UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de un sistema de pirólisis para material de empaque plástico de una empresa alimenticia

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Samantha María Anleu Aceituno,

Lidia Margarita Fuentes Paniagua,

Mario Fernando Melgar Bonilla,

Pablo Muadi Braddick,

Lourdes Paola Orozco López,

Juanerick Israel Orozco Tzic,

Carmen Anabel Pérez Mijangos

para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Química.

Guatemala

2019

Evaluación de un sistema de pirólisis para material de empaque plástico de una empresa alimenticia

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de un sistema de pirólisis para material de empaque plástico de una empresa alimenticia

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Samantha María Anleu Aceituno,

Lidia Margarita Fuentes Paniagua,

Mario Fernando Melgar Bonilla,

Pablo Muadi Braddick,

Lourdes Paola Orozco López,

Juanerick Israel Orozco Tzic,

Carmen Anabel Pérez Mijangos

para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Química.

Guatemala

2019

Vo. Bo.:

(f) _____

Ing. Gamaliel Zambrano - No. Col. 686

Director del Departamento de Ingeniería Química

(f) _____

Ing. Frances Recari – No. Col.743

Coordinadora del Megaproyecto

Fecha de aprobación: 28 de noviembre del 2,019

PREFACIO

Este trabajo de investigación tuvo la finalidad de realizar una propuesta para el tratamiento de desechos plásticos de material de empaque de una industria alimenticia del país. Se basó en la realización de una reacción de pirólisis para obtener productos de valor energético que fueran de utilidad en la industria y disminuyeran la cantidad de desechos plásticos que terminan en los vertederos del país.

Muchas personas nos acompañaron y apoyaron durante este proyecto, las cuales mencionaremos a continuación.

Queremos agradecer principalmente a los padres de familia de los siete integrantes del grupo de megaproyecto, por ser ejemplo de trabajo, inspiración y fuente de apoyo incondicional desde el inicio de la carrera hasta el cierre de la misma.

A la Universidad de Valle de Guatemala por motivarnos a ser personas que participan y aportan en la investigación científica del país, a ser agentes del cambio, a ser personas que toman retos y sobre todo, a buscar la excelencia.

Agradecemos al Departamento de Ingeniería Química de la Universidad, especialmente al director de Carrera, Ing. Gamaliel Zambrano y a los catedráticos: Ing. Luis Núñez e Ing. Cristián Rossi. Su conocimiento, apoyo, paciencia y asesoría fueron esenciales para lograr este proyecto. También agradecemos al Ing. José Andrés Hernández e Ing. Carmen Ortiz por su asesoría en las etapas iniciales de la investigación. A la Ing. Frances Recari, por ayudarnos a coordinarnos como grupo y siempre estar pendiente de nosotros. Y demás personal del departamento por su apoyo en las pruebas de laboratorio.

Por último, un agradecimiento al Departamento de Química de la Universidad, especialmente al director de Carrera, Lic. Ángel Ramírez, y a las catedráticas: Lic. Sandra Bocaletti de Estrada, Lic. Ana Luisa Mendizábal de Montenegro y Lic. Angelika Hasselmann por permitir el uso de los laboratorios científicos a su cargo, por su apoyo y asesoría para la realización de la experimentación y análisis de resultados del proyecto.

ÍNDICE

LISTA DE CUADROS..... XV

LISTA DE FIGURAS XXV

RESUMEN XXXIX

I. INTRODUCCIÓN..... 1

II. OBJETIVOS 3

A. General..... 3

B. Específicos 3

C. Sub-específicos 3

III. JUSTIFICACIÓN..... 5

IV. MARCO TEÓRICO 7

A. CONTAMINACIÓN PROBLEMA..... 7

B. CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL 9

C. PLÁSTICOS..... 9

1. Tipos de plásticos:..... 10

D. POLÍMEROS SINTÉTICOS..... 10

1. Propiedades de los polímeros 10

2. Clasificación de polímeros sintéticos: 11

E. APLICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS EN LA INDUSTRIA ALIMENTICIA 13

F. COMPONENTES DEL MATERIAL DE EMPAQUE DE PRODUCTOS ALIMENTICIOS 14

1. Aluminio 14

2. Colorantes..... 15

G. RECICLAJE DE RESIDUOS PLÁSTICOS 15

1. Tipos de reciclaje 16

2. Hidrogenación catalítica..... 18

3. Gasificación..... 18

4. Pirólisis o craqueo..... 18

5. Reciclaje cuaternario..... 19

H. PIRÓLISIS 19
1. Pirólisis de polímeros 21
2. Reacciones en la pirólisis 22
3. Aplicación de la pirólisis analítica para su escalamiento 23
4. Pirólisis de polipropileno 23
I. PRODUCTOS DE PIRÓLISIS 24
1. Líquido 24
2. Sólido (Char) 24
J. ANÁLISIS TÉRMICO DE POLÍMEROS 25
1. Análisis termogravimétrico 25
2. Termogravimetría diferencial 25
3. Calorimetría diferencial de barrido 25
4. Análisis termo mecánico 25
5. Análisis de gas evolucionado 25
6. Pirólisis analítica 26
K. FACTORES CINÉTICOS EN LA FORMACIÓN Y DESCOMPOSICIÓN DE POLÍMEROS 26
1. Velocidad de reacción 26
2. Reacciones de primer orden 26
3. Reacciones de segundo orden 26
4. Reacciones de orden n 27
L. TÉCNICAS DE ANÁLISIS QUÍMICO 29
1. Cromatografía 29
M. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS SUSTANCIAS 35
N. PODER CALORÍFICO 37
O. PUNTO DE INFLAMACIÓN 37
P. TRANSFERENCIA DE CALOR 37
Q. SOFTWARES PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS 38
R. MODELO Y SIMULACIÓN DE PROCESOS 39
S. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA Y CONCEPTOS IMPORTANTES PARA EL ANÁLISIS DE DATOS CUANTITATIVOS 40
T. MODELO MATEMÁTICO DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN 44
U. COMBUSTIBLES LÍQUIDOS 44

V. PETRÓLEO 45
W. GASOLINA 46
X. DIESEL 46
Y. FUEL OIL 46
Z. LUBRICANTES 46
AA. COMBUSTIBLES SÓLIDOS 47
BB. ABONO ORGÁNICO 49
CC. MEJORADOR DE SUELOS 49
DD. ALMACENAMIENTO DE SUSTANCIAS LÍQUIDAS 50
1. Tipos de tanques 51
EE. ALMACENAMIENTO DE SUSTANCIAS SÓLIDAS 57
FF. TRANSPORTE MECÁNICO DE SUSTANCIAS LÍQUIDAS 60
GG. TRANSPORTE MECÁNICO DE SUSTANCIAS SÓLIDAS 63
HH. POLÍTICA NACIONAL PARA EL MANEJO INTEGRAL DE LOS RESIDUOS Y DESECHOS SÓLIDOS 67
II. EMPRESAS QUE PRESTAN SERVICIO DE TRATAMIENTO DE DESECHOS SÓLIDOS 68
JJ. COMPONENTES QUÍMICOS DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS 70
KK. DESARROLLO DE PATENTE DE INVENCIÓN SEGÚN EL REGISTRO DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL 71
LL. COSTOS DE OPERACIÓN 72
MM. VALOR ACTUAL NETO 72
NN. TASA INTERNA DE RETORNO (TIR) 73
OO. TASA MÍNIMA ATRACTIVA DE RETORNO (TMAR) 74
PP. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 75

V. ANTECEDENTES 77
A. SITUACIÓN ACTUAL DE DESECHOS DE EMPAQUE PLÁSTICO DE POLIPROPILENO SEGÚN EMPRESA ALIMENTICIA 77
B. INVESTIGACIÓN DE PIRÓLISIS DE PLÁSTICOS EN REVISTAS CIENTÍFICAS 77
C. EXPERIENCIA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA EN PIRÓLISIS DE MATERIALES 78

VI. METODOLOGÍA 79
A. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE EMPAQUE 79

1. Caracterización del material 79
2. Determinación de proporción de mezcla de material de empaque. 81
3. Determinación de los equipos necesarios previos a la reacción de pirólisis. 82
B. PRUEBAS A ESCALA LABORATORIO Y CINÉTICA DE LA REACCIÓN DE PIRÓLISIS 82
1. Investigación sobre la pirólisis de polipropileno. 82
2. Obtención de material de empaque de polipropileno. 82
3. Determinación de la temperatura de pirólisis 82
4. Ejecución de las pruebas a escala laboratorio. 83
5. Montaje del sistema de experimentación a escala laboratorio 84
6. Descripción del sistema 85
7. Ejecución de las pruebas a escala laboratorio. Para cada una de las cinco condiciones de cinética evaluadas se realizó el siguiente procedimiento. 86
8. Cálculo de los rendimientos porcentuales de productos 87
9. Determinación de la composición de las muestras de producto líquido 87
C. MODELADO DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN 88
1. Planteamiento del modelo a utilizar 88
2. Determinación de la masa de reactivo en el reactor 88
3. Obtención de parámetros cinéticos y operativos 88
4. Determinación de las constantes cinéticas de reacción 89
D. DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DE VELOCIDAD DE PRODUCCIÓN DEL COMPUESTO REPRESENTATIVO DEL PRODUCTO LÍQUIDO 89
1. Identificación del compuesto representativo 89
2. Corrección de la composición del compuesto representativo en las muestras de producto líquido. 90
3. Determinación de la constante de proporcionalidad. 90
E. CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS 91
1. Análisis químico del producto gaseoso por cromatografía de gases 91
2. Análisis químico del producto líquido por cromatografía de gases 92
3. Densidad del producto líquido 93
4. Determinación de la densidad del producto líquido 93
5. Determinación del poder calorífico de los productos líquido y sólidos 93
F. ANÁLISIS DE DATOS 93

1. Modelo de simulación 94
2. Caída de presión de tubería 97
3. Comparación de propiedades fisicoquímicas de líquido de pirólisis con combustibles utilizados en una empresa 97
4. Determinación de punto de inflamación del líquido de pirólisis 98
5. Determinación de viscosidad cinemática del líquido de pirólisis 98
6. Dimensionamiento de tanques de almacenamiento de líquido de pirólisis 99
7. Obtención de las características del char de pirólisis 99
8. Comparación de características del char de pirólisis con abonos orgánicos y combustibles sólidos 101
9. Propuesta de sistema de almacenamiento 102
10. Investigación sobre productos obtenidos de la pirólisis 103
11. Determinación de venta o utilización de los productos de la pirólisis 103

VII. RESULTADOS 107
A. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE EMPAQUE DE RECHAZO EN BOBINA Y MATERIAL RESIDUAL. 107
1. Proporciones de mezcla 109
2. Acondicionamiento del material 109
3. Balance de masa para el proceso de peletización de 2,300kg por lotes: 110
B. RENDIMIENTOS DE LOS PRODUCTOS DE LA REACCIÓN 111
C. CINÉTICA DE REACCIÓN 112
D. VELOCIDAD DE PRODUCCIÓN DEL COMPUESTO REPRESENTATIVO 116
E. PRODUCTO GASEOSO 117
F. PRODUCTO LÍQUIDO 120
G. PRODUCTO SÓLIDO 126
H. ESCALAMIENTO INDUSTRIAL 126
H. ANÁLISIS DEL USO INDUSTRIAL DEL PRODUCTO LÍQUIDO 132
I. ANÁLISIS DEL USO INDUSTRIAL DEL PRODUCTO SÓLIDO 136
1. Comparación del char obtenido de pirólisis con enmiendas y abonos orgánicos 136
2. Comparación del char obtenido de pirólisis con combustibles sólidos 140
4. Propuesta de sistema de almacenaje del char obtenido de pirólisis 141
J. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO 145
1. Propuesta de comercialización de productos de la pirólisis 145

2. Costos de equipos y obra gris obtenidos de cotizaciones para la implementación y puesta en marcha de la planta de pirólisis..... 148
3. Ahorro de la implementación de la planta de pirólisis versus el proceso actual de tercerización de desechos..... 148

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... 149
A. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE EMPAQUE..... 149
B. PRUEBAS A ESCALA LABORATORIO: DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS OPERATIVOS Y CINÉTICOS..... 153
C. CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS DE LA PIRÓLISIS..... 158
D. ESCALAMIENTO INDUSTRIAL..... 161
E. PRODUCTO LÍQUIDO..... 164
F. PRODUCTO SÓLIDO..... 168
G. ANÁLISIS ECONÓMICO..... 173

IX. CONCLUSIONES..... 179

X. RECOMENDACIONES..... 185

XI. BIBLIOGRAFÍA..... 195

XII. ANEXOS..... 205
A. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE EMPAQUE..... 205
1. Identificación del material de empaque de la industria alimenticia..... 205
2. Instrumento utilizado para las propiedades: densidad aireada, densidad compacta e índice de compresibilidad..... 207
B. PRUEBAS A ESCALA LABORATORIO Y CINÉTICA DE LA REACCIÓN DE PIRÓLISIS..... 227
1. Experimentación inicial sin sistema de condensación..... 227
2. Análisis termogravimétrico del material de empaque de polipropileno..... 227
3. Datos experimentales de las reacciones de pirólisis..... 229
4. Rampas de calentamiento experimentales..... 231
5. Análisis de los productos de las cinéticas de reacción..... 233
a. Balance de masa del sistema..... 233
b. Cálculo de rendimiento de productos..... 234
c. Resultados de la cromatografía de gases de la cinética del producto líquido..... 235

2. Mediciones en producto líquido 392
3. Modelado de las curvas de calentamiento 393
4. Desarrollo de modelo cinético 400
5. Desarrollo de la ecuación de velocidad de producción del compuesto representativo 412
C. CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS 420
1. Resultados de la cromatografía de gases del producto gaseoso: Cromatogramas. 420
2. Resultados de la cromatografía de gases del producto gaseoso: Composiciones 441
3. Resultados de la cromatografía de gases del producto líquido libre de solvente: Cromatogramas 448
6. Resultados de la cromatografía de gases del producto líquido libre de solvente: Composiciones. 475
7. Resumen de datos de composición y estadística de los productos gaseoso y líquido 483
6. Pruebas de densidad del producto líquido. 490
7. Poder calorífico de los productos líquido y sólido. 491
8. Especificaciones de cristalería 492
9. Especificaciones de equipo y método de cromatografía 492
10. Especificaciones de los reactivos 493
11. Prueba t de student 493
12. Cálculos de muestra 494
13. Representación gráfica de la lógica de formación de compuestos obtenidos de la pirólisis 494
D. ESCALAMIENTO INDUSTRIAL DE LA REACCIÓN DE PIRÓLISIS 495
1. Datos utilizados de los productos, temperatura y cinética de la pirólisis escala laboratorio 495
2. Análisis estadístico de los datos a utilizar para el sistema de simuladores 502
3. Modelo de simulación 504
4. Instrucciones para la simulación de procesos en el programa SuperPro Designer. 531
5. Instrucciones para la utilización de GraphPad Prism para realizar regresiones no lineales de un conjunto de datos. 545
E. ANÁLISIS TÉCNICO DEL USO INDUSTRIAL DEL PRODUCTO LÍQUIDO 548
1. Figuras de metodología 548
2. Datos originales producto líquido 559
3. Cálculos de muestra 560
4. Análisis de error 565
5. Datos calculados 566

6. Especificaciones de equipo 566
7. Planos 567
F. ANÁLISIS TÉCNICO DEL USO INDUSTRIAL DEL PRODUCTO SÓLIDO 569
1. Datos obtenidos experimentalmente 569
2. Datos calculados 571
3. Cálculo de muestra 573
4. Cálculo de muestra 27. Densidad aparente 573
5. Análisis de error 577
6. Fichas técnicas de mejoradores de suelos 578
7. Equipos empleados 579
8. Resultados de análisis externos 583
9. Especificaciones del sistema de transporte 585
10. Esquema del sistema de transporte 590
G. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA REACCIÓN DE PIRÓLISIS A ESCALA INDUSTRIAL 591
1. Cotizaciones utilizadas como propuesta para la implementación de una planta de pirólisis 591
2. Materiales necesarios para la realización de la obra gris de la planta de pirólisis 601
3. Equipos utilizados para el pretratamiento del material de empaque 603
4. Equipos utilizados para desplazamiento y almacenamiento de productos de pirólisis 603
5. Componentes de la Inversión Inicial 611
6. Costos de equipos y materiales utilizados para pruebas de laboratorio 616
7. Propiedades fisicoquímicas del producto sólido de la pirólisis. 616
8. Consumo de combustible y consumo eléctrico para cada propuesta de planta 617
9. Costos de operación para ambas propuestas de planta piloto de pirólisis 618
10. Costo determinado para imprevistos durante la vida de la planta piloto 618
11. Costos de Obra Gris 619
12. Depreciación del proyecto 619
13. Información utilizada para la determinación de salarios del personal 620
14. Información sobre ahorro de bunker para la producción principal de la empresa. 621
15. Cálculos de comercialización y producción de char de pirólisis 621
XIII. GLOSARIO 626

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Comparación de las características y aplicaciones principales de los plásticos más comunes en las industrias. 14
Cuadro 2. Comparación de los procesos de pirólisis según las condiciones de operación 20
Cuadro 3. Clasificación de crudos respecto a la gravedad API 36
Cuadro 4. Dimensiones para tanques horizontales o verticales según Underwriter Laboratories 54
Cuadro 5. Dimensiones para tanques horizontales pequeños según Underwriter Laboratories 54
Cuadro 6. Costos de solicitud de una patente de invención 72
Cuadro 7. Especificaciones de material de empaque BOPP 77
Cuadro 8. Listado de componentes del sistema de experimentación a escala laboratorio. 84
Cuadro 9. Especificaciones mufla utilizada para la medición de temperatura de fusión. 91
Cuadro 10. Especificaciones del reactor de lecho fijo para la pirólisis lenta. 91
Cuadro 11. Propiedades principales de los compuestos registrados en el simulador de pirólisis de material de empaque escala planta piloto. 95
Cuadro 12. Módulos empleados para el proceso de pirólisis de material de empaque en el simulador, y descripción de cada uno. 95
Cuadro 13. Caracterización del material de empaque de polipropileno biorientado. 107
Cuadro 14. Propiedades fisicoquímicas para la mezcla del material de rechazo en bobina y material residual. 108
Cuadro 15. Proporción de los productos de material residual. 109
Cuadro 16. Trituradora para el acondicionamiento de la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual. 109
Cuadro 17. Extrusora para el acondicionamiento de la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual. 109
Cuadro 18. Rendimientos de los productos de la reacción de pirólisis a diferentes curvas de calentamiento. ... 112
Cuadro 19. Resultados de los parámetros cinéticos de Arrhenius calculados en cada cinética evaluada. 113
Cuadro 20. Resultados de las constantes de proporcionalidad que relacionan la pérdida de masa reactiva y la producción de moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno. 117
Cuadro 21. Valores promedio de composición porcentual del propeno en el producto gaseoso para cada corrida de pirólisis 118
Cuadro 22. Valores promedio de composición porcentual del 2-penteno en el producto gaseoso para cada corrida de pirólisis 119

Cuadro 23. Valores promedio de composición porcentual del 2-metil-1-penteno en el producto gaseoso para cada corrida de pirólisis. 119
Cuadro 24. Resultados promedio de los tres compuestos principales del producto gaseoso obtenidos de las corridas de la reacción de pirólisis de empaques de polipropileno metalizado. 120
Cuadro 25. Valores promedio de composición porcentual del 2,4-dimetil-1-hepteno en el producto líquido para cada corrida de pirólisis. 121
Cuadro 26. Valores promedio de composición porcentual del 2,3,7-trimetil-4-octeno en el producto líquido para cada corrida de pirólisis. 121
Cuadro 27. Valores promedio de composición porcentual del 2,3,6,7-tetrametil-4-octeno en el producto líquido para cada corrida de pirólisis. 122
Cuadro 28. Valores promedio de composición porcentual del 2,3,5-trimetil-hexano en el producto líquido para cada corrida de pirólisis 123
Cuadro 29. Valores promedio de composición porcentual del 2-metil-1-penteno en el producto líquido para cada corrida de pirólisis. 124
Cuadro 30. Resultados promedio de los cinco compuestos principales del producto líquido obtenidos de las corridas de la reacción de pirólisis de empaques de polipropileno metalizado. 125
Cuadro 31. Propiedades fisicoquímicas del producto líquido obtenido de las corridas de la reacción de pirólisis de empaques de polipropileno metalizado 125
Cuadro 32. Propiedades fisicoquímicas del producto sólido obtenido de las corridas de la reacción de pirólisis de empaques de polipropileno metalizado 126
Cuadro 33. Promedio, desviación estándar y rango de 95% de confianza de rendimientos de productos de las corridas de pirólisis escala laboratorio. 126
Cuadro 34. Promedio, desviación estándar y rango de 95% de confianza de los rendimientos, tiempo de reacción y corrida del 2,4-dimetil-1-hepteno. 126
Cuadro 35. Análisis estadístico para datos de consumo de bunker de diferentes días y horas de operación de una caldera de una empresa alimenticia. 127
Cuadro 36. Procesos realizados y resultados en los softwares para la simulación de la pirólisis escala planta piloto de material de empaque metalizado. 127
Cuadro 37. Procesos y condiciones de operación principales utilizadas en el simulador SuperPro Designer para el escalamiento de la reacción de pirólisis. 128
Cuadro 38. Rendimientos de productos de la pirólisis de material de empaque en el reactor escala planta piloto para diferentes tiempos de operación, de acuerdo con sistema de simulación. 129

Cuadro 39. Comparación de rendimientos de los productos de pirólisis de polipropileno y polietileno en literatura y simulación. 129
Cuadro 40. Comparación de los resultados de la simulación de pirólisis a escala planta piloto de material de empaque tipo polipropileno metalizado respecto a teoría..... 130
Cuadro 41. Dimensiones propuestas del reactor escala planta piloto para el procesamiento de 2.3 t/lote de material de empaque tipo polipropileno metalizado obtenidas con el software SuperPro Designer..... 131
Cuadro 42. Composición en masa de capas que conforman el material de empaque de polipropileno metalizado utilizado para pirólisis..... 132
Cuadro 43. Diferencia de masa obtenida de líquido de pirólisis respecto al dato calculado por la composición del empaque..... 132
Cuadro 44. Rendimientos del líquido de pirólisis en pruebas a escala laboratorio..... 132
Cuadro 45. Poder calorífico del líquido de pirólisis de material de empaque de polipropileno metalizado..... 133
Cuadro 46. Comparación de propiedades fisicoquímica entre líquido de pirólisis y combustibles industriales. 133
Cuadro 47. Comparación de propiedades de mezclas de bunker - líquido pirolítico con bunker..... 133
Cuadro 48. Especificaciones para el diseño del tanque horizontal de recepción de líquido de pirólisis..... 134
Cuadro 49. Especificaciones para el diseño del tanque vertical de almacenamiento de líquido de pirólisis. 134
Cuadro 50. Especificaciones de bomba de desplazamiento positivo de tornillo propuesta..... 135
Cuadro 51. Sensor ultrasónico U500.DA0.2-IA1B.72F 135
Cuadro 52. Especificaciones de filtro para combustibles..... 135
Cuadro 53. Resultados de análisis de abonos orgánicos para el char de pirólisis y su comparación con una enmieda agrícola comercial..... 136
Cuadro 54. Resultados de análisis de abonos orgánicos para el char de pirólisis y su comparación con bocashi. 137
Cuadro 55. Resultados de análisis de abonos orgánicos para el char de pirólisis y su comparación con estiércol de vaca, oveja y gallina..... 138
Cuadro 56. Poder calorífico del char de pirólisis y su comparación con diferentes tipos de combustibles sólidos. 140
Cuadro 57. Características del char de pirólisis y su comparación con diferentes tipos de carbón. 140
Cuadro 58. Características del producto sólido de la pirólisis a almacenar..... 141
Cuadro 59. Especificaciones para el silo propuesto para almacenaje del char. 141
Cuadro 60. Especificaciones de la banda transportadora..... 142
Cuadro 61. Especificaciones del elevador de cangilones..... 143
Cuadro 62. Especificaciones de la descarga del silo..... 143

Cuadro 63. Usos, propiedades fisicoquímicas y comercialización de compuestos del producto líquido. 145
Cuadro 64. Precio de mercado de productos líquidos de la pirolisis. 146
Cuadro 65. Usos, propiedades fisicoquímicas y comercialización de los compuestos del producto gaseoso. ... 147
Cuadro 66. Precio de mercado de productos gaseosos de la pirolisis. 147
Cuadro 67. Precios de mercado de Mejoradores de Suelos en Guatemala. 147
Cuadro 68.Componentes de la Inversión de la Planta de Pirólisis..... 148
Cuadro 69. Comparación de propuestas de planta de pirólisis con tercerización de tratamiento 148
Cuadro 70. Ficha técnica código DPN-E-002 con fecha de actualización 11/02/19..... 205
Cuadro 71. Resultados para la prueba de tensión realizada para el material de empaque. 223
Cuadro 72. Volumen medido por corrida para la muestra utilizada para la medición de densidad aireada y compacta. 223
Cuadro 73. Índice de compresibilidad para el material de empaque. 223
Cuadro 74. Resultados obtenidos para el porcentaje de humedad y de grasas presentes en el material de empaque. 223
Cuadro 75. Resultado para la temperatura de fusión del material de empaque. 224
Cuadro 76. Resultado para la densidad del material fundido. 224
Cuadro 77. Mediciones de tiempo y temperatura para la prueba sin sistema de condensación. 227
Cuadro 78. Especificaciones de la mufla utilizada para las pruebas a escala laboratorio. 229
Cuadro 79. Especificaciones del reactor utilizado para las pruebas a escala laboratorio. 229
Cuadro 80. Especificaciones de la balanza analítica utilizada para las pruebas a escala laboratorio. 229
Cuadro 81. Especificaciones de la balanza semi analítica utilizada para las pruebas a escala laboratorio. 229
Cuadro 82. Identificación del número de cinética de acuerdo con la temperatura programada en la mufla..... 230
Cuadro 83. Tiempo de duración de las cinco reacciones de pirólisis realizadas a diferentes curvas de calentamiento. 230
Cuadro 84. Rampas de temperatura medidas en la reacción de la cinética 1. 231
Cuadro 85. Rampas de temperatura medidas en la reacción de la cinética 2. 231
Cuadro 86.Rampas de temperatura medidas en la reacción de la cinética 3. 232
Cuadro 87. Rampas de temperatura medidas en la reacción de la cinética 4. 232
Cuadro 88. Rampas de temperatura medidas en la reacción de la cinética 5. 233
Cuadro 89. Composición de capas que conforman el material de empaque de polipropileno metalizado utilizado en la pirólisis. 233
Cuadro 90. Masa de productos y residuos obtenidos en las diferentes reacciones de pirólisis. 234
Cuadro 92. Rendimientos totales de los productos en cada reacción de pirólisis evaluada. 235

Cuadro 93. Mediciones experimentales en muestras líquidas de la reacción de pirólisis de la cinética..... 392
Cuadro 94. Mediciones experimentales en muestras líquidas de la reacción de pirólisis de la cinética..... 392
Cuadro 95. Mediciones experimentales en muestras líquidas de la reacción de pirólisis de la cinética 3..... 393
Cuadro 96. Mediciones experimentales en muestras líquidas de la reacción de pirólisis de la cinética 4..... 393
Cuadro 97. Mediciones experimentales en muestras líquidas de la reacción de pirólisis de la cinética 5..... 393
Cuadro 98. Resultados de los parámetros para el ajuste de curva no linear de tipo Boltzmann sigmoidal de las curvas de calentamiento. 398
Cuadro 99. Pérdida de masa del reactivo (BOPP) durante la reacción de cinética 1. 401
Cuadro 100. Pérdida de masa del reactivo (BOPP) durante la reacción de cinética 2. 401
Cuadro 101. Pérdida de masa del reactivo (BOPP) durante la reacción de cinética 3. 402
Cuadro 102. Pérdida de masa del reactivo (BOPP) durante la reacción de cinética 4. 402
Cuadro 103. Pérdida de masa del reactivo (BOPP) durante la reacción de cinética 5. 402
Cuadro 104. Parámetros cinéticos calculados para las cinco condiciones de cinética evaluadas. 407
Cuadro 105. Pérdida de masa reactiva de durante la reacción de cinética 1. 410
Cuadro 106. Pérdida de masa reactiva durante la reacción de cinética 2. 410
Cuadro 107. Pérdida de masa reactiva durante la reacción de cinética 3. 411
Cuadro 108. Pérdida de masa reactiva durante la reacción de cinética 4. 411
Cuadro 109. Pérdida de masa reactiva durante la reacción de cinética 5. 412
Cuadro 110. Resultado de la composición de 2,4-Dimetil-1-hepteno en las muestras líquidas de la cinética 1. 414
Cuadro 111. Resultado de la composición de 2,4-Dimetil-1-hepteno en las muestras líquidas de la cinética 2. 414
Cuadro 112. Resultado de la composición de 2,4-Dimetil-1-hepteno en las muestras líquidas de la cinética 3. 414
Cuadro 113. Resultado de la composición de 2,4-Dimetil-1-hepteno en las muestras líquidas de la cinética 4. 415
Cuadro 114. Resultado de la composición de 2,4-Dimetil-1-hepteno en las muestras líquidas de la cinética 5. 415
Cuadro 115.Resultados del tiempo de retención del compuesto 2,4-Dimetil-1-hepteno de las muestras de producto líquido de cada cinética. 415
Cuadro 116.Diferencial de masa de reactivo y moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno en muestras de cinética. 416
Cuadro 117. Diferencial de masa de reactivo y moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno en muestras de cinética 416
Cuadro 118. Diferencial de masa de reactivo y moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno en muestras de cinética 3. 416
Cuadro 119. Diferencial de masa de reactivo y moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno en muestras de cinética 4. 417
Cuadro 120. Diferencial de masa de reactivo y moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno en muestras de cinética 5. 417
Cuadro 121. Parámetros de ajuste lineal para la relación de moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno y masa reactiva en función del tiempo. 417
Cuadro 122. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 1 – Muestra 1..... 441

Cuadro 123. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 1 – Muestra 2..... 441
Cuadro 124. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 1 – Muestra 3..... 442
Cuadro 125. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 1.1..... 442
Cuadro 126. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 1.2..... 443
Cuadro 127. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 2.1..... 443
Cuadro 128. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 2.1..... 443
Cuadro 129. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 1.1..... 444
Cuadro 130. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 1.2..... 444
Cuadro 131. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 2.1..... 444
Cuadro 132. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 2.2..... 444
Cuadro 133. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 4 – Muestra 1.1..... 445
Cuadro 134. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 4 – Muestra 1.2..... 445
Cuadro 135. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 4 – Muestra 2.1..... 445
Cuadro 136. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 4 – Muestra 2.2..... 445
Cuadro 137. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 1.1..... 446
Cuadro 138. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 1.2..... 446
Cuadro 139. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 2.1..... 447
Cuadro 140. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 2.2..... 447
Cuadro 141. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 3.1..... 447
Cuadro 142. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 3.2..... 448
Cuadro 143. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestra 1..... 475
Cuadro 144. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestra 2..... 475
Cuadro 145. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestra 3..... 476
Cuadro 146. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestra 1..... 476
Cuadro 147. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestra 2..... 477
Cuadro 148. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestra 3..... 477
Cuadro 149. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestra 1..... 478
Cuadro 150. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestra 2..... 478
Cuadro 151. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestra 3..... 479
Cuadro 152. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestra 1..... 479
Cuadro 153. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestra 2..... 480
Cuadro 154. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestra 3..... 480
Cuadro 155. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestra 1..... 481

Cuadro 156. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestra 2 481
Cuadro 157. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestra 3 482
Cuadro 158. Composiciones porcentuales del producto líquido con solvente: Corrida 1 – Muestra 1 482
Cuadro 159. Composición porcentual del propeno en las muestras gaseosas analizadas. 483
Cuadro 160. Composición porcentual del 2-penteno en las muestras gaseosas analizadas 483
Cuadro 161. Composición porcentual del 2-metil-1-penteno en las muestras gaseosas analizadas 484
Cuadro 162. Composición porcentual del 2,4-dimetil-1-hepteno en las muestras líquidas analizadas 485
Cuadro 163. Composición porcentual del 2,3,7-trimetil-4-octeno en las muestras líquidas analizadas 485
Cuadro 164. Composición porcentual del 2,3,6,7-tetrametil-4-octeno en las muestras líquidas analizadas 486
Cuadro 165. Composición porcentual del 2,3,5-trimetil-hexano en las muestras líquidas analizadas 486
Cuadro 166. Composición porcentual del 2-metil-1-penteno en las muestras líquidas analizadas 487
Cuadro 167. Estadística descriptiva de las composiciones de propeno en el producto gaseoso 487
Cuadro 168. Estadística descriptiva de las composiciones de 2-penteno en el producto gaseoso 487
Cuadro 169. Estadística descriptiva de las composiciones de 2-metil-1-penteno en el producto gaseoso 488
Cuadro 170. Estadística descriptiva de las composiciones de 2,4-dimetil-1-hepteno en el producto líquido 488
Cuadro 171. Estadística descriptiva de las composiciones de 2,3,7-trimetil-4-octeno en el producto líquido ... 488
Cuadro 172. Estadística descriptiva de las composiciones de 2,3,6,7-tetrametil-4-octeno en el producto líquido 489
Cuadro 173. Estadística descriptiva de las composiciones de 2,3,5-trimetil-hexano en el producto líquido 489
Cuadro 174. Estadística descriptiva de las composiciones de 2-metil-1-penteno en el producto líquido 489
Cuadro 175. Mediciones de densidad del producto líquido a 24 – 26 °C (g/mL) 490
Cuadro 176. Valores promedio de la densidad del producto líquido a 24 – 26 °C 490
Cuadro 177. Estadística descriptiva de la densidad del producto líquido a 24 – 26 °C 490
Cuadro 178. Mediciones de densidad del producto líquido a 15 °C 490
Cuadro 179. Estadística descriptiva de la densidad del producto líquido a 15 °C 491
Cuadro 180. Mediciones de poder calorífico del producto líquido (J/g) 491
Cuadro 181. Estadística descriptiva del poder calorífico del producto líquido 491
Cuadro 182. Mediciones de poder calorífico del producto sólido (J/g) 491
Cuadro 183. Estadística descriptiva del poder calorífico del producto sólido 492
Cuadro 184. Especificaciones de la cristalería utilizada 492
Cuadro 185. Especificaciones del equipo 492
Cuadro 186. Métodos de cromatografía utilizados para la identificación de compuestos en los productos gaseosos y líquidos de la pirólisis. 493

Cuadro 187. Especificaciones de los reactivos utilizados para el análisis químico de los productos gaseosos y líquidos 493
Cuadro 188. Tabla de distribución t para 1 a 20 grados de libertad..... 493
Cuadro 189. Masa y rendimientos de productos a escala laboratorio de la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado a diferentes set points de temperatura en la mufla. 496
Cuadro 190. Masa y rendimientos de productos sólidos, líquidos y gaseosos de la cinética a escala laboratorio de la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado a diferentes set points de temperatura en la mufla. 496
Cuadro 191. Masa y rendimientos de productos de las corridas a escala laboratorio de la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado. 496
Cuadro 192. Mediciones de temperatura de la mufla con diferencia de un minuto para calcular las rampas de calentamiento en las corridas escala laboratorio para la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado 497
Cuadro 193. Composición, masa y moles de 2,4-dimtetil-1-hepteno en muestras obtenidas a distintos tiempos de corrida a escala laboratorio de pirólisis de material de empaque analizado. 499
Cuadro 194. Propiedades del producto líquido, plastic oil, obtenido en las corridas escala laboratorio de la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado y del bunker utilizado en la empresa alimenticia . 500
Cuadro 195. Propiedades del material de empaque tipo polipropileno metalizado utilizado en las corridas escala laboratorio y simulaciones escala planta piloto de pirólisis. 500
Cuadro 196. Datos de consumo de bunker, recolectados en diferentes días y horas de operación de la caldera de una empresa de industria alimenticia. 501
Cuadro 197. Medidas del reactor utilizado para las corridas de la reacción de pirólisis escala laboratorio de material de empaque tipo polipropileno metalizado. 501
Cuadro 198. Promedio, desviación estándar y rango de 95% de confianza respecto a los rendimientos de los productos obtenidos para las corridas escala laboratorio de pirólisis a 475°C..... 502
Cuadro 199. Prueba Q para la eliminación de datos atípicos realizada a los rendimientos del producto líquido de las corridas de pirólisis a 475 °C 502
Cuadro 200. Prueba Q para la eliminación de datos atípicos realizada a los rendimientos del producto sólido de las corridas de pirólisis a 475 °C 503
Cuadro 201. Prueba Q para la eliminación de datos atípicos realizada a los rendimientos del producto gaseoso de las corridas de pirólisis a 475 °C 503
Cuadro 202. Promedio, desviación estándar y rango de 95% de confianza para el porcentaje m/m del 2,4-dimetil-1-hepteno obtenido en las pruebas escala planta piloto. 504

Cuadro 203. Análisis estadístico de consumo de bunker recolectados en caldera de una empresa alimenticia.. 504
Cuadro 204. Datos calculados para realizar una correlación entre la masa de material de empaque en el reactor y la altura que este ocupa en el mismo. 509
Cuadro 205. Calibración del termopar con termo pozo calibrado para corregir las mediciones de temperatura de la mufla 510
Cuadro 206. Corrida de calentamiento con set point de 475°C en el reactor escala laboratorio para corregir la temperatura leída por la mufla y determinar el calor cedido hacia el reactor 510
Cuadro 207. Corrida de calentamiento con set point de 415°C en el reactor escala laboratorio para corregir la temperatura leída por la mufla y determinar el calor cedido hacia el reactor 511
Cuadro 208. Corrección del lector de temperatura de la mufla con el termopar calibrado 512
Cuadro 209. Calor cedido según el modelo de transferencia de calor determinado para las temperaturas del reactor escala laboratorio. 516
Cuadro 210. Productos sólidos, líquidos y gaseoso obtenidos en la simulación de la pirólisis de material de empaque en el reactor escala planta piloto variando el tiempo de operación. 522
Cuadro 211. Rendimientos y factores en la operación de una planta piloto del reactor de pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado según rendimientos mayoritarios para cada producto. 523
Cuadro 212. Dimensiones del reactor escala planta piloto para el escalamiento de la reacción de pirólisis escala laboratorio, obtenido con el simulador Super Pro Designer 530
Cuadro 213. Datos de investigaciones de pirólisis escala piloto de polipropileno y polietileno. 531
Cuadro 214. Mediciones realizadas para la determinación de poder calorífico del líquido de pirólisis..... 559
Cuadro 215. Datos de pruebas de pirólisis a escala laboratorio 560
Cuadro 216. Masas de pruebas de volatilidad 560
Cuadro 217. Propiedades de solventes utilizados en prueba de volatilidad 560
Cuadro 218. Líquido obtenido por producción semanal y mensual..... 566
Cuadro 219. Masa del char obtenido de las pruebas a escala laboratorio. 569
Cuadro 220. Humedad del char obtenido de las pruebas a escala laboratorio. 569
Cuadro 221. Poder calorífico del char obtenido de las pruebas a escala laboratorio. 569
Cuadro 222. Masa del char retenida en los tamices según el número de mesh. 570
Cuadro 223. Volumen aparente y compactado del char para medición de densidades. 570
Cuadro 224. Alturas y radios obtenidos para el cálculo de ángulos de reposo y deslizamiento del char. 570
Cuadro 225. Características fisicoquímicas del char obtenido de pirólisis. 571
Cuadro 226. Resultados del análisis de determinación de Aluminio en el char. 571
Cuadro 227. Análisis granulométrico del char obtenido de las pruebas a escala laboratorio. 571

Cuadro 228. Densidades aparente y compactada del char obtenido de las pruebas a escala laboratorio. 572
Cuadro 229. Ángulos de reposo y deslizamiento del char obtenido de las pruebas a escala laboratorio. 572
Cuadro 230. Datos utilizados para el dimensionamiento del silo. 573
Cuadro 231. Datos de placa de equipos. 579
Cuadro 232.Especificaciones técnicas de ambas propuestas de planta de pirólisis 611
Cuadro 233.Inversión Inicial Desglosada para la propuesta de "Henan Lingfine Machinery Co., Ltd". 611
Cuadro 234.Inversión Inicial Desglosada para la propuesta de "Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co., Ltd". 612
Cuadro 235. Almacenamiento, tratamiento y transporte del producto líquido 613
Cuadro 236.Almacenamiento, transporte y producción del producto sólido para ambas propuestas de planta piloto. 614
Cuadro 237. Almacenamiento y purificación del producto gaseoso para ambas propuestas. 614
Cuadro 238. Costo de equipos, utensilios y cristalería utilizada 616
Cuadro 239. Comparación de char de pirólisis obtenido y otros mejoradores de suelos 616
Cuadro 240.Consumo anual de combustible para trabajo de planta de pirólisis..... 617
Cuadro 241. Consumo anual de electricidad para operación de planta de pirólisis. 617
Cuadro 242. Costos de operación para planta propuesta por "Henan Lingfire Machinery Co., Ltd". 618
Cuadro 243. Costos de operación para planta propuesta por "Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co., Ltd"..... 618
Cuadro 244. Materiales necesarios para la realización de la obra gris de la planta de pirólisis para ambas propuestas 619
Cuadro 245. Depreciación de la planta de pirólisis de la propuesta de "Henan Lingfine MachineryCo., Ltd". . 619
Cuadro 246. Depreciación de la planta de pirólisis de la propuesta de "Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co. Ltd"..... 620
Cuadro 247.Salario mínimo mensual en Guatemala por sector..... 620
Cuadro 248.Salarios de Personal de Planta..... 620
Cuadro 249.Ahorro de combustible "Bunker" en planta principal de producción utilizando producto líquido . 621
Cuadro 250. Flujo de efectivo para propuesta de planta de pirólisis de "Henan Lingfine Machinery Co., Ltd" a un precio de venta de propileno de $1.056..... 623
Cuadro 251. Flujo de efectivo para propuesta de planta de pirólisis de "Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co.. Ltd" a un precio de venta de propileno de $1.056..... 623
Cuadro 252. Cálculo del Valor Actual Neto para la tercerización de 46 toneladas de empaque..... 623

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cantidad de plástico generado mundialmente en el año 2019..... 7
Figura 2. Distribución de la cantidad de plástico acumulado en los océanos 8
Figura 3. Ejemplos de polímeros de adición 12
Figura 4. Molécula del polipropileno..... 12
Figura 5. Diagrama de los tipos de reciclaje para residuos plásticos 16
Figura 6. Descripción gráfica de un proceso de pirólisis..... 20
Figura 7. Cromatograma obtenido de la pirólisis de polipropileno a 600°C..... 23
Figura 8. Valores de la energía de activación y factor de frecuencia a 350°C para algunos polímeros comunes. 29
Figura 9. Cromatograma de gases para una mezcla compleja 30
Figura 10. Diagrama del proceso de análisis de un espectrómetro de masas..... 30
Figura 11. Esquema de un GC-MS capilar típico 31
Figura 12. Esquema de un cromatógrafo de gases..... 32
Figura 13. Vista transversal de un inyector directo para cromatografía de gases 33
Figura 14. Esquema de una válvula de muestreo rotatoria para cromatografía de gases..... 33
Figura 15. Transferencia de calor hacia el exterior en dirección radial..... 38
Figura 16. Forma de la curva de la función sigmoidal de Boltzmann. 39
Figura 17. Representación gráfica de la diferencia entre exactitud y precisión 41
Figura 18. Especificaciones y relaciones de diseño. 53
Figura 19. Carta del factor de fricción. 62
Figura 20. Prueba preliminar de reacción de pirólisis sin sistema de condensación. 83
Figura 21. Sistema de pirólisis a escala laboratorio a utilizar para las pruebas experimentales de cinética. 84
Figura 22. Reactor utilizado para las pruebas a escala laboratorio. 85
Figura 23. Configuración de chimenea y reactor dentro de la mufla. 85
Figura 24. Configuración del sistema de condensación. 86
Figura 25. Esquema del proceso y balance de masa. 110
Figura 26. Esquema del proceso y balance de energía. 110
Figura 27. Esquema de la distribución de equipos. 110
Figura 28. Ciclo de operación del acondicionamiento y el reactor. 111
Figura 29. Diagrama de entradas y salidas para la reacción de pirólisis de polipropileno. 111

Figura 30. Variación de la masa reactiva con el tiempo de acuerdo con los valores experimentales y lo predicho por el modelo para la cinética 1. 114
Figura 31. Variación de la masa reactiva con el tiempo de acuerdo con los valores experimentales y lo predicho por el modelo para la cinética 2. 114
Figura 32. Variación de la masa reactiva con el tiempo de acuerdo con los valores experimentales y lo predicho por el modelo para la cinética 3. 115
Figura 33. Variación de la masa reactiva con el tiempo de acuerdo con los valores experimentales y lo predicho por el modelo para la cinética 4. 115
Figura 34. Variación de la masa reactiva con el tiempo de acuerdo con los valores experimentales y lo predicho por el modelo para la cinética 5. 116
Figura 35. Composición porcentual del propeno en el producto gaseoso para las corridas de pirólisis 117
Figura 36. Composición porcentual del 2-penteno en el producto gaseoso para las corridas de pirólisis .. 118
Figura 37. Composición porcentual del 2-metil-1-penteno en el producto gaseoso para las corridas de pirólisis 119
Figura 38. Composición porcentual del 2,4-dimetil-1-hepteno en el producto líquido para las corridas de pirólisis..... 120
Figura 39. Composición porcentual del 2,3,7-trimetil-4-octeno en el producto líquido para las corridas de pirólisis..... 121
Figura 40. Composición porcentual del 2,3,6,7-tetrametil-4-octeno en el producto líquido para las corridas de pirólisis. 122
Figura 41. Composición porcentual del 2,3,5-trimetil-hexano en el producto líquido para las corridas de pirólisis..... 123
Figura 42. Composición porcentual del 2-metil-1-penteno en el producto líquido para las corridas de pirólisis 124
Figura 43. Diagrama de los procesos y flujos registrados en el simulador SuperPro Designer 128
Figura 44. Comparación gráfica de los rendimientos obtenidos de la simulación del reactor de pirólisis escala planta piloto con los obtenidos en la literatura. 130
Figura 45. Comparación de los rendimientos obtenidos de la simulación del reactor de pirólisis escala planta piloto con los obtenidos en la literatura para planta piloto..... 131
Figura 46. Bomba de tornillo propuesta..... 135
Figura 47. Filtro SL13-577/KEL 136
Figura 48. Comparación de pH y relación C/N en abonos orgánicos y char de pirólisis..... 139

Figura 49. Comparación del contenido de materia y carbono orgánicos en abonos orgánicos y char de pirólisis. 139
Figura 50. Comparación del contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en abonos orgánicos y char de pirólisis. 140
Figura 51. Comparación del poder calorífico del char de pirólisis y combustibles sólidos. 141
Figura 52. Esquema del arreglo de los rodillos de la banda. 142
Figura 53. Esquema de los cangilones. 143
Figura 54. Esquema de la válvula dosificadora. 144
Figura 55. Esquema del silo propuesto para el almacenaje de char. 144
Figura 56. Esquema general de la salida del reactor y almacenamiento de producto sólido para un lote (2,300 kg) diario de producción. 145
Figura 57-Ficha técnica código DPN-E-002 con fecha de actualización 01/05/17. 206
Figura 58.Probeta utilizada para medir volumen de material, con capacidad de 1L 207
Figura 59.Volumen medido en la probeta para la densidad aireada. 207
Figura 60.Volumen medido en la probeta para la densidad compacta. 208
Figura 61.Muestra utilizada para realizar la medición de la densidad aireada, densidad compacta y densidad aireada. 208
Figura 62. Peso de muestra utilizada junto con la bolsa que lo contenía. 209
Figura 63-Peso de bolsa sin la muestra. 209
Figura 64- Mezcla de material según la composición de Cuadro 8. 210
Figura 65-Material de empaque residual con grasa utilizado para la prueba del porcentaje de grasa presente. 210
Figura 66- Material que fue lavado con etanol. 211
Figura 67-Etanol con residuos de grasa para el lavado de material. 211
Figura 68-Material limpio luego de ser lavado con etanol. 212
Figura 69- Beaker con etanol y residuos de grasa 212
Figura 70- Peso de beaker con grasa restante de la evaporación del etanol. 213
Figura 71-Peso de beaker utilizado para lavar las muestras de material de empaque. 213
Figura 72-Recipiente a utilizar para la medición de la temperatura de fusión. 214
Figura 73- Medición del volumen del recipiente. 214
Figura 74-Material dentro de la mufla durante la medición de la temperatura de fusión. 215
Figura 75 Mufla utilizada 215
Figura 76-Material dentro de la mufla fundido a 220ºC 215

Figura 77- Material fundido a temperatura ambiente de 25ºC. 216
Figura 78- Balanza de humedad utilizada para realizar la medición del porcentaje de humedad. 216
Figura 79- Balanza analítica utilizada para la medición de distintos pesos 217
Figura 80 – Máquina de ensayos de tensión y compresión. 217
Figura 81 -Desperdicio de bobinas de material de empaque de la empresa. 218
Figura 82- Kilogramos de desperdicio de bobinas de material de empaque de la empresa en el año 2018.218
Figura 83 -Desviación estándar para porcentajes de grasa y humedad, calculado en Microsoft Excel. 219
Figura 84-Desviación estándar para porcentaje de volumen aireado y compacto, calculado en Microsoft Excel..... 219
Figura 85 – Mandril a retirar del material de rechazo en bobina. 219
Figura 86 – Ilustración aproximada del ancho de la trituradora y del tornillo extrusor. 220
Figura 87 – Ilustración de la trituradora, el alimentador y el tornillo extrusor. 220
Figura 88. Máquina de referencia para el proceso acondicionamiento del material de empaque. 221
Figura 89. Diagrama general del proceso de pirólisis evaluado..... 222
Figura 90. Análisis termogravimétrico de la muestra de material de empaque de polipropileno limpio.... 228
Figura 91. Análisis termogravimétrico de la muestra de material de empaque de polipropileno sucio..... 228
Figura 92. Diagrama de entradas y salidas para el balance de masa general de la reacción de pirólisis teórica. 234
Figura 93. Diagrama de entradas y salidas para el balance general de la reacción de pirólisis experimental. 235
Figura 94. Cromatograma de la muestra 1 de la condición de cinética 1. 236
Figura 95. Reporte de cromatografía de la muestra 1 de la condición de cinética 1 237
Figura 96. Cromatograma de la muestra 2 de la condición de cinética 1. 241
Figura 97. Reporte de cromatografía de la muestra 2 de la condición de cinética 1. 242
Figura 98. Cromatograma de la muestra 3 de la condición de cinética 1. 252
Figura 99. Reporte de cromatografía de la muestra 3 de la condición de cinética 1. 253
Figura 100. Cromatograma de la muestra 4 de la condición de cinética 1. 258
Figura 101. Reporte de cromatografía de la muestra 4 de la condición de cinética 1. 259
Figura 102. Cromatograma de la muestra 5 de la condición de cinética 1. 264
Figura 103. Reporte de cromatografía de la muestra 5 de la condición de cinética 1. 265
Figura 104. Cromatograma de la muestra 6 de la condición de cinética 1.Figura 105. Reporte de cromatografía de la muestra 6 de la condición de cinética 1. 269
Figura 106. Cromatograma de la muestra 1 de la condición de cinética 1. 274

Figura 107. Reporte de cromatografía de la muestra 1 de la condición de cinética 1. 275
Figura 108. Cromatograma de la muestra 8 de la condición de cinética 1. 280
Figura 109. Reporte de cromatografía de la muestra 8 de la condición de cinética 1. 282
Figura 110. Cromatograma de la muestra 1 para la condición de cinética 2..... 286
Figura 111. Reporte de cromatografía de la muestra 1 para la condición de cinética 2..... 287
Figura 112. Cromatograma de la muestra 2 de la condición de cinética 2. 289
Figura 113.Reporte de cromatografía de la muestra 2 de la condición de cinética 2. 290
Figura 114. Cromatograma de la muestra 3 de la condición de cinética 2. 293
Figura 115. Reporte de cromatografía de la muestra 3 de la condición de cinética 2. 294
Figura 116. Cromatograma de la muestra 4 de la condición de cinética 2. 298
Figura 117. Reporte de cromatografía de la muestra 4 de la condición de cinética 2. 299
Figura 118. Cromatograma de la muestra 5 de la condición de cinética 2. 303
Figura 119. Reporte de cromatografía de la muestra 5 de la condición de cinética 2. 304
Figura 120. Cromatograma de la muestra 6 de la condición de cinética 2. 308
Figura 121. Reporte de cromatografía de la muestra 6 de la condición de cinética 2. 309
Figura 122. Cromatograma de la muestra 7 de la condición de cinética 2. 313
Figura 123. Reporte de cromatografía de la muestra 7 de la condición de cinética 2. 314
Figura 124. Cromatograma de la muestra 8 de la condición de cinética 2. 317
Figura 125. Reporte de cromatografía de la muestra 8 de la condición de cinética 2. 318
Figura 126. Cromatograma de la muestra 1 de la condición de cinética 3. 320
Figura 127. Reporte de cromatografía de la muestra 1 de la condición de cinética 3. 321
Figura 128. Cromatograma de la muestra 2 de la condición de cinética 3. 324
Figura 129. Reporte de cromatografía de la muestra 2 de la condición de cinética 3. 325
Figura 130. Cromatograma de la muestra 3 de la condición de cinética 3. 328
Figura 131. Reporte de cromatografía de la muestra 3 de la condición de cinética 3. 329
Figura 132. Cromatograma de la muestra 4 de la condición de cinética 3. 333
Figura 133. Reporte de cromatografía de la muestra 4 de la condición de cinética 3. 334
Figura 134. Cromatograma de la muestra 5 de la condición de cinética 3. 338
Figura 135. Reporte de cromatografía de la muestra 5 de la condición de cinética 3. 339
Figura 136. Cromatograma de la muestra 6 de la condición de cinética 3. 343
Figura 137. Reporte de cromatografía de la muestra 6 de la condición de cinética 3. 344
Figura 138. Cromatograma de la muestra 7 de la condición de cinética 3. 348
Figura 139. Reporte de cromatografía de la muestra 7 de la condición de cinética 3. 349

Figura 140. Cromatograma de la muestra 1 de la condición de cinética 4. 351
Figura 141. Reporte de cromatografía de la muestra 1 de la condición de cinética 4. 352
Figura 142. Cromatograma de la muestra 2 de la condición de cinética 4. 353
Figura 143. Reporte de cromatografía de la muestra 2 de la condición de cinética 4. 354
Figura 144. Cromatograma de la muestra 3 de la condición de cinética 4. 356
Figura 145. Reporte de la muestra 3 de la condición de cinética 4. 357
Figura 146. Cromatograma de la muestra 4 de la condición de cinética 4. 359
Figura 147. Reporte de cromatografía de la muestra 4 de la condición de cinética 4 360
Figura 148. Cromatograma de la muestra 5 de la condición de cinética 4. 363
Figura 149. Reporte de cromatografía de la muestra 5 de la condición de cinética 4. 364
Figura 150. Cromatograma de la muestra 6 de la condición de cinética 4. 366
Figura 151. Reporte de cromatografía de la muestra 6 de la condición de cinética 4. 367
Figura 152. Cromatograma de la muestra 7 de la condición de cinética 4. 368
Figura 153. Reporte de cromatografía de la muestra 7 de la condición de cinética 4. 370
Figura 154. Cromatograma de la muestra 1 de la condición de cinética 5. 371
Figura 155. Reporte de cromatografía de la muestra 1 de la condición de cinética 5. 373
Figura 156. Cromatograma de la muestra 2 de la condición de cinética 5. 376
Figura 157. Reporte de cromatografía de la muestra 2 de la condición de cinética 5. 377
Figura 158. Cromatograma de la muestra 3 de la condición de cinética 5. 378
Figura 159. Reporte de cromatografía de la muestra 3 de la condición de cinética 5. 379
Figura 160. Cromatograma de la muestra 4 de la condición de cinética 5. 380
Figura 161. Reporte de cromatografía de la muestra 4 de la condición de cinética 5. 381
Figura 162. Cromatograma de la muestra 5 de la condición de cinética 5. 384
Figura 163. Reporte de cromatografía de la muestra 5 de la condición de cinética 5. 385
Figura 164. Cromatograma de la muestra 6 de la condición de cinética 5. 387
Figura 165. Reporte de cromatografía de la muestra 6 de la condición de cinética 5. 388
Figura 166. Cromatograma de la muestra 7 de la condición de cinética 5. 389
Figura 167. Reporte de cromatografía de la muestra 7 de la condición de cinética 5. 390
Figura 168. Funcionamiento del modo 1 en mufla utilizada para la experimentación. 394
Figura 169. Incremento de la temperatura con el tiempo para la cinética 1..... 394
Figura 170. Incremento de la temperatura con el tiempo para la cinética 2..... 395
Figura 171. Incremento de la temperatura con el tiempo para la cinética 3..... 395
Figura 172. Incremento de la temperatura con el tiempo para la cinética 4..... 396

Figura 173. Incremento de la temperatura con el tiempo para la cinética 5..... 396
Figura 174. Comparación de los datos experimentales y el modelo tipo Boltzmann sigmoidal propuesto de la cinética 1..... 398
Figura 175. Comparación de los datos experimentales y el modelo tipo Boltzmann sigmoidal propuesto de la cinética 2..... 398
Figura 176. Comparación de los datos experimentales y el modelo tipo Boltzmann sigmoidal propuesto de la cinética 3..... 399
Figura 177. Comparación de los datos experimentales y el modelo tipo Boltzmann sigmoidal propuesto de la cinética 4..... 399
Figura 178. Comparación de los datos experimentales y el modelo tipo Boltzmann sigmoidal propuesto de la cinética 5..... 400
Figura 179. Resultado de ajuste de curva para datos experimentales de cinética 1..... 407
Figura 180. Resultado de ajuste de curva para datos experimentales de cinética 2..... 408
Figura 181. Resultado de ajuste de curva para datos experimentales de cinética 3..... 408
Figura 182. Resultado de ajuste de curva para datos experimentales de cinética 4..... 409
Figura 183. Resultado de ajuste de curva para datos experimentales de cinética 5..... 409
Figura 184. Ajuste lineal de la relación entre los moles producidos de 2,4-Dimetil-1-hepteno y la masa reactiva en el tiempo para la cinética 1..... 418
Figura 185. Ajuste lineal de la relación entre los moles producidos de 2,4-Dimetil-1-hepteno y la masa reactiva en el tiempo para la cinética 2..... 418
Figura 186. Ajuste lineal de la relación entre los moles producidos de 2,4-Dimetil-1-hepteno y la masa reactiva en el tiempo para la cinética 3..... 419
Figura 187. Ajuste lineal de la relación entre los moles producidos de 2,4-Dimetil-1-hepteno y la masa reactiva en el tiempo para la cinética 4..... 419
Figura 188. Ajuste lineal de la relación entre los moles producidos de 2,4-Dimetil-1-hepteno y la masa reactiva en el tiempo para la cinética 5..... 420
Figura 189. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 1 - Muestra 1..... 420
Figura 190. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 1 - Muestra 2..... 421
Figura 191. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 1 – Muestra 3..... 422
Figura 192. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 1.1..... 423
Figura 193. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 1.2..... 424
Figura 194. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 2.1..... 425
Figura 195. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 2.2..... 426

Figura 196. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 1. 427
Figura 197. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 1.2 428
Figura 198. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 2.1 429
Figura 199. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 2.2 430
Figura 200. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 4 – Muestra 1.1 431
Figura 201. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 4 – Muestra 1.2 432
Figura 202. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 4 – Muestra 2.1 433
Figura 203. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 4 - Muestra 2.2 434
Figura 204. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 1.1 435
Figura 205. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 1.2 436
Figura 206. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 2.1 437
Figura 207. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 2.2 438
Figura 208. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 3.1 439
Figura 209. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 3.2 440
Figura 210. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestra 1 449
Figura 211. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestra 2 450
Figura 212. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestra 3 451
Figura 213. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestra 1 452
Figura 214. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestra 2 453
Figura 215. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestra 3 454
Figura 216. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestra 1 455
Figura 217. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestra 2 456
Figura 218. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestra 3 457
Figura 219. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestra 1 458
Figura 220. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestra 2 459
Figura 221. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestra 3 460
Figura 222. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestra 1 461
Figura 223. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestra 2 462
Figura 224. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestra 3 463
Figura 225. Cromatograma del producto líquido con solvente: Corrida 1 - Muestra 1 464
Figura 226. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestras 1, 2 y 3 de 0 a 10 minutos 465

Figura 227. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestras 1, 2 y 3 de 10 a 23 minutos 466
Figura 228. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestras 1, 2 y 3 de 0 a 10 minutos 467
Figura 229. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestras 1, 2 y 3 de 10 a 23 minutos 468
Figura 230. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestras 1, 2 y 3 de 0 a 10 minutos 469
Figura 231. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestras 1, 2 y 3 de 10 a 23 minutos 470
Figura 232. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestras 1, 2 y 3 de 0 a 10 minutos 471
Figura 233. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestras 1, 2 y 3 de 10 a 23 minutos 472
Figura 234. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestras 1, 2 y 3 de 0 a 10 minutos 473
Figura 235. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestras 1, 2 y 3 de 10 a 23 minutos 474
Figura 236. Formación de propeno a partir de una sección de la molécula de polipropileno 494
Figura 237. Formación de 2-penteno a partir de una sección de la molécula de polipropileno 495
Figura 238. Formación de 2-metil-1-penteno a partir de una sección de la molécula de polipropileno 495
Figura 239. Determinación de tiempo de reacción de la pirólisis de material de empaque con los valores de la escala laboratorio y una masa incial de 2,300,000 gramos. 507
Figura 240. Diagrama de los procesos y flujos registrados en el simulador SuperPro Designer 508
Figura 241. Gráfico de correlación entre el volumen de material de empaque dividido el largo del reactor escala planta piloto contra la altura del material de empaque dentro del reactor. 509
Figura 242. Regresión lineal de la curva de temperatura de termopar contra temperatura de termopozo para la corrección de las lecturas realizadas con este instrumento. 510
Figura 243. Simulación de la pirólisis de material de empaque escala planta piloto para determinar la cantidad de sólido y gas pirolítico producido y tiempo de operación. 519
Figura 244. Simulación de la pirólisis de material de empaque escala planta piloto para determinar la cantidad de sólido y gas pirolítico producido para 648 minutos de reacción. 520

Figura 245. Simulación de la pirólisis de material de empaque escala planta piloto para determinar la cantidad de sólido y gas pirolítico producido para 598 minutos de operación. 520
Figura 246. Simulación de la pirólisis escala planta piloto de material de empaque para la obtención del producto líquido en el tiempo de operación definido. 521
Figura 247. Simulación de la pirólisis escala planta piloto de material de empaque para la obtención del producto líquido para 598 minutos de operación. 521
Figura 248. Simulación de la pirólisis escala planta piloto de material de empaque para la obtención del producto líquido para 648 minutos de operación. 522
Figura 249. Condiciones de operación del incinerador en el sistema de simulación en SuperPro Designer. 523
Figura 250. Componentes del incinerador en el sistema de simulación en SuperPro Designer. 524
Figura 251. Condiciones de operación del ventilador que alimenta el incinerador en el sistema de simulación en SuperPro Designer. 524
Figura 252. Condiciones de operación para el intercambiador de calor del reactor en el sistema de simulación en Super Pro Designer. 525
Figura 253. Operaciones establecidas para el reactor de pirólisis en el sistema de simulación en Super Pro Designer. 525
Figura 254. Condiciones de operación de la alimentación del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en Super Pro Designer. 526
Figura 255. Volumen establecido para el llenado del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en Super Pro Designer. 526
Figura 256. Condiciones de la operación de reacción del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en Super Pro Designer. 527
Figura 257. Condiciones de reacción establecidas para la operación del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en Super Pro Designer. 527
Figura 258. Estequiometria de la reacción establecida para la operación del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en Super Pro Designer* 528
Figura 259. Operación de extracción de syngas y plsatic oil como gases del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en Super Pro Desginer. 528
Figura 260. Condiciones de la operación de enfriamiento del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en SuperPro Designer. 529
Figura 261. Condiciones de la operación de extracción del char del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en SuperPro Designer. 529

Figura 262. Condiciones de operación del intercambiador de calor para condensar el pplastic oil contenido en la corriente de salida del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en SuperPro Designer.. 530
Figura 263. Pantalla de inicio de SuperPro Designer 531
Figura 264. Cuadro de diálogo para seleccionar el tipo de proceso a simular y el tiempo de operación anual. 532
Figura 265.Mapa de la ubicación de la opción Registro, visualización y edición de los componentes puros que se utilizarán en el proceso de simulación. 533
Figura 266. Pantalla para el registro, visualización y edición de los compuestos de las bases de datos y los agregados al programa de simulación..... 534
Figura 267. Definición de un compuesto nuevo en la base de datos del simulador para utilizarlo en el proceso. 535
Figura 268. Pestaña IDs del cuadro de diálogo “Pure Componenet Properties for:” 536
Figura 269. Pestaña Physical (Constant) del cuadro de diálogo “Pure Componenet Properties for:” 537
Figura 270. Mapa de la ubicación de la opción Registro, visualización y edición de las mezclas que se utilizarán en el proceso de simulación. 538
Figura 271. Cuadro de diálogo “Register/Edit Stock Mixtures …” 539
Figura 272. Cuadro de diálogo “Stock Mixture Properties for:” para editar las mezclas de componentes a utilizar en el proceso de simulación. 540
Figura 273. Mapa de opciones para insertar uno de los equipos a utilizar para el proceso de simulación de SuperPro Designer. 541
Figura 274. Cuadro de diálogo “Operation Sequence for Procedure P-1 (in V-101)” para agregar las operaciones que se realizarán en el equipo seleccionado..... 542
Figura 275. Cuadro de diálogo “Stream S-101 (INPUT --- P-1)” para indicar los componentes y condiciones de la corriente seleccionada. 543
Figura 276. Cuadro de diálogo del proceso “Pull-IN-1 (Pull in) in P-1” para establecer las condiciones de operación. 544
Figura 277. Selección del botón para la resolución del balance de masa y energía del proceso de almacenamiento y reacción utilizado como ejemplo. 545
Figura 278. Cuadro de diálogo de inicio de GraphPad Prism 545
Figura 279. Interfaz principal para el uso de módulo de regresiones de GraphPad Prism 546
Figura 280. Tabulación de datos de tiempo y calor cedido en las columnas de “x” y “y” correspondientes para realizar la regresión no lineal..... 546
Figura 281. Botón para realizar regresiones no lineales a los datos seleccionados en el software. 547

Figura 282. Resultados numéricos de la regresión no lineal seleccionada para los datos evaluadados. 547
Figura 283. Resultados gráficos de la regresión lineal seleccionada para los datos evaluados. 548
Figura 284. Calorímetro IKA C-200 de laboratorio de operaciones unitarias UVG 548
Figura 285. recipiente de disgregación de calorímetro IKA C-200 549
Figura 286. Estación de oxígeno C 5010 con partes señalizadas 549
Figura 287. Sistema de llenado de oxígeno para recipiente de disgregación 550
Figura 288. Adaptador de encendido de recipiente de disgregación 550
Figura 289. Vista en planta del calorímetro para colocar recipiente de disgregación en cámara interna ... 551
Figura 290. Pantallas de ingreso de masa de muestra para análisis 551
Figura 291. Pantallas indicadoras de llenado de equipo 551
Figura 292. Pantallas indicadoras de acciones de llenado de la cámara 552
Figura 293. Viscosímetro Cannon 552
Figura 294. Especificaciones de Fuel Oil utilizado en la empresa 553
Figura 295. Especificaciones de calidad de gasolina según reglamento técnico centroamericano 554
Figura 296. Especificaciones de calidad de fuel oil 6 según reglamento técnico centroamericano 555
Figura 297. Especificaciones de calidad de diésel según reglamento técnico centroamericano 556
Figura 298. Análisis de mezcla 90:10 bunker con líquido de pirólisis 557
Figura 299. Análisis de mezcla 95:05 bunker con líquido de pirólisis 557
Figura 300. Relación de evaporación de masa respecto a tiempo 559
Figura 301. Especificaciones de calorímetro IKA C 200 566
Figura 302. Especificaciones de enmienda agrícola FERTICONSA 578
Figura 303. Especificaciones de la gallinaza comercial. 578
Figura 304. Tamizador 579
Figura 305. Colocación de la muestra en tamizador. 580
Figura 306. Prueba de tamizado. 580
Figura 307. Muestra empleada en el tamizador. 581
Figura 308. Balanza de humedad. 581
Figura 309. Balanza analítica. 582
Figura 310. Muestras de char obtenido en las pruebas de pirólisis. 582
Figura 311. Pruebas de medición de ángulos. 582
Figura 312. Resultados del análisis de abonos orgánicos realizado por ANACAFE 583
Figura 313. Resultado del análisis de determinación de Aluminio realizado por Agrolaboratorio Ceres. . 584
Figura 314. Tipo del cangilón 585

Figura 315. Especificaciones del cangilón. 585
Figura 316. Tabla de especificaciones del proveedor 4B. 585
Figura 317. Tabla para el coeficiente de llenado del cangilón. 586
Figura 318. Tipo de banda transportadora. 586
Figura 319. Disposición de los rodillos de la banda. 587
Figura 320. Dimensiones de los rodillos. 587
Figura 321. Cubierta para la banda. 587
Figura 322. Tipo de válvula para la descarga. 588
Figura 323. Dimensiones de la válvula de descarga. 588
Figura 324. Tabla para la capacidad real de transporte de la banda. 588
Figura 325. Tabla para el coeficiente de reducción de la capacidad de la banda. 589
Figura 326. Cotización de planta de pirólisis de 2 ton/lote propuesta por "Henan Lingfine Machinery Co., Ltd". 591
Figura 327.Cotización de planta de pirólisis de 2 ton/lote de proveedor "Xinxiang Huayin RenewablE Energy Equipment Co., Ltd". 596
Figura 328.Cotización de laminado para techo de planta de pirólisis. 601
Figura 329.Cotización con costo de materiales para construcción de obra gris. 602
Figura 330.Cotización para extrusora con cortadora de pellets 603
Figura 331.Cotización para el triturador de material de empaque 603
Figura 332.Cotización de válvulas de compuerta y tubería para el desplazamiento del producto líquido.. 603
Figura 333.Cotización de tanque de acero inoxidable horizontal de 1000 gal para el almacenamiento del producto líquido. 604
Figura 334.Cotización de tanque de acero inoxidable horizontal de 10000 gal para el almacenamiento del producto líquido. 604
Figura 335.Cotización de bomba de Desplazamiento Positivo de Tornillo para producto líquido 604
Figura 336.Cotización de módulo de fibra hueca para producto gaseoso. 605
Figura 337.Membrana para extracción de propileno del producto gaseoso. 605
Figura 338.Cotización de tanque de almacenamiento de 1000 gal para propileno del producto gaseoso... 606
Figura 339.Cotización de tanque del almacenamiento de 5000 gal para gas de descarte proveniente del producto gaseoso. 606
Figura 340.Cotización de compresores para el transporte del producto gaseoso. 607
Figura 341.Cotización de intercambiadores de calor para propileno extraído y gas de descarte 607
Figura 342.Cotización de bomba de desplazamiento positivo para el producto gaseoso 608

Figura 343.Cotización de silo para almacenamiento del producto sólido..... 608
Figura 344.Cotización de banda transportadora para el transporte del producto sólido. 609
Figura 345.Elevador de cangilones para el transporte del producto sólido. 609
Figura 346.Cotización de tubo de acero inoxidable para la creación del reactor a escala laboratorio..... 610
Figura 347.Precio de venta mundial de Propileno según ICIS. 610
Figura 348.Factura de compra de Beakers para análisis de laboratorio..... 611
Figura 349. Plano de la distribución de equipos en la planta de pirólisis proporcionada por la Propuesta 2 624

RESUMEN

En diversas industrias los plásticos han reemplazado a otros materiales tradicionales, por lo que su producción ha aumentado con los años. Se realizan mezclas de plásticos para generar materiales con propiedades específicas, lo que ha generado una problemática ambiental debido a las dificultades para la disposición, tratamiento o reciclaje de cada componente. En búsqueda de una solución a este problema, se llevó a cabo el siguiente trabajo para presentar los resultados de la evaluación de un sistema de pirólisis como forma de tratamiento de residuos plásticos. Para esto, se hicieron pruebas a escala laboratorio utilizando los desechos de material de empaque de polipropileno metalizado de una industria alimenticia.

El material de empaque de polipropileno metalizado proveído fue inicialmente caracterizado para definir sus propiedades y plantear un sistema de acondicionamiento. También se realizó un análisis termogravimétrico para determinar el rango de temperatura del proceso de pirólisis de este material, que resultó entre 415°C y 475°C. Luego se hicieron las pruebas a escala laboratorio empleando un sistema compuesto por un reactor de acero inoxidable, una mufla y un sistema de condensadores. Esto permitió cuantificar y analizar la composición y rendimiento de los productos líquido, gaseoso y sólido, que fueron utilizados para el planteamiento de un modelo cinético de la reacción de descomposición térmica.

El modelo cinético se basó en la ley potencial y la ecuación de Arrhenius para expresar el avance de la reacción como una función de la pérdida de masa en el tiempo. Analizado a cinco curvas de calentamiento, el modelo con temperatura final de 475 °C fue el que mejor predijo el comportamiento de la reacción. Con los parámetros cinéticos de este modelo, se desarrolló un modelo de simulación con el software SuperPro Designer® y Berkeley Madonna® para dimensionar un reactor de pirólisis escala planta piloto y se propuso un reactor cilíndrico horizontal semicontinuo de acero inoxidable.

Posteriormente se analizaron las posibles aplicaciones de los productos mayoritarios obtenidos; líquido y sólido, para evaluar su aprovechamiento energético. También se analizó la composición del producto gaseoso en donde se determinó que el compuesto mayoritario era el propileno. Para la caracterización de la composición porcentual de los productos gaseosos y líquidos, se utilizó la técnica de cromatografía de gases con detector de masas. La caracterización física del líquido se realizó con pruebas de densidad, viscosidad cinemática, gravedad API y punto de inflamación; con ello fue posible evaluar la viabilidad de emplearlo como combustible para hornos al mezclar con bunker.

Para la caracterización del producto sólido, se hizo un análisis ICP. Con esos resultados, la aplicación del sólido o char fue enfocada a su uso como abono; este puede utilizarse como fuente de nitrógeno en los suelos ya que posee un contenido de nitrógeno de 1.35% m/m y como mejorador de suelos acidificados por su pH.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis económico basado en la producción anual de los desechos de polipropileno de la industria alimenticia y los rendimientos de los productos del proceso de pirólisis, estableciendo que el proyecto posee beneficios sobre el escenario actual, por lo que al implementarse generará ahorros a la empresa.

I. INTRODUCCIÓN

La industria alimenticia es uno de los principales sectores que promueve el consumo de plásticos dado que los emplea como material de empaque para la conservación de los alimentos. Este material se genera como desecho luego de cumplir su función con el producto, pero también se desecha cuando no cumple las especificaciones de calidad requeridas por las empresas previo al proceso de empaque. Los principales plásticos usados en los materiales de empaque para alimentos son: polipropileno, polietileno de alta densidad, polietileno de baja densidad y otros. El material de empaque evaluado en el siguiente trabajo para una empresa alimenticia fue de polipropileno metalizado.

La búsqueda de métodos viables para el tratamiento de residuos de materiales plásticos ha sido actualmente uno de los focos principales de investigaciones científicas. Existen distintas propuestas para el reuso de materiales de empaque como la reutilización, incineración en calderas, gasificación, hidrogenación y pirólisis.

La tecnología de interés para el aprovechamiento de los desechos plásticos de empaque en este estudio es la pirólisis. Consiste en una reacción de descomposición térmica en ausencia de oxígeno, realizada a altas temperaturas (400°C a 1000°C) en la cual la energía permite desestabilizar las moléculas hasta provocar la ruptura de enlaces y obtener moléculas más simples. Es una alternativa de valorización de plásticos que ha cobrado mayor interés en la industria por los productos generados en fase gaseosa, líquida y sólida con distintas características fisicoquímicas. La proporción en que se produce cada fase y las propiedades de cada producto de reacción depende de la composición de tanto de la materia prima utilizada como de las condiciones de operación. Se hizo un estudio de cinética del material de empaque evaluado con el fin de predecir el comportamiento de la reacción y distribución de las fases de los productos a escala laboratorio.

En diversos estudios se observa que el producto mayoritario es el líquido, por ello las investigaciones se centran en su potencial uso como combustible y otras aplicaciones. Este presenta compuestos complejos como parafinas, olefina y aromáticos. De la reacción también se obtiene un producto sólido carbonoso, conocido como char, que puede ser aprovechado para la regeneración de suelos debido a su elevado contenido de materia orgánica.

La determinación de las moléculas simples o complejas obtenidas de los productos se realiza a partir de técnicas fisicoquímicas que permiten identificar la composición química tales como la cromatografía y espectroscopía infrarrojo. También se utilizan técnicas que permiten clasificar los productos líquidos y sólidos como sustitutos de combustibles a partir de propiedades como: densidad, viscosidad, punto de inflamación, poder calorífico, humedad, entre otros.

Este estudio realizó un análisis del producto líquido y sólido obtenido en la reacción de pirólisis de polipropileno para evaluar su posible uso dentro de la empresa o aplicación posterior. Dicha evaluación incluyó una caracterización fisicoquímica utilizando técnicas como cromatografía de gases con detector de masa, calorimetría a volumen constante y otras para obtener composiciones y propiedades físicas de los productos.

La pirólisis de plásticos permite transformar mezclas de residuos plásticos en productos valiosos para la industria que los procesa. Su implementación a futuro podría contribuir a crear una economía circular por la generación y distribución de energía de los productos de pirólisis reutilizados como combustibles. En unos años incluso podría ser una alternativa a los combustibles fósiles utilizados en calderas y otros equipos industriales. También puede suponer ahorros en espacios de almacenamiento y costo de tratamiento por empresas externas.

Por último, para cumplir con el objetivo general de este megaproyecto se realizó una evaluación y comparación de las propuestas de uso de los productos obtenidos de la pirólisis con técnicas de análisis económico. Con el fin de realizar una propuesta para la implementación de una planta piloto. Dicha planta fue propuesta mediante el uso de un sistema de simuladores, el estudio cinético y los análisis fisicoquímicos mencionados anteriormen

II. OBJETIVOS

A. General

Realizar la evaluación técnica y económica de un sistema de pirólisis para material de empaque plástico metalizado de una empresa alimenticia como método de tratamiento de los residuos, utilizando caracterización fisicoquímica del material y productos, un modelo cinético de reacción y un análisis del uso industrial de los productos y rentabilidad del proyecto.

B. Específicos

- Caracterizar y acondicionar los residuos de material de empaque plástico tipo BOPP y BOPP metalizado alimenticio para realizar una pirólisis.
- Realizar un estudio para determinar los parámetros cinéticos y operativos de la reacción de pirólisis de material de empaque de polipropileno utilizando un sistema a escala laboratorio para generar un modelo que permita su escalamiento industrial.
- Caracterizar los productos obtenidos de la pirólisis utilizando técnicas de análisis fisicoquímico para determinar su composición y características físicas como criterio para su posterior uso en la industria.
- Realizar una simulación de pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado, para proponer el dimensionamiento de un reactor escala planta piloto.
- Evaluar el uso del producto líquido obtenido de la pirólisis de material de empaque de polipropileno metalizado como combustible para la empresa.
- Evaluar por medio de comparaciones, el producto sólido obtenido de la pirolisis para material de empaque de polipropileno biorientado para estudiar sus aplicaciones posteriores.
- Evaluación y comparación de posibles usos de productos de pirólisis utilizando técnicas de análisis económico para la implementación de una planta de pirólisis.

C. Sub-específicos

- Caracterizar los residuos de material de empaque plástico, utilizando pruebas físicas y químicas para establecer las condiciones adecuadas para ser alimentado al reactor de proceso de pirólisis.
- Determinar las proporciones de mezcla de material de rechazo en bobina y material residual, de acuerdo a la disponibilidad de la empresa, para utilizar la totalidad de los desechos producidos en la empresa alimenticia.
- Determinar el equipo y el proceso de acondicionamiento para la alimentar la mezcla al reactor de proceso de pirólisis, a partir de las propiedades físicas y químicas a evaluar.
- Determinar el rendimiento de la reacción de pirólisis en cada una de las fases utilizando un sistema a escala laboratorio para evaluar cinco curvas de calentamiento distintas.
- Determinar la cinética de reacción con el cambio de masa reactiva y temperatura en función del tiempo para predecir el comportamiento de la reacción.

- Determinar una ecuación de la velocidad de producción de un compuesto representativo analizando su comportamiento en función del tiempo para evaluar la formación del producto a distintas temperaturas.
- Analizar por cromatografía el producto gaseoso obtenido por la pirólisis de empaques de polipropileno metalizado para determinar su composición porcentual.
- Analizar por técnicas fisicoquímicas el producto líquido obtenido por la pirólisis de empaques de polipropileno metalizado para determinar su composición porcentual y propiedades.
- Analizar por técnicas fisicoquímicas el producto sólido obtenido por la pirólisis de empaques de polipropileno metalizado para determinar sus propiedades.
- Analizar y procesar los datos obtenidos de las pruebas a escala laboratorio utilizando estadística descriptiva para establecer las variables de operación de la reacción de pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado en los simuladores.
- Establecer los procesos y sus condiciones de operación en los simuladores para realizar un modelo de pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado empleando softwares de simulación.
- Establecer la variación entre los resultados reportados en la literatura sobre reacciones de pirólisis de plásticos y los que proporcionan los simuladores con estos mismos datos.
- Proporcionar la información técnica del reactor de pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado para el escalamiento de la planta piloto con los resultados obtenidos y corregidos con las herramientas de simulación.
- Determinar el poder calorífico del producto líquido de pirólisis por el método de calorimetría para evaluar su uso como combustible.
- Realizar una comparación de características fisicoquímicas del producto líquido obtenido de pirólisis con tres combustibles industriales convencionales para determinar factibilidad de uso como combustible.
- Proponer un sistema de almacenamiento del producto líquido obtenido de pirólisis de acuerdo a sus propiedades fisicoquímicas.
- Realizar una comparación de las características del producto sólido obtenido de pirólisis, con características fisicoquímicas reportadas de abonos orgánicos, para evaluar su posible uso como tal.
- Realizar una comparación de las características del producto sólido obtenido de pirólisis, con características fisicoquímicas reportadas de combustibles sólidos comerciales, para evaluar su posible uso como tal.
- Proponer un sistema de almacenamiento del producto sólido obtenido de pirólisis, de acuerdo a sus características, para ser utilizado en su posible aplicación.
- Determinar los usos y precios de venta de los productos obtenidos de las pruebas de pirólisis realizadas.
- Realizar una comparación entre los precios de venta de los productos de la pirólisis en el mercado y el poder calorífico de estos para determinar cuáles son reutilizados y cuáles pueden ser vendidos.
- Realizar un análisis de flujos de efectivo de acuerdo con la inversión inicial e implementación para planta de pirólisis, utilizando el TIR, TMAR y VPN como indicadores en un periodo de 10 años.

III. JUSTIFICACIÓN

Mundialmente, la humanidad demanda una cantidad elevada de productos plásticos en distintas presentaciones. De acuerdo con la Asociación Europea de productores de materias primas plásticas, en el 2017 la producción de plásticos a nivel mundial fue de alrededor de 348 millones de toneladas incluyendo los termoplásticos, poliuretano, plásticos termoestables, elastómeros, adhesivos, revestimientos y sellantes, y fibras de polipropileno. La producción es elevada y aumenta con los años, así como la contaminación generada por los desechos de estos productos. La tendencia de generación y desecho de plásticos indica que para el año 2050 habrá 12 millones de toneladas métricas de plástico en los vertederos.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas, el 79% de la basura generada del plástico se encuentra en vertederos o desechada en el ambiente, 12% se incinera y solo el 9% se recicla. Una alternativa para aumentar este porcentaje de plásticos tratados es la pirólisis. Este proceso permite obtener productos químicos de interés, mayoritariamente hidrocarburos, que luego pueden ser utilizados en otras aplicaciones. Esta es una ventaja respecto a otros procesos de tratamiento de residuos, como combustión o incineración, que no logran ese aprovechamiento porque no generan este tipo de productos.

Específicamente la industria alimenticia utiliza polímeros sintéticos para el empaque de productos debido a sus propiedades resistentes, impermeables e higiénicas. Importante para mantener la inocuidad de los alimentos. Este estudio, en modalidad de megaproyecto, se realizó para una industria alimenticia guatemalteca que registró acumulaciones de más de 41,000 kg de material de empaque de polipropileno metalizado en el año 2017 y 48,000 kg en el año 2018 por no cumplir con los estándares de calidad. El desecho de material de empaque equivale a un costo de Q162,932.67 ya que actualmente se contrata a una empresa externa para su disposición final.

Debido a la generación y acumulación de desechos plásticos en la empresa, se propuso la reacción de pirólisis como técnica de tratamiento de los desechos de empaque y con ello generar productos, mayoritariamente hidrocarburos, de valor económico en la industria. Para ello fue necesaria la evaluación técnica del proceso, de los productos obtenidos y la propuesto de los equipos necesarios para el tratamiento, concluyendo con un análisis económico que indicó la rentabilidad del proyecto.

Previo a la propuesta del sistema de pirólisis, se llevaron a cabo pruebas a escala laboratorio para establecer las propiedades fisicoquímicas del material de empaque, condiciones del operación de la reacción de pirólisis y el desarrollo del estudio cinético que permitió realizar la propuesta del sistema para la generación de productos de pirólisis en cantidades controlables y con propiedades fisicoquímicas determinadas. La caracterización de los productos de pirólisis permitió realizar la comparación con las propiedades fisicoquímicas de los combustibles convencionales para realizar las propuestas de la sustitución de estos en la industria o bien con un uso distinto.

Para la propuesta del sistema de pirólisis fue necesario el análisis técnico de los productos líquido y sólido, productos de mayor rendimiento, para determinar las etapas necesarias en el proceso para la separación, recolección y almacenamiento al final del proceso. Dicho análisis técnico incluyó la propuesta de los equipos involucrados en cada etapa del proceso tomando en cuenta la cantidad de material a procesar durante todo el proceso y la variación en las propiedades fisicoquímicas del material hasta ser obtenido como un producto de pirólisis. Por último, se realizó un análisis económico que tomó en cuenta los parámetros de Tasa Interna de Retorno y Valor Actual Neto, respecto a la Tasa Mínima Atractiva de Retorno utilizada actualmente en los proyectos de la empresa alimenticia para indicar la rentabilidad del proyecto, tomando en cuenta la comercialización o utilizando de los productos de pirólisis dentro de la empresa y la implementación de la planta de pirólisis para el tratamiento del material de desecho en un proceso por lotes.

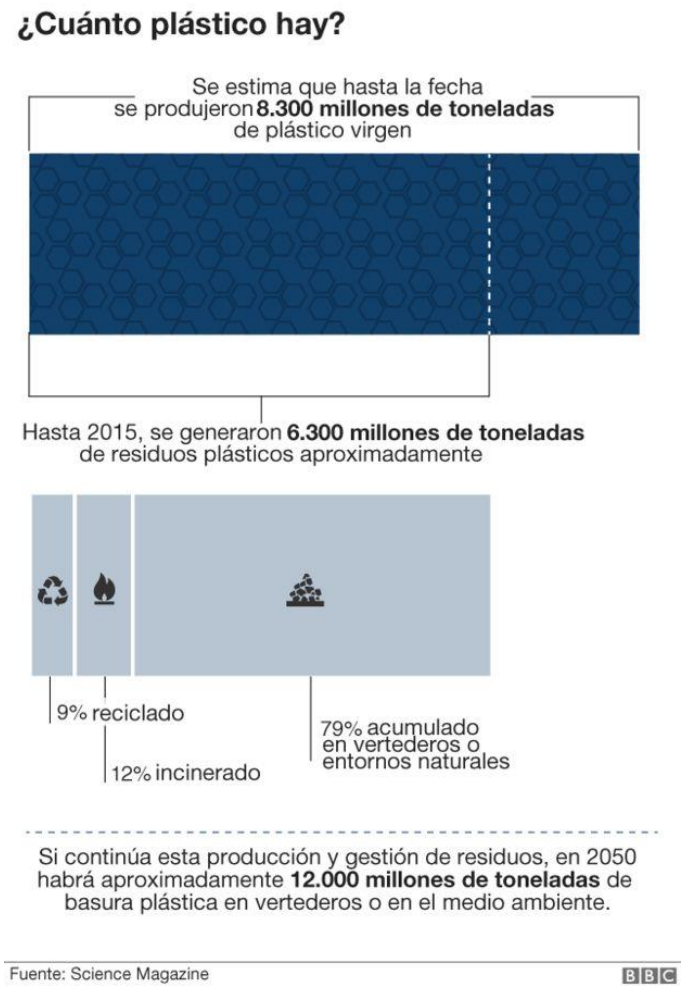
En Guatemala, no se han realizado estudios específicos para la pirólisis de polipropileno metalizado y contaminado con grasas u otros remanentes, como sucede con el residuo de esta industria. Por lo que fue necesario realizar el estudio para el correcto escalamiento industrial que permitiera cumplir con las necesidades de tratamiento de residuos requeridos por la industria alimenticia. Este trabajo también establece un antecedente en el departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala, para futuras investigaciones de pirólisis de polímeros sintéticos.

IV. MARCO TEÓRICO

A. CONTAMINACIÓN PROBLEMA

Durante las últimas décadas se han fabricado miles de millones de toneladas de plástico del cual el 91% no se recicla ya que la mayoría de los productos desechables acaban como desperdicios. Un estudio publicado en la revista Science Advances liderado por el ingeniero ecologista Roland Geyer de la Universidad de California, aclara que, de los 8.300 millones de toneladas métricas de plástico producida, solamente el 9% ha sido reciclado, el resto se acumula en vertederos o entornos naturales a tal punto que la tendencia indica que para el año 2050 habrá 12 millones de toneladas métricas de lástico en los vertederos. (Parker, 2019)

Figura 1. Cantidad de plástico generado mundialmente en el año 2019

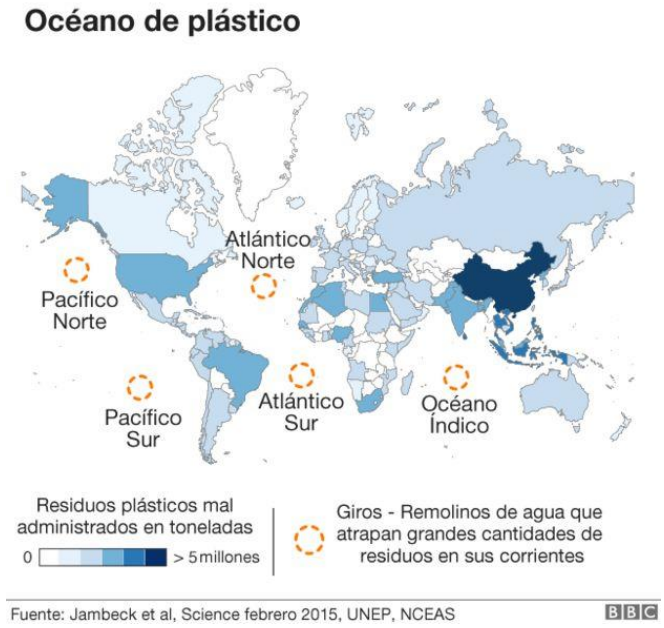


Tomado de: (Trowsdale *et al*, 2017)

Además, Geyer recalca que la rápida aceleración de la fabricación de plástico se duplica aproximadamente cada 15 años y se estima que alrededor de 8 millones de toneladas métricas de plástico terminan en el océano cada año.

En el 2010, científicos del Centro Nacional de Análisis y Síntesis Ecológicos de Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Georgia en Grecia, estimaron que 8 millones de toneladas se encuentran en el océano y que esta cantidad podría alcanzar los 9.1 millones de toneladas en los próximos años. Estos plásticos se acumulan en áreas del océano donde los vientos crean corrientes circulares conocidas como "giros" que acaparan cualquier residuo flotante. Existen cinco giros en todo el mundo y hoy en día tienen las concentraciones más altas de basura plástica. (Trowsdale *et al*, 2017)

Figura 2. Distribución de la cantidad de plástico acumulado en los océanos



Tomado de: (Trowsdale *et al*, 2017)

Lastimosamente, las estadísticas no pronostican una disminución en el consumo de plástico; en el año 2016 se vendieron alrededor de 480.000 millones de botellas de plástico en todo el mundo, lo que equivale a un millón de botellas por minuto. De esta cantidad, menos del 50% se recolecta para reciclaje y solamente el 7% se convierte en nuevas botellas. (Trowsdale *et al*, 2017)

Por último, la contaminación también se da en alimentos envasados en plástico. Hay una creciente evidencia de que los alimentos que se encuentran en contacto directo con el alimento pueden resultar perjudiciales dada su procedencia de productos químicos que en ellos se encuentran. El plástico no es el problema en sí, ya que las moléculas del polímero son tan grandes como para migrar hacia el alimento con el que se tiene contacto directo. Sin embargo, si en las moléculas poliméricas se encuentran moléculas más pequeñas, estas sí pueden migrar al producto alimenticio. Por ejemplo, a partir de policarbonato y la resina epoxi, utilizada para almacenamiento y botellas, se puede obtener bisfenol A que resulta dañino para la salud. Asimismo, el PVC presente en las botellas presenta productos químicos plastificantes que le brindan la propiedad de flexibilidad, pero pueden dañar la salud al provocar una desregulación del sistema endocrino y la producción de hormonas. (Martinez, 2016)

B. CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL

La caracterización de materiales suele comprender el estudio de propiedades físicas, químicas y estructurales bajo unas determinadas condiciones. Generalmente, este estudio consiste en la obtención de información acerca de las propiedades del material al ser perturbado por una señal (eléctrica, luminosa, térmica, etc.). El estudio de la respuesta del material a dicha perturbación nos permite conocer las propiedades del mismo. La mayoría de los materiales utilizados en aplicaciones con altos requerimientos tecnológicos (como por ejemplo la oxidación a alta temperatura, el aislamiento térmico, la disminución de la fricción y el desgaste, etc.) tienen una región cercana a la superficie con propiedades que difieren mucho de las del material interior (también conocido como 'bulk'). En general, las modificaciones de la superficie y/o la aplicación de recubrimientos son deseables y habitualmente necesarios por diversos motivos: cumplir con requerimientos específicos (durabilidad, estética, etc.), mayor flexibilidad a la hora de diseñar, factores económicos. (Palleiro, 1992).

Conocer las propiedades superficiales de los materiales es de crucial importancia para mejorar los mismos, determinar su utilidad en diferentes aplicaciones y poder llegar a entender los modos de fallo. En el caso de los recubrimientos, tanto la estructura como la composición intervienen de forma decisiva en muchas de las propiedades de los componentes, tales como la reactividad química, la fricción y el desgaste, la adherencia, la hidrofobicidad, la oleofobicidad, la estética etc. Propiedades físicas: gramaje, gramaje de papeles componentes, espesor, permeabilidad Gurley, etc. Propiedades mecánicas: tracción, estallido, perforación, compresión en corto (SCT), resistencia al aplastamiento en plano (CMT), resistencia a la compresión al canto (CCT), resistencia a la compresión en anillo (RCT), compresión en plano del cartón ondulado (FCT), compresión al canto del cartón ondulado (ECT), flexión Taber, flexión a tres y cuatro puntos, etc. Propiedades superficiales: absorción de agua Cobb, ángulo de contacto, opacidad, rugosidad Bendtsen, etc. (Palleiro, 1992).

Para plásticos y films pueden encontrarse las siguientes propiedades:

- Propiedades físico-mecánicas: tracción, dureza Shore, coeficiente de fricción, tensión superficial, rasgado, espesor, gramaje, resistencia al agrietamiento, impacto al dardo, flexión y durabilidad, etc.
- Propiedades térmicas y reológicas: análisis termogravimétrico (TGA), análisis dinamo-mecánico (DMA), calorimetría diferencial de barrido (DSC), índice de fluidez (MFI), viscosidad, etc. Propiedades estructurales: espectroscopia infrarroja (FTIR), microscopia óptica, etc.

C. PLÁSTICOS

Los materiales plásticos son compuestos orgánicos que se obtienen mediante una síntesis química presentando un tamaño muy elevado. Por esto mismo se les conoce también como compuestos macromoleculares o polímeros. (Parker, 2019)

Gracias a su versatilidad en cuanto a formas, dureza, elasticidad y buen comportamiento como una barrera frente a agentes externos de contaminación microbiológica, los plásticos son frecuentemente utilizados como empaques primarios. Por otro lado, las composiciones de los plásticos pueden modificar las

propiedades finales de un producto en un porcentaje relativamente bajo (antioxidantes, plastificantes, colorantes o pigmentos). (Parker, 2019)

Los polímeros son utilizados con mucha frecuencia para envases que tienen contacto directo con alimentos dada sus características higiénicas y de bajo costo. A continuación, se muestra una clasificación de los polímeros basada en sus características termo-mecánicas. (Parker, 2019)

1. Tipos de plásticos:

a. Termoplásticos

Dentro de esta clasificación entran aquellos plásticos que se pueden deformar mediante un aporte calórico. De esta manera adquieren cierta plasticidad y pueden llegar incluso a un estado líquido dependiendo las temperaturas a las que sean sometidos. Asimismo, al disminuir la temperatura dichos plásticos retoman su estado sólido son capaces de absorber esfuerzos mecánicos. Algunos de los polímeros que entran dentro de esta clasificación son: Polietileno de baja y alta densidad (LDPE y HDPE), Etileno (E) o Polipropileno (PP). (Vazquez, 2001)

b. Termoestables:

Al contrario de los termoplásticos, este tipo de polímeros no son moldeables a pesar de la presencia de calor. Se obtienen mediante el proceso de recirculación, en el cual se une una cadena de polímeros con otra. (Vazquez, 2001)

c. Elastómeros:

Igual que los plásticos termoestables, los elastómeros son plásticos no moldeables que no adquieren plasticidad con el calor, pero a temperatura ambiente tienen una consistencia elástica. En el ámbito alimentario, su uso se restringe a tuberías para transportar líquidos como el agua, leche, etc. (Vazquez, 2001)

D. POLÍMEROS SINTÉTICOS

Un polímero es una macromolécula formada por con unidades repetitivas conocidas como monómeros. En algunos polímeros todas las unidades de monómeros son idénticas y se conocen como homopolímeros. Cuando hay más de un tipo de unidad repetitiva se le conoce como copolímero. Actualmente al hablar de polímeros, se refiere más a los polímeros orgánicos sintéticos en vez de los polímeros orgánicos naturales como el ADN, la celulosa y una proteína.

La mayoría de los polímeros sintéticos son homopolímeros e inicialmente consistían en la imitación de polímeros naturales de interés comercial, pero se fueron desarrollando con características más ventajosas y diferentes que podían reemplazar a los naturales.

1. Propiedades de los polímeros

Los polímeros son moléculas muy grandes, pero sus propiedades químicas y físicas pueden explicarse en términos de las moléculas más pequeñas que lo conforman. Dos de las propiedades más importantes son la cristalinidad y el comportamiento térmico.

d. Cristalinidad

La mayoría de los polímeros forman regiones cristalinas microscópicas llamados cristalitos. Si un polímero altamente regular está empacado bien en una red cristalina será altamente cristalino y por lo tanto será más denso, resistente y rígido. La estereoquímica afecta la cristalinidad del polímero, los isotáctico y sindiotáctico estereorregulares tienden a ser más cristalinos que los atáctico.

e. Propiedades térmicas

A temperaturas bajas los polímeros de cadena larga son vidrios lo que los hace sólidos e inflexibles. Conforme se eleva la temperatura el polímero pasa a través de una temperatura de transición vítrea y arriba de esta un polímero altamente cristalino se vuelve flexible y moldeable. Si se eleva aún más la temperatura, se alcanza la temperatura de fusión cristalina en donde los cristalitos se funden. Arriba de esta temperatura el polímero es viscoso y puede extruirse en hiladoras.

Los polímeros de cadena larga con cristalinidad baja al elevar su temperatura se vuelven gomosos hasta ser líquidos viscosos sin puntos de fusión definidos. Estas transiciones de fase aplican a polímeros de cadena larga. Los polímeros enlazados de manera cruzada por lo general no se funden hasta que la temperatura sea lo suficientemente alta para que comience a descomponerse.

2. Clasificación de polímeros sintéticos:

Las dos clases principales de polímeros sintéticos son los polímeros de condensación y los de adición.

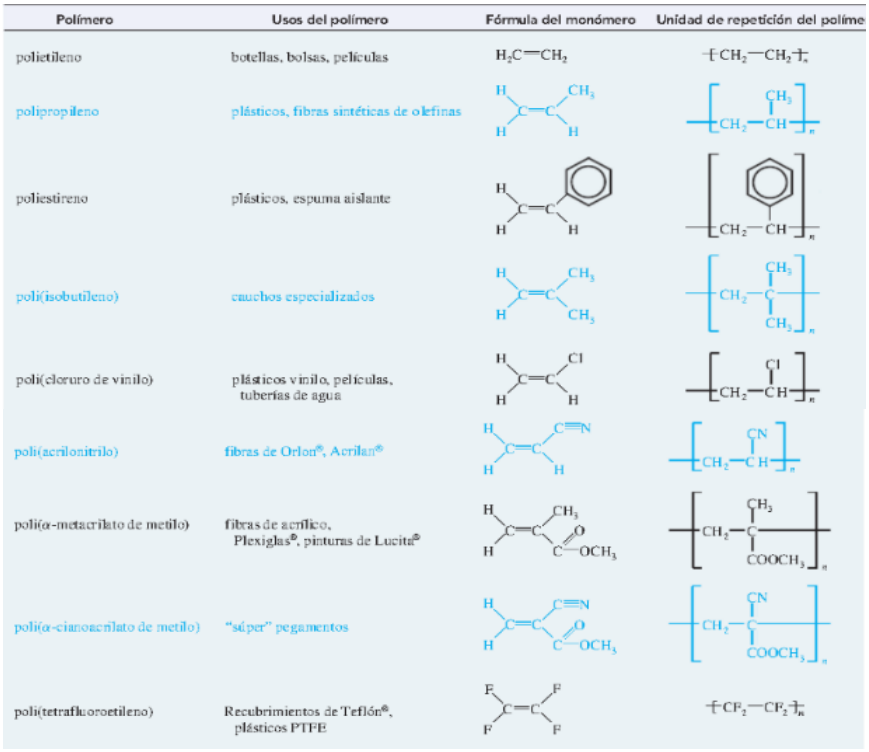
a. Polímeros de condensación

Resultado de la formación de enlaces con la pérdida de una molécula pequeña entre los monómeros. Involucra la formación de amidas y ésteres. Se les llaman polímeros de crecimiento por pasos porque cualquier par de moléculas de un monómero puede reaccionar y formar un paso en la condensación. Un ejemplo de este tipo es el poliéster Dacrón.

b. Polímeros de adición

Resultado de la adición rápida de una molécula a la vez en la cadena del polímero en crecimiento. En general para estos polímeros el crecimiento de la cadena ocurre en el extremo de esta, los monómeros son alquenos y la polimerización involucra adiciones sucesivas en los dobles enlaces. La Figura 3 muestra algunos de los polímeros de adición más importantes en la industria y el monómero que lo forma. (Wade, 2011)

Figura 3. Ejemplos de polímeros de adición



Polímero	Usos del polímero	Fórmula del monómero	Unidad de repetición del polímero
polietileno	botellas, bolsas, películas	$H_2C{=}CH_2$	$+CH_2{-}CH_2+_n$
polipropileno	plásticos, fibras sintéticas de olefinas		
poliestireno	plásticos, espuma aislante		
poli(isobutileno)	cauchos especializados		
poli(cloruro de vinilo)	plásticos vinilo, películas, tuberías de agua		
poli(acrilonitrilo)	fibras de Orlon®, Acrilan®		
poli(α-metacrilato de metilo)	fibras de acrílico, Plexiglas®, pinturas de Lucite®		
poli(α-cianoacrilato de metilo)	"súper" pegamentos		
poli(tetrafluoroetileno)	Recubrimientos de Teflón®, plásticos PTFE		$+CF_2{-}CF_2+_n$

Tomado de: (Wade, 2011)

c. Polipropileno

Figura 4. Molécula del polipropileno



Tomado de: (Universidad de Barcelona, 2019)

Es un polímero termoplástico obtenido de la polimerización del propileno. Su fórmula química es $(\text{-}CH_2\text{-}CH(CH_3))_n$ y su abreviación o nomenclatura es PP. Su uso industrial se debe a sus propiedades mecánicas a temperatura ambiente, baja densidad, material aislante, químicamente inerte y de precio bajo. (Universidad de Barcelona, 2019). Se utilizan películas de polipropileno en las técnicas de envasado y empaque para obtener mayor protección contra la humedad y el aire. Generalmente se utiliza en la industria de alimentos para proteger productos higroscópicos o susceptibles al contacto con el aire. Su uso como material de empaque también se debe a las modificaciones que permite dar una apariencia atractiva para el consumidor (UNIFEM, 1998). La presentación de los empaques flexibles es generalmente laminado con diversas resinas poliméricas y hojas de aluminio. Otros plásticos utilizados para la fabricación de empaques

flexibles, semi-rígidos y rígidos son el polietileno tereftalato (PET), polietileno de alta densidad (PEAD), polietileno de baja densidad (PEBD), policloruro de vinilo (PVC) y poliestireno (PS) (Careaga, 1993).

d. Polipropileno biorientado (BOPP)

El polipropileno biorientado es una película con texturas co-extruídas y pueden ser transparentes, metálicas u opacas. Tienen la ventaja de no ser tóxicas y totalmente reciclables, son resistentes a los rayos UV, humedad, aroma y barreras de luz. Las características principales de este material es que es rígido, tiene una alta resistencia a la tracción, actúa como barrera de agua con un rango de 12 a 60 micras y con un espesor entre 15 a 40 micras (APG, 2010).

Es resistente a los espesores bajos, claridad y tienen una excelente capacidad de impresión por lo que pueden ser tratado con revestimientos acrílicos y PVDC para otorgar mejores propiedades de barrera y sello (APG, 2010).

Entre sus aplicaciones se encuentran las buenas impresiones y laminados para el uso en máquinas verticales y horizontales, se pueden utilizar con fines decorativos, para embalaje flexible, cintas autoadhesivas, etiquetas, artículos de papelería, metalización y productos de consumo. También se utiliza en envolturas de regalos y flores, laminación de papel, embalajes de textiles, películas desmoldantes para placas de melanina, como recubrimiento anti-falsificación y envases para productos de electrónica (APG, 2010).

El BOPP es un material de alto crecimiento debido a su extrema versatilidad. Para un material metalizado se tienen las características de trabajar a una baja temperatura de sellado, con perlado blanco metalizado y con una barrera de normal a alta (APG, 2010).

E. APLICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS EN LA INDUSTRIA ALIMENTICIA

Como se mencionó anteriormente, los materiales plásticos son muy utilizados en la industria de alimentos tanto para empaques primarios, como para las instalaciones gracias a su durabilidad, facilidad de limpieza, resistencia y propiedades antimicrobianas. Actualmente existe la tendencia de convertir los envases para alimentos en empaques flexibles en lugar de estructuras rígidas como las latas o botellas. Esto se debe a las funciones que debe proveer el empaque primario tales como la protección del producto (barrera contra la humedad, gases o incluso luz), la facilidad de transporte y el bajo costo. (Illanes, 2004)

Los materiales empleados para la manipulación de alimentos, tanto para utensilios como empaques, debe mantener la inocuidad del producto procurando cumplir con lo siguiente:

- Que no transmita sustancias tóxicas
- En el caso de empaques primarios, que no modifique el olor, color o sabor del producto
- Que sea resistente al desgaste, impacto, oxidación y corrosión
- Que posea una superficie sin porosidad y de fácil limpieza

La mayoría de los plásticos utilizados de grado alimenticio (PET, PP o PLA) cumplen con las características recomendadas para mantener la inocuidad del producto. Naturalmente, las características de los plásticos varían de acuerdo con su composición y método de fabricación, pero lo principal recae en su resistencia a la corrosión, a los ácidos y detergentes y en su baja conductividad térmica y eléctrica. (Mendoza, 2012)

Cuadro 1. Comparación de las características y aplicaciones principales de los plásticos más comunes en las industrias.

Material plástico	Características	Cumplimiento	Aplicaciones
Polietileno de alta densidad (HDPE)	Resistencia química y a la corrosión Alta resistencia mecánica (alta resistencia al impacto) No absorbe humedad	Cumple con los estándares de la FDA, NSF y USDA	Para la realización de cortes de carnes y pollo
Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW-PE)	Resistencia a bajas temperaturas (bajo cero) Resistencia a la abrasión y agentes químicos corrosivos Liviano e irrompible Baja absorción de agua	Cumplimiento con los requerimientos de la FDA	Mesas de trabajo Bandas transportadoras
Policarbonato	Alta rigidez y resistencia mecánica Resistencia a temperaturas altas de hasta 135°C (Termoplástico)	FDA, NSF y USP	Utensilios como cucharones, escurridores, pinzas, cucharas medidoras, contenedores, etc.
Polipropileno	Resistente a medios ácidos y alcalinos Poca absorción de agua	Cumplimiento con la FDA, NSF y USDA	Contenedores, espátulas, palas, mangos de cuchillo, bandejas, etc.

Tomado de: (Mendoza, 2012)

F. COMPONENTES DEL MATERIAL DE EMPAQUE DE PRODUCTOS ALIMENTICIOS

1. Aluminio

El aluminio es un metal ligero, duro y resistente con una conductividad alta y un aspecto decorativo por lo que es un metal muy utilizado en la industria química y alimenticia. Este metal se encuentra en forma de bauxita comúnmente que es óxido hidratado de aluminio y para obtenerlo se realizan explosiones a cielo abierto. (Cesar, 2011).

2. Colorantes

Sustancias que pueden de teñir fibras vegetales y animales. Son capaces de absorber determinadas longitudes y se fijan en otras sustancias dándoles color de una manera estable ante factores fisicoquímicos como la luz, lavados y agentes oxidantes (Rivera & Milena Benavides, 2017).

Los colorantes deben de tener grupos funcionales llamados cromóforos los cuales son los responsables de que la molécula absorba en la región visible del espectro electromagnético. Se pueden tener moléculas auxocromas conjugadas con los cromóforos para aumentar la intensidad del color proporcionado (Rivera & Milena Benavides, 2017).

Hay dos tipos de colorantes, los naturales y los artificiales. Los colorantes naturales son extraídos de plantas o animales y los artificiales son compuestos orgánicos provenientes de síntesis y se utilizan en su mayoría como antioxidantes (Rivera & Milena Benavides, 2017)

Los colorantes mordentados no tienen el poder de entintar por sí solos, estos tienen que ser tratados con sales metálicas solubles que reaccionen con el material. Esto se utiliza principalmente para los colorantes que se adiciona usando óxidos metálicos como mordiente, especialmente los óxidos de aluminio y cromo por formar precipitados insolubles (Guevara, 2007).

La principal característica de los compuestos mordientes es que intensifican el tinte y aumentan la afinidad de la fibra por el colorante. Además, ayudan a que los colores sean más firmes y resistentes a la luz solar. Estos pueden modificar los colores respecto al brillo y transformando el color original en uno nuevo. Existen de dos tipos, los ácidos y los alcalinos. Los más comunes de tipo alcalino son el alumbre, el hierro, el amoníaco, cenizas y lejías (Guevara, 2007

Se deben tomar en cuenta varios factores como el tono del color, la disolubilidad en el fundido de plástico, la tendencia de recristalización y la autenticidad del plastificante ya que estos pueden influenciarse por los aditivos y materiales de relleno en los parámetros de procesamiento. (Rivera & Milena Benavides, 2017)

La intensidad del color de los pigmentos depende del tamaño y de la forma de las partículas del grado de dispersión en el medio de aplicación y como regla general, las pequeñas partículas forman aglomerados muy estables en el proceso de producción que son muy difíciles de destruir causando tonos de color distintos en el medio de coloración. (Guevara, 2007)

G. RECICLAJE DE RESIDUOS PLÁSTICOS

El aumento del consumo de los plásticos en la sociedad moderna, estimado en 4% anual, se ha desarrollado en paralelo con la investigación tecnológica de estos materiales. A pesar del éxito en el desarrollo tecnológico, no se ha llevado una emparejada investigación en el reciclado de estos productos. Se estima que se recupera o se recicla menos del 15% de los materiales plásticos residuales; los residuos plásticos son difíciles de reciclar por la necesidad de separarlos por resinas para poder ser utilizados en los procesos. Según Pellegrini, de las 20 a 24 mil toneladas de residuos plásticos que se p producen diariamente en

Venezuela, solo entre el 10 y 15% se reciclan, y menos de un quinto del total recibe una disposición final adecuada. (Pellegrini, 2009) (Careaga, 1993)

La disposición final de plásticos en vertederos o rellenos sanitarios tiene un impacto ambiental considerable. Debido a que estos residuos no se descomponen, con el paso del tiempo los aditivos y estabilizadores que contienen pueden pasar a formar parte de los lixiviados, ocasionando un peligro para los mantos acuíferos (Careaga, 1993).

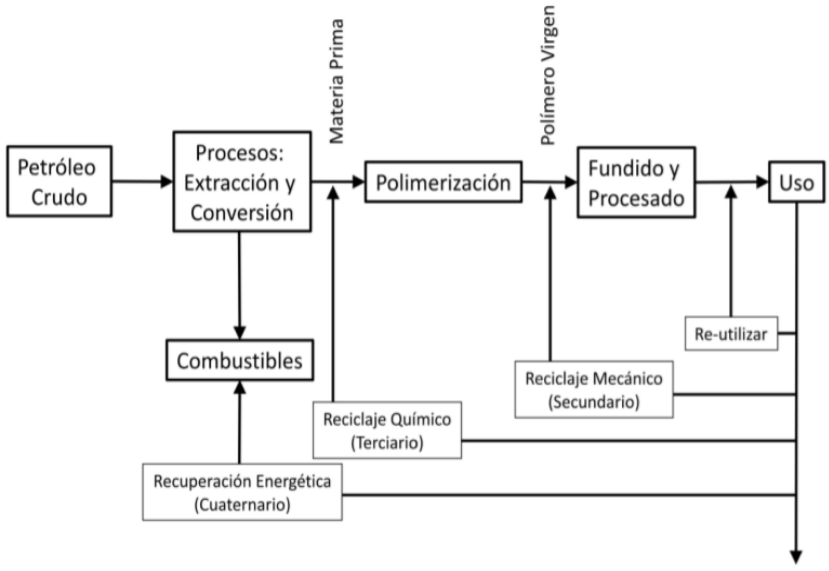
La reutilización directa de los materiales plásticos está limitada al 1-2%, debido a los cada vez más altos requerimientos de calidad de los productos. Además, el plástico obtenido de los envases alimenticios y embalajes no puede emplearse en la producción de nuevos envases para alimentos por razones sanitarias, y se debe usar para otras aplicaciones. Gran parte de los materiales de empaque presentes en los desechos es muy difícil de recuperar por su composición tipo film. (Arandes, Bilbao, & López Valerio, 2004).

El valor del reciclaje de los desechos plásticos debe contemplarse desde un punto de vista estratégico que va más allá de la situación actual del mercado del petróleo. En el proceso de transformación del crudo en productos terminados, la fabricación de productos plásticos contempla un 4% de la fracción del crudo. El incremento de la producción de plásticos implica la disminución en la producción de combustibles, o aumentar la importación y destilado de crudo. Visualizando la situación desde este punto, la importancia del reciclaje de plástico obtiene una dimensión mayor que la que presentan otros materiales, justificando los esfuerzos por su reciclado (Arandes, Bilbao, & López Valerio, 2004).

1. Tipos de reciclaje

Existen diversos métodos para el tratamiento de los desechos plásticos. Estos se clasifican en primario, secundario, terciario y cuaternario.

Figura 5. Diagrama de los tipos de reciclaje para residuos plásticos



Tomado de: (Al-Salem, Lettieri, & Baeyens,, 2010)

f. Reciclaje primario

Las operaciones mecánicas para la obtención de un producto con características similares que el producto original componen el tratamiento primario. Estos procesos aplican para el aprovechamiento de recortes de las plantas de producción. Representan un porcentaje reducido de los residuos plásticos. Este proceso también es llamado reciclaje mecánico. Está compuesto por la separación, granulado, limpieza y paletizado. (Arandes, Bilbao, & López Valerio, 2004)

g. Reciclaje secundario

El tratamiento secundario de los residuos plásticos consiste en la fusión. En estos procesos los desechos son convertidos en productos con distinta forma y distintas aplicaciones que la materia prima utilizada (Arandes, Bilbao, & López Valerio, 2004).

El reciclaje secundario de plásticos es mejor aplicado cuando sólo se utiliza un tipo de polímero. Si se utiliza una mezcla compleja, la aplicación de este proceso se volverá muy complicado. Para evitar que se torne complejo el proceso es necesario que los procesos de preparación de la materia prima sean aplicados correctamente para obtener un producto limpio y homogéneo.

A pesar de ser un proceso en apariencia simple y "verde", tiene varias complicaciones. El proceso de reciclaje mecánico enfrenta el problema de la degradación y lo heterogéneo de los desechos. Otra complicación del proceso es que en la mayoría de las ocasiones no es costo-eficiente por la necesidad de limpieza. Un ejemplo de esto es el proceso Klobbie. Este es un proceso que ha tenido mucho éxito a nivel mundial, que incorpora una etapa de extrusión con otra de flujo a baja presión para lograr el moldeo de los residuos plásticos. Para este método es necesaria la separación del insumo en sus diversas resinas para luego mezclarlos de acuerdo con las formulaciones adecuadas al producto final.

Este es un proceso con altos costos por su intensiva mano de obra; pero la alternativa de alimentar la extrusora y el molde con una mezcla de materia prima variable no es factible (Careaga, 1993). (Al-Salem, Lettieri, & Baeyens,, 2010)

h. Reciclaje terciario

Este tratamiento también es llamado tratamiento químico. Estos tipos de reciclaje tienen como objetivo el aprovechamiento integral de los elementos que componen los plásticos, para transformar estos componentes en hidrocarburos que pueden ser utilizados en distintas industrias (Arandes, Bilbao, & López Valerio, 2004).

Se llama reciclaje químico porque produce un cambio de la estructura química de los plásticos utilizados. Por su definición, en este proceso se toman en cuenta métodos de tratamiento como la de polimerización, oxidación parcial, gasificación, hidrogenación, craqueo catalítico, craqueo de vapor, pirólisis, entre otras (Scheirs & Kaminsky, 2006)

i. Hidrólisis

Etimológicamente es la ruptura (lysis) de productos químicos al agregar agua (hidro). Según la definición más sencilla, la hidrólisis consiste en una reacción química en la que el agua rompe los enlaces de la sustancia a la que se le aplica el proceso, en este caso polímeros.

Esta puede realizarse en medio ácido o básico (Phillips, 2018). La hidrólisis con ácido emplea comúnmente ácidos minerales de alta concentración y temperaturas menores a 100°C para poder romper los enlaces de la sustancia (Pulido, 2003). Citando a Delgado (2013) la hidrólisis alcalina es un proceso químico en el que una sustancia álcali sometida a altas temperaturas y presiones considerables que, al disolverse, desintegra el material orgánico (Pulido, 2003).

2. Hidrogenación catalítica

Por definición, la hidrogenación es la inclusión de hidrógeno en los compuestos orgánicos. Para aplicar esta técnica en plásticos se requieren temperaturas de 500°C y presiones de hidrógeno de al menos 200 bar. En estas condiciones, las macromoléculas de los plásticos son separadas causando que cada uno de los fragmentos tenga carga positiva o negativa. Los fragmentos con carga positiva forman enlaces con los hidrógenos. Los principales productos de la hidrogenación son hidrocarburos alifáticos gaseosos y líquidos. Los compuestos anteriormente aromáticos se vuelven cicloalifáticos. (Vélez Bone & Mosquera González, 2011).

La hidrogenación catalítica es una de las vías de reciclaje más utilizadas comercialmente. Un ejemplo del uso de este método se puede observar en la empresa Veba Oel en Alemania. Esta empresa procesa 400 T/año de plásticos obteniendo productos de 60% parafinas, 30% nafta, 9% aromáticos y 1% oleofinas. La rentabilidad de la planta demanda una tasa de al menos $120/T de material plástico tratado (Shelley, Fouhy, & Moore, 1992)

3. Gasificación

La gasificación tiene como productos hidrocarburos y syngas, cuyas cantidades y la calidad de los productos depende del tipo de plástico que se introduzca al proceso. Las condiciones de operación requieren de temperaturas desde 800 a 1600 °C. Este proceso ha llegado a obtener una eficiencia de 60% en la producción de hidrógeno libre, empleando un proceso de gasificación con tecnologías de hierro y acero. El gas de síntesis se puede usar para la producción de hidrocarburos con reactores de Fischer-Tropsch (Achyut, Panda, Singh, & Mishra, 2010).

4. Pirólisis o craqueo

El proceso de pirólisis, o craqueo, se define como la ruptura de las cadenas de polímeros para formar compuestos útiles con menor peso molecular. Este proceso necesita calentar los materiales hasta llevarlos a altas temperaturas en una atmósfera inerte. Los productos de la pirólisis de derivados de los hidrocarburos se pueden utilizar como combustibles o materias primas químicas.

La pirólisis se clasifica según su tiempo de retención y rampa de calentamiento, convencional, rápida o flash, o según el tipo de reacción utilizada, hidrocraqueo, craqueo térmico y craqueo catalítico.

El hidrocraqueo ocurre a condiciones de temperatura y presión moderadas y se realiza mediante un catalizador y la reacción con hidrógeno. Las materias primas utilizadas en este tratamiento de desechos incluyen PE, PET, PS, PVC y mezclas. Los trabajos que se han reportado han empleado este método para la obtención de gasolina de alta calidad. El craqueo catalítico involucra la degradación de polímeros al calentarlos en una atmósfera inerte utilizando un catalizador para realizar la reacción. El proceso de pirólisis térmica realiza el mismo proceso que el craqueo catalítico, pero sin el uso de un catalizador (Panda, Singh, & Mishra, 2010).

5. Reciclaje cuaternario

Uno de los principales métodos de reciclaje de plásticos es la incineración. Esta aplicación se basa en la recuperación de la energía contenida en los plásticos, ya que, por ser derivados del petróleo, contienen elevado poder calorífico por unidad de masa. Para la reducción de dioxinas y furanos en los gases de combustión, los plásticos deben ser incinerados a elevadas temperaturas. La incineración de los plásticos está siendo criticada por varios aspectos. La quema de productos que contienen materiales como PVC producen sustancias tóxicas como ácido clorhídrico, dioxinas y dibencenfuranos (Careaga, 1993).

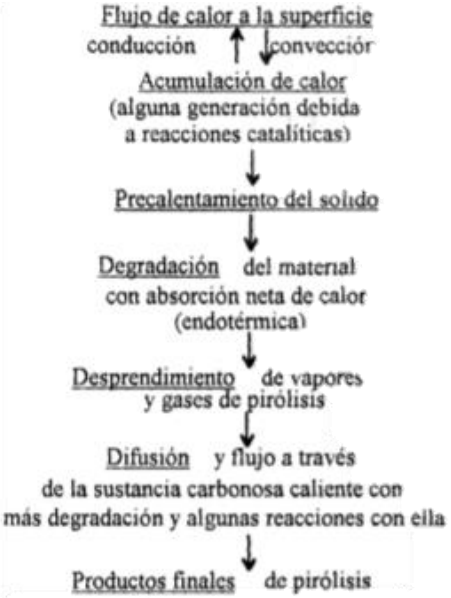
H. PIRÓLISIS

La pirólisis es un proceso endotérmico que requiere gran cantidad de energía al necesitar temperaturas de al menos 350 °C, dependiendo del polímero a degradar. Se han realizado estudios previos de la aplicación de la pirólisis en los que se necesitaron temperaturas de hasta 700 – 900°C. Varios de estos estudios se han realizado para polietileno, poliestireno y polipropileno.

A pesar de esto, pocos son los estudios realizados para el craqueo térmico de compuestos comunes como el policloruro de vinilo, polimetacrilato de metilo, poliuretano y polietilenterftalato, debido a sus altas probabilidades de formación de compuestos tóxicos y corrosivos (Canteros, 2014).

Siguiendo el procedimiento estrictamente, la pirólisis es un proceso que se debe realizar en una atmósfera totalmente inerte. A pesar de esto, en esta descripción entran procesos en los cuales se produce descomposición química por energía térmica de materiales en contacto con aire, gases inertes o los gases de pirólisis.

Figura 6. Descripción gráfica de un proceso de pirólisis



La pirólisis se considera como un proceso complejo. La comprensión de lo que ocurre con los materiales durante la pirólisis supone la fragmentación de las moléculas por la cantidad de energía cinética entregada, dando lugar a reacciones primarias. Los productos resultantes de estas primeras reacciones también pueden fragmentarse al sufrir reacciones secundarias. La cantidad de productos primarios y secundarios se dicta según las condiciones en las que se lleva a cabo el proceso. Para la obtención de char, el proceso se realiza con largos tiempos de residencia y bajas temperaturas. Si el proceso se realiza a altas velocidades el porcentaje de líquido en el producto será mayoritario. Si la temperatura del proceso es muy elevada, el *syngas* será el producto principal. Además de estas tres variables generales que se conocen en el proceso de pirólisis, hay varias otras que también se deben tomar en cuenta.

El proceso de pirólisis puede dividirse por tipos de operación: pirólisis convencional, pirólisis rápida y pirólisis instantánea. La diferencia se debe a la temperatura de operación, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia y productos mayoritarios. La dependencia de la composición de los productos es en función de la temperatura (Castells y Velo, 2012).

Cuadro 2. Comparación de los procesos de pirólisis según las condiciones de operación

Proceso	**Temperatura (°C)**	**Velocidad de calentamiento (°C/s)**	**Tiempo de residencia**	**Producto mayoritario**
Convencional	500	2	Gases: 5s Sólido: horas	Char y condensables
Rápida	400 a 800	>2	Gases: >2 s	A temperaturas moderadas, 500 °C, condensables
Instantánea	>600	>200	Gases: <0.5 s	Gases e hidrocarburos ligeros

Tomado de: (Castells y Velo, 2012)

La composición de la materia prima es una de las variables más importantes a considerar. La cantidad de *char*, *syngas* y *plastic oil* depende de las propiedades de la materia prima y la proporción de cada plástico en la mezcla utilizada. Se ha mostrado en distintas investigaciones que algunos plásticos tienden más hacia cierto tipo de productos. Este comportamiento se ha observado en el polietileno, una mezcla con un porcentaje elevado de este polímero aumenta la obtención de *char* (Chaparro). De igual forma, la composición química de los productos también es afectada por las propiedades de los materiales utilizados (Kuester, 1980)

Como variable indirecta se tiene la humedad, por estar relacionada con la temperatura. La cantidad de agua que tenga la muestra restringirá la temperatura alcanzable pues el agua contenida absorberá el calor. De esta forma una materia prima húmeda inclinará el porcentaje de obtención en los productos hacía el *char* (Gray, Corcoran, & Gavalas, 1985).

El tamaño de partícula y la cantidad de muestra son variables que han sido estudiadas. La cantidad de material introducido en el proceso afecta la pirólisis principalmente en la transferencia de masa y energía. Por estas razones este es un factor que se debe tomar en cuenta para diseñar un reactor de pirólisis que sea adecuado para la cantidad de materia prima que se utilizará (Devesa, 1990). El tamaño de partícula también influye en la transferencia de masa y energía de la muestra, pero esta debido al aumento o reducción del área de contacto.

El proceso de pirólisis también puede ser afectado por la atmósfera de reacción. Es claro que la cantidad de variación que se tenga en el proceso estará afectada por la reactividad de la atmósfera. Usualmente se utilizan gases inertes como medio de transporte de los gases de pirólisis. También se han utilizado vapores condensables como metanol o etilenglicol y atmósferas reducidas.

Los estudios realizados con estos tipos de atmósfera es que no afectan las reacciones, pero dificulta el análisis de los productos líquidos debido a que es necesario separarlos de los gases que se condensaron (Beaumont & Schwob, 1984).

Para la pirolisis se debe tomar en cuenta los beneficios y modificaciones al proceso que tienen los catalizadores. Estos pueden ser ácidos o básicos, dependiendo del método seleccionado y de los resultados deseados. Se ha comprobado que los catalizadores reductores aumentan el porcentaje de obtención de gases y disminuyen la cantidad de líquidos en el producto, esto en un estudio de pirólisis de cáscara de almendra. Los catalizadores ácidos, en cambio, presentan una disminución en la producción de gases, manteniendo constante la cantidad de líquidos y sólidos a obtener del proceso (Verdú, 1988).

1. Pirólisis de polímeros

Los procesos químicos que ocurren durante la pirólisis de un polímero dependen de la temperatura, rampa de calentamiento, atmósfera donde está ocurriendo la reacción, etc. Las reacciones de pirólisis para polímeros ocurren por lo general en un rango de temperaturas entre 500°C-800°C, ya que aquellas transformaciones químicas que ocurren entre 100°C y 300°C se les denomina degradaciones térmicas no pirólisis.

Usualmente estas reacciones se realizan con un gas inerte o presión reducida para eliminar reacciones con la atmósfera ambiental. La combinación de estas condiciones define las reacciones químicas que suceden en el proceso.

2. Reacciones en la pirólisis

En un caso ideal la pirólisis consiste en una única reacción de descomposición a elevada temperatura. Esto genera moléculas más pequeñas obtenidas como fragmentos del compuesto inicial. Pero en general, se dan diversas reacciones de pirólisis que ocurren simultánea o secuencialmente. En el caso de los polímeros ocurren reacciones tanto en las moléculas grandes como en las pequeñas e incluso los productos pueden reaccionar entre ellos generando nuevos compuestos. También pueden formarse productos complejos de condensación y el sólido residual conocido como char puede contener moléculas más largas que el polímero inicial. El resultado de una pirólisis de polímeros es una secuencia de reacciones químicas generando nuevos compuestos. Las reacciones más comunes son:

j. Reacción de rearreglo

Un grupo migra de un átomo a otro en la misma molécula. Durante el proceso de pirólisis puede ocurrir varios rearreglos debido a la influencia del calor que permite la formación de radicales que posteriormente realiza el proceso de migración.

k. Reacción de eliminación

Los fragmentos de una molécula se remueven y forman una nueva molécula. Primero ocurre una iniciación seguida de una propagación y terminación. Los rompimientos de cadena o escisiones también ocurren siguiendo este mecanismo.

l. Oxidaciones y reducciones

Estas reacciones pueden ocurrir como una reacción secundaria al proceso inicial. Se consideran este tipo de reacciones algunos sustituciones de radicales libres que involucran la transferencia de átomos de hidrógeno. Puede ocurrir una oxidación debido a la presencia intencional o accidental de oxígeno.

m. Sustituciones y adiciones

Este tipo de reacciones pueden ocurrir al inicio o como resultado de la interacción de moléculas formadas en previas reacciones durante la pirólisis. Son comunes las sustituciones nucleofílicas, sustituciones de radicales libres y adiciones Diels-Alder.

n. Combinación de reacciones

Calentar los polímeros a temperaturas relativamente bajas entre 100°C y 300° puede conducir a reacciones con eliminación de moléculas pequeñas como agua y ácido clorhídrico mientras la estructura principal se mantiene intacta.

Al utilizar temperaturas comunes de pirólisis entre 500°C y 800°C ocurren rápida o simultáneamente las reacciones antes descritas. Es difícil definir cuales reacciones ocurren debido que estas no ocurren idealmente en la fase gaseosa. Algunos procesos de pirólisis ocurren en la fase de condensados y

allí la interacción entre moléculas es inevitable, causando múltiples reacciones. Otros problemas incluyen las reacciones causada por la presencia intencional o no de gases como oxígeno e hidrógeno que pueden estar presentes durante el calentamiento. Incluso el material puede estar en contacto con superficies no inertes que puedan presentar efectos de catalizadores. Todos estos fenómenos deben considerarse de acuerdo con la aplicación del proceso de pirólisis. (Moldoveanu, 2005)

3. Aplicación de la pirólisis analítica para su escalamiento

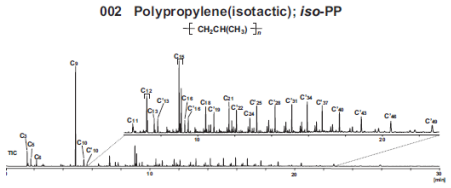
Se han realizado varios estudios que involucran la utilización de una pirólisis a escala laboratorio para modelar y escalar a un proceso industrial. En el caso de los polímeros, algunos procesos de pirólisis buscan regenerar los monómeros u obtener moléculas útiles. La descomposición térmica de estos materiales puede formar compuestos con alto poder calorífico y compuestos hidrocarbonados de alto valor comercial. También se ha investigado la utilización de catalizadores o condiciones específicas durante la descomposición térmica para generar compuestos diferentes, útiles y maximizando su concentración. (Moldoveanu, 2005)

4. Pirólisis de polipropileno

El polipropileno es un polímero común obtenido por una polimerización catalizada. Puede fabricarse en tres tipos principales según su tacticidad: isotáctico, atáctico y sindiotáctico. Se han realizado diversos estudios de la pirólisis de polipropileno a diferentes atmósferas y con catalizadores. Según Tsuge, Ohtani y Watanabe (2011) los compuestos principales obtenidos por la pirolisis de polipropileno isotáctico se muestran en el cromatograma de la Figura 7.

La presencia de varios picos con una intensidad relativamente igual sugiere que el mecanismo de pirólisis inició con una escisión aleatoria. La presencia de alcanos, alquenos y dienos demuestra que este proceso fue finalizado por una reacción de desproporción. El pico con mayor intensidad relativa es el 2,4-dimetil-1-hepteno, probablemente porque es el compuesto más estable en las condiciones de pirólisis utilizadas en esa experimentación. (Moldoveanu, 2005)

Figura 7. Cromatograma obtenido de la pirólisis de polipropileno a 600°C.



Peak Notation	Assignment of Main Peaks	Molecular Weight	Retention Index	Relative Intensity
C3	propylene	42	295	14.6
C5	*n*-pentane	72	500	10.0
C6	2-methyl-1-pentene	84	584	8.1
C9	2,4-dimethyl-1-heptene	126	844	100.0
C10	2, 4, 6-trimethyl-1-heptene	140	895	6.8
C10'	2, 4, 6-trimethyl-1, 6-heptadiene	138	916	2.6
C11	4, 6-dimethyl-2-nonene (meso form)	154	996	2.9
C12	2, 4, 6-trimethyl-1-nonene (meso form)	168	1083	9.5
	2, 4, 6-trimethyl -1-nonene (racemic form)	168	1087	3.3
C13	2, 4, 6, 8-tetramethyl-1-nonene (meso form)	182	1132	4.0
C13'	2, 4, 6, 8-tetramethyl-1, 8-nonadiene (meso form)	180	1156	4.1
C15	2, 4, 6, 8-tetramethyl-1-undecene (isotactic)	210	1312	18.5
	2, 4, 6, 8- tetramethyl-1-undecene (heterotactic)	210	1320	2.6
	2, 4, 6, 8- tetramethyl-1-undecene (syndiotactic)	210	1329	10.6
C16	2, 4, 6, 8, 10-pentamethyl-1-undecene (isotactic)	224	1356	3.4
C16'	2, 4, 6, 8, 10-pentamethyl-1, 10-undecadiene (isotactic)	222	1385	3.9
C18	2, 4, 6, 8, 10-pentamethyl-1-tridecene (isotactic)	252	1531	6.4
C19'	2, 4, 6, 8, 10, 12-hexamethyl-1, 12-tridecadiene (isotactic)	264	1605	5.4
C34'	2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22-undecamethyl-1,22-tricosadiene (isotactic)	476	3397	9.7

Tomado de: (Shin, Hajime, & Chuichi, 2011)

I. PRODUCTOS DE PIRÓLISIS

1. Líquido

El líquido extraído después de la pirólisis es conocido como líquido pirolítico o bio-oil y consiste en una mezcla de varios compuestos que depende de la materia prima utilizada para el proceso. El líquido tiende a volverse viscoso debido al envejecimiento, ya que se producen numerosos cambios físicos y químicos con la consiguiente pérdida de materias volátiles. Sin embargo, el proceso de envejecimiento puede ralentizarse almacenándolos en lugares frescos.

El bio-oil al ser un producto líquido resulta fácil de almacenar y transportar. Dependiendo su procedencia, se puede considerar como un combustible renovable que se puede usar para producir electricidad o calor, como combustible en vehículos o para obtener compuestos químicos. El uso más simple aparentemente parece ser combinarlo con combustibles fósiles para usarlo como combustible de transporte, aunque previamente sería necesario mejorar las características de éste. Para ello se recurre a la catálisis, bien mediante hidrogenación o mediante el uso de zeolitas. (Cortázar, 2014)

El líquido de la pirólisis de desechos plásticos contiene algunas impurezas. tales como azufre, cloro, residuos sólidos, humedad y ácidos. La presencia de estas impurezas no solo disminuye la calidad del aceite líquido, sino que también limita sus aplicaciones comerciales. Por lo tanto, el aceite líquido requiere postratamiento que variará dependiendo de la composición de materia prima. (Miandad, Barakat, & Aburiazaiza, 2016)

2. Sólido (Char)

Se trata de un producto de grano fino y poroso similar en apariencia al carbón vegetal. Se produce a partir de la transformación de distintos tipos de biomasa mediante el procedimiento de pirolisis, que consiste en la descomposición térmica de la materia orgánica bajo un aporte de oxígeno limitado (T. C., 2010).

Normalmente, la superficie del biochar posee una carga negativa, por lo que puede facilitar la atracción electrostática de compuestos orgánicos cargados. La sorción de contaminantes orgánicos del agua en el biochar se produce debido a su gran área superficial y microporosidad (Yu *et al*, 2009; Yang *et al*, 2010; Lou *et al.*, 2011). Los Biochar producidos a temperaturas mayores a 400°C son más eficaces para la adsorción de contaminantes orgánicos debido a su gran área superficial y el desarrollo de sus microporos. En general, los biochar producidos a temperaturas más altas exhiben una mayor eficiencia de adsorción para la remediación de contaminantes orgánicos en el suelo y el agua. Esto es probablemente debido a la alta área superficial y microporosidad de biochar (T. C., 2010).

La temperatura en el proceso de generación de Biochar juega un papel muy importante, ya que al producirlo a temperaturas muy altas se puede generar una mayor cantidad de gases volátiles y muy poca área superficial, por lo que el rendimiento sería prácticamente nulo, por otro lado, a temperaturas que se encuentran dentro de los 400 y 600°C se ha encontrado que poseen un rendimiento constante, debido a que se genera un área superficial considerable y la capacidad de adsorción no se ve afectada (T. C., 2010).

El rendimiento en peso del biocarbón, depende de las condiciones y los parámetros de operación del proceso de pirólisis, de la temperatura final y de la composición de la biomasa. Este rendimiento disminuye rápidamente con el aumento de la temperatura y la velocidad de calentamiento de la biomasa, al favorecerse de este modo la generación de gases y la formación de un carbón muy reactivo, de alta porosidad, que evoluciona hacia la formación de compuestos volátiles. En estas condiciones de rápido calentamiento, se ha comprobado además, que se produce un incremento en la formación de alquitrán. Otro de los factores que afecta al rendimiento en biocarbón es la proporción entre los componentes de la biomasa (T. C., 2010).

J. ANÁLISIS TÉRMICO DE POLÍMEROS

El análisis térmico de un polímero se realiza para estudiar su composición y estructura. Se evalúan propiedades físicas de una sustancia o de sus productos de reacción como una función de la temperatura. Brinda información acerca de la descomposición y resistencia de estos materiales al calentamiento. Las principales técnicas incluyen:

1. Análisis termogravimétrico

Se mide continuamente el peso de una muestra de polímero conforme es calentado en aire o una atmósfera inerte. La pérdida de peso ocurre inicialmente por la evaporación de compuestos volátiles (agua y solventes) y después por la descomposición y eliminación de fragmentos volátiles del polímero. Permite establecer la estabilidad térmica del material.

2. Termogravimetría diferencial

Se calienta continuamente una muestra del polímero junto a un material inerte de referencia, como alúmina, para medir la temperatura de los dos materiales simultáneamente. Cuando ocurre un proceso endotérmico o exotérmico en el polímero, su temperatura disminuye o aumenta en comparación a la del material inerte y esto permite establecer la temperatura de transición vítrea.

3. Calorimetría diferencial de barrido

Se calienta una muestra del polímero y de material inerte por separado a temperaturas constantes mientras se mide el diferencial de energía requerido para obtener la misma temperatura. Graficando la derivada de este diferencial de energía en función de la temperatura permite detectar los proceso exotérmicos y endotérmicos similares a la termogravimetría diferencial.

4. Análisis termo mecánico

Esta técnica se basa en el cambio de volumen o módulo de tracción del material para indicar transformaciones como una función del incremento de temperatura. Detecta transiciones térmicas.

5. Análisis de gas evolucionado

Se calienta una muestra para estudiar la evolución de los gases volátiles en función de la temperatura. Se combina con múltiples técnicas para proveer más información de los compuestos, tales como la termogravimetría y la espectrometría de masas.

6. Pirólisis analítica

El proceso de pirólisis es una transformación química inducida por energía térmica al calentar un compuesto a una temperatura elevada. Esto causa la descomposición del compuesto en moléculas más pequeñas. La pirólisis analítica caracteriza un material o proceso químico basado en los resultados de las reacciones de degradación térmica involucradas. La pirólisis analítica tiene ventajas significativas ya que requiere poca muestra para los análisis, tiene excelente reproducibilidad y es muy sensible por ejemplo a un sistema de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas para analizar su composición. Se incluye como una técnica especial de descomposición térmica porque estudia la formación de nuevos productos a partir del calentamiento de polímeros. (Moldoveanu, 2005)

K. FACTORES CINÉTICOS EN LA FORMACIÓN Y DESCOMPOSICIÓN DE POLÍMEROS

1. Velocidad de reacción

La velocidad de reacción de un proceso químico donde A es el reactivo y B el producto se define como la variación de la concentración de alguno de los dos compuestos en el tiempo.

Ecuación 1.

$$-\frac{\mathrm{d[A]}}{\mathrm{d\,t}} = \frac{\mathrm{d[B]}}{\mathrm{d\,t}}$$

Donde [A] y [B] corresponden a las concentraciones molares en algún momento específico del tiempo de la reacción.

2. Reacciones de primer orden

Si la velocidad de reacción depende linealmente del cambio de concentración de un reactivo A, se denomina de primer orden (n=1) y la velocidad de reacción se expresa:

Ecuación 2.

$$-\frac{\mathrm{d[A]}}{\mathrm{d\,t}} = \mathrm{k[A]}$$

Donde *k* es la constante de reacción dependiente de la temperatura y expresada en s^{-1}. Si la reacción se realiza en condiciones isotérmicas, *k* es constante.

3. Reacciones de segundo orden

Si la velocidad de reacción depende simultáneamente de dos especies reactivas, se denominan de segundo orden (n=2) y la velocidad de reacción se expresa:

Ecuación 3.

$$-\frac{\mathrm{d[A]}}{\mathrm{d\,t}} = \frac{\mathrm{d[B]}}{\mathrm{d\,t}} = \mathrm{k[A][B]}$$

Donde *k* se expresa en $mol^{-1}\ s^{-1}$, diferentes unidades a la utilizada en una reacción de primer orden.

4. Reacciones de orden n

La velocidad de reacción se expresa con la siguiente ecuación en donde *n* corresponde al orden de reacción que puede ser un valor entero o una fracción. (Moldoveanu, 2005)

Ecuación 4.

$$-\frac{d[A]}{d\,t} = k[A]^n$$

a. Dependencia de la constante de reacción con la temperatura

Asumiendo que las reacciones químicas solo pueden suceder cuando existe una colisión entre moléculas, se obtiene un estado intermediario en donde se forma un complejo activado.

La velocidad de reacción en este caso dependerá de la diferencia de energía entre los reactivos y el complejo activado conocida como energía de activación (E_a). También dependerá de la frecuencia de las colisiones entre moléculas que puede expresarse con un factor de frecuencia (A). Basado en estos supuestos puede expresarse la constante de reacción *k* con la ecuación de Arrhenius según:

Ecuación 5.

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

Donde R es la constante ideal de los gases. Esta ecuación expresa la dependencia de la constante de reacción con la temperatura, en donde incluso los factores A y E_a pueden ser también dependientes de este parámetro. (Moldoveanu, 2005)

b. Factores cinéticos en reacciones de pirólisis

En las reacciones de pirólisis es difícil monitorear la variación de la concentración molar de reactivo para su utilización como parámetro en el desarrollo de la cinética de reacción. Es más conveniente monitorear la masa de la muestra reactiva.

Por ejemplo, para una reacción de primer orden al multiplicar la Ecuación 2 por el volumen y el peso molecular de la sustancia reactiva A de la Ecuación 6 se obtiene:

Ecuación 6.

$$W = [A]\,V\,M$$

Ecuación 7.

$$-\frac{dW}{d\,t} = kW$$

Donde W es la masa de la muestra reactiva en un tiempo de la reacción. Este tipo de ecuación permite a aproximación adecuada para la cinética de diversos procesos pirolíticos. Integrando se obtiene que Wo es la masa de la muestra inicial en el tiempo inicial (t=0).

Ecuación 8.

$$\ln\frac{W}{W_o} = -kt$$

En algunos casos, el proceso de pirólisis deja un residuo de muestra sin descomponer (Wf) que debe modificarse resultando en:

Ecuación 9.

$$-\frac{dW}{d\,t} = k(W - W_f)$$

Si la ecuación no es de primer orden, puede modificarse la siguiente ecuación resulta para su aplicación a una reacción de orden *n:*

Ecuación 10.

$$-\frac{dW}{d\,t} = k(W - W_f)^n$$

El orden de reacción *n* no es necesariamente un valor entero y pueden aplicarse otras relaciones para relacionar parámetros distintos a la masa reactiva como la conversión o la fracción de masa residual.

Cuando el proceso de pirólisis no ocurre en fase gaseosa, las ecuaciones deducidas anteriormente pueden presentar mayor error e incluso resultados incorrectos. Si la muestra utilizada en el proceso de pirólisis es un sólido, puede describirse su cinética de reacción con algunos modelos empíricos desarrollados que permitan adaptarse a los datos experimentales.

La dependencia de la temperatura es importante en estos procesos puede incluirse en la constante de reacción resultando en una expresión general para un reacción de pirólisis basada en el peso.

Ecuación 11.

$$-\frac{dW}{d\,t} = A\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)W$$

Conociendo los valores de A, E_a y T se puede integrar para obtener la pérdida de masa del reactivo en un tiempo determinado. Algunos valores de estas constantes para polímeros comunes a 350°C se presentan en la siguiente Figura 8.

El factor de frecuencia depende de la exponencial de la entropía de activación según:

Ecuación 12.

$$A = \left(\frac{k_B T}{h}\right)e^{\Delta S/R}$$ (Ecuación 12)

Figura 8. Valores de la energía de activación y factor de frecuencia a 350°C para algunos polímeros comunes.

Polymer	Activation energy $E^{\#}$ kcal/mol	Frequency factor $A\ s^{-1}$	Rate at 350° C weight %/min.
poly(methyl methacrylate)	32-55	$1.5\ 10^{8}$	5.2 - 200
poly(methyl acrylate)	37	$1.6\ 10^{10}$	10
poly(α-methylstyrene)	58-65	$8.5\ 10^{18}$	228
poly(*m*-methylstyrene)	59	$7.5\ 10^{16}$	0.9
polystyrene	45	$2.4\ 10^{11}$	0.235
poly(isobutylene)	52	$7\ 10^{14}$	2.4
polypropylene	59	$5.75\ 10^{15}$	0.069
polyethylene (linear)	65	$4.3\ 10^{16}$	0.004
polyethylene (branched)	70	$4.8\ 10^{18}$	0.008
poly(vinylcyclohexane)	52	$1.3\ 10^{14}$	0.450
polytetrafluoroethylene	80	$3.9\ 10^{18}$	$2\ 10^{-6}$
poly(trifluorostyrene)	67	$1.3\ 10^{20}$	2.4
poly(trifluorochloroethylene)	50	$1.2\ 10^{13}$	0.2
poly(trifluoroethylene)	53	$1.3\ 10^{13}$	0.02
poly(vinylidene fluoride)	48	$2.3\ 10^{11}$	0.02
poly(*p*-xylylene)	76	$1.5\ 10^{20}$	0.002
polybenzyl	53	$3.9\ 10^{12}$	0.006
poly(N-*p*-chlorophenylmaleimide)	52	$7.6\ 10^{8}$	$2.9\ 10^{-6}$
poly(N-phenylmaleimide)	45	$7.2\ 10^{16}$	$3.5\ 10^{4}$
poly(N-*p*-nitrophenylmaleimide)	33	$1.5\ 10^{12}$	$2.4\ 10^{4}$

Tomado de: (Moldoveanu, 2005)

L. TÉCNICAS DE ANÁLISIS QUÍMICO

1. Cromatografía

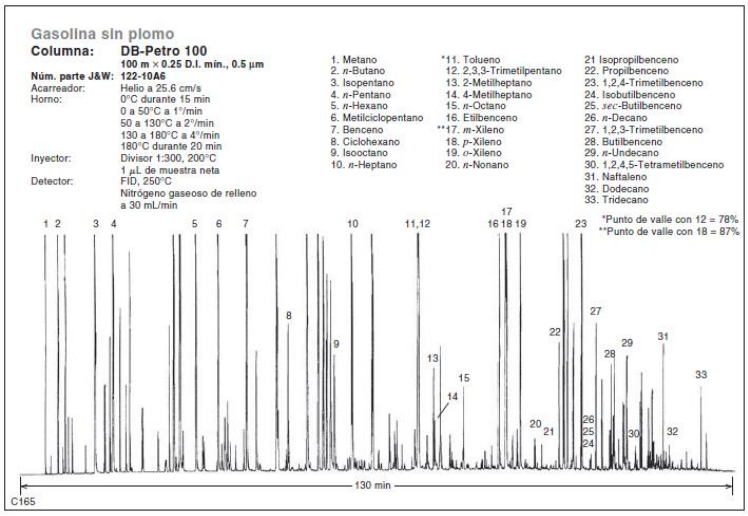
a. Cromatografía de gases

La cromatografía de gases (GC) es una técnica de separación en la cual la muestra es volatilizada (muestras líquidas) y luego inyectada en la parte superior de una columna cromatográfica. Se utiliza un gas inerte acarreador (helio, argón, nitrógeno e hidrógeno) como fase móvil que fluye para producir una elución. Esta fase móvil no interactúa con las moléculas del analito, únicamente lo transporta a lo largo de la columna. Frecuentemente la elección del gas depende del tipo de detector a utilizar (Skoog *et. al.*, 2015).

La cromatografía de gases de divide en: gas-líquido (GLC) y gas-sólido (GSC). La cromatografía gas-líquido o de partición, se basa en una fase móvil gaseosa por la cual se distribuye el analito y una fase líquida estacionaria sobre un sólido de retención. Esta es la más importante y se utiliza en forma de columna capilar. La cromatografía gas-sólido también conocida como de adsorción, se basa en una fase sólida estacionaria para la retención de los analitos por adsorción física (Christian, 2009).

En esta técnica el factor más importante es la selección de una columna adecuada para realizar la separación particular de la muestra que se desea experimentar. El intercambio de componentes de la muestra se ve afectado por la naturaleza de las fases líquida y sólida, la solubilidad de la muestra y la polaridad de la fase estacionaria. La detección de los analitos ocurre cuando estos salen por la columna. Los tiempos de retención (tiempo en minutos desde la inyección de la muestra hasta el registro en el cromatógrafo) de cada uno de los analitos se utilizan para su identificación cualitativa. La medición cuantitativa se da por las áreas de los máximos (Christian, 2009).

Figura 9. Cromatograma de gases para una mezcla compleja

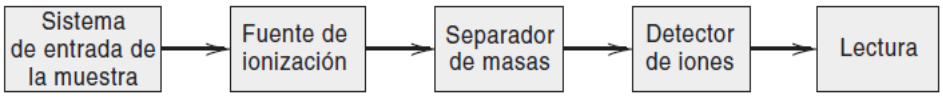


Tomado de: (Christian, 2009)

b. Espectrometría de masas

Es una herramienta analítica muy importante debido a su versatilidad para la identificación de compuestos desconocidos a partir de su masa molecular, composición elemental y estructura química. Es una herramienta cuantitativa que es capaz de determinar casi todos los elementos presentes en la tabla periódica. También proporciona información de la estructura de moléculas orgánicas, inorgánicas y biológicas y la composición cualitativa y cuantitativa de mezclas complejas (Skoog *et. al.*, 2015).

Figura 10. Diagrama del proceso de análisis de un espectrómetro de masas



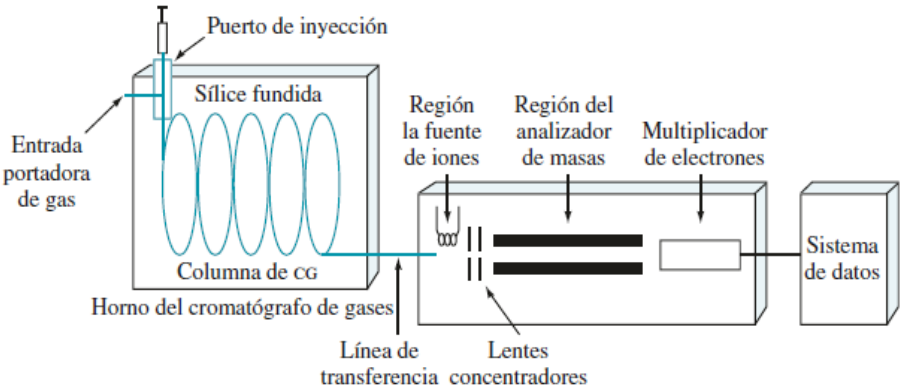
Tomado de: (Christian, 2009)

Esta técnica permite producir, separar y detectar iones en fase gaseosa. La muestra se introduce al equipo y se calienta hasta 300 °C para evaporarse y ser arrastrada a una fuente de ionización. Los iones son separados por aceleración en un separador de masas de acuerdo con las relación masa-carga de los iones (Christian, 2009).

c. Cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS)

La cromatografía de gases es de las técnicas más versátiles en los laboratorios para la determinación de compuestos orgánicos. Con esta técnica se puede realizar la separación de mezclas muy complejas al unirse a la espectrometría de masas utilizando un espectrómetro de masas directamente en el cromatógrafo. Esto permite una mayor sensibilidad dando como resultado un sistema analítico muy importante (Christian, 2009).

Figura 11. Esquema de un GC-MS capilar típico



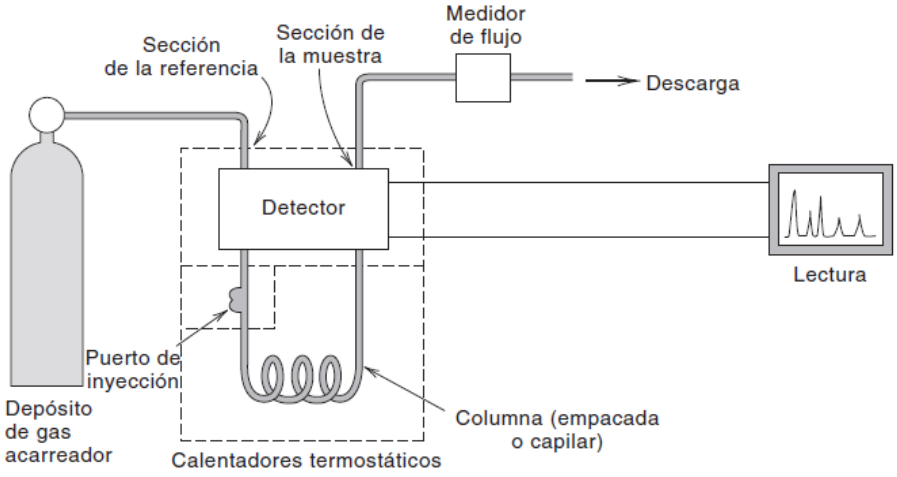
Tomado de: (Skoog *et. al.*, 2015)

El efluente de la cromatografía de gases se dirige al detector de espectrometría de masas para que las moléculas la muestra sean ionizadas y fragmentadas en el gas y posteriormente analizadas y detectadas. El espectrómetro escanea repetidamente la masa de cada compuesto indicando espectros de masa a partir de la relación masa-carga. Un espectro muestra las especies que eluyeron en un tiempo definido (Skoog *et. al*., 2015).

1) Cromatógrafo de gases

Este equipo consiste en varias partes que permiten la funcionalidad completa de la técnica. Consta de la fase móvil el cual es gas transportador contenido en un depósito o tanque presurizado, reguladores de flujo del gas, cámaras de inyección de la muestra que fluyen en la corriente de gas a partir de calentadores, una fase estacionaria, la columna a temperatura apropiada de acuerdo con la secuencia programada, detector de los componentes que eluyen de la columna, y el dispositivo que indica la señal proporcional en magnitud a la cantidad de cada componente (Skoog *et. al*., 2015).

Figura 12. Esquema de un cromatógrafo de gases



Tomado de: (Christian, 2009)

2) Columna y hornos de columna

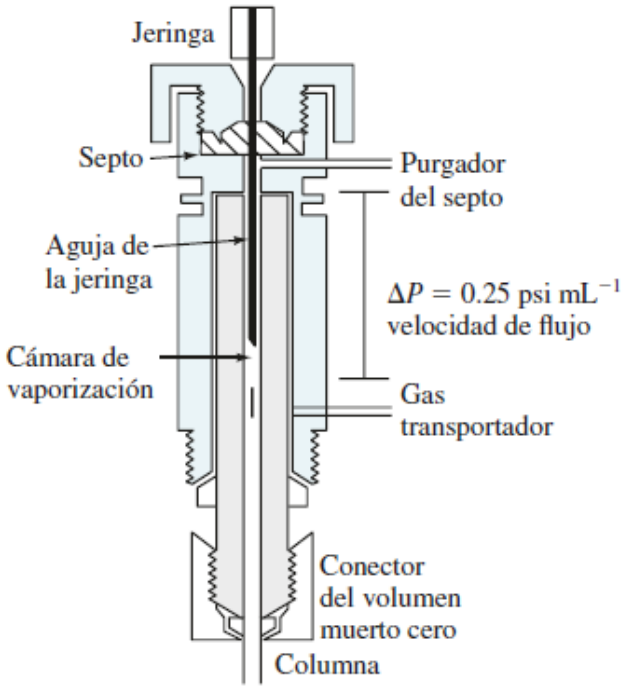
Los dos tipos de columna utilizados en cromatografía de gases son: empacadas y capilares. En el pasado se utilizaban las columnas empacadas, pero actualmente han sido sustituidas por las columnas capilares que son más eficientes y rápidas. La longitud de las columnas puede variar desde 2 hasta más de 60 metros. Pueden estar fabricadas de vidrio, sílice fundido o acero inoxidable. Su ajuste en el horno ocurre por su arreglo como bobinas con diámetros de 10 – 30 cm (Skoog *et. al*., 2015).

La variación de temperatura de la columna debe controlarse con precisión por lo que normalmente esta se aloja en hornos de temperatura regulada. La temperatura a la cual se va a utilizar la columna depende de la temperatura de ebullición de la muestra que se va a separar y el grado de separación que se desea. Cuando se tiene un intervalo de ebullición amplio, se utiliza una programación de temperatura con la cual la temperatura incrementa continuamente conforme avanza la separación (Skoog *et. al*., 2015).

3) Inyección de la muestra

El modo estándar para las columnas empacadas es la inyección directa. Para la inyección de muestras es necesario el uso de jeringas o microjeringas hipodérmicas a través de un puerto septum de goma de silicón o hule autosellante. El puerto de inyección, la columna y el detector deben estar a una temperatura mayor a la temperatura de ebullición de la muestra, 50 °C, para vaporizarla instantáneamente y barrerla hacia la columna. Generalmente se inyectan microlitros de muestra líquida (0.1 – 10 µL) y un orden superior para muestras gaseosas (1 – 10 mL). En el caso de muestras gaseosas suelen utilizarse jeringas herméticas (Christian, 2009).

Figura 13. Vista transversal de un inyector directo para cromatografía de gases

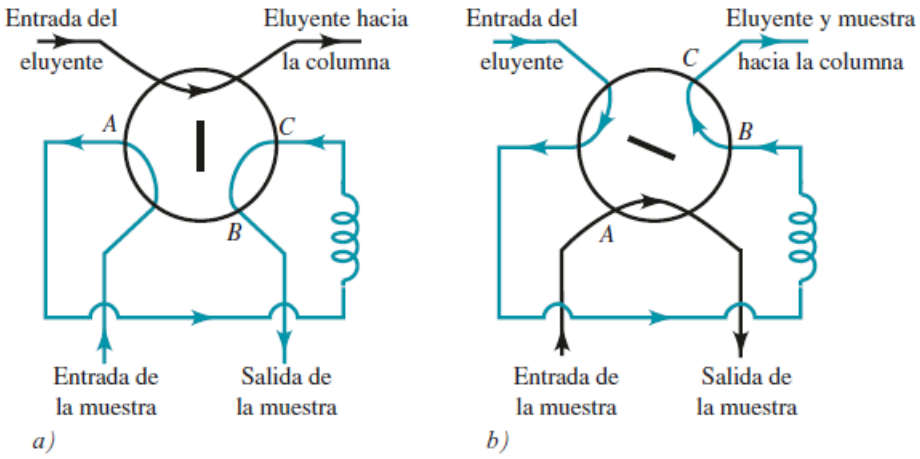


Tomado de: (Skoog *et. al.*, 2015).

4) Muestreadores e inyectores automáticos

Los nuevos cromatógrafos cuentan con autoinyectores y automuestreadores para lograr inyecciones reproducibles y evitar manuales. Se utilizan frascos o viales de vidrio, desechables y con tapones de septum con sello para vapores contenidas en un carrusel giratorio. Se pueden colocar hasta 150 viales de muestra (Skoog *et. al.*, 2015).

Figura 14. Esquema de una válvula de muestreo rotatoria para cromatografía de gases



Tomado de: (Skoog *et. al.*, 2015).

Siguiendo la Figura 14, el esquema a) indica el proceso de llenado del asa con la muestra para eliminar trazas de la muestra anterior, toma una muestra nueva y luego se inyecta automáticamente en el cromatógrafo, como lo indica el esquema b). La ventaja de la operación es que no requiere atención personal por lo que libera al operador de la vigilancia del equipo (Skoog *et. al*., 2015).

5) Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente

La espectrometría masas por plasma acoplado inductivamente ICPMS es altamente sensible y capaz de determinar de forma cuantitativa casi todos los elementos presentes en la tabla periódica que tengan un potencial de ionización menor que el potencial de ionización del argón a concentraciones muy bajas (nanogramo/litro o parte por trillón, ppt). Se basa en el acoplamiento de un método para generar iones (plasma acoplado inductivamente) y un método para separar y detectar los iones (espectrómetro de masas). (Universidad de Burgos, 2019)

La muestra, en forma líquida, es transportada por medio de una bomba peristáltica hasta el sistema nebulizador donde es transformada en aerosol gracias a la acción de gas argón. Dicho aerosol es conducido a la zona de ionización que consiste en un plasma generado al someter un flujo de gas argón a la acción de un campo magnético oscilante inducido por una corriente de alta frecuencia. En el interior del plasma se pueden llegar a alcanzar temperaturas de hasta 8000 K. En estas condiciones, los átomos presentes en la muestra son ionizados. Los iones pasan al interior del filtro cuadrupolar a través de una interfase de vacío creciente, allí son separados según su relación carga/masa. Cada una de las masas sintonizadas llegan al detector donde se evalúa su abundancia en la muestra. (Universidad de Burgos, 2019)

6) Acidez intercambiable

La acidez intercambiable es aquella producida por iones hidronio retenidos por enlaces iónicos en las moléculas que aportan acidez al suelo, por disociación del grupo ácido de la materia orgánica y por hidrólisis causada por cationes metálicos. La acidez por aluminio surge en pH menor a 6, en suelos con pH menor a 5.5, la toxicidad por aluminio es alta. Se debe establecer el valor de la saturación que presenta en el suelo con este catión y comparar esa saturación con la que es capaz de tolerar el cultivo. Si hay más aluminio del que la planta tolera, se debe neutralizar el exceso elevando el pH. De esta forma se aumenta la disponibilidad del fósforo, se mejora el suministro de nitrógeno y la actividad microbiológica en el suelo (Quirós, 1979).

La determinación de la acidez intercambiable se basa en el uso de una sal neutra como el Cloruro de Potasio (KCl) con un ion desplazante (K+) el cual provoca que los iones ácidos (Aluminio (Al+) e Hidronios (H+)) pasen a la solución. Esta acidez es luego titulada con una solución básica, de modo que la cantidad de acidez será igual a la cantidad de base usada entre los puntos de neutralización con fenolftaleína (Quirós, 1979).

Para determinar la cantidad de acidez que corresponde al Aluminio, se procede a realizar una retrotitulación con una solución ácida. En este caso, se añade Fluoruro de Potasio (KF) al 4 % para disolver los hidróxidos de aluminio (Al (OH)3) formados previamente, los cuales, luego de la reacción, liberan iones hidroxilo (OH) al medio que son titulados con ácido clorhídrico (HCl) (Quirós, 1979).

M. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS SUSTANCIAS

a. Densidad

La densidad permite expresar la relación de masa por unidad de volumen de cualquier sustancia. Las unidades del sistema internacional (SI) son kilogramos por litro (kg/L) o bien, gramos por mililitro (g/mL). Matemáticamente,

Ecuación 13.

$$densidad\ (\rho) = \frac{masa\ (m)}{volumen\ (V)}$$

(Skoog *et. al.*, 2015)

b. Densidad de partícula

La densidad real o densidad de partícula es la masa de una partícula de la sustancia sólida dividida por el volumen que ocupa la misma partícula. Generalmente es expresa en kilogramos por metro cúbico (Aranda y Ortego, 2011).

c. Densidad aparente

La densidad absoluta de una sustancia o de un cuerpo es la relación de la masa contenida en una determinada unidad de volumen sin incluir espacios vacíos. De modo contrario, la densidad aparente toma en cuenta sus vacíos (Crespo, 2004). La densidad aparente varía de acuerdo con el grado de compactación que haya sufrido el material ya que disminuye el volumen de aire en los vacíos o huecos. También depende de la humedad del material. Generalmente es expresa en kilogramos por metro cúbico. (Aranda y Ortego, 2011). Matemáticamente:

Ecuación 14.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{masa de materia}}{(\text{volumen de materia} + \text{volumen de aire en huecos})}$$

(Aranda y Ortego, 2011).

d. Densidad compactada

La densidad compactada de un sólido grueso o un polvo se determina colocando una cantidad determinada de muestra en una probeta de vidrio graduada y de dimensiones conocidas y medir el volumen que ocupa sin compactar, es decir la densidad aparente. Luego se golpea la probeta en posición vertical sobre una superficie plana de modo que se pueda compactar la muestra. Se repite por lo menos 50 veces y se mide el volumen final del polvo para obtener la densidad compactada (IICA, 1988).

e. Humedad

La humedad ligada de un sólido es la cantidad de agua retenida en los capilares, estructuras celulares o dentro del mismo ya sea adsorbida, química o físicamente, sobre la superficie del sólido. A una temperatura determinada, ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor a la que ejerce el agua a la misma temperatura (Treybal, 1988).

f. Viscosidad

Es una propiedad relacionada con la fricción interna existente en los fluidos, pues es la medida de resistencia que presenta el líquido a fluir. Se define como el esfuerzo cortante por unidad de área en cualquier punto de un fluido confinado, dividido por el gradiente de velocidad en la dirección perpendicular a la dirección del flujo. (Speight, 2002)

La viscosidad cinemática (v) se define como la relación entre la viscosidad absoluta y la densidad a la misma temperatura y presión. La unidad más común correspondiente al poise es el stoke (1 cm^2/s). La unidad SI es m^2/s. (Perry R. , Perry´s chemical engineers´ handbook, 1997)

La viscosidad cinemática del combustible dicta el patrón de pulverización y la atomización del combustible inyectado en una cámara de combustión. Mayores viscosidades del combustible dan como resultado una atomización deficiente, lo que conduce a un arranque y rendimiento del motor deficientes. Además, los combustibles más viscosos tienen una capacidad de flujo reducida, especialmente durante los inviernos, lo que afecta negativamente la función del inyector de combustible y causa problemas en el arranque y funcionamiento del motor. Además, la atomización deficiente puede provocar depósitos de carbono en las puntas de los quemadores o en las paredes. (Sarkar D. , 2015). Matemáticamente:

Ecuación 15.

$$\text{viscosidad cinemática (v)} = \frac{\text{viscosidad dinámica (}\mu\text{)}}{\text{densidad (}\rho\text{)}}$$

(McCabe y Smith, 2003).

g. Gravedad API

Los petróleos son clasificados generalmente por propiedades químicas y físicas, entre ellas la gravedad API. La gravedad es determinada por la composición química del combustible. A mayor cantidad de hidrocarburos y productos como resinas y asfaltenos, mayor gravedad y ocurre en viceversa respecto a la disminución de temperatura.

Se expresa en gramos sobre mililitro, gramos sobre centímetro cúbico o su expresión más común, grados API (Parámetro internacional establecido por el Instituto Americano de Petróleo, por sus siglas ingles) (Roldán, 2008). La temperatura de referencia es 15.6 °C o 60 °F para la relación de la gravedad específica del fluido respecto a la gravedad específica del agua (Mott, 1996).

Cuadro 3. Clasificación de crudos respecto a la gravedad API

Tipo de crudo	**Gravedad API**
Liviano	Mayor a 31.1
Mediano	22.3 – 31.1
Pesado	10.0 – 22.3
Extrapesado	Menor a 10

Tomado de: (Roldán, 2008)

N. PODER CALORÍFICO

El calor que desprende una sustancia combustible al reaccionar con aire se conoce como poder calorífico. La reacción produce vapor de agua o agua líquida. Si se permite que el agua condense entonces se le conoce como calorífico superior (PCS). Si el agua permanece en estado de vapor, se conoce como poder calorífico inferior (PCI). El poder calorífico se basa en la masa de la sustancia combustible por lo que se expresa en J/kg, kJ/kg o bien MJ/kg. En unidades inglesas sería BTU/lbm de aire (Rolle, 2006).

Para la medición de esta propiedad térmica, se utiliza un calorímetro o bomba calorimétrica. La metodología consiste en medir el calor que libera la muestra a partir del cambio de temperatura que se obtiene por la pérdida de calor. Se inicia calentando la muestra simultáneamente con las chaquetas interna y externa, después del equilibrio se mide la diferencia de temperatura y se calcula el calor específico a partir de ecuaciones o por lectura directa en el equipo (Rolle, 2006).

O. PUNTO DE INFLAMACIÓN

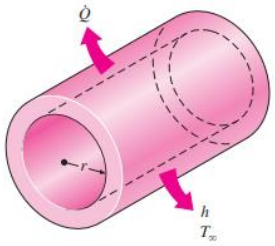
El punto de inflamación de una sustancia líquida como un aceite o un combustible es la temperatura mínima a la cual la sustancia desprende una cantidad de vapores suficientes para provocar una inflamación momentánea en contacto con una llama. El punto de inflamación o también llamado flash point se expresa en grados centígrados (°C). A mayor cantidad de partes volátiles en la sustancia, es menor el punto de inflamación y viceversa. Su importancia se debe a que sirve de base para la clasificación de líquidos inflamables y combustibles y los riesgos de su almacenamiento (Tormos, 2005).

P. TRANSFERENCIA DE CALOR

Considerando la conducción estacionaria de calor a través de un tubo que conduce, por ejemplo, agua caliente, se puede decir que el calor se pierde en forma continua hacia el exterior a través de las paredes de este (hacia el aire del exterior en la dirección radial). En este caso, la pared del tubo separa dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y ya que ambas temperaturas permanecen constantes, entonces es posible afirmar que la transferencia de ese tubo es estacionaria. En otras palabras, la transferencia de calor a través del tubo debe ser constante. (Cengel *et al*, 2011)

Por otro lado, se puede considerar que la transferencia de calor a través del tubo es unidimensional, pues el calor se pierde hacia el aire del exterior en una dirección radial. Dadas estas dos consideraciones, la temperatura del tubo depende solamente de la dirección radial T(r). Este comportamiento se puede observar en la práctica cuando se trata de tubos cilíndricos largos y en recipientes esféricos.

Figura 15. Transferencia de calor hacia el exterior en dirección radial



(Cengel *et al*, 2011)

Q. SOFTWARES PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

a. Berkeley Madonna

Este software desarrollado en University of California at Berkeley es utilizado para la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales y algebraicas a través de una simulación numérica. La dinámica simulación de los procesos químicos en este programa permite interpretar los resultados fácilmente. Este programa posee un sistema de resolución iterativo por el método Runge – Kutta (método de integración) (Villena, 2012)

b. Runge – Kutta

Actualmente, los ordenadores modernos cuentan con diferentes algoritmos para resolver las ecuaciones diferenciales de forma numérica. Un método frecuentemente implementado en los sistemas de cómputo es el método de Runge-Kutta de cuarto orden (RK4), publicado en 1895 por el matemático alemán, Carl Runge (1856-1927). Este método fue generalizado a sistemas de EDO (ecuaciones diferenciales ordinarias) en 1901 por M. Wilhelm Kutta, quien también era matemático alemán. En este método, el error total acumulado es proporcional a h4, de manera que la reducción del tamaño de paso por un factor de 1/10 da lugar a cuatro dígitos más de exactitud y por tano a más precisión. (Ricardo, 2008)

c. Graphpad Prism

GraphPad es una compañía privada fundada en 1989 que se dedica a la creación de herramientas de software para la comunidad científica internacional. Estos programas intuitivos proveen a los investigadores a través del mundo de herramientas para simplificar el análisis de datos, estadística y realización de gráficas. Entre sus softwares para investigadores se encuentran: GraphPad Prism, GraphPad InStat, GraphPad StatMate y GraphPad QuickCalcs. (GraphPadSoftware, 2019)

GraphPad Prism es un software comercial utilización para graficar en 2D con formato científico y para realizar análisis estadísticos. Está desarrollado para funcionar con sistemas operativos de macOS y Windows. Este software permite realizar análisis estadísticos básicos como regresiones no lineales, prueba t de colas, comparaciones no paramétricas, y ANOVA de una, dos y tres vías. Todos los análisis estadísticos poseen una lista de suposiciones y valores para mejorar la selección del método de análisis a ejecutar (GraphPadSoftware, 2019).

Este es un programa se utiliza principalmente en el sector científico y de investigación para la realización de gráficos complejos e interactivos, además de permitir un alto grado de personalización. Permite la creación de plantillas, duplicar familias de datos y realizar gráficos de clones de datos. También tiene la función de poder personalizar y editar los gráficos para su uso en artículos científicos (GraphPadSoftware, 2019).

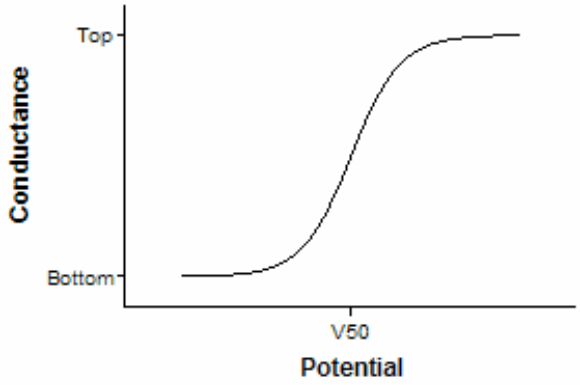
Para fines de este trabajo, el software incluye el ajuste de curva no lineal sigmoidal de tipo Boltzmann. describe la conductancia como una función del potencial de membrana.

La conductancia varía entre el límite inferior (Bottom) y superior (Top). V50 es el potencial en el cual la conductancia se encuentra justo a la mitad de los límites. "Slope" es la pendiente de la curva. Este modelo es parecido al comportamiento de curvas de calentamiento por la función sigmoide empleada. (GraphPad, 2014)

Ecuación 16.

$$T(t) = \text{Bottom} + \frac{(\text{Top} - \text{Bottom})}{1 + e^{\frac{V50-X}{\text{slope}}}}$$

Figura 16. Forma de la curva de la función sigmoidal de Boltzmann.



R. MODELO Y SIMULACIÓN DE PROCESOS

Un modelo es una abstracción que puede plasmarse en un conjunto de ecuaciones para describir un proceso dado. Naturalmente, mientras más complejo sea el proceso o, en este caso, la reacción química, más difícil resulta la incorporación de todas las posibles variables que podrían impactar al modelo con tal de que este se acerque lo más posible a la realidad. Por esto mismo, resulta más conveniente representar el proceso con un modelo lo más simplificado posible o de orden reducido, para que el cálculo resulte más sencillo. (Kumar, 2015) (Korn, 2007)

Por otro lado, la simulación busca analizar un proceso como un todo o bien por partes empleando un conjunto de ecuaciones que lo describen con la mayor precisión posible. El enfoque de la simulación puede ser tanto el diseñar un proceso como optimizar el mismo, ya que, gracias a diferentes softwares y programas de cómputo para la simulación numérica, es posible estudiar las posibles variaciones de una

operación. Es por esto que los estudios de simulación involucran el análisis de muchos parámetros y el impacto que estos pueden tener en los resultados. Cabe mencionar que dependiendo el modelo que se emplee, así se pueden clasificar los modelos como estacionarios, dinámicos, determinísticos, continuos o discretos. (Kumar, 2015)

Las simulaciones tienen gran importancia en temas como el diseño de plantas operativas, resolución de problemas durante la operación u optimización de procesos ya que gracias al proceso de simulación se puede agilizar la obtención de resultados que se apegan a la realidad.

a. SuperPro Designer ®

SuperPro Designer es un software de simulación con interfaz gráfica que incluye diferentes módulos con aplicación a la industria en general. Gracias a su interfaz amigable y base de datos, es posible diseñar y evaluar un proceso con más de 140 operaciones unitarias incluyendo reactores, reacciones químicas, costeo de equipos, etc. (Intelligen, 2017)

Este programa utiliza el método modular secuencial para la resolución de modelos de simulación, en otras palabras, se emplean modelos basados en secuencias de entradas y salidas las cuales se resuelven dependiendo las direcciones de los flujos especificados en un diagrama de bloques del proceso. Para este método se parte de un balance de masa y energía, seguido de la solución de los modelos que describen la operación. Se debe generar un diagrama de proceso que especifica los compuestos, flujos y operaciones unitarias involucradas para resolver el modelo planteado. (Intelligen, 2017)

S. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA Y CONCEPTOS IMPORTANTES PARA EL ANÁLISIS DE DATOS CUANTITATIVOS

Es necesario que la información numérica y estadística asociada a cualquier trabajo se presente de forma resumida y fácil de comprender. Para ello se utiliza la estadística descriptiva por medio de tablas, gráficas o números.

Además de la compresión, se busca que la información sea capaz de interpretarla y concluirla. Para los datos cualitativos suelen utilizarse histogramas, pero para los valores numéricos comúnmente se utiliza el valor promedio o media (Anderson *et. al.,* 2012).

1. Media aritmética

La media, media aritmética o promedio, *x,* es la medida que se utiliza para representar el valor central de un conjunto de datos. Se obtiene a partir de la división de la suma de las mediciones de muestras obtenidas de la misma manera (réplicas) $(\sum_{i=1}^{N} x_i)$ entre el número total de mediciones que pertenecen al conjunto (N). Matemáticamente,

Ecuación 17.

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N}$$

(Skoog *et. al.,* 2015)

2. Precisión

La precisión indica la repetibilidad o cuán reproducibles son los resultados de un conjunto de mediciones que se obtuvieron exactamente de la misma manera. La precisión de una medición debe repetirse en un conjunto de réplicas. Para explicar la precisión de los datos se utilizan tres términos estadísticos: desviación estándar, varianza y coeficiente de variación, las cuales permiten indicar cuando se aleja un valor individual (x_i) de la media, *x*. Matemáticamente la desviación de la media, d_i, se expresa:

Ecuación 18.

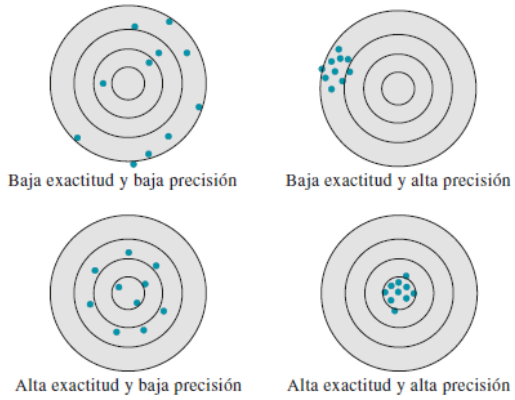
$$d_i = |x_i - x|$$

(Skoog *et. al.*, 2015).

3. Exactitud

La exactitud expresa que tan cercano es un valor medido al valor verdadero o aceptado. Para expresar el la exactitud se utiliza el término de error. Otra forma de expresión es la medición de la concordancia que existe entre el resultado de una medición respecto a su valor aceptado. Es difícil de determinar ya que generalmente el valor esperado o aceptado es desconocido (Skoog *et. al.*, 2015).

Figura 17. Representación gráfica de la diferencia entre exactitud y precisión



Tomada de: (Skoog *et. al.*, 2015).

4. Datos atípicos

Son los datos que se observan alejados o diferentes del resto de resultados de un mismo conjunto de mediciones de réplicas. Su importancia se debe a que difieren significativamente de los resultados. Generalmente son ocasionados por los errores brutos realizados durante la experimentación (Skoog *et. al.*, 2015).

5. Errores tipo I y II y nivel de significancia

En el análisis estadístico se utiliza el planteamiento de hipótesis nula (Ho) y alternativa (Ha) para demostrar la afirmación de una población. Ambas son opuestas por lo cual únicamente una es verdadera. La aceptación se plantea para la hipótesis nula. Cuando se realiza la prueba de hipótesis con información

muestral, debe considerarse que existe una posibilidad de error asociada a la conclusión (Anderson *et. al.*, 2012).

El error tipo I ocurre cuando se concluye que debe rechazarse Ho y esta es verdadera. Pero si se acepta Ho cuando Ha es verdadera, se comete un error de tipo II. A la probabilidad de cometer un error tipo I se le conoce como nivel de significancia. Se denota el nivel de significancia o confianza utilizando la letra griega α. Los valores comúnmente utilizados son 0.01, 0.05 y 0.10 (Anderson *et. al.*, 2012).

Es recomendable que previo a la prueba de hipótesis se especifique el nivel de significancia de acuerdo con el costo de cometer el error tipo I. Si el costo es alto, se prefiere valores pequeños para α. Debido a la incertidumbre asociada al error tipo II, se recomienda que, si los datos muestrales permanecen consistentes con la hipótesis nula, se concluya como "no es rechazada Ho" para no correr con el riesgo de afirmar un error tipo II (Anderson *et. al.*, 2012).

6. Estimación por intervalo

Se utiliza el método de la distribución t para la estimación por intervalo de la media poblacional cuando no se conoce la desviación estándar de la población. A partir de la desviación estándar muestral, s, se calcula con la siguiente expresión:

Ecuación 19.

$$x = t_{\alpha/2}\frac{s}{\sqrt{n}}$$

(Anderson *et. al.*, 2012).

El valor de $t_{\alpha/2}$ se lee en la tabla de distribución t de anexos.

7. Desviación estándar muestral

Se utiliza la siguiente ecuación para el cálculo de la desviación estándar muestral a partir de los n valores del cálculo, la media muestral y la sumatoria de los valores independientes del cálculo:

Ecuación 20.

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - x)^2}{n-1}}$$

(Anderson *et. al.*, 2012).

8. Modelo de regresión lineal simple

Este aproxima la relación entre una variable independiente y una variable dependiente mediante una línea recta. Expresada con la siguiente ecuación:

Ecuación 21.

$$\mathrm{E(y)} = \beta_0 + \beta_1 \mathrm{x}$$

Donde β_0 es la intersección de la recta de regresión con el eje *y*, β_1 es la pendiente y E(y) es la media o valor esperado de y para un valor de x. (Anderson, Sweeney, & Williams, 2012)

9. Coeficiente de determinación

Proporciona una medida de la bondad de ajuste para una ecuación de regresión estimada. Se calcula como el cociente de la suma de cuadrados debido a la regresión (SCR) y la suma total de cuadrados (STC) y se denota como R2. Mientras más cercano sea este valor a 1, mejor es el ajuste de los datos.

Ecuación 22.

$$R^2 = \frac{SCR}{STC}$$

La suma de cuadrados debido a la regresión (SCR), mide cuánto se desvían del y promedio ($\bar{y}$) los valores de la variable dependiente ($\hat{y}_i$) en la regresión.

Ecuación 23.

$$SCR = \sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

La suma de cuadrados debido al error (SCE), mide la diferencia entre el valor observado de la variable dependiente (y_i) y el valor estimado de la variable dependiente $\widehat{(y_i)}$en la regresión.

Ecuación 24.

$$SCR = \sum(y_i - \hat{y}_i)^2$$

La suma total de cuadrados se compone de la suma de cuadrados debido a la regresión (SCR) y la suma de cuadrados debido al error (SCE).

Ecuación 25.

$$STC = SCR + SCE \text{ (Ecuación 17)}$$

(Anderson, Sweeney, & Williams, 2012)

10. Propagación de error

En la mayoría de las experimentaciones se realizan operaciones aritméticas con varios números que incluyen un error aleatorio. La incertidumbre del resultado no es simplemente la suma de los errores individuales, sino que requiere de una serie de operaciones para realizar la compensación de errores entre sí de acuerdo con la operación aritmética realizada. Para las sumas y restas, la incertidumbre del resultado se obtiene a partir de las incertidumbres absolutas de los de los términos individuales. (Harris, 2001)

Ecuación 26.

$$e_c = \sqrt{e_a^2 + e_b^2}$$

Para el cociente o multiplicación de una división de a/b=c, se calcula la propagación de error:

Ecuación 27.

$$e_c = c * \sqrt{\left(\frac{e_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{e_b}{b}\right)^2}$$

T. MODELO MATEMÁTICO DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN

Los modelos son abstracciones de sistemas y procesos reales, representaciones simplificadas. Son de utilidad para ingenieros y científicos para desarrollar una compresión de sistemas y procesos importantes utilizando ecuaciones matemáticas.

1. Aplicaciones del modelado en ingeniería química

Un típico problema en la ingeniería química es el escalamiento de escala laboratorio a una escala de equipo completo. Para realizar este proceso con mayor fundamento debe evaluarse y formularse en términos matemáticos. Esto involucra un cuidadoso trabajo experimental relacionado con el conocimiento teórico. En general el modelado matemático es prerrequisito para:

- Diseño y escalamiento
- Control de proceso
- Optimización
- Comprensión de los mecanismos del proceso
- Evaluación o planificación de experimentos
- Resolución de problemas y diagnósticos
- Determinar cantidades que no pueden medirse directamente
- Simulación en lugar de realizar costosos experimentos de laboratorio
- Realización de estudios de factibilidad previo a la elaboración de un prototipo

(Rasmuson, Andersson, Olsson, & Andersson, 2014)

U. COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Los principales combustibles líquidos están hechos por destilación fraccionada de petróleo crudo (una mezcla de hidrocarburos y derivados de hidrocarburos que van desde metano hasta betún pesado). Entre un cuarto y la mitad de las moléculas en crudo pueden contener átomos de azufre, y algunas contienen nitrógeno, oxígeno, vanadio, níquel o arsénico. La desulfuración, la hidrogenación, el agrietamiento (para reducir el peso molecular) y otros procesos de refinación se pueden realizar en fracciones seleccionadas antes de mezclarlas y comercializarlas como combustibles. (Perry R. , Perry´s chemical engineers´ handbook, 1997)

1. Clasificación de líquidos

a. Líquido combustible

Cualquier líquido que tenga un punto de inflamación de taza cerrada a 100 °F (37.8 °C) o más, según lo determinado por los procedimientos y aparatos de prueba establecidos según National Fire Protection Association, NFPA, los líquidos combustibles se pueden clasificar en II o III según lo siguiente:

- Líquido clase II: cualquier líquido que tenga un punto de inflamación en o por encima de 100 °F (37.8 °C) y por debajo de 140 °F (60 °C)
- Líquido de clase III: cualquier líquido que tenga un punto de inflamación en o por encima de 140 °F (60 °C)

- Líquido de clase IIIA: cualquier líquido que tenga un punto de inflamación igual o superior a 140 ° F (60 °C), pero inferior a 200 °F (93 °C)
- Líquido de clase IIIB: cualquier líquido que tenga un punto de inflamación en o superior a 200 °F (93 °C)

(NFPA, 2015)

b. Líquido inflamable

Cualquier líquido que tenga un punto de inflamación a taza cerrada por debajo de 100 °F (37.8 °C), según lo determinado por el procedimientos y aparatos de prueba establecidos, y una presión de vapor Reid que no exceda una presión absoluta de 40 psi (276 kPa) a 100 °F (37.8°C), según lo determinado por la norma NFPA 30. (NFPA, 2015)

Los líquidos inflamables se clasificarán como líquidos de Clase I y se subclasificarán de acuerdo con lo siguiente:

- Líquido clase IA: cualquier líquido que tenga un punto de inflamación debajo 73 ° F (22.8 ° C) y un punto de ebullición por debajo de 100 ° F (37.8 ° C)
- Líquido clase IB: cualquier líquido que tenga un punto de inflamación debajo 73 ° F (22.8 ° C) y un punto de ebullición igual o superior a 100 ° F (37.8 ° C)
- Líquido de clase IC: cualquier líquido que tenga un punto de inflamación igual o por encima de 73 ° F (22.8 °C), pero punto de ebullición por debajo de 100 °F (37.8 °C).

(NFPA, 2015)

V. PETRÓLEO

El petróleo es una mezcla natural de hidrocarburos, generalmente en estado líquido, que también puede incluir compuestos de azufre, nitrógeno, oxígeno, metales y otros elementos. (Perry R. , Perry´s chemical engineers´ handbook, 1997)

La mezcla de hidrocarburos es altamente compleja. Las estructuras parafínicas, nafténicas, olefínicas y aromáticas pueden ocurrir en la misma molécula, y la complejidad aumenta con el rango de ebullición de la fracción de petróleo. Además, el petróleo varía en apariencia física desde un líquido de color claro hasta el petróleo pesado más viscoso. (Speight, 2002)

Cuánto más pesado es el crudo, más alta es su proporción de C/H. Debido a los procesos químicos de la refinación, cuánto mayor es la proporción de C/H del crudo, más intenso y costoso es El proceso de refinación que se requiere para producir determinados volúmenes de gasolina y combustibles destilados. Por ello, la composición química del petróleo crudo y su división en fracciones de distinto punto de ebullición incluyen en los requisitos de inversión de la refinería y la energía que utiliza, los dos aspectos más importantes del costo total de la refinación. (Jafarinejad, 2017)

El aceite combustible, los aceites lubricantes y la gasolina son los derivados más usados del petróleo. La gasolina es el producto más sencillo y el más importante a la vez, ya que la mayoría de los transportes y muchas industrias la utilizan como combustible. (Speight, 2002)

W. GASOLINA

Combustible líquido que se usa en un motor de combustión interna de encendido por chispa alternativo. La gasolina se clasifica ampliamente como gasolina de motor y gasolina de aviación. La gasolina de motor es una mezcla compleja de hidrocarburos de bajo punto de ebullición. Compuesta principalmente por mezcla de compuestos aromáticos y nafta. Los hidrocarburos de bajo punto de ebullición generalmente causan bloqueo de vapor en los motores y, por lo tanto, no es adecuada para uso en motores de aviones. La gasolina de motor tiene una clasificación de octano más baja que la gasolina de aviación. (Sarkar D. , 2015)

X. DIESEL

Las características del diésel varían de queroseno pesado a combustibles residuales. El diésel es rico en aromáticos e iso-parafinas. La calidad de ignición, la limpieza y la viscosidad son las propiedades importantes del combustible diésel que determinan su uso en motores de alta velocidad. El uso de diésel en motores es atractivo debido a su bajo costo, a pesar de que el costo de mantenimiento es alto. (Sarkar D. , 2015)

Y. FUEL OIL

Hay cinco grados comerciales de fuel oil, también conocido como combustible búnker, aceite o aceite de horno. Estos son: diésel de alta velocidad (HSD), diésel ligero (LDO), fuelóleo pesado (HFO), aceite de horno (FO), stock pesado bajo en sulfato (LSHS). Cualquier aceite usado para la generación. de potencia o calor se identifica como fuel oil. Varía desde gasóleo ligero (LDO) hasta pesado fuel oil (HFO). LDO se utiliza en quemadores sin precalentamiento, mientras que el calentamiento elaborado se proporciona un arreglo a HFO para su uso en quemadores. El equipo usado para quemar el HFO está diseñado para inhibir la formación de depósitos de carbono. (Sarkar D. , 2015)

Z. LUBRICANTES

Los lubricantes son una mezcla de aceites de base y, en función de su uso, diversos aditivos. La proporción de aceites de base en el producto acabado suele ser de entre el 70% y el 95%. Los aditivos tienen múltiples funciones, como la de prevenir la formación de espuma, limpiar o mejorar el índice de viscosidad. Aunque se les suele denominar únicamente lubricantes, además de lubricar para reducir la fricción y el desgaste, la transmisión de potencia, enfriar y controlar las vibraciones, los lubricantes también pueden desempeñar muchas otras funciones, como la transferencia de calor del aceite, la estanqueidad fina y la protección contra la corrosión. Además, los lubricantes neutralizan los productos de combustión agresivos. (Speight, 2002)

Se utilizan habitualmente en el sector automotriz (aceites para motores y aceites para engranajes) así como en la industria: aceites para engranajes, aceites hidráulicos, aceites para cajas de cambios y

elementos deslizantes, aceites para compresores, lubricantes, térmicos, para turbinas, grasas, aceites endurecedores, aceites para tratamientos térmicos y muchos otros. (Standar oil company, 2013)

AA. COMBUSTIBLES SÓLIDOS

El origen de los combustibles sólidos se remonta a miles de años atrás. Los combustibles sólidos naturales son principalmente la leña, carbón, y los residuos agrícolas de diverso origen.

Además, existen combustibles sólidos artificiales como los aglomerados, alcoque de petróleo y de carbón y carbón vegetal. (Gálvez & Roselló, 2000)

Los aglomerados o briquetas son transformados a partir de los combustibles sólidos naturales. Las briquetas se obtienen aglomerando grano menudo y polvo de carbón. Los combustibles sólidos artificiales son el resultado de procesos de pirogenación a que sometemos los combustibles sólidos naturales. La pirogenación es un proceso mediante el cual, aplicando calor sin contacto con aire, obtenemos los combustibles sólidos artificiales. La madera se ha empleado como combustibles sólidos desde que se descubrió el fuego. Hasta mediados del S. XVIII era prácticamente el único combustible utilizado. El desarrollo industrial fue el que propició el uso de otros combustibles más eficientes y potentes, como por ejemplo el carbón (Gálvez & Roselló, 2000).

1. Bagazo de caña

El bagazo es el residuo lignocelulósico, fibroso, obtenido a la salida del último molino que extrae el jugo de la caña, y representa aproximadamente el 28% en peso de la caña que se procesa. El agua presente en el bagazo se retiene a través a través de mecanismos de absorción (capacidad que presentan los componentes químicos del bagazo de absorber moléculas de agua en cantidades que dependen de la humedad relativa ambiental) y capilaridad dado el carácter poroso del mismo (agua mantenida por fuerzas de capilaridad y tensión superficial). (Gálvez & Roselló, 2000)

La densidad y la humedad son dos propiedades físicas importantes del bagazo, las que se encuentran íntimamente vinculadas y son imprescindibles para realizar cualquier tipo de cálculo de ingeniería relacionada con los procesos industriales. (Gálvez & Roselló, 2000)

Las fibras del bagazo, de gran interés para la industria del papel y de tableros, son rígidas, de contornos irregulares y bien definidos. Las fibras del haz vascular son finas y de paredes delgadas con extremos romos, horquillados o bifurcados y en su superficie presentan ocasionalmente pequeños poros. Las fibras de la corteza son de mayor longitud y diámetro, con paredes gruesas y presentan poros en toda su superficie. (Gálvez & Roselló, 2000)

2. Carbón mineral

El carbón mineral es una roca sedimentaria de color negro, muy rica en carbono y con cantidades variables de otros elementos como hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno. Arde fácilmente y es uno de los combustibles fósiles más utilizados. Este es una mezcla de la descomposición de componentes orgánicos acumulados en zonas pantanosas, lagunares o marinas, de poca profundidad, cubiertas o sepultadas por sedimentos que con el paso del tiempo, incrementan las condiciones de presión y temperatura produciendo

un progresivo enriquecimiento en carbono, lo cual se conoce como carbonificación y da lugar a la formación de los diferentes tipos de carbón mineral (R & D, 2003)

Existen dos tipos de carbón que son los más conocidos hoy en día, siendo estos los siguientes; carbón lignítico: de color pardo, con poco poder calórico y carbón antracítico: contiene la mayor concentración de carbono; es el más duro y brillante. Es localizado en forma de cuerpos horizontales o inclinados, denominados mantos, ubicados en depresiones o cuencas antiguas. Los mantos son de gran extensión y llegan a alcanzar profundidades de hasta 1,200 metros. Sus espesores son muy variables y pueden ir desde unos cuantos centímetros hasta 100 metros. En México llegan a tener un espesor máximo de 3 metros. (R & D, 2003)

Normalmente el carbón mineral es de gran utilidad en la industria, por ejemplo en la generación de energía eléctrica. Las centrales térmicas de carbón pulverizado constituyen la principal fuente mundial de energía eléctrica. En los últimos años se han desarrollado otros tipos de centrales que tratan de aumentar el rendimiento y reducir las emisiones contaminantes, entre ellas las centrales de lecho fluido a presión. (R & D, 2003)

3. Coque

Es el producto de la pirólisis del carbón en ausencia de aire. Es utilizado como combustible y reductor en distintas industrias, principalmente en los altos hornos (coque siderúrgico). Dos tercios del acero mundial se producen utilizando coque de carbón, consumiendo en ello 12% de la producción mundial de carbón

4. Siderurgia

Mezclando minerales de hierro con carbón se obtiene una aleación en la que el hierro se enriquece en carbono, obteniendo mayor resistencia y elasticidad.

5. Industrias varias

Se utiliza en las fábricas que necesitan mucha energía en sus procesos, como las fábricas de cemento y de ladrillos.

a. Uso doméstico

Históricamente el primer uso del carbón fue como combustible doméstico. Aún hoy sigue siendo usado para calefacción, principalmente en los países en vías de desarrollo, mientras que en los países desarrollados ha sido desplazados por otras fuentes más limpias de calor (gas natural, propano, butano, energía eléctrica) para rebajar el índice de contaminación. (R & D, 2003)

b. Carboquímica

Practicada principalmente en África del Sur y China. Mediante el proceso de gasificación se obtiene del carbón un gas llamado gas de síntesis, compuesto principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono. El gas de síntesis es una materia prima básica que puede transformarse en numerosos productos químicos de interés como, por ejemplo: amoníaco, metanol, gasolina y gasóleo de automoción a través del proceso Fischer-Tropsch (proceso químico para la producción de hidrocarburos líquidos a partir de gas de síntesis, CO y H2). (R & D, 2003)

c. Petróleo sintético

Mediante el proceso de licuefacción directa, el carbón puede ser transformado en un crudo similar al petróleo. La licuefacción directa fue practicada ampliamente en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial, pero en la actualidad no existe ninguna planta de escala industrial en el mundo. (R & D, 2003)

BB. ABONO ORGÁNICO

Se entiende por abono orgánico todo material de origen orgánico utilizado para la fertilización de cultivos o como mejorar los suelos. Se incluyen dentro de los abonos orgánicos materiales como la gallinaza, la broza del café, coberturas como el kudzú o Arachis, compost y ácidos húmicos. El compostaje es un proceso biológico controlado de transformación de la materia orgánica a humus a través de la descomposición aeróbica; el producto de este proceso es denominado compost. (IFA, 2002)

El abono orgánico es de suma importancia y muy valioso, ya que mejora la estructura del suelo, reduce la erosión del mismo, tiene un efecto regulador de la temperatura y ayuda a almacenar más humedad, mejorando de manera significativa la fertilidad. Además, la materia orgánica es un alimento necesario para los organismos del suelo (IFA, 2002)

El abono orgánico a menudo crea la base para el uso exitoso de los fertilizantes minerales. La combinación de abono orgánico, materia orgánica y fertilizantes minerales ofrece las condiciones ambientales ideales para el cultivo, cuando el abono orgánico/materia orgánica mejora las propiedades del suelo y el suministro de los fertilizantes minerales provee los nutrientes que las plantas necesitan. (IFA, 2002)

Sin embargo, por sí solo el abono orgánico no es suficiente para lograr el nivel de producción que el agricultor desea, además de que no se encuentra disponible en grandes cantidades. Es por eso que los fertilizantes minerales deben ser aplicados de manera adicional. (IFA, 2002)

CC. MEJORADOR DE SUELOS

El suelo es uno de los recursos naturales más importantes, es por eso que surge la necesidad de mantener su productividad, para que a través de él y las prácticas agrícolas adecuadas se establezca un equilibrio entre la producción de alimentos y el acelerado incremento del índice demográfico. La composición de los suelos consta de: materia mineral (45%), materia orgánica (5%), agua (25%) y aire (25%). (Urrestarazu, 2015)

La materia mineral de los suelos está compuesta de pequeños fragmentos de roca y minerales de varias clases (grava, arena, limo y arcilla). La materia orgánica del suelo representa la acumulación de las plantas destruidas y resintetizadas parcialmente, así como de los residuos animales.

Por su parte, el agua junto con sus sales disueltas forma la llamada solución del suelo; la cual es esencial para abastecer de nutrimentos a las plantas que en él se desarrollan. El aire del suelo no es continuo y está localizado en los poros separados por los sólidos. Este aire tiene generalmente una humedad más alta que la de la atmósfera. (Urrestarazu, 2015)

Todo esto, proporciona la cantidad necesaria de nutrientes a plantas y cultivos de forma natural, pero existen factores que afectan esta importante característica de los suelos, dentro de las que destacan:

- Salinización: deterioro de los suelos por el incremento en el nivel de sales solubles que reduce su capacidad productiva.
- Degradación física: se produce como consecuencia de la reducción de permeabilidad, la compactación, la cementación y la degradación de la estructura, entre otros.
- Degradación biológica: Consiste en el aumento de la velocidad de mineralización de la materia orgánica.
- Degradación química: es la pérdida de nutrientes por lixiviación.

La agricultura es sin duda una de las principales actividades del hombre que requiere del uso de todas las propiedades que el suelo tiene. Con la aplicación adecuada de residuos orgánicos naturales y algunos factores anteriormente mencionados. Los mejoradores del suelo son uno de ellos. Los fertilizantes y los mejoradores del suelo son cosas totalmente diferentes: una está destinada a mejorar su suelo, la otra está destinada a alimentar a sus plantas. Pero en algunos casos, una enmienda del suelo también es un fertilizante que contiene nutrientes y micronutrientes muy específicos. (Urrestarazu, 2015)

Para los jardineros orgánicos, el objetivo siempre es mejorar su suelo con enmiendas para construir un ambiente rico en humus, microorganismos y micronutrientes. Esto, a su vez, fomenta el crecimiento profundo de las raíces, plantas resistentes y resistentes a las enfermedades, hermosas floraciones y abundantes frutas y verduras. La fertilidad y la viabilidad del suelo es el objetivo, no la solución rápida (y en ocasiones la aplicación inútil) de los fertilizantes para estimular el crecimiento. Una enmienda al suelo es cualquier tipo de material orgánico o no orgánico que mejora la condición de la tierra de su jardín. El objetivo principal es mejorar la textura del suelo para que las bolsas de agua y aire estén disponibles para las raíces de las plantas. (Urrestarazu, 2015)

Por ejemplo, puede enmendar los suelos arcillosos para aflojarlos y mejorar el drenaje o agregar enmiendas a los suelos arenosos para retener los nutrientes y el agua y proporcionar alimento a los microorganismos. Los mejoradores del suelo pueden incluir abonos animales, fundición de gusanos, hojas de otoño, perlita, compost, paja, recortes de césped, arenas verdes, yeso, heno, cultivos de cobertura u otros materiales. Los abonos, compost y hojas también se pueden considerar fertilizantes de liberación lenta ya que contienen muchos o todos los nutrientes que sus plantas necesitan, especialmente en combinación. (Urrestarazu, 2015)

Los fertilizantes solos no ayudan a mejorar la estructura de un suelo. Si sus plantas sufren de falta de aire o agua en la zona de la raíz, o demasiada agua en un suelo pobremente drenado o compactado, todo el fertilizante en el mundo no ayudará. De hecho, si su suelo es compactado, los fertilizantes pueden simplemente salir de la superficie y las raíces de sus plantas nunca lo absorberán. (Urrestarazu, 2015)

DD. ALMACENAMIENTO DE SUSTANCIAS LÍQUIDAS

Los tanques son recipientes normalmente fabricados con forma cilíndrica, preparados para el almacenamiento y conservación de productos líquidos o sólidos. Pueden ser fabricados en diversos

materiales, como fibra de vidrio, acero al carbono o acero inoxidable. (Walas, Chemical Process Equipmen Selection and Design, 2012)

1. Tipos de tanques

Generalmente el primer paso en el diseño de cualquier recipiente de almacenamiento es la determinación del tipo de tanque a utilizar. Los principales factores que influyen son: la función y ubicación del tanque, tipo de fluido, temperatura y presión de operación, y el volumen necesario de almacenamiento o la capacidad para procesamiento.

a. Tanques atmosféricos

Tanque de almacenamiento que ha sido diseñado para operar presiones desde la atmosférica hasta presiones de 1.0 psig medidos en el tope del tanque. Este tipo de tanques no se pueden usar para el almacenamiento de líquidos a temperaturas iguales a su punto de ebullición. También serán usados para líquidos que tienen una máxima presión de vapor de $0.914 kg/cm^3$ abs a nivel del mar. Por cada 300 metros de elevación a la máxima presión de vapor deberá ser reducida en $0.035 kg/cm^2$ abs. Los principales tanques atmosféricos son de techo flotante y de techo fijo (León, 1994).

b. Tanques de techo fijo

La forma del techo de un tanque puede ser usada para clasificar el tipo de tanque. Es necesario comprender el efecto de la presión interna en las placas de las estructuras incluyendo tanques y recipientes a presión. Si una placa de acero es sujeta a una presión en un lado, debe estar fabricada con un espesor lo bastante suficiente como para resistir una visible deformación o pandeo. El tamaño del tanque es el más severo efecto de presión en la estructura ya que conforme la presión se incrementa, la fabricación y el costo fuerzan al constructor a usar formas más sustentables para que sean capaces de soportarla. En el momento de la construcción, la forma cilíndrica es la más económica y fácil de fabricar para presiones internas y lograr que el almacenamiento sea seguro. Relativamente los techos y fondos planos de los tanque no ayudan mucho a la presión interna. Si la presión interna incrementa, se debe tomar la decisión de construir usando domos o esferas como techos. La esfera es la forma más económica para almacenar fluidos presurizados en términos del espesor requerido, pero es más difícil de fabricar, generalmente más que los tanques de techo en domo o sombrilla (León, 1994)

c. Tanques de techo cónicos

Estos tanques tienen una envolvente cilíndrica con un eje vertical de simetría. El fondo es usualmente plano, y la parte superior está hecha en forma de un cono poco profundo. Estos son los tanques más ampliamente usados para almacenar grandes cantidades de fluido ya que son más económicos de construir. Pueden ser fabricados en pequeñas piezas y ser armados en campo. Este tipo de tanque tienen soportes y columnas de soporte para el techo excepto en los tanques de diámetro muy pequeño (León, 1994).

d. Tanques techo de sombrilla

Tanques son similares a los de techo cónico, pero el techo parece una sombrilla. Estos tanques pueden ser de estructura auto soportada, lo que significa que no cuenta con estructuras de soporte que deben ser puestas desde el fondo del tanque (León, 1994).

e. Tanques techo de domo

Similares a los tanques con techo en forma de sombrilla, excepto que su domo es más aproximado a una superficie esférica que a las secciones segmentadas de un techo con forma de sombrilla (León, 1994).

f. Tanques con techo de domo geodésico de aluminio

Este tipo de techo fijo ha llegado a ser muy popular. Ofrecen una alternativa económica, superior resistencia a la corrosión para una amplia variedad de condiciones y son estructuras que no requieren soportes internos. Pueden ser construidos, también, con cualquier diámetro requerido (León, 1994).

Los tanques de almacenamiento también se pueden clasificar según la orientación de sus ejes de simetría en:

g. Tanques horizontales

Se construyen tanto para servicio en superficie como subterráneos. Estos tanques generalmente están construidos de acero, acero con una capa de fibra de vidrio o poliéster reforzado con fibra de vidrio. Los tanques horizontales son generalmente tanques de almacenamiento pequeños. Se construyen de manera que la longitud del tanque no sea mayor que seis veces el diámetro para garantizar la integridad estructural. (Walas, Chemical Process Equipmen Selection and Design, 2012)

Los tanques horizontales generalmente están equipados con respiraderos de vacío de presión, escotillas de medición, pozos de muestra y pozos de registro para proporcionar acceso a ellos. Además, los tanques subterráneos pueden protegerse catódicamente para evitar la corrosión de la carcasa del tanque. La protección catódica se logra colocando ánodos de sacrificio en el tanque que están conectados a un sistema de corriente impresa o usando ánodos galvánicos en el tanque. Sin embargo, la protección catódica interna ya no se usa ampliamente en la industria del petróleo, debido a los inhibidores de corrosión que ahora se encuentran en la mayoría de los productos de petróleo refinado.

h. Tanques verticales

Los que se encuentran apoyados sobre el suelo están hechos con fondos cóncavos o cónicos. Los tanques de fondo plano descansan sobre cimientos firmes de arena aceitada u hormigón. Los fondos planos soportados generalmente tienen un grosor de 1/4 pulgada. Las placas del techo tienen un grosor de 3/16 pulgada. (Walas, Chemical Process Equipmen Selection and Design, 2012)

2. Reglas gruesas de diseño

Los tanques de almacenamiento de líquidos están provistos de una cierta cantidad de espacio de vapor, comúnmente 15% por debajo de 500 galones y 10% por encima de 500 gal. Las prácticas comunes de montaje para tanques de almacenamiento de líquidos son:

- Por menos de 1000 gal, se usan tanques verticales montados en patas.
- Entre 1000 y 10 000 gal, se usan tanques horizontales montados sobre cimientos de hormigón.
- Más allá de 10,000 galones, se usan tanques verticales montados en cimientos de concreto.

(Walas, Chemical Process Equipmen Selection and Design, 2012)

Los líquidos con altas presiones de vapor, gases licuados y gases a alta presión se almacenan en recipientes horizontales alargados, con menos frecuencia en recipientes esféricos.

Figura 18. Especificaciones y relaciones de diseño.

Process unit	Capacity Unit	Maximum Value	Minimum Value	Comment	
Horizontal Vessel	Pressure (bar)	400	Vacuum	*L/D* typically 2–5	
	Temper. (° C)	400[b]	−200		
	Height (m)	10	2		
	Diameter (m)	2	0.3		
	L/D	5	2		
Vertical Vessel	Pressure (bar)	400	400	*L/D* typically 2–5	
	Temperature (° C)	400[b]	−200		
	Height (m)	10	2		
	Diameter (m)	2	0.3		
	L/D	5	2		
Towers	Pressure (bar)	400	Vacuum	Normal Limits Diameter	*L/D*
	Temperature (° C)	400[b]	−200	0.5	3.0–40[c]
	Height (m)	50	2	1.0	2.5–30[c]
	Diameter (m)	4	0.3	2.0	1.6–23[c]
	L/D	30	2	4.0	1.8–13[c]

(Walas, Chemical Process Equipmen Selection and Design, 2012)

3. Normas estándares y códigos aplicables

Existen diversas normas que rigen la construcción de los tanques. El diseño y cálculo de tanques de almacenamiento puede estar basado en las normativas del "Instituto Americano del Petróleo", al que esta institución designa como “STANDAR API 650", para tanques de almacenamiento a presión atmosférica. Este estándar sólo cubre aquellos tanques en los cuales se almacenan fluidos líquidos y que están construidos de acero con el fondo uniformemente soportado por una cama de arena, grava, concreto, asfalto, etc., diseñados para soportar una presión de operación atmosférica o presiones internas que no excedan el peso del techo por unidad de área y una temperatura de operación no mayor de 93 °C (200 °F), y que no se usen para servicios de refrigeración. (Walas, Chemical Process Equipmen Selection and Design, 2012)

Este tipo de tanque es sobre todo utilizado en plantas de proceso que forman parte de refinerías de petróleo o instalaciones petroleras, tales como estaciones de bombeo, estaciones de reducción o plataformas de pozos de producción; en cada uno de estos puntos se almacenan diferentes tipos de hidrocarburos tales como petróleo, productos intermedios como agua de producción o productos terminados como gasolina, diésel, fuel–oíl. Por esta razón no solo un tipo de tanque es apropiado para el almacenamiento de los diferentes productos a ser almacenados. (Argüello & Cabezas , 2011)

Los tanques para el almacenamiento de líquidos inflamables, sobre o debajo del suelo, a presión atmosférica cercana están sujetos a los estándares de Underwriter Laboratories o de API. Underwriter Laboratory cubre tanques pequeños de hasta 25,000 galones. Ambos conjuntos de normas están restringidos a la construcción de acero para servicios esencialmente no corrosivos. (Walas, Chemical Process Equipmen

Selection and Design, 2012). Algunas especificaciones para tanques de almacenamiento que cumplan con los requerimientos de Underwriter Laboratories o los estándares API se mencionan en las siguientes tablas:

Cuadro 4. Dimensiones para tanques horizontales o verticales según Underwriter Laboratories

Capacidad nominal	Diámetro (metros)	Longitud aproximada (metros)	Espesor(cm)	Peso(kg)	No. de soportes
5000	1.83	7.24	0.64	2472.73	3
5000	2.13	5.33	0.64	2331.82	2
6000	2.44	4.90	0.64	2690.91	2
6000	2.44	4.90	0.79	3054.55	2
8000	2.44	6.50	0.64	3309.09	2
8000	2.44	6.50	0.79	3786.36	2
10000	2.44	8.10	0.64	4027.27	2
10000	2.44	8.10	0.79	4777.27	3
10000	3.05	5.23	0.64	3650.00	2
10000	3.05	5.23	0.79	4150.00	2
10000	3.20	4.78	0.79	4100.00	2
15000	2.44	12.17	0.64	6004.55	4
15000	2.44	12.17	0.79	6645.45	4
20000	3.05	10.39	0.64	6422.73	3
20000	3.05	10.39	0.79	7422.73	3
25000	3.20	11.81	0.79	8640.91	4

(Walas, Chemical Process Equipmen Selection and Design, 2012)

Cuadro 5. Dimensiones para tanques horizontales pequeños según Underwriter Laboratories

Capacidad (gal)	Diámetro(metros)	Longitud (metros	Espesor (cm)	Peso (kg)
280	1.07	1.22	0.48	245.45
550	1.22	1.83	0.48	363.64
1000	1.22	3.25	0.48	572.73
1000	1.63	1.83	0.48	527.27
1500	1.63	3.66	0.48	704.55
2000	1.63	4.86	0.48	886.36
3000	1.63	5.49	0.48	1240.91
4000	1.63	7.32	0.48	1595.45

(Walas, Chemical Process Equipmen Selection and Design, 2012)

4. Parámetros requeridos para diseño

Los parámetros dependen esencialmente del proceso requerido y no del tanque en particular. Se debe tener bien definido de donde provine la corriente de hidrocarburos que alimentará al tanque de almacenamiento, la tasa de producción de hidrocarburos que entrará diariamente, líneas de transporte, líneas de carga, descarga y desvíos de flujo entre otros. Entre los más importantes se encuentran:

a. Propiedades de los fluidos

Se deben de conocer las propiedades del fluido que será almacenado. Dependiendo si el hidrocarburo sea ligero o pesado, si tiene alto contenido de impurezas se deberá construir con materiales especiales que resistan la corrosión y los cambios de estado dentro del tanque. (Cano, 2015)

b. Flujos volumétricos

Es fundamental conocer la producción del campo o yacimiento del cual se recibirán los fluidos para almacenar. Dependiendo de las producciones máximas o mínimas, se estimará el tiempo de residencia en el tanque. De esta formase sabrá cuanto tiempo tiene disponible el tanque antes de ser llenado totalmente y si cuenta con la capacidad suficiente para cumplir con su objetivo. (Argüello & Cabezas , 2011)

c. Capacidad del tanque

Se debe conocer el volumen a almacenar para determinar la capacidad de los tanques. Estos van desde unos cuantos barriles, siguiendo por 500 hasta 20,000 barriles, en el Cuadro 4. Dimensiones para tanques horizontales o verticales según Underwriter Laboratories y Cuadro 5. Dimensiones para tanques horizontales pequeños según Underwriter Laboratories se muestran algunas especificaciones de las capacidades de los tanques atmosféricos. (Argüello & Cabezas , 2011)

5. Mediciones

La medición de tanques es la medición de líquidos en grandes tanques de almacenamiento con el fin de cuantificar el volumen y la masa del producto en los tanques. La industria de gas y petróleo generalmente utiliza evaluaciones volumétricas estáticas del contenido del tanque. Esto involucra las mediciones de nivel, temperatura y presión. Existen diferentes maneras de medir el nivel del líquido y otras propiedades del líquido. El método de medición depende del tipo de tanque, el tipo de líquido y la manera en la que se utiliza el tanque. (Argüello & Cabezas , 2011)

Medición estática de tanques de almacenamiento: el proceso de medición en los tanques de almacenamiento es un control indispensable en la cantidad de fluidos a la corriente de entrada. Con una medición precisa del nivel estático se toman decisiones debido al tiempo de residencia disponible, si se tiene el nivel adecuado para un mantenimiento, la cantidad de hidrocarburos para la venta final y en qué condiciones están, entre otros. (Cano, 2015)

La medición puede ser:

- Directa: se obtiene con un instrumento de medida que compara la variable a medir con un patrón.
- Indirecta: se obtiene mediante cálculos, a partir de las otras mediciones directas.

6. Instrumentación y dispositivos

a. Válvula de presión – vacío

Su función es liberar el exceso de presión o vacío que se puede generar en el interior del tanque debido a los cambios de temperatura y a los movimientos de carga y descarga de líquido.

b. Válvula de emergencia

Libera el exceso de presión que se puede generar en el interior del tanque debido a fuego externo.

c. Sensor de temperatura

Para monitorear la temperatura del líquido almacenado en el tanque.

d. Cámaras de espuma contra incendios

Para la inyección superficial de espuma contraincendios.

e. Transmisor de presión

Para medir la presión del líquido almacenado en el tanque.

(Cano, 2015)

7. Servicios auxiliares

Elementos adicionales usados en caso de contingencias o contaminación de los hidrocarburos con agua o fluidos no deseados dentro del tanque. Los servicios auxiliares ayudan a controlar este tipo de problemas, aunque no garantizan siempre el control de algún siniestro que pudo ser evitado con una buena planeación de trabajo. Para ello la prevención es la mejor forma de mantener la seguridad en una instalación.

a. Sistema contraincendios

Conformado por un sistema de aspersión (para el enfriamiento del tanque en caso de un incendio cercano) y un sistema de inyección de espuma superficial (para la extinción del fuego por medio de cámaras de espuma y un sistema de inyección de espuma subsuperficial). (Cano, 2015)

b. Drenaje

Conducto por el cual se eliminan los excesos de fluidos dentro del tanque de almacenamiento. Los tanques de almacenamiento deberán contar con una o varias boquillas para la toma de drenaje de las aguas aceitosas, las cuales deberán estar al ras del fondo o dependiendo a 30 o 50 centímetros del fondo. (Cano, 2015)

c. Venteo

Los tanques de almacenamiento deberán contar con una boquilla exclusiva para el venteo, debe ser diseñada de acuerdo con la norma API 2000. El propósito de este tipo de boquilla es que no se produzcan presiones internas al llenar o vaciar el tanque. La boquilla se ubicará en la parte más alta del tanque. (Cano, 2015)

Tipos de venteo: de acuerdo con el tipo de producto almacenado existen diferentes tipos de venteos, válvulas y/o accesorios.

Válvula de presión y vacío: Cuando los productos son volátiles, se necesita presurizar el tanque para que los vapores no se pierdan libremente en la atmósfera. Por este motivo es necesario colocar en el venteo una válvula de presión y vacío, de esta manera se cierra el tanque herméticamente, mientras no entra y sale producto de este, liberando los gases a partir de los rangos de presión y vacío mostrados en la válvula, de acuerdo a los valores de diseño del tanque.

Cuello de cisne o venteo libre: Cuando los productos almacenados son poco o no volátiles, el dispositivo a colocar en el venteo podrá ser un cuello de cisne. El mismo permite que la presión dentro del tanque esté siempre equilibrada con la atmósfera.

Válvula de presión y vacío con venteo dirigido: Cuando los productos almacenados emanan gases que no se desean ventear a la atmósfera o se pretenden recuperar para otros procesos.

8. Materiales

Según la norma UL – 142; Norma de Underwriters Laboratories de seguridad para tanques de acero sobre el suelo para líquidos inflamables y combustibles. los tanques deben estar construido de acero al carbono de grado comercial o acero inoxidable Tipo 304 o 316 según las especificaciones descrita en el estándar ASTM A167 "Especificación estándar para placa, lámina y banda de acero al cromo-níquel resistente al calor y al acero inoxidable" o el estándar ASTM A240 / A240M de "Especificación estándar para placas, láminas y tiras de acero inoxidable con cromo y cromo-níquel para dos recipientes a presión y para aplicaciones generales. (Underwriters Laboratories , 2006)

a. Acero inoxidable 304

El acero inoxidable grado 304 generalmente se considera el acero inoxidable austenítico más común. Contiene un alto contenido de níquel que típicamente está entre 8 y 10.5 por ciento en peso y una gran cantidad de cromo de aproximadamente 18 a 20 por ciento en peso. Otros elementos de aleación importantes incluyen manganeso, silicio y carbono. El resto de la composición química es principalmente hierro. Las altas cantidades de cromo y níquel le dan al acero inoxidable 304 una excelente resistencia a la corrosión. (Cano, 2015)

b. Acero inoxidable 316

Similar al 304, el acero inoxidable Grado 316 tiene altas cantidades de cromo y níquel. 316 también contiene silicio, manganeso y carbono, siendo la mayoría de la composición hierro. Contiene una cantidad significativa de molibdeno; típicamente del 2 al 3 por ciento en peso.

El mayor contenido de molibdeno da como resultado que el grado 316 posea una mayor resistencia a la corrosión. El molibdeno se agrega para ayudar a contradecir la desintegración a los cloruros (como el agua de mar y las sales de deshielo). (Cano, 2015)

EE. ALMACENAMIENTO DE SUSTANCIAS SÓLIDAS

En procesos químicos los sólidos se encuentran más frecuentemente en forma de partículas y son en general, más difíciles de tratar que los líquidos, vapores o gases. Es necesario un conocimiento de las características de masas de sólidos en forma de partículas para el diseño de procesos y del equipo que operan con corrientes que contienen tales partículas. Partículas sólidas individuales se caracterizan por su Tamaño, Densidad y Forma. El tamaño y la forma se pueden especificar fácilmente para partículas regulares, tales como esferas o cubos, pero para partículas irregulares es preciso definirlos arbitrariamente. (Ravenet, 1992)

El diámetro equivalente se define a veces como el diámetro de una esfera de igual volumen. Sin embargo, para materiales granulares finos resulta difícil determinar con exactitud el volumen. El área de la superficie se obtiene a partir de medidas desorción o de la caída de presión en un lecho de partículas. (Ravenet, 1992)

Las masas de partículas sólidas poseen muchas de las propiedades de un fluido. Ejercen presión sobre las paredes de un contenedor, fluyen a través de un orificio o descienden por una tolva. Diferencias con los líquidos y gases: Las partículas se entrecruzan y adhieren por efecto de la presión y no pueden deslizar

unas sobre otras hasta que la fuerza aplicada no alcanza un cierto valor, una presión aplicada en una dirección genera alguna presión en otras direcciones. La densidad de la masa puede variar, dependiendo del grado de empaquetamiento de los granos. (Ravenet, 1992)

Los sólidos en forma de partículas se dividen en dos clases: cohesivos y no cohesivos. Los materiales no cohesivos como grano, arena o briznas de plástico, fluyen fácilmente desde depósitos o silos. Los sólidos cohesivos, tales como arcilla húmeda, se caracterizan por su dificultad para fluir a través de orificios. (Ravenet, 1992)

1. Silos

Los silos son estructuras diseñadas para almacenar grano y otros materiales a granel, son parte integrante del ciclo de acopio. Los más habituales tienen forma cilíndrica, asemejándose a una torre, construida de madera, hormigón armado o metal. El diseño, inventado por Franklin Hiram King, emplea por lo general un aparejo mecánico para la carga y descarga desde la parte superior. Actualmente el diseño original se ha adaptado a otros usos en la industria, utilizándose silos para depósito de materiales diversos, como el cemento, y también se han adaptado al área militar, empleándose silos para depósito y manejo de misiles, por mencionar algunos. (Ravenet, 1992)

El almacenamiento del grano, por ejemplo, es importante para alargar el tiempo de comercialización, pueden ser almacenados en sacos o a granel. En sacos se pueden almacenar en cobertizos o en bodegas tratando de mantener una ventilación adecuada. Los depósitos para granos a granel son silos de metal, hormigón o madera, tienen un fondo plano o cónico. El fondo cónico permite la descarga del silo por gravedad. El fondo plano debe ser descargado manualmente o por medio de transportadores de gusano. (Ravenet, 1992)

Los silos metálicos de gran volumen constan de:

- Tolva subterránea, cubierta por medio de una rejilla, con un transportador de gusano, el grano a granel es descargado sobre la tolva con rejilla y el gusano alimenta los granos al elevador de cangilones
- Válvula o dispositivo con cinco vías con tubo telescópico que conduce el grano hacia el silo deseado en donde es distribuido automáticamente. El equipo secador que inyecta aire caliente distribuyéndolo por los granos.
- Gusanos removedores que mezclan los granos durante el secado, gusano en el doble fondo del piso, que después del secado lleva el producto hacia una tolva de descarga en el centro del piso y otro gusano horizontal, que lleva los granos deseados hacia la tolva subterránea y al elevador de cangilones.

a. Silos de torre

El silo de torre es una estructura de generalmente 4 a 8 m de diámetro y 10 a 25 m de altura. Su diseño original se debe al ingeniero estadounidense Franklin Hiram King. Puede construirse de materiales tales como vigas de madera, hormigón, vigas de hormigón, y chapa galvanizada ondulada. Los silos de torre que solo guardan ensilaje generalmente se descargan desde su parte superior. Esta tarea era originalmente hecha a mano con rastrillos, pero actualmente se realiza más a menudo con descargadores mecánicos. Algunas veces se utilizan cargadores para recoger desde las partes inferiores, pero hay problemas para hacer

reparaciones y con el ensilaje que se incrusta en las paredes de la estructura. Una ventaja de los silos de torre es que el ensilaje tiende a empacarse bien gracias a su propio peso, con excepción de algunos metros de la parte superior. (Ravenet, 1992)

b. Silos de búnker

Los silos de búnker son trincheras hechas generalmente de hormigón que se llenan y comprimen con tractores y máquinas de carga. Su costo es bajo y son convenientes para operaciones muy grandes. La trinchera rellena se recubre con una carpa para sellarlo herméticamente. Estos silos generalmente se descargan usando tractores y cargadores. Son de forma esférica, y tiene un tubo para pasar el alimento a una planta procesadora. (Ravenet, 1992)

c. Silos de bolsa

Silos de bolsa son bolsas plásticas de gran tamaño, generalmente 2 a 2½ m. de diámetro, y de un largo que varía dependiendo de la cantidad del material a almacenar. Se compactan usando una máquina hecha para ese fin, y ambos finales se sellan. Las bolsas se descargan usando un tractor y cargador, o un cargador con palanca. La bolsa se descarta por secciones mientras se destroza.

Los silos de bolsa necesitan poca inversión de capital y se pueden usar como una medida temporal cuando las condiciones de cosecha o crecimiento demandan más espacio, aunque algunas granjas los usan cada año. Se puede usar en cualquier periodo. (Ravenet, 1992)

2. Ángulo de reposo y deslizamiento

Cuando un sólido es vaciado sobre una superficie horizontal plana, el producto forma un montículo, simular a un cono invertido. El ángulo formado por la horizontal y la altura es el ángulo de reposo. El ángulo de reposo está influenciado por el tamaño, forma, volumen, superficie del sólido, contenido de humedad y orientación de las partículas que conforman la masa del grano. El ángulo de reposo varía con el contenido de humedad debido a la lámina superficial de humedad que rodea a cada partícula y a los efectos de la tensión superficial que predomina sobre los productos granulares. Igualmente cuando se llena un silo, el ángulo de reposo puede variar dependiendo la altura de llenado y el flujo del material. (Ospina, 2001)

Existen dos tipos de ángulos de reposo:

- Ángulo de reposo estático: es el ángulo que forma el material granular cuando se desliza sobre sí mismo.
- Ángulo de reposo dinámico: es el más importante y se presenta en todos los casos en que la masa granular se encuentra en movimiento, como en las operaciones de cargue y descargue de un silo, una bodega o una máquina.

El ángulo de reposo es un indicador útil para saber la fluidez del material. Entre menor sea el ángulo de reposo, más fácil se desliza el grano, sin riesgo de impacto. La inclinación de la pendiente es un factor de estabilidad muy importante. Esto porque con el aumento de la inclinación de la pendiente aumenta el efecto de la fuerza de gravedad en relación a la fuerza de rozamiento. De esta forma cuanto mayor la pendiente mayor que la tendencia de movimiento de los materiales sobre ella. La estabilidad de los materiales en

pendiente con diferentes inclinaciones está definida por los factores anteriormente mencionados. Cualquier factor que altere la inclinación de la pendiente puede por tanto alterar la estabilidad de las mismas (Ospina, 2001)

Algunos autores sugieren que ángulos hasta 35 º indican que el material puede fluir libremente, entre 35-45 º indican que el material es algo cohesivo, mientras que ángulos entre 45 y 55 º señalan una gran cohesividad del material, finalmente ángulos mayores a 55 º indican movilidad nula. A pesar de que el ángulo de reposo es indicativo de la capacidad de fluir del material, no debe usarse directamente en el diseño de silos. (Ospina, 2001)

Por ejemplo, un material que libremente posee un ángulo de reposo bajo (puede fluir bien) al momento de ser compactado por otras partículas que se almacenan sobre él, puede desarrollar fuerzas cohesivas que limiten la salida del material del silo. Como regla general, se puede decir que partículas más grandes tienen menores ángulos de reposo ya que tienden a adherirse menos que las partículas pequeñas. (Ospina, 2001)

Las partículas esféricas poseen menor que ángulo de reposo que las no esféricas. La humedad aumenta la cohesividad del material, por lo tanto el ángulo de reposo también aumenta. Si se aplican tensiones bajas a un sistema particulado, el ángulo de reposo puede ser de utilidad para el diseño de silos Es el ángulo que necesita dar a un plano para que el material se deslice por el mismo, debido a su propio peso. Este ángulo está obviamente influenciado por la rugosidad del plano (Ospina, 2001).

FF. TRANSPORTE MECÁNICO DE SUSTANCIAS LÍQUIDAS

1. Bombas

Las bombas incrementan la energía mecánica del líquido al aumentar su velocidad, presión o elevación. Las dos clases principales son las bombas de desplazamiento positivo y las bombas centrífugas. Las bombas de desplazamiento positivo aplican presión directamente al líquido por un pistón reciprocante. En este tipo de equipo, un volumen determinado de líquido queda encerrado en una cámara que se llena desde la entrada y se vacía a una presión más alta en la descarga. Se usan para generar presiones altas y para fluidos con densidades y viscosidades altas. En las bombas la densidad del líquido no cambia en forma apreciable y es posible considerarla constante. (McCabe, Smith , & Harriot, 2007).

a. Bombas de engranaje interno

En este tipo de bombas por cada revolución que dan los engranes permanecen unidos cierto tiempo, de esta manera los espacios ente los dientes se llenan de líquido, impidiendo la formación de cavidades. Las bombas de engranes internos bombean con viscosidades elevadas y líquidos de poca viscosidad, tales como propano y amoniaco líquidos. Además, a velocidades bajas y presiones de entrada bajas, proveen flujo constante e incluso descargan a pesar de condiciones de variación de presión. (McCabe, Smith , & Harriot, 2007)

b. Bombas de tornillo

Esta bomba utiliza un tornillo helicoidal excéntrico que se mueve dentro de una camisa y hace fluir el líquido entre el tornillo y la camisa. Usada para bombear fluidos viscosos, con altos contenidos de sólidos, que no necesiten removerse o que formen espumas si se agitan. Este tipo de bombas son ampliamente utilizadas en la industria petrolera, para el bombeo de crudos altamente viscosos y con contenidos apreciables de sólidos. (McCabe, Smith , & Harriot, 2007)

2. Número de Reynolds

Reynolds estudió las condiciones bajo la cuales un flujo laminar cambia a un flujo turbulento. En su estudio encontró que la velocidad crítica, a la cual el flujo laminar cambia a flujo turbulento depende de cuatro variables: el diámetro del tubo, la viscosidad, la densidad y la velocidad lineal promedio del líquido. (McCabe, Smith , & Harriot, 2007)

Reynolds, además, encontró que estas cuatro variables se pueden combinar para formar un número adimensional llamado el número de Reynolds. La transición del tipo de flujo ocurre para un valor definido del número de Reynolds. La transición del flujo laminar al turbulento puede ocurrir para un amplio intervalo de número de Reynolds.

En una tubería, un flujo es siempre laminar para números de Reynolds menores a 2100. Bajo condiciones ordinarias, el flujo en una tubería es turbulento a números de Reynolds mayores a 4000. Entre 2100 y 4000 existe una región de transición, en donde el flujo puede ser laminar o turbulento. (McCabe, Smith , & Harriot, 2007)

Ecuación 28

$$N_{Re} = \frac{D\bar{v}\rho}{\mu}$$

Donde:

D = diámetro del tubo

V= velocidad promedio del líquido

ρ = densidad del líquido

μ = viscosidad del líquido

3. Factor de fanning

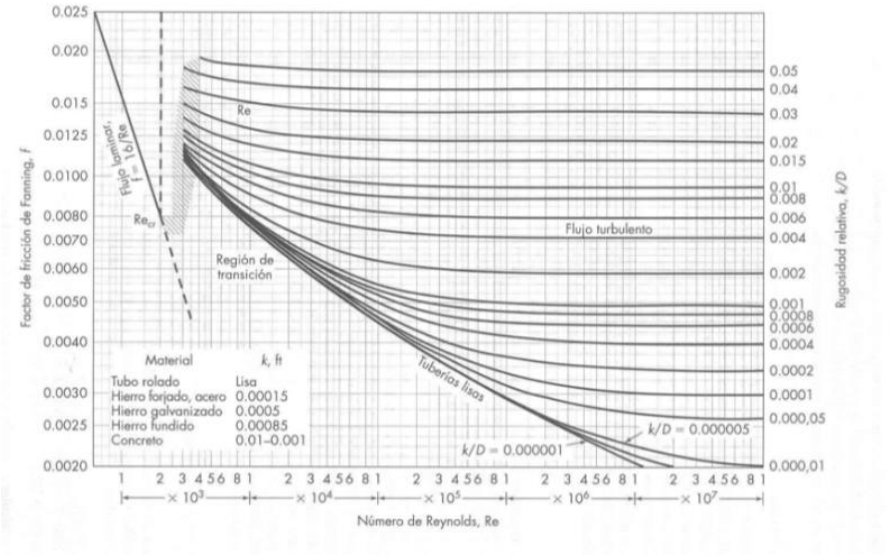
Es la relación entre el esfuerzo cortante y el producto de la carga de velocidad por la densidad. (McCabe, Smith , & Harriot, 2007).

Ecuación 29

$$f = \frac{\Delta p_s \, g_c \, D}{2 \, \Delta L \, \rho \, \bar{V}^2}$$

En la carta del factor de fricción, las líneas curvas del intervalo de flujo turbulento representan los factores de fricción para diferentes tipos de tuberías, cada uno de los cuales posee un diferente valor de k. Las tuberías estiradas de cobre y latón pueden considerarse hidrodinámicamente lisas. (McCabe, Smith , & Harriot, 2007).

Figura 19. Carta del factor de fricción.



Tomado de: (McCabe *et. al.* , 2007)

4. Pérdidas por fricción

- Pérdida por fricción de forma: esta pérdida de fricción se da en función de la posición y forma de los sólidos y ocurre cuando la capa límite se separa y hay disipación adicional de energía. (McCabe, Smith , & Harriot, 2007)
- Pérdida por fricción debido a válvulas y accesorios: Las pérdidas de fricción por accesorios están dadas por la fricción generada cuando el flujo pasa por cada uno de ellos, que su pérdida es mayor que cuando pasa por una tubería recta. Estás pérdidas se puede calcular de la siguiente manera:

Ecuación 30

$$h_{fc} = K_{ff}\frac{\bar{V}_a^2}{2}$$

Dónde Kff es el factor de pérdida del accesorio, el cual no se calcula, sino se encuentra en tablas. (McCabe, Smith , & Harriot, 2007)

- Pérdida por fricción debido ensanchamiento en tubería: En una tubería, cuando ocurre una expansión el flujo se separa de la pared creando un espacio entre el expansor y la tubería, hasta que vuelve a ocupar todo el espacio del conducto. (McCabe, Smith , & Harriot, 2007)

Ecuación 31

$$h_{fe} = K_e\frac{\bar{V}_a^2}{2}$$

GG. TRANSPORTE MECÁNICO DE SUSTANCIAS SÓLIDAS

1. Banda transportadora

Una banda transportadora es un sistema de transporte consistente en una cinta que se mueve continuamente entre dos tambores. El funcionamiento una cinta transportadora consiste en el movimiento de un soporte físico continuo, la banda o cinta, montado sobre unas plataformas de dimensiones variables y que pueden contar con distintos tipos de accesorios (guardas laterales, topes, desviadores, barandillas, ruedas y otro tipo de accesorios neumáticos o mecánicos). La velocidad y capacidad de carga dependerán tanto de las características del material a desplazar (polvo, grano fino, paquetes, etc.) como del tipo de cinta transportadora. (Miravete & Larrodé, 2004)

Aunque su principio básico de funcionamiento pueda parecer simple (el movimiento de una banda debido al giro de los tambores o poleas que a su vez son accionados por un motor); el sistema de una cinta transportadora utilizada en la industria es bastante más complejo y llevan aparejado un importante desarrollo tecnológico con aplicaciones técnicas realmente innovadoras. (Miravete & Larrodé, 2004)

Esta banda es arrastrada por fricción por uno de los dos tambores, que es accionado por un motor. El otro tambor gira libremente y tiene como función el de servir de retorno a la banda. Entre los dos tambores la banda es soportada por rodillos. El material depositado sobre la banda es transportado hacia el tambor con motor de accionamiento, que es precisamente donde la banda gira y da vuelta en sentido contrario. Cuando el material de la banda llega a esta zona sale de la misma por la acción de la fuerza de gravedad. (Miravete & Larrodé, 2004)

Los tres componentes básicos de una banda transportadora son:

- Cinta o banda

Uno de los principales materiales utilizados es la tela engomada, pero pueden tener composición muy variable, principalmente derivados del caucho. También podemos encontrar bandas modulares plásticas, realizadas en poliéster, PVC, poliamida, acetal, etc. Esto permite disponer de cintas transportadoras para muy diversos usos. (Miravete & Larrodé, 2004)

En la composición o estructura de la banda pueden variar el número de capas y las distintas calidades de revestimiento según su uso en cada tipo de industria (resistencia a fuego, aceites y grasa, productos químicos, resistencia a la tensión, deslizamiento, etc.). Recordemos que sobre una cinta transportadora se pueden trasladar desde materiales abrasivos o cortantes (arenas, gravas, etc.) como productos más delicados (por ejemplo, frutas). (Miravete & Larrodé, 2004)

Igualmente, las cintas pueden variar en anchura y grosor según la capacidad de carga. Las bandas también pueden fabricarse con distintos colores o dibujos (rayas o marcas) para ayudar en la automatización de procesos; y su superficie puede presentar distinta rugosidad o incluso relieves para evitar que las mercancías resbalen o rueden, así como para permitir traslados con distintos ángulos de inclinación sin que los materiales caigan (desde inclinaciones suaves, 15°, hasta más marcadas, 45°). (Miravete & Larrodé, 2004)

- Tambores o poleas y motor

Los tambores son los rodillos que, con su giro, provocan el avance de la cinta debido a la fricción de esta sobre ellos (transmisión de banda) o por la acción de piñones y bandas dentadas (transmisión de cadena). En un esquema general de la transmisión de una cinta transportadora de banda tenemos que el movimiento se genera en el tambor motriz al que irá conectado el motor. Por su parte, el tambor de reenvío provocará el retorno de banda hacia la parte superior. Los tambores de inflexión se sitúan por la parte inferior de la banda a la salida del tambor motriz y a la entrada del tambor de reenvío para modificar el ángulo de salida y entrada a estos. De esta forma, se asegura que la superficie de banda que entre en contacto con ellos sea la óptima para conseguir así el máximo rendimiento y eficiencia. También se pueden situar por debajo de la cinta los tambores de desvío que se encargan de dirigirla hacia el tambor de tensión para mantener la correcta tensión de la banda. Además de los mencionados, y dependiendo del tipo y uso de la cinta transportadora, podemos encontrar otros tipos de tambores con distinta funcionalidad, por ejemplo en cintas transportadoras con ángulos de elevación. (Miravete & Larrodé, 2004)

Según la localización del tambor motriz podemos encontrar motorización en cabezal o frontal y motorización central. La potencia y características del motor dependerán del tipo de cinta transportadora y su uso. Igualmente, la capacidad de automatización de su funcionamiento será un aspecto muy importante en algunos sistemas de producción.

- Estructura

Los bastidores sobre los que se monta y se desplaza la banda transportadora están formados por una estructura normalmente metálica (acero pintado, cincado, acero inoxidable, etc.). Esta puede variar en longitud, altura y forma (cintas en curva); así como permitir el acceso para la manipulación de operarios sobre el material transportado. Este chasis puede incorporar las guías de deslizamiento, además de carriles laterales o guías de plástico a los lados para acompañar a la cinta en su recorrido. Sobre la estructura se acoplarán y montarán todos los elementos principales de la cinta así como los sistemas accesorios que aportan fiabilidad al sistema completo. La estructura debe ser resistente y proporcionar fiabilidad y durabilidad al sistema, permitiendo el óptimo funcionamiento de la cinta transportadora en las distintas condiciones ambientales de uso: resistencia a humedad, temperatura, oxidación, resistencia a golpes accidentales, etc. (Miravete & Larrodé, 2004)

Las bandas transportadoras se utilizan para el transporte de:

- Materiales como carbón, minerales y cereales
- Transporte de personas en recintos cerrados
- Cargar y descargar buques cargueros o camiones
- Transportar material por terreno inclinado
- Estas bandas pueden ser:
- De tornillo
- De suelo móvil
- De rodillos

Además de los componentes básicos relacionados con el movimiento, una cinta transportadora cuenta con un importante número de sistemas accesorios que aseguran la estabilidad del movimiento, además de aportar versatilidad y adaptación a los distintos tipos de cargas (Miravete & Larrodé, 2004)

Algunos elementos accesorios son:

- Estaciones de impacto con estructuras almohadilladas para la recepción de carga.
- Estaciones autocentrantes para la recolocación de la cinta.
- Sistemas para transporte plano o acanalado (en cuna).
- Estaciones autolimpiantes de retorno: raspadores y limpiadores para eliminar restos y limpiar la banda antes de su retorno.
- Sistemas para el ajuste de la tensión: permiten el ajuste de los tambores.
- Sistemas de automatización: sensores electrónicos para la regulación de velocidad, parada e inicio, con el fin de mantener un flujo continuo y sincronizado del trabajo de la cinta transportadora mediante un software de gestión

(Miravete & Larrodé, 2004)

Los transportadores de banda o cintas transportadoras son elementos fundamentales en la industrial actual. El correcto funcionamiento de las cintas transportadoras puede llegar a ser decisivo en la eficacia de la cadena de producción al completo y la logística de un almacén. (Miravete & Larrodé, 2004)

Aunque el principio de funcionamiento es general para todas ellas, se trata de un sistema muy versátil, pues existen una gran variabilidad de transportadores de banda (planos, ascendentes, con inflexiones, curvos, espirales de baja y alta velocidad) así como distintas opciones de fabricación, lo que permite adaptar su funcionamiento al transporte y manipulación de casi cualquier tipo de producto. (Miravete & Larrodé, 2004)

2. Elevador de cangilones

Los transportadores o elevadores de cangilones: Son máquinas de transporte continuo que se emplean para la manipulación de materiales a granel como talcos granulados y en pedazos pequeños por una traza vertical o inclinada (más de 60 grados sobre la horizontal, sin que se produzcan paradas entre la carga y descarga del material transportado. (Miravete & Larrodé, 2004)

Los transportadores o elevadores de cangilones están compuestos por un órgano de tracción que puede ser de banda o cadenas, en el cual se fijan los cangilones. Todo el conjunto se moverá alrededor de la tambora motriz y de atezado, colocadas en el extremo superior e inferior respectivamente. En el caso de emplearse cadenas como lo órgano de tracción, el lugar de tamboras se emplearán catalinas. Todo lo anterior va encerrado una armadura metálica compuesto de tres partes: superior, intermedia e inferior. (Miravete & Larrodé, 2004)

En la parte superior se coloca el sistema propulsor compuesto por reductor, el freno y el motor eléctrico; en la parte inferior se sitúa el sistema de atezado. Estos se construyen estacionarios e inmóviles. En ocasiones, además de elevar la carga, garantizan un determinado proceso tecnológico, por ejemplo la

extracción del material sumergido en el fluido separando de él. Solamente pueden transportar la carga desde un punto inferior hasta el final del elevador sin entradas o salida de este entre puntos intermedios. (Miravete & Larrodé, 2004)

El Transportador de cangilones se ponen funcionamiento a través del sistema propulsor el cual por mediación de la tambora motriz o catalina, en dependencias del órgano de tracción que se utilice proporciona movimiento al mismo, en el que van a ir acoplado los cangilones que son los encargados de recoger la carga de la parte inferior y elevar la hasta el punto de descarga. El material se introduce al elevador por un conducto que se encuentra en la parte inferior y se descarga por la parte superior. (Miravete & Larrodé, 2004)

Las ventajas de utilizar este método de transporte son:

- Variedad de manipulación de materiales.
- Amplio rango de capacidades.
- Amplio rango de longitudes de transportación.
- Gran facilidad para la carga y descarga del material.
- Estructura liviana.
- Trazas horizontales y verticales.
- Desgate mínimo y fácil mantenimiento.
- Bajo consumo de energía.
- Posibilidad de transportación por el ramal superior e inferior y si fuera necesario por ambos a la vez.
- Bajos niveles de ruido.
- Construcción y montaje simple comparado con otros transportadores.

3. Tornillo sin fin

Un tornillo sin fin se utiliza para transmitir la potencia entre ejes que se cruzan, casi siempre perpendicularmente entre sí. En un pequeño espacio se pueden obtener satisfactoriamente relaciones de velocidad comparativamente altas. La velocidad de giro del eje conducido depende del número de entradas del tornillo y del número de dientes de la rueda. Si el tornillo es de una sola entrada, cada vez que éste de una vuelta avanzará un diente. (Miravete & Larrodé, 2004)

Desde el punto de vista conceptual el sinfín es considerado una rueda dentada de un solo diente que ha sido tallado helicoidalmente (en forma de hélice). Este operador ha sido diseñado para la transmisión de movimientos giratorios, por lo que siempre trabaja unido a otro engranaje. El tornillo sinfín se puede considerar, por tanto, como una rueda dentada de un número de dientes igual al número de entradas. (Miravete & Larrodé, 2004)

El tornillo sinfín, acompañado de un piñón (mecanismo sinfín-piñón), se emplea para transmitir un movimiento giratorio entre ejes perpendiculares que se cruzan, obteniendo una gran reducción de velocidad. Puede ser encontrado en limpiaparabrisas, clavijas de guitarra, reductores de velocidad para motores, manivelas para andamios colgantes. (Miravete & Larrodé, 2004)

Este mecanismo permite transmitir el movimiento entre árboles que se cruzan. El árbol motor coincide siempre con el tornillo sin fin, que comunica el movimiento de giro a la rueda dentada que engrana con él, llamada corona. Una vuelta completa del tornillo provoca el avance de un diente de la corona. En ningún caso puede usarse la corona como rueda motriz. Puede observarse un tornillo sin fin en el interior de muchos contadores mecánicos.

Los tornillos sin fin se utilizan en prensas, laminadores, cadenas de montaje, maquinaria en industrias de explotación minera, en timones de barco y en sierras circulares. Además, en fresadoras y máquinas herramienta sirven para ubicar los útiles de corte en la zona de trabajo con alta precisión, utilizando sistemas de doble tornillo con tolerancias estrictas. También se utilizan en los mecanismos de control de muchos tipos de ascensores y de escaleras mecánicas, debido a su tamaño compacto y a la no reversibilidad del movimiento. (Miravete & Larrodé, 2004)

Mecanismos sin fin de plástico a menudo se utilizan con motores eléctricos pequeños, para obtener una salida con muchas menos revoluciones que el motor, que funciona mejor a una velocidad bastante alta. Este sistema se utiliza a menudo en juguetes y en otros aparatos eléctricos pequeños. (Miravete & Larrodé, 2004)

Las abrazaderas para tubo utilizan para ajustar su tamaño un tornillo sin fin que encaja en una serie de ranuras. En ocasiones, un sin fin se puede diseñar para funcionar a la inversa, resultando que el eje de salida gira mucho más rápido que el de entrada. Ejemplos de esto pueden verse en algunas centrifugadoras manuales o en el mecanismo regulador de velocidad de las cajas de música. (Miravete & Larrodé, 2004)

HH. POLÍTICA NACIONAL PARA EL MANEJO INTEGRAL DE LOS RESIDUOS Y DESECHOS SÓLIDOS

La Política Nacional para el Manejo Integral de los Residuos y Desechos Sólidos es un documento es un documento aprobado por el Gobierno de Guatemala y se identifica como el "Acuerdo Gubernativo No. 111-2005". Este acuerdo fue creado debido a que la contaminación por desechos sólidos es uno de los indicadores principales del ascenso de la contaminación en el país, teniendo un impacto negativo en los recursos naturales y en los ecosistemas, flora y fauna, que forman parte de Guatemala. (Sólidos, 2005).

La Política Nacional para el Manejo Integral de los Residuos y Desechos Sólidos tiene como objetivo principal la "reducción los niveles de contaminación ambiental que producen los residuos y desechos sólidos, para que Guatemala sea un país más limpio y ordenado que brinde a su población un ambiente saludable." En cuanto a los objetivos específicos, están subdivididos en diferentes ámbitos que forman parte de un país:

- Ámbito político-institucional.
- Ámbito social.
- Ámbito económico.
- Ámbito ambiental y de salud. (Sólidos, 2005).

Para que se puedan cumplir los ámbitos mencionados previamente, la Política se debe regir al Artículo 97 de la Constitución de la República, definido como "... El Estado, las municipalidades y los habitantes del territorio nacional están obligados a propiciar el desarrollo social, económico y tecnológico que prevenga la contaminación del ambiente y mantenga el equilibrio ecológico". Este continua "... se dictarán todas las normas necesarias para garantizar que la utilización y el aprovechamiento de la fauna, flora, tierra y agua, se realicen racionalmente, evitando su depredación".

II. EMPRESAS QUE PRESTAN SERVICIO DE TRATAMIENTO DE DESECHOS SÓLIDOS

En Guatemala existen diferentes empresas que se encargan del tratamiento de desechos sólidos, abarcando diferentes tipos de plásticos, materiales, entre otros. A continuación, se presentan varias empresas, junto con los servicios que prestan:

1. ProVerde

Empresa fundada en el 2013 en la Ciudad de Guatemala, que tiene como visión el proveer servicios de gestión integral de residuos, a través de servicios diferenciados que generan un valor social y ambiental. (ProVerde, 2013).

Algunos de los servicios que presta son:

- Recolección y transporte.
- Servicios de laboratorio, desde el muestreo hasta la caracterización de los residuos.
- Coprocesamiento de los residuos.
- Destrucciones auditadas.
- Capacitación al personal del cliente sobre Gestión Integral de Residuos.
- Asesoría en programas de gestión integral de residuos para municipalidades. (ProVerde, 2013).

El precio de los servicios prestados variará dependiendo del tipo de desecho, la ubicación de donde se producen y el volumen de estos. (ProVerde, 2013).

Los residuos que ProVerde tiene la capacidad de tratar son los siguientes:

- Llantas de vehículos.
- Materiales de empaque.
- Granos.
- Pinturas a base de agua.
- Aguas contaminadas.
- Residuos textiles.

(ProVerde, 2013)

2. Hojas verdes

Empresa fundada en Guatemala que tiene como objetivo la reducción de la contaminación ambiental proveniente del mal manejo de residuos sólidos y de aceites, y la reforestación de áreas que han sido afectadas por las industrias agrícolas. Tiene como visión la mejora del medio ambiente en el país, a través de reforestar y desechar de manera correcta los desechos que tengan la posibilidad de arriesgar los recursos naturales.

3. Ecotermo

Empresa fundada en Guatemala con más de 15 años experiencia en el mercado de manejo de desechos biológico-infecciosos e industriales. La misión principal de la empresa se define como "*Proveer soluciones integrales y de valor agregado en el manejo de Desecho Sólidos Hospitalarios e Industriales; motivando siempre la excelencia en la preservación del Medio Ambiente…".* (Ecotermo, 2019).

Algunos de los servicios que presta son los siguientes:

- Asesoría y capacitación: se da para realizar de manera correcta la segregación, clasificación, envasado y almacenamiento de desechos bio-infecciosos e industriales.
- Tratamiento de desechos.
- Recolección y transporte.
- Disposición final de desechos.

(Ecotermo, 2019).

4. Eco-Reprocesos

Empresa guatemalteca con más de 15 años de experiencia, dedicada al manejo técnico de desechos sólidos y líquidos industriales y comerciales. Los tratamientos brindados se basan en normativas internacionales. (Eco-Procesos, 2019).

Algunos de los servicios que presta son los siguientes:

- Manejo de lodos.
- Trituración y molienda.
- Incineración.
- Desnaturalización y neutralización.
- Compactación.
- Pirólisis.

(Eco-Procesos, 2019).

5. Biotrash

Es la primera empresa a nivel centroamericano especializada en soluciones innovadoras en el manejo de desechos peligrosos, involucrada en el proceso desde la recolección de los sólidos hasta la transformación de estos. (Biotrash, 2019)

Algunos de los servicios que presta son los siguientes:

- Tratamiento de desechos bioinfecciosos.

- Tratamiento de desechos químicos.
- Tratamiento de desechos industriales.
- Tratamiento de desechos tóxicos.
- Tratamiento de desechos con mercurio.
- Reciclaje.
- Asesoría y educación ambiental.

(Biotrash, 2019).

JJ. COMPONENTES QUÍMICOS DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS

1. Componentes principales encontrados en el producto gaseoso

a. Propileno

El propileno es un gas incoloro inflamable, perteneciente a la familia de los hidrocarburos alcanos. Tiene un aroma similar al ajo y es utilizado en la industria química como un intermediario en la síntesis de otros derivados, por ejemplo, el polipropileno, óxido de propileno, alcohol isopropílico, acetona y acetonitrilo. Su proceso de producción es similar al del etileno, pues es obtenido a través de craqueo al vapor (proceso utilizado para la disminución del tamaño de las partículas, a través de inyección de vapor en los catalizadores) de materias primas de hidrocarburos. (ChemicalBook, 2019g)

2. Componentes principales encontrados en el producto líquido

a. 3-penten-2-eno

Es un líquido incoloro con un aroma frutal, pero de estar bastante tiempo en almacenamiento, este se transforma en un olor fuerte. Este compuesto se obtiene del reflujo entre el 4-hidroxi-pentan-2-ona y el ácido oxálico. (ChemicalBook, 2019e).

b. 2,4-dimetil-1-hepteno

No existe información suficiente sobre la utilización y precio comercial, aparte de algunas propiedades fisicoquímicas, de este compuesto. (ChemicalBook, 2019c).

c. 2,3,7-trimetil-4-octeno

No existe información suficiente sobre la utilización y precio comercial, aparte de algunas propiedades fisicoquímicas, de este compuesto. (ChemicalBook, 2019b)

3. Componentes principales encontrados en el producto sólido

En la pirólisis se puede encontrar como otro producto el “char de pirólisis”. Este es un residuo carbonoso que puede llegar a ser utilizado como un combustible, para la producción de carbón activo o como un mejorador de suelos.

Un mejorador de suelos es una sustancia sólida que tiene como finalidad mejorar la estructura del suelo, aumentando la aireación, los nutrientes que este contiene y la capacidad de retener el agua. Dependiendo de la formulación del mejorador, este puede aumentar o disminuir el nivel de pH.

Existen diferentes tipos de mejoradores de suelos, presentados a continuación:

a. Turba de Sphagnum

Se especializa en absorber agua y liberarla de manera lenta para que las raíces de la planta la absorban eficazmente. Agrega masa al suelo arenoso, aliviana el suelo compuesto de arcilla y proporciona aireación.

b. Humus

Materia orgánica descompuesta que ayuda a mejorar la fertilidad del suelo y la aireación, teniendo como resultado que este se mantenga más húmedo.

c. Abono compuesto

Mejora la aireación y la retención de humedad del suelo. Es un subproducto proveniente de la industria ganadera.

d. Compost de hongos

Mezcla que está constituida de paja, turbas y demás componentes orgánicos. Este es utilizado en viviendas en su mayoría, puesto que ayuda al crecimiento del pasto.

e. Tierra vegetal

Tipo de compost con una textura rugosa, por lo que es ideal para su uso en jardines de viviendas. Cabe mencionar que debe ser mezclado con otro tipo de productos y no utilizarse como tierra únicamente.

KK. DESARROLLO DE PATENTE DE INVENCIÓN SEGÚN EL REGISTRO DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL

Según la (RAE, n.d.), el término patente de invención "es un documento en el que se le reconoce a alguien una invención y los derechos que de ella derivan".

Esto aplica para un producto, objeto, maquinaría, entre otros, que una persona o empresa desarrollen desde un inicio. En Guatemala es necesario acudir al Departamento de Patentes del Registro de la Propiedad Intelectual para su desarrollo, respaldado por el Decreto 57-2000 del Congreso de la República que dicta la Ley de Propiedad Intelectual. Este departamento busca la protección legal de los inventos y modelos de utilidad del cliente a través de un título o certificado que confiere al inventor la exclusividad del producto, dentro de territorio guatemalteco durante un tiempo establecido. (Gobierno de Guatemala, 2019).

Para la solicitud, otorgamiento y seguimiento de una patente, es necesario seguir los siguientes 8 pasos determinados por el Registro de la Propiedad Intelectual:

- Presentación de formulario de solicitud.
- Examen de forma.
- Publicación de edicto en el diario oficial.
- Periodo de observaciones.

- Examen de fondo.
- Otorgamiento de la patente o registro.
- Vigencia de la protección.
- Pago de anualidades. (Gobierno de Guatemala, 2019).

A continuación, se presenta el costo que conlleva el proceso para el otorgamiento de una patente de invención:

Cuadro 6. Costos de solicitud de una patente de invención

Etapa	**Precio**
Tasa de ingreso de la solicitud	Q. 2500.00
Costo de edicto	Q. 50.00
Publicación en el diario oficial	---
Tasa de examen de fondo	Q. 3000.00
Inscripción en el libro de patentes o registro	Q. 450.00
título	Q. 50.00
Total de gastos	Q. 6050.00

LL. COSTOS DE OPERACIÓN

Es necesario verificar los costos de operación que se tendrán al momento de realizar la pirólisis, por lo que la definición de costos de operación según (Everett E., 1991) *"son los gastos necesarios para mantener un proyecto, línea de procesamiento o un equipo en funcionamiento".* A través del tiempo de uso con relación a la cantidad técnica especificada por el equipo, operario, entre otros, al utilizarse en la producción es determinado el costo. Existen dos tipos de costos, que serán presentados a continuación:

- ***Costos variables:*** este tipo de costos dependerá de la producción. Mientras más unidades se hayan producido, el costo se repartirá en cada una de estas unidades. Sin embargo, mientras menos unidades se produzcan, el costo de cada una aumentara. (Everett E., 1991).
- ***Costos fijos:*** este tipo de costos son independientes de la producción, permaneciendo iguales, a menos que exista un cambio a la institución a quien se le paga. Por ejemplo, un costo fijo es el pago de servicios de un local, como la luz, agua, etc. (Everett E., 1991).

MM. VALOR ACTUAL NETO

El valor actual neto de un proyecto tiene como definición el valor actual de un flujo de efectivo (ingresos y egresos en un tiempo determinado) de una propuesta de un proyecto. Los flujo deben de actualizarse utilizando una tasa de expectativa, que, por definición, es una medida de la rentabilidad mínima que debe de tener el proyecto para la recuperación de la inversión inicial, cubrimiento de costos, entre otros. (Mete, 2014).

Para la obtención del valor neto actual, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$VAN = (\sum_{t=1}^{n} FE(t) * (1+i)^{(0-t)})(I(o)(I)$$

(Mete, 2014)

Donde:

- VAN es el valor neto actual.
- FE(t) es el flujo de efectivo en un periodo de tiempo t.
- i es la tasa de expectativa.
- n es el número de períodos de vida del proyecto.
- I(o) es la inversión inicial. (Mete, 2014)

Teóricamente, un proyecto es factible, siempre y cuando, su valor neto actual sea mayor o sea igual a cero, de lo contrario, el proyecto es rechazado.

Existen situaciones en las que se presentan dos o más proyectos, por lo que se elige el que tenga el valor de VAN más alto. (Mete, 2014). Siendo más específico, un valor de VAN negativo no demuestra que no se están obteniendo beneficios, sin embargo, si demuestra que, posiblemente, no se están cubriendo las expectativas del proyectos mismo. Debido a esto, un valor de VAN que sea cero demuestra que apenas se llegan a cubrir los costos del proyecto, mientras si es mayor a cero, se cubren estos costos y aún se obtiene un beneficio. (Mete, 2014).

NN. TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

La tasa interna de retorno (TIR) tiene como definición la tasa de descuento, que tiene el mismo valor que el valor presente de todos los ingresos del proyecto como con los egresos de este. (Mete, 2014). Determina el rendimiento de la inversión inicial del proyecto y depende únicamente de los flujos de efectivo de este. Para poder realizar el cálculo de la tasa interna de retorno, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sum_{t=0}^{n} FE/(1+TIR)^{t} = VAN = 0$$

(Mete, 2014)

Donde:

- TIR es la tasa interna de retorno.
- VAN es el valor actual neto.
- FE(t) es el flujo de efectivo del periodo t.
- n es el número de períodos de vida que tiene el proyecto. (Mete, 2014).

Existen diferentes factores que ayudan a entender el criterio de aceptación de la tasa interna de retorno, los cuales son:

- Si el TIR es mayor a la tasa de expectativa, la atracción financiera por el proyecto es alta, pues los ingresos tienen la capacidad de cubrir los egresos y generan beneficios más allá de los que se esperaban.
- Si el TIR es menor a la tasa de expectativa, la atracción por el proyecto es baja, pues existe la posibilidad de alternativas que sean de mayor interés y que tengan un mejor resultado. Dentro de este criterio de aceptación, existen dos escenarios:
- Si el TIR es menor a la expectativa, pero mayor a cero, los ingresos cubren los costos de una manera apenas eficiente y no existe generación de beneficios adicionales.
- Si el TIR es menor a cero, los ingresos no cubrirán los costos y la inversión inicial, generando pérdidas hacia la empresa. (Mete, 2014).

OO. TASA MÍNIMA ATRACTIVA DE RETORNO (TMAR)

El TMAR o la tasa mínima atractiva de retorno es un factor que se utiliza como referencia para la determinación sobre la posibilidad de generación de ganancias del proyecto. (CPE, 2012).

Existen tres posibilidades que se pueden tomar en base al valor del TMAR, los cuales son:

- Si el valor del TMAR es menor al valor de la inflación, el proyecto no es rentable y la inversión en el no ocurrirá, pues no habrá ganancias, solo pérdidas.
- Si el valor del TMAR es igual al valor de la inflación, no habrá generación de ganancias ni de pérdidas por parte del proyecto.
- Si el valor del TMAR es mayor al valor de la inflación, la rentabilidad del proyecto es aceptable y habrá interés por parte de la empresa en invertir en él, pues se cubrirá la inversión inicial y se generarán ganancias. (CPE, 2012).

El TMAR se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$TMAR = Tasa\ de\ inflación\ +\ riesgo\ de\ la\ inversión$$

(CPE, 2012).

Donde:

La tasa de inflación es un valor que se puede obtener a partir de los datos proporcionados por el gobierno de cada país y varía dependiendo del año. Este valor está representado en porcentaje.

El riesgo de la inversión está representado como un porcentaje, determinado a través de un estudio de mercado, sobre la remuneración que obtendrá el inversionista. (CPE, 2012).

- Riesgo bajo: existe una estabilidad constante en la demanda del producto o servicio a dar, sin alta presencia de competidores, teniendo como resultado entre un 3% a un 6% de riesgo.
- Riesgo medio: existe una variabilidad en la demanda del producto o servicio, con presencia considerable de competidores, teniendo como resultado entre un 6% a 10% de riesgo.
- Riesgo alto: el precio del producto varía considerablemente debido a la oferta y la demanda presente en el mercado, teniendo como resultado más de 10% de riesgo. (CPE, 2012).

PP. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Al momento de realizar un análisis económico con proyecciones a futuro, existe un grado de incertidumbre entre las alternativas que son estudiadas, lo que afecta la toma de decisiones.

El propósito de realizar un análisis de sensibilidad es facilitar la toma de decisiones, esto a través de determinar las variables que más afectan el resultado económico de un proyecto.

Para realizar la sensibilidad de una propuesta individual, se debe realizar respecto al parámetro más incierto. Un ejemplo es la posible evaluación en donde se tenga incertidumbre con respecto al precio unitario de venta de productos. Para estos casos, es necesario determinar qué tan sensible es la Tasa Interna de Retorno y el Valor Actual Neto para una variación en el precio unitario de venta, partiendo de la propuesta más atractiva económicamente. (Cross Bu, 1981)

V. ANTECEDENTES

A. SITUACIÓN ACTUAL DE DESECHOS DE EMPAQUE PLÁSTICO DE POLIPROPILENO SEGÚN EMPRESA ALIMENTICIA

El presente estudio se realizó para una empresa alimenticia que rechazó en el último año alrededor de 46 toneladas métricas de material de empaque de polipropileno metalizado porque no cumplía con los requisitos de control de calidad. Actualmente, no se realiza ningún proceso de tratamiento para este desecho y se contrata una empresa externa para su eliminación. El siguiente cuadro muestra las especificaciones del material de empaque utilizado el cual es de polipropileno biorientado (BOPP) metalizado y transparente.

Cuadro 7. Especificaciones de material de empaque BOPP

Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor total (mm)	Rendimiento (g/m^2)	BOPP transparente (g/m^2)	Tinta (g/m^2)	Adhesivo (g/m^2)	BOPP metalizado (g/m^2)
204	150	0.0325	30.3	13.65	1	2	13.65

B. INVESTIGACIÓN DE PIRÓLISIS DE PLÁSTICOS EN REVISTAS CIENTÍFICAS

Revista de manejo y conversión energética. La revista "Energy Conversion and Management" publica investigaciones relacionadas con temas de generación, conversión, manejo y sustentabilidad de energía. Sharuddin, Abnisa, & Kheireddine (2016) realizaron una investigación de los procesos de pirólisis para cada tipo de plásticos y los principales parámetros que influían en los productos gaseosos, líquidos y char. De acuerdo con la revisión literaria que presentaron, la pirólisis es una de las vías para convertir los desechos y plásticos en productos líquidos, gaseosos y de amplio rango de ebullición que pueden competir en propiedades con combustibles destilados a base de petróleo. Puede tratar diferentes tipos de residuos plásticos sin separación previa y convertirlos en combustible líquido, que se puede utilizar para generar energía en la industria. Concluyeron que es una alternativa para la conversión de residuos plásticos porque es económica en términos de operación y sustentable por la cantidad de plásticos generados mundialmente.

Revista de pirólisis analítica y aplicada. La revista "Journal of Analytical and Applied Pyrolysis" se dedica a la publicación de artículos relacionados con aplicaciones innovadoras de los procesos de pirólisis, caracterización de los productos, mecanismos de reacción, entre otros. Específicamente de pirólisis de polipropileno, en el 2011 se publicó un estudio de la Academia China de las Ciencias acerca de la pirólisis a baja temperatura de mezclas de plásticos que incluían polipropileno y polietileno de alta y baja densidad. Para fines de este trabajo se consideró el modelo utilizado para las curvas de calentamiento de la investigación ya que también era realizado en condiciones no isotérmicas.

Abbas-Abadi *et.al* publicó en el 2014 la investigación de la influencia de los parámetros de pirólisis de polipropileno sobre el rendimiento y la composición del producto condensado empleando un reactor y una temperatura entre 420 y 510 ° C.

El rendimiento de líquido más alto fue 92.3% en peso. a 450 ° C. Las temperaturas cada vez más altas causaron una disminución en la producción del líquido. Los componentes de este producto se agruparon en cuatro clases diferentes: cicloalcanos, alcanos, alquenos y aromáticos. Las fracciones aromáticas y de olefinas aumentaron, pero las fracciones de parafina disminuyeron con el aumento de la temperatura. Otros investigadores estudiaron la pirólisis de polipropileno y obtuvieron los mayores rendimientos de petróleo a altas temperaturas, 69.82% en pesa a 300 ° C y 82.12% en peso a 500 °C. Por encima de 500°C, el rendimiento del aceite disminuyó al aumentar la temperatura.

Revista de degradación térmica y estabilidad de polímeros. La revista "Polymer Degradation and Stability" de la editorial Elsevier® publica estudios relacionados con el control de las reacciones de degradación de polímeros con la finalidad de evaluar el desarrollo de nuevas tecnologías, mejoramiento de propiedades de los materiales, reciclaje de productos poliméricos, entre otros. En diciembre del 2002 Gao, Kaneko, Amasia y Nakada del Instituto Tecnológico de Chiba, Japón, publicaron un artículo en la revista acerca del estudio cinético de la degradación térmica de polipropileno. Realizaron la degradación isotérmica y dinámica del polipropileno en una termobalanza con atmósfera de gas nitrógeno. La degradación isotérmica la realizaron a 390°C, 400°C y 410°C. Evaluaron para la degradación dinámica cuatro distintas rampas de temperatura 4, 6, 8 y 10 °C/min en las cuales determinaron un orden de reacción promedio y compararon los parámetros cinéticos de la ecuación de Arrhenius obtenidos con un orden de reacción 1 como es asumido en muchos estudios.

C. EXPERIENCIA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA EN PIRÓLISIS DE MATERIALES

El departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala ha realizado investigaciones de pirólisis de diversos materiales. En el año 2017 estudiantes de la carrera de ingeniería química e ingeniería industrial realizaron el megaproyecto con título *"Estudio técnico y evaluación económica de la pirólisis de estípite de palma africana Deli x AVROS a nivel laboratorio y su escalamiento"*. Este trabajo se basaba en la pirólisis de estípite de palma, pero sirvió como referencia en este estudio para la metodología, uso del reactor de pirólisis diseñado para la operación a escala laboratorio, elaboración de la simulación del proceso en el software SuperPro Designer® y guía en el análisis económico.

VI. METODOLOGÍA

A. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE EMPAQUE

La caracterización y el acondicionamiento de la materia prima para cumplir con los objetivos se desarrolló de la siguiente manera:

La metodología fue realizada en base a una cantidad de 2,300kg de material de empaque tipo BOPP y BOPP metalizado.

1. Caracterización del material

Recopilación de propiedades del material de empaque tipo polipropileno biorientado y polipropileno biorientado metalizado.

a. Tipo de material

Se hizo referencia a la ficha técnica código DPN-E-002.

b. Densidad de partícula para la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual

1) Se realizó la medición del volumen en metros cúbicos que ocupa por kilogramo el material de empaque.
2) Se pesó en una balanza analítica (ver listado de equipos) un tramo de 2x2cm de material de empaque.
3) Este volumen se obtuvo a partir de multiplicar el área del empaque por el grosor del empaque.
4) El área se obtuvo a partir de multiplicar la base por la altura del tramo utilizado en el inciso ii.
5) Se dividió el valor obtenido de peso en el volumen del material pesado.
6) El procedimiento se realizó en quintuplicado para validar el método de obtención de resultados.

c. Densidad aireada para la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual

1) Se midieron 11.0000 – 13.0000g en una balanza analítica de material de empaque recortado en pedazos de aproximadamente 1x1cm.
2) Utilizando una probeta marca DEN con capacidad de 1L, se colocó la muestra pesada dentro de ella. Es importante resaltar que para calcular esta propiedad, el material debe de ser soltado libremente dentro de la probeta.
3) Luego, para obtener la densidad aireada del material se dividió el peso de la muestra dentro del volumen leído en la probeta.
4) El procedimiento se realizó en quintuplicado para validar el método de obtención de resultados, pesando distintas muestras dentro del rango establecido en el inciso

d. Densidad compacta para la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual

1) Para medir esta propiedad se utilizaron las mismas muestras que para la densidad aireada. Relacionándolas respectivamente corrida 1 de densidad aireada con la corrida 1 de la densidad compacta.
2) El procedimiento para calcular la densidad compacta es golpear suavemente la probeta marca DEN con capacidad de 1L, 250 veces para que la vibración del golpe junto con la gravedad logre mover el material hacia el fondo de la probeta.
3) Para medir la densidad comprimida se dividió la masa de la muestra introducida dentro del volumen final de muestra en la probeta.
4) El procedimiento se realizó en quintuplicado para validar el método de obtención de resultados, pesando distintas muestras dentro del rango establecido en el inciso i del procedimiento de la densidad aireada.

e. Densidad de trabajo para la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual

Para densidad de trabajo se utilizó la ecuación con los datos obtenidos de la densidad aireada, densidad comprimida y el índice de compresibilidad.

f. Compresibilidad para la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual:

Para el índice de compresibilidad se utilizó la ecuación definida en la sección de Marco Teórico con los datos obtenidos de la densidad aireada y densidad comprimida.

g. Grosor del material para la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual

Se hizo referencia a la ficha técnica código DPN-E-002 (ver anexos), la cual indica el grosor por componente del material de empaque.

h. Porcentaje de humedad para la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual

1) Se utilizó una balanza de humedad.
2) Se colocó una muestra de 1g de mezcla de material de empaque de rechazo en bobina y material residual para realizar la medición. La medición se realizó con la mezcla para tener una medición más precisa de la humedad presente en ambos.
3) Se tomó la lectura del equipo para el porcentaje de humedad.
4) El procedimiento se realizó en quintuplicado para validar el método de obtención de resultados.

i. Porcentaje de grasas presentes en el material para la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual:

1) Se colocaron muestras de la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual dentro de un beaker.
2) Se utilizó etanol, un beaker y una espátula para las grasas presentes en el material de empaque.

3) Luego se evaporó la etanol a una temperatura de 100ºC, utilizando una estufa.
4) Luego se pesó el beaker junto a los residuos de grasas.
5) El procedimiento se realizó en quintuplicado para validar el método de obtención de resultados.

j. Resistencia a un esfuerzo cortante, realizado para la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual:

1) Se realizó una prueba del esfuerzo necesario para cortar el material.
2) Para ello se utilizó una máquina de tensión y compresión.
3) La prueba se realizó para el material colocado de forma horizontal y vertical.

k. Temperatura de Fusión para la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual

1) Se utilizó una muestra de 25g en un recipiente de aluminio con un volumen de 2L.
2) El recipiente se colocó en una mufla (ver a 150ºC).
3) Se observó, abriendo la puerta de la mufla, que el material empezara a fundirse. Al momento de observar que la muestra inicial de 25g se empezó a fundir, se agregaron proporciones de 21g aproximadamente, hasta llegar a 90.2g.
4) Se estuvo abriendo la mufla periódicamente para observar el comportamiento del material de empaque.
5) Se revisó que el material empezara a fundirse en su totalidad.
6) Se anotó la temperatura de fusión del material al llegar a los 90.2g.

l. Densidad de la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual, fundido

1) Se esperó a que la muestra fundida se enfriara a temperatura ambiente y se midió la densidad del sólido resultante del precalentamiento.
2) La densidad se obtuvo a partir de la volumen que ocupada la masa del material fundido en el recipiente de 2L.

m. Poder calorífico de la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual

Se solicitó una prueba en duplicado de poder calorífico de la mezcla de material, en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

2. Determinación de proporción de mezcla de material de empaque.

1) Se solicitó a la empresa el historial de producción del material de empaque de planta de producción en ella.
2) Se analizó el documento y se observó que existía una tendencia en el crecimiento de la demanda líneas específicas de producto. Además, se determinó dentro de estas líneas, el producto que tenía la mayor cantidad de desecho producida.
3) Se realizaron gráficos que reflejaran la tendencia del crecimiento de la línea de producción y del crecimiento de desecho.

4) Estos productos fueron los utilizados para escoger la relación de mezcla para el material sucio y limpio.

3. Determinación de los equipos necesarios previos a la reacción de pirólisis.

1) Se evaluaron las propiedades físicas y químicas del proceso, a partir de estas se analizaron propiedades como el índice de compresibilidad, porcentaje de grasas y la densidad de este, para evaluar la manera correcta de alimentar al reactor.
2) Se estimó la necesidad de los distintos procesos previos al proceso de pirólisis en un escalamiento industrial.
3) Se propusieron los procesos necesarios para llevar a cabo una pirólisis del material de empaque.
4) Se propuso que se contratara a una persona para retirar el mandril del material de empaque de rechazo en bobina.
5) Se propuso un triturador para la materia prima para mejorar las características de flujo de la materia prima.
6) Se propuso un precalentamiento utilizando un tornillo sin fin con resistencias que calentaran este y de esa manera producir pellets para alimentar al reactor y así realizar la pirólisis. Se colocó una cortadora externa para crear los pellets a partir del material fundido que saliera del tornillo sin fin.
7) La realización de las pruebas experimentales y análisis de datos para el desarrollo de los objetivos de este megaproyecto implicó la ejecución de los siguientes procedimientos:

B. PRUEBAS A ESCALA LABORATORIO Y CINÉTICA DE LA REACCIÓN DE PIRÓLISIS

1. Investigación sobre la pirólisis de polipropileno.

Se investigó acerca de la cinética de pirólisis de polímeros sintéticos con sustento de libros, artículos científicos y tesis para identificar condiciones de operación, sistemas utilizados y análisis realizados a las muestras de reactivo y producto.

Se propuso un sistema a escala laboratorio basado en el reactor disponible del Laboratorio de Operaciones Unitarias y la investigación realizada.

2. Obtención de material de empaque de polipropileno.

Se realizó una visita a la industria de alimentos para solicitar muestras del material de empaque limpio y sucio para las experimentaciones.

3. Determinación de la temperatura de pirólisis

Para verificar la temperatura de programación de la mufla, se realizó una prueba al aire libre con el reactor cargado con 60 gramos de material de empaque. No se armó el sistema de condensación ni el de recolección de líquido o gas, solo se ajustó la chimenea como muestra la Figura 20. Se realizó un calentamiento con una temperatura programada hasta 500°C, observando la temperatura y tiempo de aparición del gas de pirólisis.

Figura 20. Prueba preliminar de reacción de pirólisis sin sistema de condensación.



Se mandaron muestras de material de empaque limpio y sucio al Centro de Investigación y Desarrollo (CI+D/CETEC) de Cementos Progreso para realizar un análisis termogravimétrico de ambas muestras. El material de empaque limpio se definió como el proveniente de las bobinas rechazadas y sin ningún residuo alimenticio.

El material sucio se definió como el material proveniente del rechazo en línea de producción y por lo tanto contaminado con residuos alimenticios. Las curvas TGA y DTG resultantes se encuentran en la sección de anexos.

Con los datos obtenidos anteriormente se evaluaron las temperaturas de programación de la mufla y se seleccionaron cinco diferentes para evaluar las cinéticas de reacción.

4. Ejecución de las pruebas a escala laboratorio.

Se solicitaron los materiales necesarios al encargado del Laboratorio de Operaciones Unitarias detallando cantidades, procedimiento y fechas de realización de las pruebas.

Equipo y materiales requeridos. Todo el equipo y material requerido fue proporcionado por el Laboratorio de Operaciones Unitarias y será listado a continuación:

- Reactor de pirólisis con chimenea (Especificaciones en Anexos)
- Mufla Thermo Scientific F6030CM-33-AVL (Especificaciones en Anexos)
- Campana de extracción
- Aislante de fibra de vidrio
- Balanza analítica (Especificaciones en Anexos)
- Balanza semi analítica (Especificaciones en Anexos)
- 2 Kits de destilación utilizando únicamente las siguientes piezas:
- Tapón de vidrio
- Condensador de vidrio 24/40
- Adaptadores de vacío 24/40

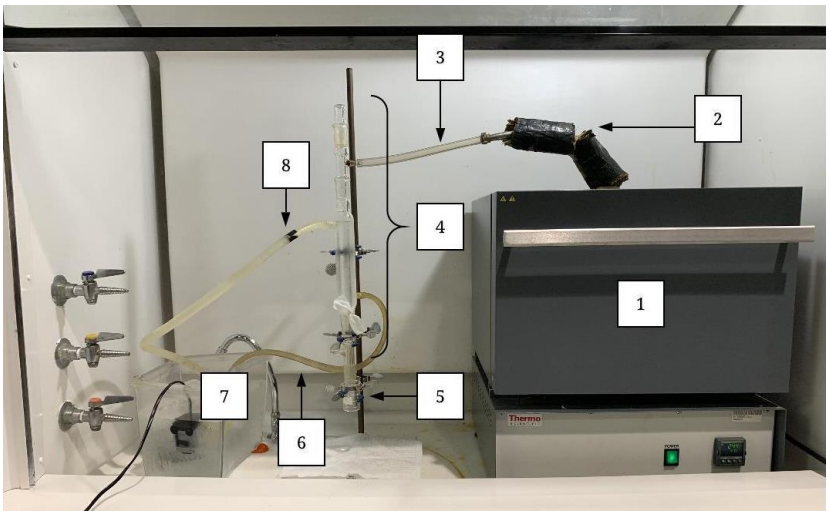
- 8 Beakers de 50 mL
- 1 Bolsa de hielo de 0.5 kg
- Mangueras de látex
- 1 Soporte universal
- Pinzas de tres dedos
- 1 Bomba de agua de pecera
- Vaselina líquida
- Llaves inglesas número 13
- Papel Parafilm

5. Montaje del sistema de experimentación a escala laboratorio

Se armó un sistema a escala laboratorio según la Figura 21 para realizar las pruebas experimentales con el reactor con el equipo y cristalería disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Este fue montado en una campana de extracción por seguridad para la extracción de los gases producidos y con los componentes listados en la siguiente figura:

Figura 21. Sistema de pirólisis a escala laboratorio a utilizar para las pruebas experimentales de cinética.



Cuadro 8. Listado de componentes del sistema de experimentación a escala laboratorio.

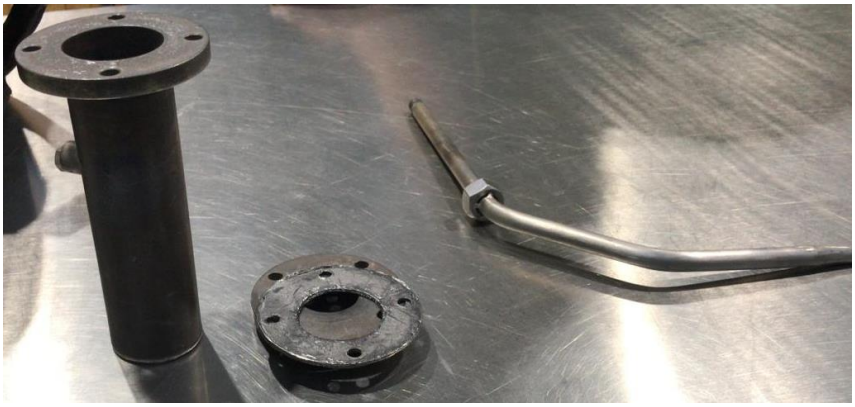
No.	Componente
1	Mufla con reactor
2	Chimenea de gases y líquido de pirólisis con aislante
3	Manguera de conexión de la chimenea y el sistema de condensación
4	Sistema de condensación
5	Recipiente para recolección del producto líquido
6	Manguera de ingreso del agua de enfriamiento desde el reservorio
7	Reservorio de agua de enfriamiento y bomba
8	Manguera de salida del agua de enfriamiento hacía el reservorio

6. Descripción del sistema

El reactor incluye una brida pernada para realizar el cierre hermético, un empaque de grafito laminado y una chimenea para la salida de gases (Figura 22).

El reactor se llenó con 60 gramos de material de empaque en las proporciones y dimensiones descritas. El material se comprimía lo mayor posible para llenar hasta antes de la abertura de la chimenea y evitar tapar esa salida. Luego se sellaba el reactor con el empaque de grafito y la brida asegurada apretando las roscas con llaves inglesas número 13.

Figura 22. Reactor utilizado para las pruebas a escala laboratorio.



Antes de iniciar se pesó el reactor, chimenea y manguera de conexión. El reactor fue ubicado dentro de la mufla sobre un ladrillo para poder enroscar la chimenea y alinearlo con el agujero en la parte superior (Figura 23). Se guía la salida de la chimenea hacía el sistema de condensación y se colocó el aislante antes de asegurar la manguera de conexión hacía el sistema de condensación.

Figura 23. Configuración de chimenea y reactor dentro de la mufla.



Para completar, se realizó el montaje del sistema condensación utilizando el adaptador de vacío para conectar la manguera proveniente de la chimenea con el sistema y siguiendo la configuración de la Figura 24 para el otro adaptador de vacío, condensador, tapón, mangueras de agua de enfriamiento, reservorio de agua y bomba.

Antes de armarlo se pesaron todas las piezas para el registro de pérdidas de productos residuales en el sistema. Al iniciar el calentamiento se comprueba el funcionamiento de circulación de agua a través del condensador, encendiendo la bomba de pecera y luego agregando hielo al reservorio.

Figura 24. Configuración del sistema de condensación.



7. Ejecución de las pruebas a escala laboratorio. Para cada una de las cinco condiciones de cinética evaluadas se realizó el siguiente procedimiento.

1) Se encendió la mufla para seleccionar el programa 1 de operación y programar la temperatura a alcanzar. Las cinco temperaturas finales evaluadas fueron: 415°C, 430°C, 450°C, 460°C y 475°C. Se anotó la hora de inicio del calentamiento.
2) Se monitoreó la temperatura de la mufla y se registró durante toda la reacción el incremento de temperatura conforme transcurría el tiempo. También se fueron midiendo los cambios de temperatura por minuto en distintos tiempos del proceso utilizando un cronómetro y la temperatura del lector digital de la mufla.
3) Se pesaron los beakers vacíos y se rotularon para su posterior identificación. Se coloca el primer beaker en la parte inferior del sistema de condensación para recolectar el producto líquido.
4) Se esperó hasta observar la salida de gases de la chimenea que daba inició a la reacción.
5) Al caer la primera gota de líquido de pirólisis en el beaker se esperó hasta recolectar alrededor de 5 a 10 mL y luego se cambió de beaker rápidamente tratando de no perder muestra del líquido. El beaker con muestra se pesó en la balanza analítica y se tapó con papel parafilm. Se registró el tiempo y temperatura de la mufla al momento de recolectar la muestra.

6) Se repitió este procedimiento con cada beaker y muestra hasta que ya no salía producto líquido del sistema. Cuando hubo fugas en el sistema se recolectaron los residuos líquidos en otro beaker y se pesaron al final.
7) Se apagó la mufla y se anotó la hora de finalización de la reacción.
8) Se desarmó el sistema de condensación y se pesaron todas las piezas nuevamente.
9) Se esperó hasta que el sistema estuviera completamente frío para desenroscar la chimenea y retirar el reactor de la mufla. Se pesaron todos los componentes incluida la manguera de conexión.
10) Se abrió el reactor y se extrajo el producto sólido del interior para luego pesarlo en la balanza semi analítica.
11) Se pesó el reactor nuevamente luego de extraer la mayor cantidad del producto sólido.

8. Cálculo de los rendimientos porcentuales de productos

1) Se calcularon las masas de cada producto de la reacción para poder determinar el rendimiento. Los cálculos se realizaron en el siguiente orden:
2) La masa del producto líquido se calculó restando la masa del beaker vacío a la masa del beaker con muestra. Luego se sumaron todas las masas para obtener el total del producto líquido.
3) La masa del producto sólido fue pesada extrayendo el producto del reactor ya frío al finalizar la reacción.
4) La masa del residuo sólido se calculó restando la masa del reactor antes de vaciarlo a la masa del reactor después de vaciarlo
5) La masa del residuo líquido se calculó restando la masa de los componentes del sistema de condensación y chimenea antes de la reacción a la masa de estos después de la reacción.
6) La masa del producto gaseoso se obtuvo restando de los 60.00 gramos iniciales de muestra reactiva la masa obtenida de los productos líquido, sólidos y sus respectivos residuos.
7) Con los datos de masa se calcularon los rendimientos porcentuales de cada producto y residuo con la siguiente ecuación utilizando la masa de reactivo inicial de 60.00 g de material de empaque de polipropileno metalizado.

$$\text{Rendimiento del producto}\left(\%\frac{\text{m}}{\text{m}}\right) = \frac{\text{Masa de producto}}{\text{Masa de reactivo inicial}} * 100$$

8) Se sumaron los rendimientos de los residuos a su respectivo producto para obtener un rendimiento total de los tres productos principales de la reacción.
9) Se calculó la propagación de error para las diferentes operaciones aritméticas.

9. Determinación de la composición de las muestras de producto líquido

Las muestras de producto líquido rotuladas y selladas se trasladaron al Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado para realizar el análisis de su composición utilizando cromatografía de gases con detector de masa. Consultar metodología de caracterización de productos.

C. MODELADO DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN

1. Planteamiento del modelo a utilizar

Se desarrolló el modelo cinético de Arrhenius adaptado a las condiciones del sistema a escala laboratorio para obtener la siguiente ecuación. Se incluyó el residuo de muestra sin descomponer (Wf) y por las condiciones no isotérmicas del sistema, la temperatura se definición como una función del tiempo. El modelo cinético utilizado se encuentra desarrollado a detalle en la sección E de Anexos.

2. Determinación de la masa de reactivo en el reactor

1) Se calculó restando a la masa inicial de reactivo las masas de los productos formados conforme transcurrió el tiempo. Se realizó en el siguiente orden:
2) Se restó primero la masa de gas obtenido a la masa de muestra reactiva inicial.
3) Al resultado anterior se le restó la masa de la primera muestra del producto líquido.
4) Consecutivamente se restaron las masas de los demás productos líquidos hasta la última muestra cuantificada.

3. Obtención de parámetros cinéticos y operativos

1) Para cada condición de cinética se determinó la función de la temperatura y las constantes cinéticas A, E_a y n en el siguiente orden:
2) Determinación de la función de temperatura. Se utilizaron los datos registrados del cambio de temperatura en función del tiempo para graficarlos y poder evaluar el ajuste de curva que expresara el comportamiento de la curva de calentamiento.
3) Se planteó el ajuste de las curvas de calentamiento con la función no lineal sigmoidal de Boltzmann. Se graficaron los datos en el software GraphPad Prism® y se determinaron los valores de cada término de la función adaptando el nombre de las variables del Marco Teórico definida por el software para el sistema de pirólisis basado en temperatura y tiempo:

$$T(t) = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1 + e^{\frac{t_{1/2} - t}{m}}}$$

Donde:

$$T_1 = \text{Límite inferior de temperatura (K)}$$
$$T_2 = \text{Límite superior de temperatura (K)}$$
$$t_{1/2} = \text{Tiempo intermedio entre límites (min)}$$
$$m = \text{Pendiente que describe la curva (K/min)}$$

4) Se calculó el coeficiente de determinación en GraphPad Prism® como medida estadística de la fiabilidad del modelo estimado
5) Se graficó la comparación del modelo con los datos experimentales para comparar de manera visual el modelo matemático ajustado a la curva de calentamiento.

4. Determinación de las constantes cinéticas de reacción

1) Con la función de temperatura ya calculada se procedió a calcular las constantes cinéticas A, E_a y n de la cinética evaluada.
2) Se definió el residuo de muestra sin descomponer (Wf) como la masa de reactivo correspondiente al tiempo de la última muestra líquida cuantificada para análisis cinético.
3) Se utilizó el software Berkeley Madonna ® para ingresar la ecuación con sus variables correspondientes, estableciendo el tiempo final como el de la última muestra de líquido cuantificado y valores iniciales de las constantes A y Ea obtenidos de la literatura para una reacción de polipropileno. Para el orden de reacción se inició el aproximamiento con un n=0.50.
4) Se ejecutó el código programado para la ecuación y se ingresaron los datos experimentales tabulados en un documento de texto.
5) Se realizó el ajuste de curva variando simultáneamente los parámetros A, E_a y n según el método de integración predeterminado del software (Runge Kutta 4).
6) Se calculó el coeficiente de determinación en GraphPad Prism® como medida estadística de la fiabilidad del modelo estimado con los datos utilizando los datos experimentales y los calculados por el software de Berkeley Madonna ®. Se compararon para determinar cual de las cinco condiciones evaluadas representaba mejor el comportamiento de la reacción.
7) Se graficaron los datos experimentales y el modelo ajustado por el software para comparar visualmente los resultados obtenidos.
8) Una vez determinados los parámetros se compararon y analizaron las variaciones entre los resultados de las diferentes cinéticas.

D. DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DE VELOCIDAD DE PRODUCCIÓN DEL COMPUESTO REPRESENTATIVO DEL PRODUCTO LÍQUIDO

1. Identificación del compuesto representativo

Para definir el compuesto representativo al que se le realizaría la cinética de reacción se analizaron las composiciones de los compuestos en cada muestra de cinética buscando identificar un compuesto que apareciera en todos los resultados en un tiempo de retención similar y a una concentración significativa del resto de los compuestos. También se analizó que el grado de coincidencia entre el espectro experimental y el de la base de datos del equipo fuera alto, este valor era el correspondiente a la columna “qual” de los informes de cromatografía encontrados en Anexos.

2. Corrección de la composición del compuesto representativo en las muestras de producto líquido.

    1) Luego de seleccionar el compuesto a analizar, se realizó una corrección de las áreas obtenidas en el análisis de cromatografía para expresarlas con relación al cloroformo utilizado como disolvente.
    2) Se calculó la masa de cloroformo utilizada para disolver la muestra de pirólisis con la densidad y pureza del reactivo.
    3) Se calculó la concentración en % m/m de cloroformo en la solución preparada.
    4) Se calculó la densidad de la solución preparada.
    5) Se calculó la masa de cloroformo en un 1µL de la solución preparada utilizando la densidad y concentración del compuesto previamente calculados.
    6) Con la densidad de la solución preparada se calcularon los gramos de solución correspondientes a 1µL.
    7) Por diferencia entre la masa de solución preparada y la masa de cloroformo en 1µL se obtuvo la masa que se debe distribuye en los demás compuestos.
    8) Con la densidad del líquido de pirólisis se calculó el volumen de solución preparada que se utiliza para calcular la masa correspondiente a los demás compuestos del análisis en la muestra de 0.25 g.
    9) El resultado anterior se utilizó como un el factor de corrección aplicado a las áreas sin solvente del compuesto seleccionado para expresarlo en fracción másica.

3. Determinación de la constante de proporcionalidad.

    1) Se realizó un análisis para expresar con una constante de proporcionalidad el cambio de moles del compuesto representativo en relación con el cambio de masa reactivo en función del tiempo. La ecuación de velocidad de producción utilizada se encuentra desarrollada a detalle en Anexos. La constante de proporcionalidad fue calculada de la siguiente manera para cada una de las cinco curvas de calentamiento evaluadas:
    2) Con las fracciones másicas y masa molecular del compuesto se calcularon los moles presentes en las muestras cuantificadas de cinética.
    3) Se calcularon los moles acumulados del compuesto adicionando a la primera muestra los moles de la segunda muestra y así consecutivamente hasta adicionar los moles de la última muestra.
    4) Con los moles acumulados y el tiempo correspondiente a cada cantidad, se calculó el diferencial como el cambio de moles en un intervalo de tiempo.
    5) Se calculó el diferencial de pérdida de masa del reactivo como el cambio de masa de reactivo en un intervalo de tiempo.
    6) Se graficó el diferencial de moles del compuesto representativo en función del diferencial de masa de reactivo y se aplicó una regresión lineal simple.
    7) Se determinaron las constantes de proporcionalidad como la pendiente de la regresión lineal aplicada los datos graficados.

8) Se determinaron los coeficientes de determinación de cada regresión lineal para evaluar si el ajuste era correcto.
9) Se expresó el diferencial de masa reactiva con el modelo determinado en la sección anterior para completar la ecuación general de la cinética de reacción del compuesto representativo en función de la pérdida de masa de reactivo.

- Balanza analítica.
- Balanza marca BOECO, con capacidad de 220g y una incertidumbre de ±0.001g.
- Balanza marca OHAUS, con capacidad de 120g y una incertidumbre de ±0.001g
- Máquina de ensayos para tensión y compresión.
- Máquina marca LLOYD, con capacidad de 30kN.

Cuadro 9. Especificaciones mufla utilizada para la medición de temperatura de fusión.

Característica	Especificación
Modelo	F6030CM-33-AVL
Amperaje	18.3 A
Certificaciones	Aprobado CSA.
Dimensiones interiores	25 x 33 x 18 cm
Dimensiones exteriores	51 x 48.5 x 53.3 cm
Frecuencia	60Hz
Consumo de Energía	4400W
Bandejas	Acero Inoxidable
Control de Temperatura	Programable digital
Rango de Temperatura	100ºC a 1200ºC
Voltaje	240ºC

Cuadro 10. Especificaciones del reactor de lecho fijo para la pirólisis lenta.

Elemento	Especificación
Material	Acero Inoxidable 304 DN 50
Diámetro	9.5cm
Largo	21.6cm
Brida	Acero Inoxidable 304 DN 50
Apertura pernos	0.635cm

E. CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS

1. Análisis químico del producto gaseoso por cromatografía de gases

1) Se utilizó un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 con detector de masas, columna DBWAX, y helio como gas acarreador. Las especificaciones del equipo y las especificaciones del método de análisis utilizado se encuentran en anexos.
2) Se utilizó una jeringa de cromatografía para extraer una muestra de 1 mL del gas de pirólisis contenido en un globo de látex.
3) Se inyectó la muestra en el puerto de inyección del cromatógrafo.
4) Al terminar la corrida de la muestra, se obtuvo el cromatograma generado por el equipo.

5) Utilizando el software AMDIS incluido en el equipo de cromatografía, se hizo una comparación de los componentes obtenidos con la biblioteca interna del equipo con la finalidad de obtener compuestos con un porcentaje de coincidencia mayor al 80%.
6) Luego de la selección de compuestos, se exportaron los datos desde el software del cromatógrafo como archivo .csv para su uso en Microsoft Excel.
7) La interpretación de los datos consistió en utilizar el porcentaje de área de los picos del cromatograma de la muestra, como un porcentaje relativo para cada uno de los compuestos presentes.
8) Se repitió el procedimiento para cada muestra de gas obtenida por cada pirólisis realizada para identificar repetibilidad de los compuestos.

2. Análisis químico del producto líquido por cromatografía de gases

1) En un beaker limpio, seco y previamente tarado, se pesó 0.2500 gramos de la producto líquido en una balanza analítica.
2) En una campana de extracción, se agregó al beaker 5 mL de cloroformo medidos con una probeta graduada de 10 mL.
3) Se agitó con una varilla de metal hasta diluir la muestra líquida y formar una solución homogénea.
4) Se trasvasó 1.5 mL de dilución a un vial de 1.5 mL.
5) Se preparó 3 muestras de esta forma por cada pirólisis analizada dando un total de 15 muestras (5 pirólisis).
6) Se indicó en el equipo de cromatografía la secuencia de los viales previo a la colocación de estos en el auto muestreador.
7) Se utilizó un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 con detector de masas, columna HP5, y helio como gas acarreador. Las especificaciones del equipo, del método de análisis cromatográfico y cristalería utilizada se encuentran en anexos.
8) Al terminar la de cada muestra en el cromatógrafo, se obtuvo el cromatograma generado por el equipo.
9) Utilizando el software AMDIS incluido en el equipo de cromatografía, se hizo una comparación de los componentes obtenidos con la biblioteca interna del equipo con la finalidad de obtener compuestos con un porcentaje de coincidencia mayor al 80%.
10) Luego de la selección de compuestos, se exportaron los datos desde el software del cromatógrafo como archivo .csv para su uso en Microsoft Excel.
11) La interpretación de los datos consistió en utilizar el porcentaje de área de los picos del cromatograma de la muestra, como un porcentaje relativo para cada uno de los compuestos presentes.
12) Se repitió el procedimiento para cada muestra de gas obtenida por cada pirólisis realizada para identificar repetibilidad de los compuestos.

3. Densidad del producto líquido

1) Las especificaciones cristalería y equipo utilizado se encuentra en anexos,
2) Corrección de volumen a 25 °C.
3) Se utilizó un balón aforado de 5 mL calibrado por fabrica a 20 °C.
4) En una balanza analítica se determinó la masa de un balón aforado de 5 mL limpio y seco incluyendo su tapa.
5) Se utilizó agua destilada a 25 °C utilizando un baño térmico.
6) Se agregó agua al balón aforado hasta la marca de calibración y se determinó su masa en una balanza analítica.
7) Utilizando la densidad teórica del agua a la temperatura de trabajo y la masa determinada en el inciso anterior, se determinó el volumen real del balón utilizado.
8) Se repitió el mismo procedimiento para cuatro balones adicionales.

4. Determinación de la densidad del producto líquido

1) Se utilizó un baño térmico para el control de temperatura del producto líquido en un rango de acuerdo con la homogeneidad observada en las muestras a trabajar (24 – 26 °C).
2) En una balanza analítica se determinó la masa de un balón aforado de 5 mL limpio y seco incluyendo su tapa.
3) Utilizando una pipeta se agregó muestra del producto líquido hasta la marca de aforo.
4) Se determinó la masa del balón con la muestra líquida con el tapón colocado en una balanza analítica, con la precaución de que la superficie exterior de la cristalería no estuviera contaminada por la muestra.
5) Se determinó la masa de la muestra a partir de la diferencia de la masa obtenida en el paso d y la obtenida en el paso b.
6) Se determinó la densidad de la muestra a la temperatura de trabajo establecida con la masa obtenida en el paso e y el volumen del balón.
7) Se vació el contenido del balón. Limpio y seco, se volvió a tarar para una siguiente medición.
8) Se repitió la metodología para las mediciones en quintuplicado de cinco corridas de pirólisis.
9) Se repitió la metodología para la determinación de la densidad a 15 °C.

5. Determinación del poder calorífico de los productos líquido y sólidos

Se siguió la metodología indicada por el manual de equipo del calorímetro IKA C 200 citado en: (IKA, 2018) sin modificaciones. Consultar las sección de bibliografía.

F. ANÁLISIS DE DATOS

1) Se recopilaron los datos de las corridas realizadas a escala laboratorio y análisis fisicoquímicos.

2) Se analizó estadísticamente los resultados de los análisis de los datos de la pirólisis escala planta piloto utilizando las funciones estadísticas de Excel para establecer los rendimientos y condiciones de operación de la reacción en los simuladores.
3) Se recopilaron, ordenaron y analizaron los datos y modelos de cinética y temperatura establecidos para la reacción de pirólisis.

1. Modelo de simulación

1) Se calculó la masa de material de empaque a utilizar por lote de reacción de pirólisis según las bases de cálculo estipuladas por la empresa alimenticia.
2) Se recolectó los datos de densidad y poder calorífico del plastic oil y del bunker, así como los datos del consumo de bunker en la industria alimenticia.
3) Según los tiempos de operación de las corridas de pirólisis escala laboratorio y las primeras pruebas de simulación del proceso de pirólisis escala planta piloto, se estimó un tiempo de operación de 1 día por lote.
4) Por las suposiciones realizadas y variación de los resultados en el escalamiento de procesos, se utilizó el 30% de consumo de Fuel Oil No. 6. Se utilizó el consumo promedio más una desviación estándar para evitar incumplimientos a la base de diseño por variaciones.
5) Se convirtió a kg/día el flujo de bunker consumido por la empresa.
6) Se determinó el calor cedido en un día por el bunker a los equipos de la empresa y según este dato se obtuvo la cantidad de material de empaque a utilizar por lote re de acción, ver Ecuación 1. Para realizar este cálculo se utilizaron los poderes caloríficos del bunker y del plastic oil.
7) Se definió el tipo de pirólisis a simular como “Pirólisis lenta en un reactor semi continuo”, según literatura investigada, comportamiento del reactor a escala laboratorio y la definición de tipos de pirólisis por Bridgwater (2008) y Gao (2010).
8) Se inició el programa de simulación Berkely Madonna y se abrió un documento nuevo.
9) Se escribió en el espacio de texto el código de programación del modelo de cinética de la pirólisis de material de empaque escala laboratorio, Texto 1 contenido en Anexos. Se corrió la simulación mientras se aumentaba el valor de “STOPTIME”, hasta que el programa graficó una asíntota vertical. Esta asíntota corresponde el tiempo de reacción para alcanzar la masa final ingresada del producto sólido de pirólisis.
10) Se estableció las etapas y procesos unitarios a incluir en la simulación en el software SuperPro Designer del reactor escala planta piloto de pirólisis de material de empaque. Para una operación adecuada y mejor control de este, se separaron los módulos del intercambiador de calor y del incinerador del módulo del reactor.
11) El simulador SuperPro Designer se inició y se siguieron los pasos indicados en el apartado D de Anexos para armar el sistema de pirólisis.
12) Se estableció los tipos y características de los procesos del modelo.

Cuadro 11. Propiedades principales de los compuestos registrados en el simulador de pirólisis de material de empaque escala planta piloto.

Componente	Peso molecular (g/mol)	Punto de ebullición (°C)	Punto de fusión (°C)	Capacidad calorífica (J/g mol K)
*2,4-dimetil-1hepteno	126.240	81.00	-124.10	276.3700
Diesel	246.49	366.68	0.00	499.7780
Dióxido de carbono	44.010	-56.57	-78.00	209.3500
*Char	12.011	6000.00	4026.85	8.5200
*Gas pirolítico	28.010	-191.44	-205.00	1,478,099.0000
+Material de empaque	58.080	**600.00	-111.93	2428.57
Nitrógeno	28.013	-195.76	-210.00	88.8000
Oxígeno	31.999	-182.84	-218.79	97.0000
Propeno	42.080	-47.65	-185.26	111.8000
Agua	18.015	100.00	0.00	276.3700

* Datos presentes en la base dedatos del programa SuperPro Desginer.

** El valor reportado por el análisis termogravimétrico del material de empaque usado es 350 ºC, pero se aumentó la temperatura a 600 ºC para que la corrida usando la reacción planteada en el simulador ocurriera sin error. Esta modificación no altera los cálculos del simulador ya que utiliza la cinética calculada y los valores de la composición establecidos en las pruebas realizadas.

*** Datos extraídos de compuestos del archivo de simulación "Simulación pirólisis rápida de biomasa" (Maldonado, Simulación de pirólisis de estípite de palma africana Deli x AVROS empleando SuperPro Designer® , 2017)

Cuadro 12. Módulos empleados para el proceso de pirólisis de material de empaque en el simulador, y descripción de cada uno.

Módulo	Operación	Función
Ventilador	P-5/M-101	Suministrar el flujo de aire necesario para la combustión en el incinerador.
Incineración	P-17/INC-101	Quemar el combustible y producir gases de combustión para calentar el material de empaque.
Intercambiador de calor	P-3/HX-102	Calentar el material de empaque a la temperatura de reacción.
Reactor horizontal	P-1/V-101	Llevar a cabo la reacción y extracción de gases en la parte superior. Enfriamiento y extracción de sólido por la parte inferior.
Condensados	P-2/HX-101	Condensar y separar el plastic oil del syngas del flujo de salida del reactor.

13) Se empleó un modelo de transferencia de calor que establecía el cambio de temperatura del reactor respecto al tiempo, para completar la reacción dentro del reactor a escala planta piloto a partir de los datos del reactor escala laboratorio.
14) Se calculó la altura y área ocupada por el material de empaque dentro del reactor escala planta piloto de acuerdo con la capacidad y forma de la cámara interna del mismo, proporcionado por la

simulación anterior con el software SuperPro Designer y usando la ecuación correspondiente al volumen de una porción de un cilindro horizontal (El cálculo para determinar la altura inicial de este voluen se muestra el procedimiento en el apartado de Anexos).

15) Para establecer una relación entre la altura y el volumen de material de empaque que cambia dentro del reactor escala planta piloto por la transformación del plástico debido a la reacción, se graficó y realizó una regresión a los datos de altura de material de empaque para distintos volúmenes dentro del reactor.
16) Se realizó corridas de calentamiento del reactor escala laboratorio con un termopar previamente calibrado con un termopozo (para hacer las correcciones correspondientes), introducido por la chimenea de este hasta el centro del reactor para establecer la diferencia de temperatura de la mufla con respecto a este punto.
17) Para corregir las temperaturas leídas por el termopar de la mufla (reporatadas en la pantalla de control), se colocó el termopar calibrado en la misma posición del termopar de la mufla y se realizó tres corridas de calentamiento, desde temperatura ambiente hasta 475 ºC. Se determinó la diferencia entre las temperaturas leídas por ambos termopares para corregir las mediciones realizadas anteriormente.
18) Se calculó la resistencia térmica por conducción de la masa total del material de empaque dentro del reactor escala planta piloto, usando la Ecuación 8.
19) Se calculó la resistencia térmica por convección del gas dentro del reactor usando la Ecuación 10. Debido a que el inicio de la reacción de pirólisis se lleva a cabo avanzado el tiempo de operación se utilizaron las propiedades de aire como gas dentro del reactor.
20) Se calculó la resistencia térmica por conducción de las paredes del reactor.
21) Se realizó una hoja de cálculo de Excel en donde se hizo el cálculo para determinar el calor transferido y la temperatura de calentamiento del material en la reacción, repitiendo el procedimiento de los incisos “a” – “h” en intervalos de dos minutos hasta completar la reacción.
22) Los datos obtenidos se importaron al software GraphPad para realizar una regresión no lineal y obtener una función correspondiente al comportamiento de los datos de diseño, obtenidos en el paso anterior. También se obtuvo los valores estadísticos de la correlación. (Ver Anexos).
23) Se sustituyó la ecuación de la temperatura respecto al tiempo del modelo de cinética para el reactor escala laboratorio en el código de cinética en el simulador Berkeley Madonna para determinar el tiempo de operación, el rendimiento de producto sólido y el del gas pirolítico producido.
24) Se modificó el código de simulación para agregar la constante cinética en la ecuación de Arrhenius y calcular la obtención de plastic oil (gas condensable) con el tiempo y el tiempo de emisión de gases y sus rendimientos, obtenidos del paso anterior.
25) Con las ecuaciones obtenidas de cinética, los rendimientos de productos y los resultados de la modificación de la cinética para el escalamiento a planta piloto, se estableció las condiciones de operación para definir el sistema de simulación en SuperPro Designer, siendo estas el tiempo de

reacción, masa obtenida de los productos y sus propiedades (peso molecular, capacidad calorífica, entre otras)

26) Con todos los datos obtenidos se corrigió las condiciones de operación de los módulos utilizados en el simulador SuperPro Designer.
27) Se ejecutó la simulación de balance de masa y energía en SuperPro Designer para determinar los flujos de salida de los productos obtenidos de los módulos de equipos.
28) Para determinar el efecto de la reducción del tiempo de operación en el reactor escala planta piloto sobre la producción de plastic oil, syngas y char, se varió el tiempo de reacción en la ecuación de cinética para el reactor escala planta piloto usando el simulador Berkeley Madona. Debido a que la reacción inició a partir del minuto 530, se realizó el análisis cada 50 minutos a partir de iniciada la reacción para abarcar el rango de producción de compuestos líquidos y gaseosos.
29) Se hizo una revisión bibliográfica exhaustiva para obtener datos reales de pirólisis de materiales similares a la materia prima evaluada y solo se encontró cuatro fuentes de información con condiciones de operación parecidas, pero sin toda la información necesaria para correr el sistema de simuladores. Por esta razón, se procedió a comparar únicamente los rendimientos obtenidos reportados de los productos de pirólisis con los obtenidos por el sistema de simuladores.

2. Caída de presión de tubería

1) Se determinó la caída de presión utilizando el método de diámetros equivalentes.
2) Por rangos de velocidad requeridos para el gas se estableció una velocidad en tuberías de 9 m/s de acuerdo.
3) Para el flujo de alimentación al sistema se calculó el diámetro interno de la tubería y el área de la tubería.
4) Se comparó el diámetro con el diámetro de la cedula 40 de tubería para la medida disponible en el mercado.
5) Se calculó el número de Reynolds.
6) Se determinó la rugosidad y el factor de fricción.
7) Se estableció el largo de las tuberías en el sistema de separación y almacenamiento.
8) Se estableció la cantidad de válvulas y codos que se necesitaron para la distribución de gas a los tanques de almacenamiento.
9) Por el método de diámetros equivalentes se calculó el largo total y el largo por pérdidas en la tubería.

3. Comparación de propiedades fisicoquímicas de líquido de pirólisis con combustibles utilizados en una empresa

1) Se tabularon los resultados de las pruebas fisicoquímicas realizadas al líquido de pirólisis: viscosidad cinemática, gravedad API, densidad, punto de inflamación y poder calorífico.
2) Se investigaron las mismas propiedades del líquido pirolítico con los combustibles a comparar: diésel, gasolina y bunker.

3) Se utilizaron los datos del Acuerdo Ministerial 211-2017 de Nómina de productos petroleros con sus respectivas denominaciones, características y especificaciones de calidad; del Ministerio de energía y minas de Guatemala, para tabular los valores correspondientes a las propiedades del líquido de pirólisis evaluadas.
4) Las propiedades que no presentaban valores en la Nómina, ya que indicaba que se debían reportar los valores, se buscaron en fichas técnicas proporcionadas por la empresa.
5) Se procedió a comparar cada parámetro del líquido con los tres combustibles, para evaluar si presentaba similitud con alguno de ellos.
6) Se indicó si la propiedad del líquido entraba en el rango de comparación con algún combustible o estaba fuera del rango permisible.
7) Al finalizar la comparación de las propiedades fisicoquímicas del líquido pirolítico, se estableció si presentaba similitud con algún combustible que utiliza la empresa.

4. Determinación de punto de inflamación del líquido de pirólisis

1) Se realizaron 5 pruebas a escala laboratorio de pirólisis de material de empaque de polipropileno metalizado para obtener 150 mL de líquido para el análisis.
2) La muestra fue recolectada en un envase de vidrio y se envió a los laboratorios de Perenco para la determinación del punto de inflamación mediante el Método de ensayo para el punto de flama por ensayador de taza cerrada de Pensky-Martens ASTM D 93-15. *Por políticas de la empresa no se pudo obtener el método completo.

5. Determinación de viscosidad cinemática del líquido de pirólisis

1) Se utilizó un viscosímetro de Cannon – Fenske para la determinación de viscosidad cinemática del líquido de pirólisis.
2) Previo a la experimentación, se aseguró que el viscosímetro estuviera limpio.
3) Se aseguró que la muestra del líquido no tuviera sólidos disueltos.*Si en algún caso presentara, se puede realizar un filtrado para remover los sólidos.
4) Para ingresar la muestra al instrumento, el viscosímetro se colocó boca abajo y se succionó en el tubo por la parte G. Posteriormente la parte A entró en contacto en la muestra y se llevó el líquido hasta el punto E.
5) Se sujetó el viscosímetro con pizas y luego se procedió a introducirlo en el baño térmico a una temperatura constante para la medición.
6) Se esperó hasta el equilibrio térmico del sistema, aproximadamente 10 minutos, para que la muestra estuviera a la temperatura del baño (40°C) y 15 minutos (100°C).
7) Con un bulbo se succionó por la parte A del tubo y se llevó el líquido por encima de la marca C.
8) Con un cronómetro, se midió el tiempo que tardó el líquido en ir de la marca C a E.
9) Se realizaron varias mediciones para poder determinar la viscosidad del líquido

6. Dimensionamiento de tanques de almacenamiento de líquido de pirólisis

1) Se calculó el volumen de líquido obtenido por lote a partir del porcentaje de conversión establecido en la propuesta de escalamiento de planta piloto.
2) Se calculó el volumen mensual obtenido a partir de establecer 20 lotes mensuales, cada uno de 2.3 toneladas.
3) Se determinó el volumen requerido para suplir el 10% del consumo mensual de bunker con líquido pirolítico.
4) Posteriormente se calculó el volumen a almacenar a partir de la diferencia entre el volumen mensual producido y el volumen requerido de líquido para suplir el bunker.
5) Para el diseño de ambos tanques se tomó de referencia los requerimientos de la norma UL - 142 que establece los parámetros de diseño para tanques de almacenamiento de hidrocarburos y líquidos inflamables.
6) Se eligió el material de los tanques basándose en la recomendación de la norma y la composición del líquido pirolítico. Debido a que no se encontraron compuestos clorados que indicaran la necesidad de utilizar un acero más resistente a la corrosión, se propuso que el material de ambos tanques fuera SS 304.
7) El dimensionamiento del tanque horizontal se determinó a partir del cálculo de producción de líquido pirolítico obtenido por lote.
8) Se consultaron las capacidades de tanques horizontales pequeños según Underwritter Laboratories para evaluar el tanque sugerido para el almacenamiento calculado anteriormente.
9) Se realizó el mismo procedimiento para calcular el tanque que mejor se ajustara para el almacenamiento de la diferencia de líquido pirolítico a almacenar.
10) Posterior a elegir los tanques por el volumen de almacenamiento, se buscaron las dimensiones específicas de diámetro, longitud, espesor y peso para cada uno de ellos.

7. Obtención de las características del char de pirólisis

a. Cálculo de densidad aparente

1) Se pesaron 7 gramos de muestra en una balanza.
2) Se introdujo la muestra pesada sin compactar en una probeta de vidrio de 100 mL.
3) Se niveló el material cuidadosamente sin compactarlo
4) Se tomó la lectura del volumen aparente sin asentar, aproximando a la unidad más cercana de la escala.
5) Se calculó la densidad aparente en kg/m^3, utilizando la siguiente ecuación:

$$Densidad\ aparente = \frac{masa}{volumen\ aparente}$$

6) Se realizaron 5 pruebas para esta medición empleando la misma muestra.

b. Cálculo de densidad compactada

1) Se utilizó la misma muestra dentro de la probeta que se utilizó para la medición de la densidad aparente.
2) Se golpeó la probeta 250 veces contra una superficie sólida para compactar la muestra.
3) Se tomó la lectura del volumen compactado aproximando a la unidad más cercana de la escala.
4) Se calculó la densidad compactada en kg/m^3, utilizando la siguiente ecuación:

$$Densidad\ compactada = \frac{masa}{volumen\ compactado}$$

5) Se realizaron 5 pruebas para esta medición empleando la misma muestra.

c. Cálculo del ángulo de reposo

1) Se pesaron 25 gamos de muestra en una balanza.
2) Se dejó caer la muestra sobre una superficie sólida.
3) Se midió el radio y la altura de la pila formada.
4) Se calculó el ángulo con la siguiente ecuación, donde h representa la altura de la pila de material y r el radio.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{h}{r}\right)$$

5) Se realizaron 5 pruebas para esta medición empleando la misma muestra.

d. Cálculo del ángulo de deslizamiento

1) Se utilizó la misma cantidad de muestra empleada en el cálculo del ángulo de reposo.
2) Se dejó caer la muestra sobre una superficie sólida.
3) Se levantó un extremo de la superficie, inclinándola hasta que la pila de material empezara a deslizarse.
4) Se midió el radio y la altura de la superficie en el punto en que el material empezó a deslizarse.
5) Se calculó el ángulo con la siguiente ecuación, donde h representa la altura de la pila de material y r el radio.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{h}{r}\right)$$

6) Se realizaron 5 pruebas para esta medición empleando la misma muestra.

e. Análisis granulométrico

1) Se pesaron los tamices y se colocaron en el tamizador en orden de número de malla, de la más grande a la más pequeña.
2) Se colocaron 30 g de muestra del char obtenido de pirólisis en el tamiz superior.
3) Se puso a funcionar el tamizador por 15 minutos.
4) Al finalizar los 15 minutos, se procedió a pesar cada uno de los tamices.
5) Se calculó la masa de muestra retenida en cada tamiz restando la masa final del tamiz menos la masa inicial.

6) Se determinó la proporción másica del sólido retenido en cada malla en función de la masa total utilizada y se expresó como porcentaje.
7) Las proporciones se sumaron acumulativamente para determinar en qué número de llama se encontraba el mayor porcentaje retenido.

f. Obtención de humedad

1) Se colocó 1 gramo de la muestra char obtenida en la bandeja metal de la balanza de humedad.
2) Se procedió a dejar secar la muestra hasta que la balanza indicara que se encontraba totalmente seca.
3) Se anotó el valor de humedad proporcionado.
4) Se realizaron 5 pruebas para esta medición y se calculó el promedio.

g. Análisis de determinación de aluminio

1) Se enviaron 30 gramos de muestra al laboratorio CERES para realizar un análisis de aluminio intercambiable, el cual consistió en el siguiente método:
2) Se midió una cantidad definida de muestra seca y se colocó en un vaso de extracción.
3) Se agregó un volumen proporcional (1:10) de la solución extractora de Cloruro de Potasio.
4) Se agitó durante 10 minutos y se procedió a filtrar.
5) Usando un dispensador se tomó una alícuota del filtrado y se diluyó con agua destilada.
6) Se agregaron 2 gotas de fenolftaleína y se tituló con la disolución de Hidróxido de Sodio hasta la aparición de un color rosado tenue para obtener la acidez intercambiable.
7) Para determinar el aluminio intercambiable se añadió Fluoruro de Potasio y se tituló con Ácido Clorhídrico hasta que el color rosado desapareciera.
8) Se obtuvo el resultado de aluminio presente en $mmol/dm^3$.
9) Se utilizó el resultado obtenido en $mmol/dm^3$ para calcular la cantidad de aluminio presente en el char en kg/m^3 y ppm, utilizando conversiones y el peso molecular del aluminio.

8. Comparación de características del char de pirólisis con abonos orgánicos y combustibles sólidos

a. Análisis de abonos orgánicos por ICP

1) Se envió la cantidad de muestra recolectada de 12 pruebas de pirólisis al laboratorio de ANACAFÉ para realizar el análisis del contenido de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn, materia orgánica y ceniza por medio de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente, el cual consistió en el siguiente método:
2) Se tamizó la muestra utilizando un tamiz de mesh 20.
3) Se llevó la muestra a una mufla donde se secó durante 7 horas.
4) Se utilizaron 0.5 gramos de muestra filtrada en un balón con 10 mL de HNO_3 y 8 mL de agua destilada.
5) Se llevaron las muestras a un microondas para digestión por 5 minutos.

6) Al finalizar el calentamiento, se dejó enfriar
7) Se leyeron en el extracto el Mg, Ca, P, K, Na, Fe, Mn, Cu y Zn, obtenido mediante ICP-MS.
8) Se efectuaron dos réplicas de extracción y tres determinaciones en cada una de ellas.
9) Los resultados se expresaron en % m/m para los elementos mayoritarios y en ppm para los elementos minoritarios.

b. Investigación sobre abonos orgánicos y enmiendas comerciales

Se obtuvo información de fichas técnicas de enmiendas comerciales y de artículos científicos de caracterización de abonos orgánicos como estiércol vacuno, estiércol ovino, gallinaza y bocashi.

Se realizó un cuadro de comparación para verificar si los resultados obtenidos del análisis del char realizado por ANACAFÉ se acercan a los parámetros reportados para las características de abonos orgánicos, enmiendas y mejoradores de suelo comerciales.

c. Investigación de características de combustibles sólidos

1) Se obtuvo información de artículos científicos para obtener el poder calorífico del bagazo de caña, coque de carbón, carbón mineral, carbón bituminoso, carbón vegetal y madera seca
2) Se realizó un cuadro de comparación para verificar si los resultados obtenidos para el poder calorífico del char se acercan a los parámetros reportados para el poder calorífico de otros combustibles sólidos para determinar su potencial para generar energía.
3) Se compararon otras características de los combustibles como porcentaje de cenizas, de carbono fijo y humedad.

9. Propuesta de sistema de almacenamiento

a. Dimensionamiento de silo

1) Se calculó la cantidad de char producida por semana multiplicando la capacidad del reactor empleado en la planta piloto, el rendimiento del char y la cantidad de lotes por semana.
2) Se calculó el volumen de material dividiendo la cantidad de char semanal en su densidad compactada.
3) Se utilizó la ecuación del volumen del cilindro para calcular el radio, altura y diámetro del cilindro, en base al volumen de material.

$$V_{cilindro} = \pi r^2 h$$

4) Se calculó la altura del cono de la tolva, a partir del radio del cilindro y ángulo de la tolva.

$$\alpha_{tolva} = \alpha_{reposo} + 10°$$

$$h_{cono} = \mathrm{r}\tan\alpha_{tolva}$$

5) Se utilizó la ecuación del volumen del cono para calcular el volumen de la tolva.

$$V_{cono} = \frac{1}{3}\pi r^2 h$$

6) Se calculó el volumen y altura de un cono pequeño en base al diámetro de salida de la tolva considerado para el tamaño de partícula del material, empleando la ecuación del volumen del cono.

7) Se restó el volumen del cono pequeño al del cono grande para formar un cono truncado que represente la tolva.
8) Se calculó el volumen del cono de material que se forma en la parte superior del silo.
9) Se calculó el volumen dentro del cilindro, restando el volumen de la tolva y del cono superior al volumen calculado del material.
10) Se calculó la altura del material ocupado, en base al volumen dentro del cilindro.
11) Se calculó la altura del espacio vacío, restando la altura del cilindro y la altura del material ocupado.
12) Se calculó el porcentaje de espacio vacío, en base la altura del cilindro y la altura del espacio vacío. Si este porcentaje es menor al 20%, se recalcula la altura del espacio vacío.
13) Se recalculó el volumen del cilindro, sumando la altura del espacio vacío a la altura del cilindro anterior.
14) Se calculó el volumen total del silo sumando el volumen del cilindro recalculado, el volumen del cono superior y el volumen de la tolva.
15) Se calculó la altura total del silo sumando la altura del cilindro recalculada y la altura de la tolva.

b. Elección de transporte

1) Se realizó una investigación sobre los diferentes tipos de transporte mecánico de sólidos.
2) Se tomaron en cuenta las características calculadas del char, la cantidad obtenida por lote y la altura del silo para seleccionar el tipo de transporte.
3) Se realizó una revisión de reglas gruesas de los tipos de transporte mecánico en la literatura para verificar que la selección sea adecuada a los estándares establecidos.

10. Investigación sobre productos obtenidos de la pirólisis

1) Se obtuvo información acerca de las composiciones y compuestos que forman a los productos gaseoso, líquido y solido obtenidos de la pirólisis a través de módulos dentro de este trabajo.
2) Se determinó las propiedades fisicoquímicas de cada uno de los compuestos que forma parte de los productos de la pirólisis utilizando como herramientas la web y literatura.
3) Se documento el uso de cada uno de los productos de la pirólisis a través del uso literatura y de información obtenida de la web.
4) Se obtuvo el precio de cada uno de los productos de la pirólisis y los compuestos que los conforman a través de páginas web de proveedores grandes a nivel mundial.

11. Determinación de venta o utilización de los productos de la pirólisis

Con la información obtenida de los módulos mencionados en el primer paso “Investigación sobre productos obtenidos de la pirólisis” y los precios investigados de cada uno de los compuestos de los productos, se realizó una comparación entre estos y los poderes caloríficos de cada uno, con el fin de determinar cuál de estos es posible venderlo y cuál se puede reutilizar en la empresa.

a. Análisis de flujo de efectivo

1) Los requerimientos específicos de los equipos, tuberías, válvulas y obra gris que requiere la planta para su funcionamiento fueron definidos en la propuesta de reactor escala planta piloto de la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado utilizando sistemas de simulación.
2) La información fue consolidada utilizando como herramienta hojas de cálculo en Excel, para llevar un control de lo solicitado.
3) Se preparó la hoja de cálculo de manera que la primera pestaña tuviera la información de los productos solicitados con su precio, generando una plantilla que desarrollará resultados exactos sobre los costos de los equipos y el personal que la planta requiere para su funcionamiento.
4) Se cotizaron diferentes plantas de pirólisis finalizadas con una capacidad de producción de 2 toneladas por lote.
5) Se procedió a consolidar todos los datos de ambas propuestas para la cuantificación de la planta en utilizando como herramienta las hojas de cálculo de Excel mencionadas en el inciso C.
6) Se incluyó la adición de equipos requeridos para la evaluación del producto sólido obtenido de la pirólisis para material de empaque de polipropileno biorientado (BOPP) para estudiar sus aplicaciones posteriores, los productos líquido y gaseoso, para el transporte, separación y almacenamiento de cada producto de la pirólisis.
7) Se proyectó los costos de cada año, si existiera un aumento en la producción de los productos obtenidos de la planta de pirólisis.
8) Se generó un flujo de caja con una proyección a 10 años, con la finalidad de observar el inicio de la generación de ingresos con la implementación de una planta de pirólisis, de todos los escenarios generados.
9) Se definió la inversión inicial de cada propuesta de planta, con ayuda de la hoja de cálculo, incluyendo materiales varios, instalaciones y transporte.
10) Se determinó el precio de venta del producto sólido utilizando como referencia la composición que este tiene y los precios del mercado local.
11) Se determinó el salario de los operarios que trabajaran la planta utilizando como base, datos proporcionados por el Banco de Guatemala e información en las propuestas brindadas por los proveedores. Este fue agregado al flujo de efectivo.
12) Se calculó el costo de mantenimiento, sobre la inversión inicial, que el proyecto necesita, utilizando como base un 4% brindado por (Perry, Perry, Green, & Maloney, 1997). Este fue agregado al flujo de efectivo.
13) Los gastos de combustible que representan a la planta fueron calculados a través del uso de la información brindada en cada propuesta. Este fue agregado al flujo de efectivo.
14) El consumo de energía eléctrica que requiere la planta fue calculado utilizando las especificaciones brindadas en las propuestas. Este fue agregado al flujo de efectivo.

15) Se definió el ahorro que tendrá la empresa al dejar de tercerizar el tratamiento de los deshechos y se agregó al flujo de efectivo de cada propuesta. Este fue agregado al flujo de efectivo.
16) Fue calculado el ahorro en bunker que tendrá la empresa al recircular una mezcla de bunker – líquido de pirólisis en una proporción 90% - 10%, y fue agregado al flujo de efectivo.
17) Se utilizó la fórmula del valor presente neto, para la obtención, a través del flujo de efectivo, el comportamiento del dinero con el paso de los años.
18) Se determinó la tasa interna de retorno, que tiene como función representar la rentabilidad por periodo generada en un proyecto de inversión.
19) Si el valor de la TIR es mayor al valor de la tasa mínima de atracción de retorno (TMAR), se aceptará el proyecto con los equipos cotizados. En cambio, si el valor de la TIR es menor al valor de la TMAR, se rechazará de manera automática la propuesta de inversión.
20) Al finalizar el análisis de los diferentes escenarios del proyecto, se presentará a la empresa una propuesta favorable para ejecutar el proyecto. Se definió la venta de propileno que tendrá la empresa utilizando un análisis de sensibilidad, utilizando un rango de precios entre $5.00 a $2.00 por kilogramo, y una disminución de la producción de producto gaseoso de un 50% del total hasta un 80%

VII. RESULTADOS

A. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE EMPAQUE DE RECHAZO EN BOBINA Y MATERIAL RESIDUAL.

A continuación, se detallan las principales características del material de empaque utilizado:

Cuadro 13. Caracterización del material de empaque de polipropileno biorientado.

Elemento	Descripción
Material	BOPP y BOPP Metalizado
Origen del material	Polímeros sintéticos
Espesor*	41.25um
BOPP*	13.65g/m^2
BOPP metalizado*	13.65g/m^2
Cantidad de tinta*	1g/m^2
Cantidad de adhesivo*	2g/m^2
Espesor BOPP*	15um
Grosor BOPP metalizado*	20um
Gramaje*	31.31g/m^2

*Nota: Los valores para el grosor, BOPP, BOPP metalizado, cantidad de tinta, cantidad de adhesivo, grosor BOPP, grosor BOPP metalizado y el gramaje, fueron obtenido de las fichas técnicas DPN-E-002. Estos valores no se calcularon.

Cuadro 14. Propiedades fisicoquímicas para la mezcla del material de rechazo en bobina y material residual.

Propiedad/Corrida	1	2	3	4	5	Promedio
Densidad de partícula	1.09kg/L	1.09kg/L	1.09kg/L	1.09kg/L	1.09kg/L	1.09kg/L
Densidad aireada	0.027kg/L	0.024kg/L	0.024kg/L	0.024kg/L	0.028kg/L	0.025kg/L
Densidad compacta	0.034kg/L	0.035kg/L	0.035kg/L	0.033kg/L	0.034kg/L	0.034kg/L
Densidad de trabajo**	0.02824kg/L	0.02824kg/L	0.02824kg/L	0.02824kg/L	0.02824kg/L	0.02824kg/L
Índice de compresibilidad**	36%	36%	36%	36%	36%	36%
Porcentaje de humedad	1.04%m/m	1.04%m/m	1.05% m/m	1.05% m/m	1.05% m/m	1.04% m/m
Porcentaje de sólidos residuales y grasas***	7.46%m/m	8.38%m/m	7.67%m/m	8.20%m/m	8.96%m/m	8.13%m/m
Resistencia a tensión horizontal	0.408N	0.408N	0.408N	0.408N	0.408N	0.408N
Resistencia a tensión vertical	0.471N	0.471N	0.471N	0.471N	0.471N	0.471N
Temperatura de fusión	220ºC	--	--	--	--	
Densidad material fundido*	0.451kg/L	--	--	--	--	
Poder calorífico	42667J/g ºC	--	--	--	--	

*Nota: Material residual hace referencia al material contaminado con grasas y residuos de harina. *La densidad del material fundido fue medida después de enfriarlo a 25ºC. ** La densidad de trabajo y el índice de compresibilidad se calcularon a partir de los promedios de densidad compacta y la densidad aireada. ***El porcentaje de *sólidos residuales* y grasas es únicamente para el material residual.

1. Proporciones de mezcla

De acuerdo con la venta de la producción de la empresa se determinó tener una mezcla de 90% material residual y 10% material de rechazo en bobina. Es importante mencionar que el material residual se desglosa en tres distintas líneas de producción, las cuales se presentan a continuación:

Cuadro 15. Proporción de los productos de material residual.

Producto	Porcentaje (%)
Fritura de maíz y de piel de cerdo deshidratada	60
Pellet frito de trigo deshidratado	20
Piel de cerdo frita y deshidratada	20

2. Acondicionamiento del material

Acondicionamiento del material de rechazo en bobina: Retirar el mandril de la bobina. De acuerdo con la necesidad de acondicionar la materia prima para ser ingresada a un reactor de pirólisis, se seleccionaron dos equipos, los cuales se presentan a continuación:

Cuadro 16. Trituradora para el acondicionamiento de la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual

Equipo	Capacidad	Información Adicional
Molino de cuchillas	460kg/h	Número de filas de cuchillas: 9 Cuchillas en total: 90Proceso continuo con el tornillo extrusor.
Motor del molino de cuchillas	Potencia: 600W Voltaje: 120VFrecuencia: 60Hz	Motor monofásico

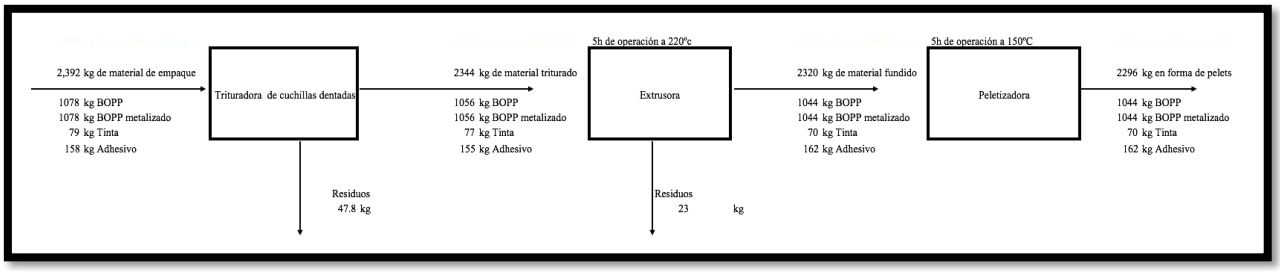
Cuadro 17. Extrusora para el acondicionamiento de la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual.

Equipo	Capacidad de alimentación	Capacidad de peletización	Capacidad	Información adicional
Extrusora*	460kg/h	531m/h	47 kWh 1,948,960 pelets/h	Resistencias necesarias: 6* Tiempo de operación: 5h

*Nota: Este valor es un dato aproximado, ya que no se tomaron en cuentas las pérdidas de calor por transferencia de las resistencias hacia la mezcla de material de empaque.

3. Balance de masa para el proceso de peletización de 2,300kg por lotes:

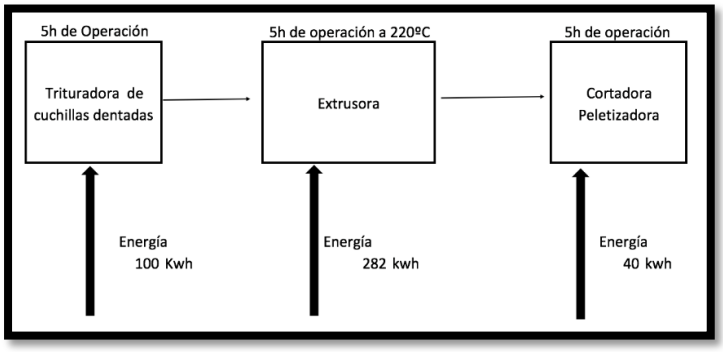
Figura 25. Esquema del proceso y balance de masa.



*Nota: El proceso inicia con 2,392 kg de materia prima porque se estima una pérdida de material de 4% durante todo el proceso.

Balance de energía para el proceso de peletización de 2,300kg por lotes:

Figura 26. Esquema del proceso y balance de energía.

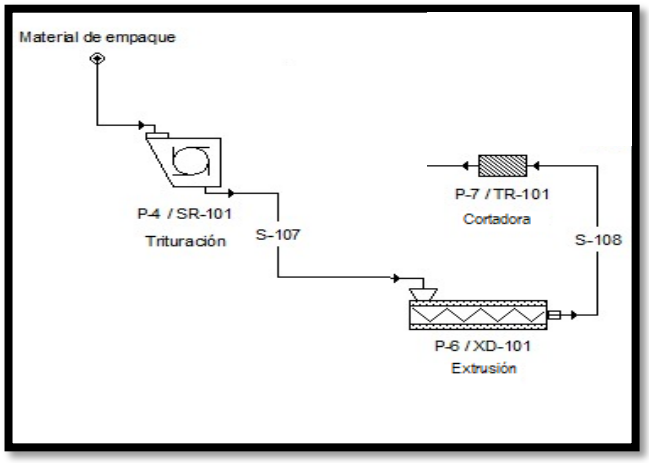


Nota: El balance de energía está hecho de acuerdo con la propuesta que se hizo para el proceso de peletización. Estos son valores son aproximados y discutidos en la sección de análisis de error.

Distribución del proceso:

Proceso por lotes de 2,300kg con una capacidad de 460kg/h para la trituradora y el tornillo extrusor.

Figura 27. Esquema de la distribución de equipos.



Ciclos de operación:

Figura 28. Ciclo de operación del acondicionamiento y el reactor.

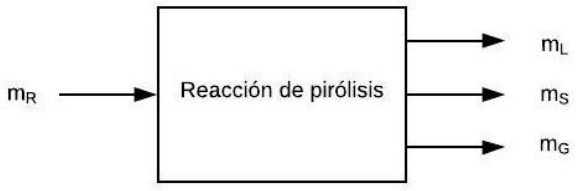
	Semana 1							Semana 2						
	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
12 - 1 am														
1 - 2 am														
2 - 3 am	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento		Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	
3 - 4 am	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento		Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	
4 - 5 am	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento		Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	
5 - 6 am	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento		Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	
6 - 7 am	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento		Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	Acondicionamiento	
7 - 8 am	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis		Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	
8 - 9 am	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis		Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	
9 - 10 am	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis		Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	
10 - 11 am	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis		Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	
11 - 12 pm	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis		Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	
12 - 1 pm	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis		Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	
1 - 2 pm	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis		Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	
2 - 3 pm	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis		Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	
3 - 4 pm	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis		Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	
4 - 5 pm	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis		Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	
5 - 6 pm	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis		Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	
6 - 7 pm	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis		Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	
7 - 8 pm	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis		Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	
8 - 9 pm	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis		Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	Reactor de Pirólisis	
9 - 10 pm														
10 - 11 pm														
11pm - 12 am														

*Nota: El ciclo de operación está realizo de acuerdo a un proceso de acondicionamiento de 5h, un proceso de pirólisis de 11h y una cantidad de 5 lotes por semana.

B. RENDIMIENTOS DE LOS PRODUCTOS DE LA REACCIÓN

El balance de masa general para el proceso de pirólisis se establece en la siguiente figura:

Figura 29. Diagrama de entradas y salidas para la reacción de pirólisis de polipropileno.



Donde:

m_R: Masa reactiva equivalente a los 60 g de material de empaque

m_L: Masa del producto líquido

m_S: Masa del producto sólido

m_G: Masa del producto gaseoso

De los 60 gramos de material de empaque ingresados al reactor, se determinaron por peso las masas del producto líquido y sólido. La masa del producto gaseoso fue determinada por diferencia, restando a la masa reactivo los otros productos obtenidos para poder determinar los rendimientos.

Los rendimientos calculados de acuerdo con las masas de los diversos productos obtenidos se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro 18. Rendimientos de los productos de la reacción de pirólisis a diferentes curvas de calentamiento.

		Rendimiento de productos (%m/m)		
No.	Temperatura final(°C)	Líquido	Sólido	Gas
1	415	82.60 ± 2.746	16.52± 3.343	0.88± 0.07
2	430	84.18 ± 3.085	15.50± 3.592	0.32± 0.07
3	450	83.00 ± 3.167	16.48± 3.608	0.52± 0.07
4	460	85.51 ± 3.309	13.77± 3.563	0.72± 0.06
5	475	87.12± 3.236	11.88± 3.531	0.98± 0.06

*Nota 1: La temperatura corresponde a la programada en la mufla como temperatura a alcanzar para calentar el sistema. Las curvas de calentamiento de cada temperatura se encuentran en la sección D de Anexos. Sistema abierto a presión atmosférica.

*Nota 2: La incertidumbre se calculó con propagación de error de las mediciones realizadas.

*Nota 3: Los rendimientos del producto líquido y sólido incluyen los residuos del sistema, el detalle de estos se encuentra en la sección A de Anexos.

C. CINÉTICA DE REACCIÓN

Tal como indica el balance de masa, la pérdida de masa reactiva en el tiempo (W_A) puede determinarse al restar el producto líquido y gaseoso que se va generando hasta el final de la reacción que deja una masa de residuo sin descomponer (W_f) que constituye el producto sólido.

De acuerdo con esto, el modelo de cinética de reacción propuesto para la pirólisis de polipropileno metalizado es el siguiente:

$$-\frac{dW_A}{dt} = A\exp\left[-\frac{E_a}{R * T(t)}\right](W_A - W_f)^n \quad \text{(Ecuación 32)}$$

*Nota 1: Modelo basado en la pérdida de masa del reactivo (W_A) en función del tiempo (t).

*Nota 2: Los valores de ajuste para la función de temperatura se encuentran en la sección D de Anexos y fueron determinados con una curva sigmoidal de Boltzmann.

*Nota 3: El detalle del desarrollo del modelo se encuentra en la sección E de Anexos.

Los parámetros cinéticos calculados para el sistema en las cinco condiciones evaluadas se presentan a continuación:

Cuadro 19. Resultados de los parámetros cinéticos de Arrhenius calculados en cada cinética evaluada.

Parámetros cinéticos					
Cinética No.	Temperatura final (°C)	A(min^{-1})	E_a (kJ/mol)	n	R^2
1	415	$1.5030 * 10^{18}$	248.90	0.54	0.9562
2	430	$4.3972 * 10^{17}$	245.66	0.52	0.9673
3	450	$9.4770 * 10^{16}$	240.56	0.55	0.9904
4	460	$3.3038 * 10^{16}$	236.02	0.52	0.9753
5	475	$5.7830 * 10^{16}$	241.27	0.54	0.9943
	Promedio	$4.2567 * 10^{17}$	242.48	0.53	
	Desviación estándar	$6.2446 * 10^{17}$	4.95	0.01	

*Nota 1: Donde A es el factor de frecuencia, E_a la energía de activación, n el orden de reacción y R^2 corresponde al coeficiente de determinación.

*Nota 2: La temperatura corresponde a la programada en la mufla como temperatura a alcanzar para calentar el sistema. Las curvas de calentamiento de cada temperatura se encuentran en la sección D de Anexos. Sistema abierto a presión atmosférica.

A continuación, se presentan las gráficas de comparación entre los datos experimentales y la curva modelada con los parámetros cinéticos calculados en el cuadro anterior.

Figura 30. Variación de la masa reactiva con el tiempo de acuerdo con los valores experimentales y lo predicho por el modelo para la cinética 1.

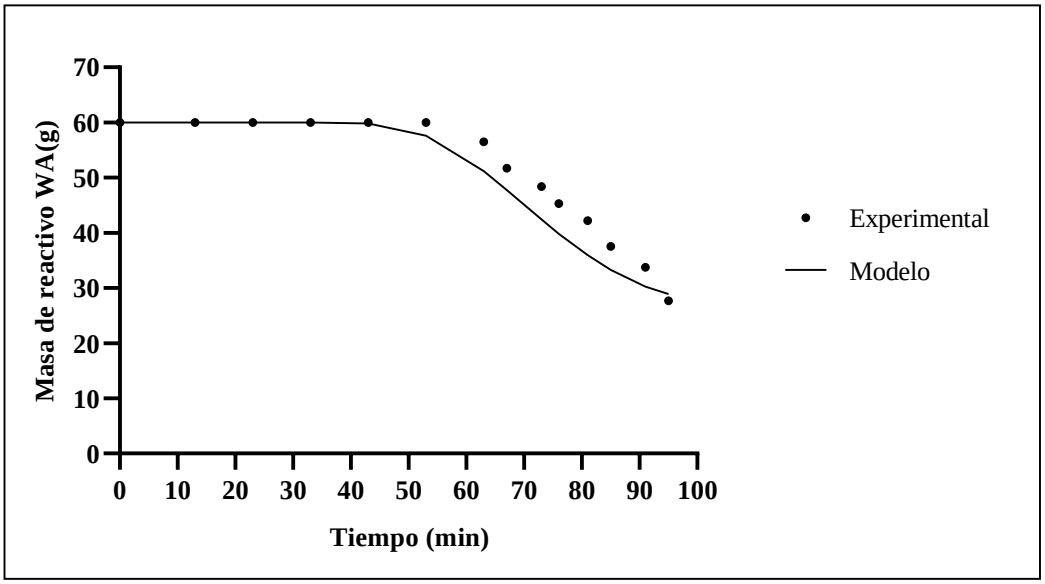


Figura 31. Variación de la masa reactiva con el tiempo de acuerdo con los valores experimentales y lo predicho por el modelo para la cinética 2.

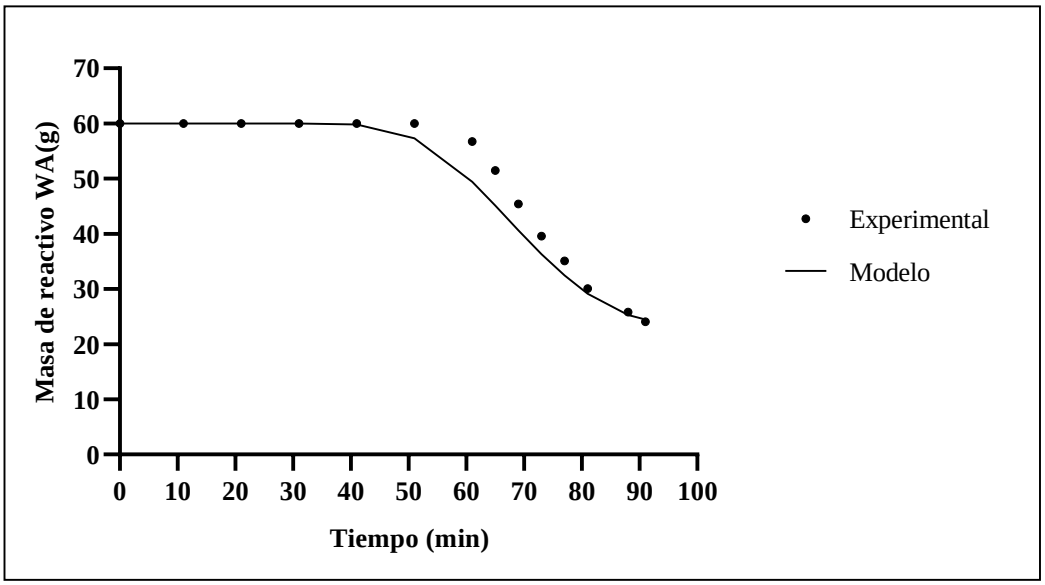


Figura 32. Variación de la masa reactiva con el tiempo de acuerdo con los valores experimentales y lo predicho por el modelo para la cinética 3.

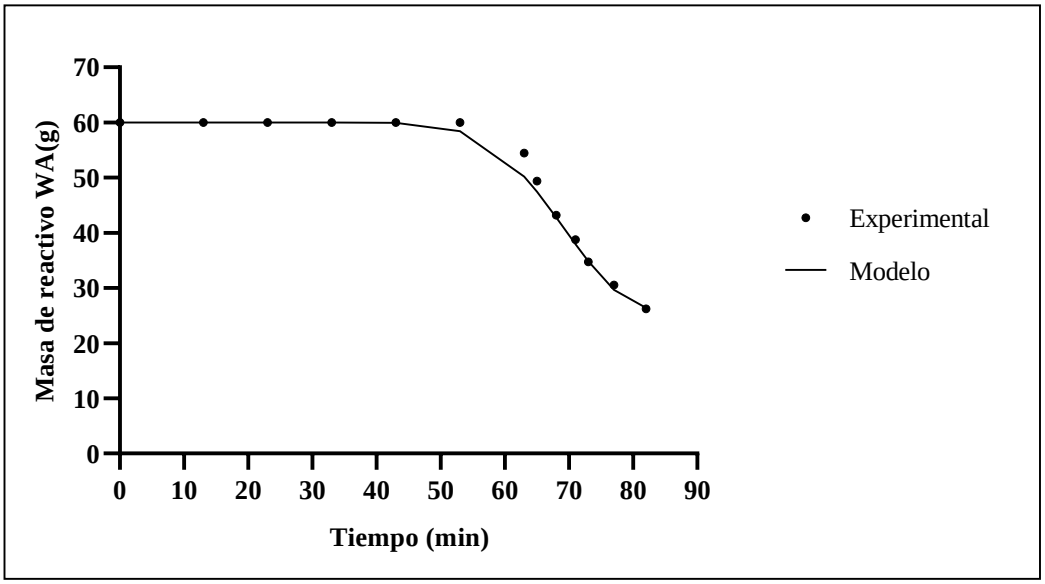


Figura 33. Variación de la masa reactiva con el tiempo de acuerdo con los valores experimentales y lo predicho por el modelo para la cinética 4.

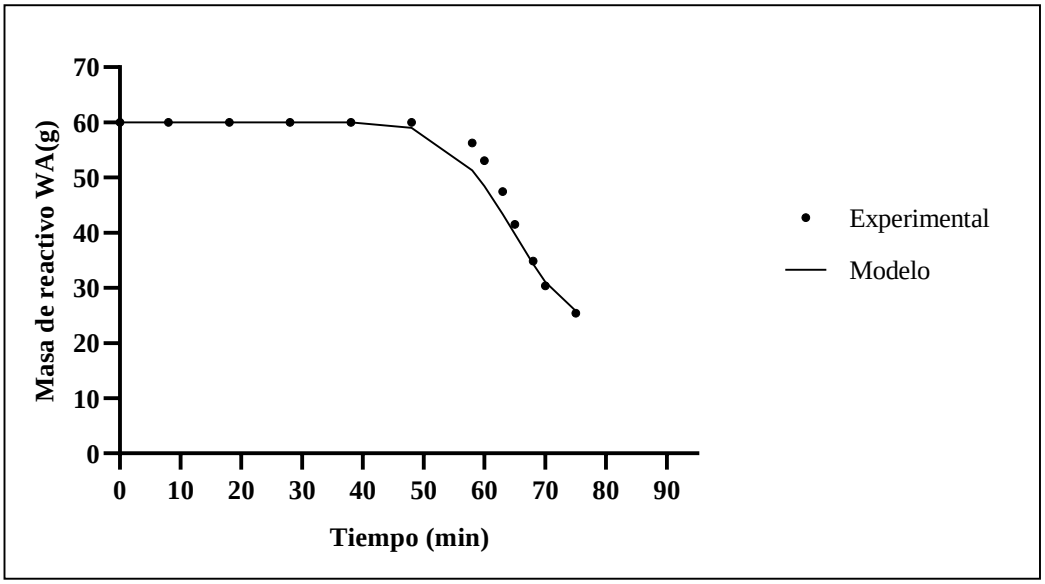
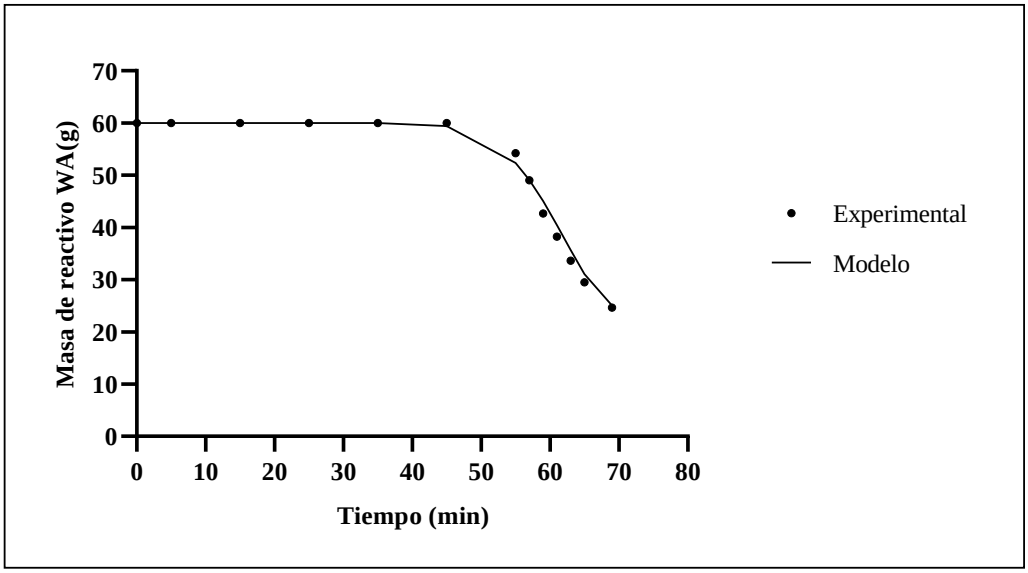


Figura 34. Variación de la masa reactiva con el tiempo de acuerdo con los valores experimentales y lo predicho por el modelo para la cinética 5.



D. VELOCIDAD DE PRODUCCIÓN DEL COMPUESTO REPRESENTATIVO

Se seleccionó como compuesto representativo para este estudio el 2,4-Dimetil-1-hepteno, del cual se determinó la ecuación de velocidad de producción según la siguiente ecuación:

$$\frac{dN_B}{dt} = -k\frac{dW_A}{dt} \text{ (Ecuación 33)}$$

*Nota 1: La ecuación 33 relaciona los moles del producto 2,4-Dimetl-1-hepteno (N_B) con la pérdida de masa reactiva (W_A) en función del tiempo con una constante de proporcionalidad (k).

*Nota 2: Para la dWA/dt los parámetros cinéticos son los mismo que los del Cuadro 19 en cada condición de cinética. *El detalle del desarrollo de la ecuación se encuentra en Anexos.

Calculando las constantes de proporcionalidad para condición de cinética, se obtienen los siguientes resultados:

Cuadro 20. Resultados de las constantes de proporcionalidad que relacionan la pérdida de masa reactiva y la producción de moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno.

Constantes de proporcionalidad para la producción de 2,4-Dimetil-1-hepteno			
Cinética No.	Temperatura final (°C)	k (mol/g)	R^2
1	415	0.0011	0.9489
2	430	0.0014	0.8925
3	450	0.0015	0.9182
4	460	0.0017	0.9241
5	475	0.0017	0.9622
Promedio		0.0015	
Desviación estándar		0.0002	

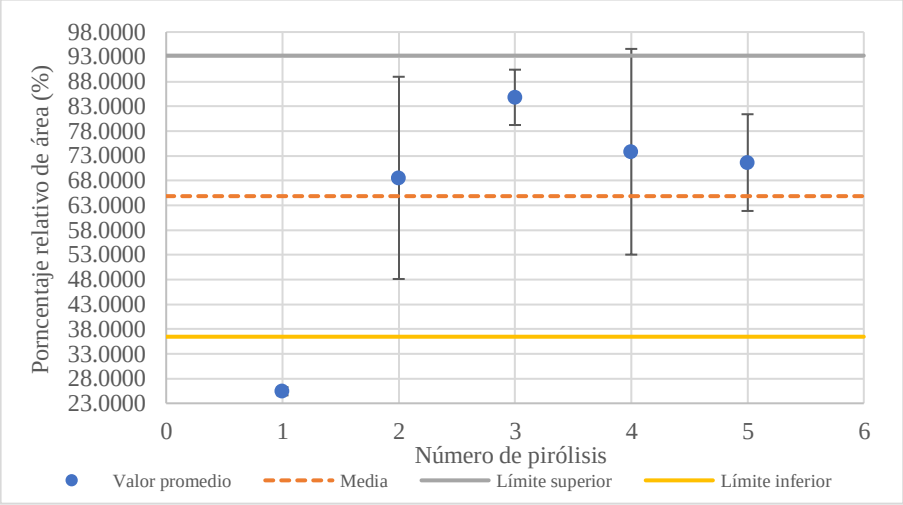
*Nota 1: El coeficiente de determinación (R^2) corresponde al de la regresión lineal utilizada para determinar la constante de proporcionalidad *k*. Gráficamente puede visualizarse el ajuste lineal de los resultados de las cinco cinéticas en Anexos.

*Nota 2: La temperatura corresponde a la programada en la mufla como temperatura a alcanzar para calentar el sistema. Las curvas de calentamiento de cada temperatura se encuentran en Anexos. Sistema abierto a presión atmosférica.

E. PRODUCTO GASEOSO

En las Figura 35, Figura 36 y Figura 37 se presenta el comportamiento de la composición de los tres compuestos mayoritarios del producto gaseoso.

Figura 35. Composición porcentual del propeno en el producto gaseoso para las corridas de pirólisis



*Nota 1: Los valores promedio de porcentaje relativo de composición de la Figura 35 se obtuvieron a partir de los cromatogramas presentados en anexos.

*Nota 2: Los límites superior e inferior representan el intervalo de confianza al 95%.

*Nota 3: Las condiciones a las que se realizaron las reacciones de pirólisis se muestran en anexos.

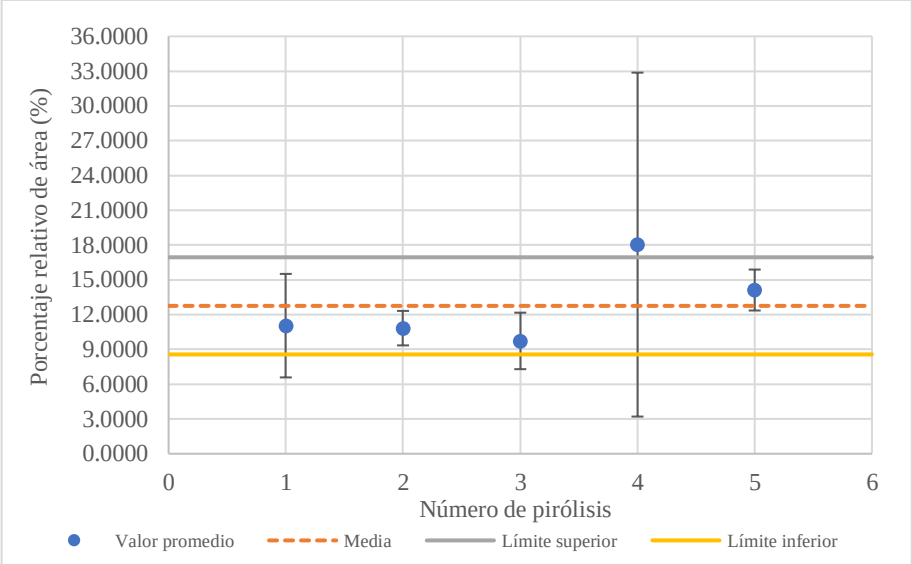
*Nota 4: Los valores promedio y la desviación estándar representada como barras de error se presentan en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Valores promedio de composición porcentual del propeno en el producto gaseoso para cada corrida de pirólisis

No. de pirólisis	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	25.4331	0.8234
2	68.5409	20.4251
3	84.8113	5.5883
4	73.8157	20.7805
5	71.6288	9.7720

*Nota 1: La cantidad de muestras gaseosas utilizadas para la determinación del valor promedio de cada pirólisis, se encuentran en anexos.

Figura 36. Composición porcentual del 2-penteno en el producto gaseoso para las corridas de pirólisis



*Nota 1: Los valores promedio de porcentaje relativo de composición de la Figura 36 se obtuvieron a partir de los cromatogramas presentados en anexos.

*Nota 2: Los límites superior e inferior representan el intervalo de confianza al 95%.

*Nota 3: Las condiciones a las que se realizaron las reacciones de pirólisis se muestran en anexos.

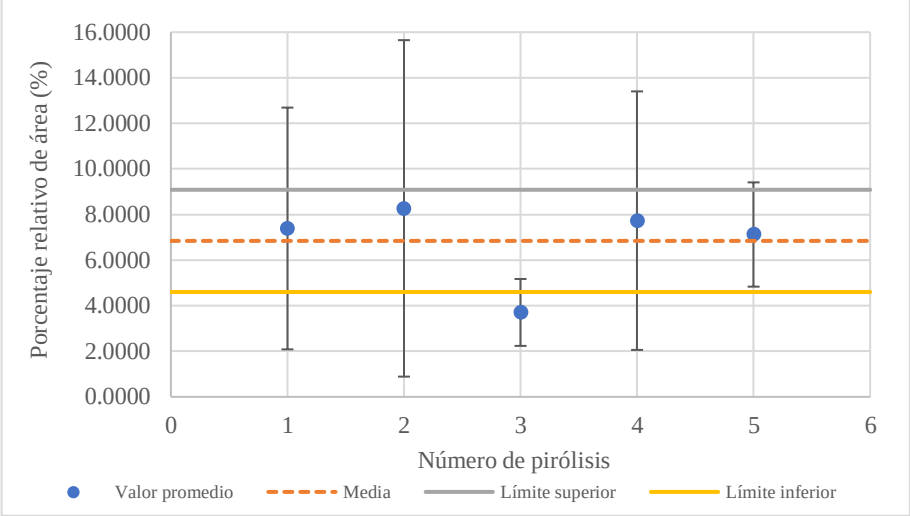
*Nota 4: Los valores promedio y la desviación estándar representada como barras de error se presentan en el Cuadro 22.

Cuadro 22. Valores promedio de composición porcentual del 2-penteno en el producto gaseoso para cada corrida de pirólisis

No. de pirólisis	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	11.0466	4.4645
2	10.8322	1.4883
3	9.7295	2.4380
4	18.0385	14.8328
5	14.1190	1.7659

*Notas: La cantidad de muestras gaseosas utilizadas para la determinación del valor promedio de cada pirólisis, se encuentran en anexos.

Figura 37. Composición porcentual del 2-metil-1-penteno en el producto gaseoso para las corridas de pirólisis



*Nota 1: Los valores promedio de porcentaje relativo de composición de la Figura 37 se obtuvieron a partir de los cromatogramas presentados en anexos.

*Nota 2: Los límites superior e inferior representan el intervalo de confianza al 95%.

*Nota 3: Las condiciones a las que se realizaron las reacciones de pirólisis se muestran en anexos.

*Nota 4: Los valores promedio y la desviación estándar representada como barras de error se presentan en el Cuadro 23.

Cuadro 23. Valores promedio de composición porcentual del 2-metil-1-penteno en el producto gaseoso para cada corrida de pirólisis.

No. de pirólisis	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	7.3875	5.3029
2	8.2696	7.3815
3	3.7037	1.4686
4	7.7308	5.6717
5	7.1232	2.2877

*Notas: La cantidad de muestras gaseosas utilizadas para la determinación del valor promedio de cada pirólisis, se encuentran en anexos.

Cuadro 24. Resultados promedio de los tres compuestos principales del producto gaseoso obtenidos de las corridas de la reacción de pirólisis de empaques de polipropileno metalizado.

No	Nombre del compuesto	Composición porcentual (%)			Intervalo de confianza		
		Media	Desviación estándar	Porcentaje equivalente	95%	Límite inferior	Límite superior
1	Propeno	64.8460	22.8698	35.27	28.3966	36.4494	93.2425
2	2-penteno	12.7532	3.3744	26.46	4.1899	8.5633	16.9430
3	2-metil-1-penteno	6.8429	1.8065	26.40	2.2430	4.5999	9.0860

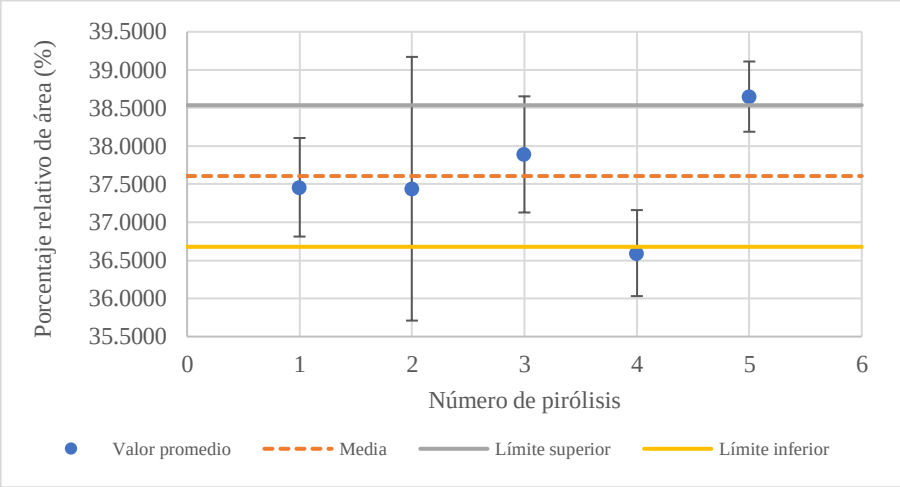
*Nota 1: Las composiciones de las muestras gaseosas analizadas para las corridas de pirólisis se presentan en los cuadros de la sección de anexos.

*Nota 2Los límites inferior y superior del intervalo de confianza se representan gráficamente en las Figura 35, Figura 36 y Figura 37.El porcentaje equivalente es el porcentaje que equivale la desviación estándar respecto al valor medio.

F. PRODUCTO LÍQUIDO

En las Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41 y Figura 42 se presenta el comportamiento de la composición de los cinco compuestos mayoritarios del producto líquido.

Figura 38. Composición porcentual del 2,4-dimetil-1-hepteno en el producto líquido para las corridas de pirólisis



*Nota 1: Los valores promedio de porcentaje relativo de composición de la Figura 38 se obtuvieron a partir de los cromatogramas presentados en anexos.

*Nota 2: Los límites superior e inferior representan el intervalo de confianza al 95%.

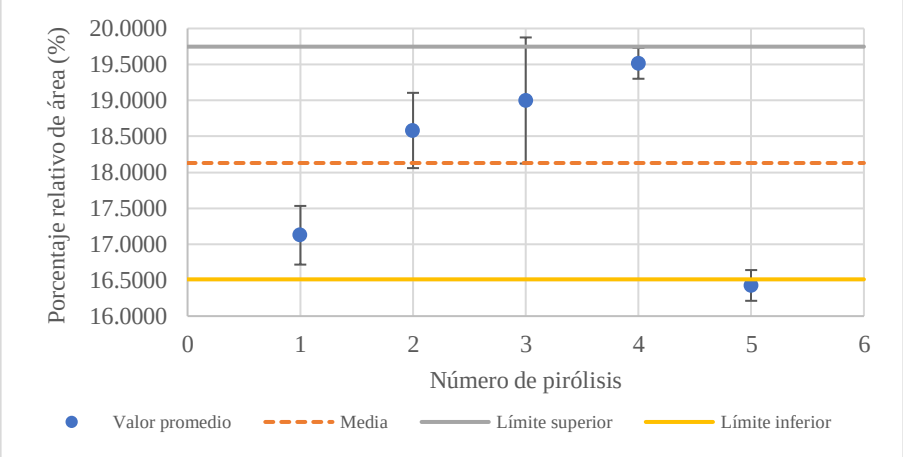
*Nota 3: Las condiciones a las que se realizaron las reacciones de pirólisis se muestran en anexos.

Cuadro 25. Valores promedio de composición porcentual del 2,4-dimetil-1-hepteno en el producto líquido para cada corrida de pirólisis.

No. de pirólisis	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	37.4596	0.6468
2	37.4404	1.7304
3	37.8909	0.7622
4	36.5957	0.5644
5	38.6492	0.4609

*Notas: La cantidad de muestras líquidas utilizadas para la determinación del valor promedio de cada pirólisis, se encuentran en anexos.

Figura 39. Composición porcentual del 2,3,7-trimetil-4-octeno en el producto líquido para las corridas de pirólisis



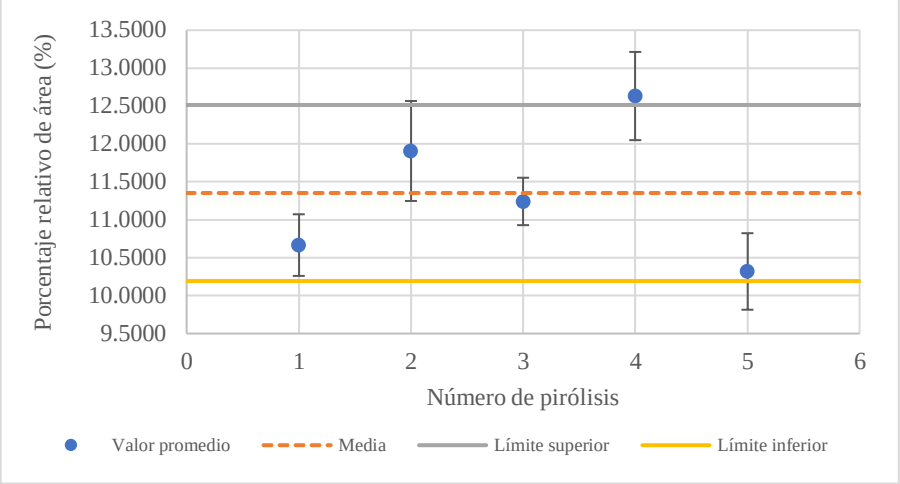
*Nota 1: Los valores promedio de porcentaje relativo de composición de la Figura 39 se obtuvieron a partir de los cromatogramas presentados en anexos.
*Nota 2: Los límites superior e inferior representan el intervalo de confianza al 95%.
*Nota 3: Las condiciones a las que se realizaron las reacciones de pirólisis se muestran en l anexos.

Cuadro 26. Valores promedio de composición porcentual del 2,3,7-trimetil-4-octeno en el producto líquido para cada corrida de pirólisis.

No. de pirólisis	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	17.1245	0.4079
2	18.5817	0.5234
3	18.9987	0.8770
4	19.5163	0.2154
5	16.4266	0.2140

*Notas: La cantidad de muestras líquidas utilizadas para la determinación del valor promedio de cada pirólisis, se encuentran en anexos.

Figura 40. Composición porcentual del 2,3,6,7-tetrametil-4-octeno en el producto líquido para las corridas de pirólisis.



*Nota 1: Los valores promedio de porcentaje relativo de composición de la Figura 40 se obtuvieron a partir de los cromatogramas presentados en anexos.

*Nota 2: Los límites superior e inferior representan el intervalo de confianza al 95%.

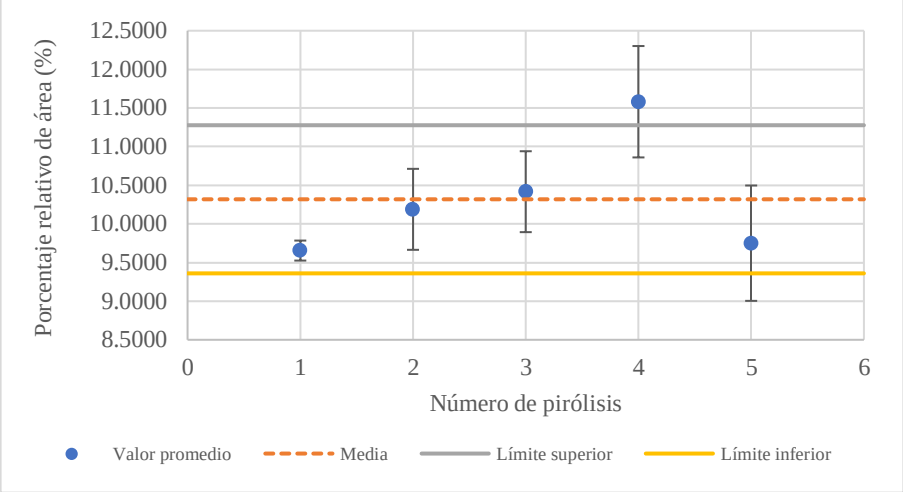
*Nota 3: Las condiciones a las que se realizaron las reacciones de pirólisis se muestran en anexos.

Cuadro 27. Valores promedio de composición porcentual del 2,3,6,7-tetrametil-4-octeno en el producto líquido para cada corrida de pirólisis.

No. de pirólisis	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	10.6663	0.4063
2	11.9071	0.6591
3	11.2417	0.3126
4	12.6315	0.5815
5	10.3186	0.5043

*Notas: La cantidad de muestras líquidas utilizadas para la determinación del valor promedio de cada pirólisis, se encuentran en anexos.

Figura 41. Composición porcentual del 2,3,5-trimetil-hexano en el producto líquido para las corridas de pirólisis



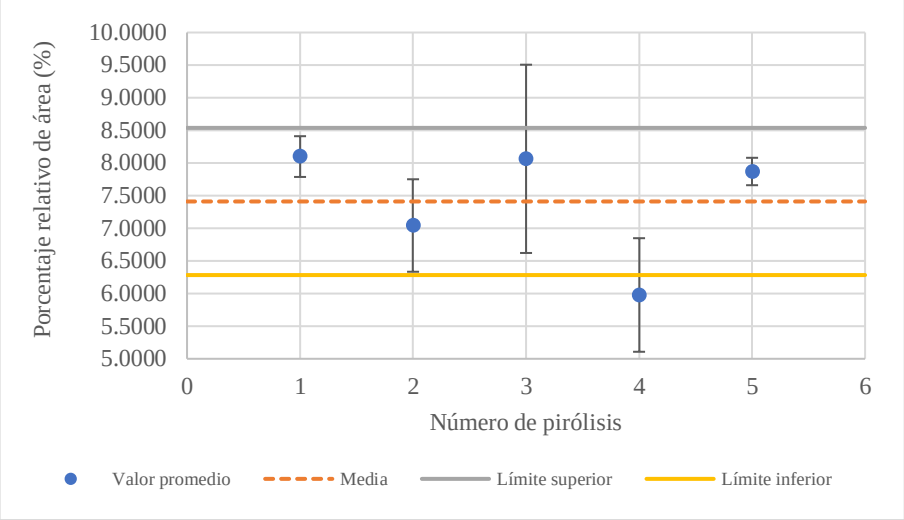
*Nota 1: Los valores promedio de porcentaje relativo de composición de la Figura 41 se obtuvieron a partir de los cromatogramas presentados en anexos.
*Nota 2: Los límites superior e inferior representan el intervalo de confianza al 95%.
*Nota 3: Las condiciones a las que se realizaron las reacciones de pirólisis se muestran en anexos.

Cuadro 28. Valores promedio de composición porcentual del 2,3,5-trimetil-hexano en el producto líquido para cada corrida de pirólisis

No. de pirólisis	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	9.6551	0.1294
2	10.1887	0.5241
3	10.4170	0.5235
4	11.5813	0.7209
5	9.7507	0.7465

*Notas: La cantidad de muestras líquidas utilizadas para la determinación del valor promedio de cada pirólisis, se encuentran en anexos.

Figura 42. Composición porcentual del 2-metil-1-penteno en el producto líquido para las corridas de pirólisis



*Nota 1: Los valores promedio de porcentaje relativo de composición de la Figura 42 se obtuvieron a partir de los cromatogramas presentados en anexos.
*Nota 2: Los límites superior e inferior representan el intervalo de confianza al 95%.
*Nota 3: Las condiciones a las que se realizaron las reacciones de pirólisis se muestran en anexos.

Cuadro 29. Valores promedio de composición porcentual del 2-metil-1-penteno en el producto líquido para cada corrida de pirólisis.

No. de pirólisis	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	8.0987	0.3123
2	7.0424	0.7086
3	8.0640	1.4426
4	5.9776	0.8704
5	7.8700	0.2101

*Notas: La cantidad de muestras líquidas utilizadas para la determinación del valor promedio de cada pirólisis, se encuentran en anexos.

Cuadro 30. Resultados promedio de los cinco compuestos principales del producto líquido obtenidos de las corridas de la reacción de pirólisis de empaques de polipropileno metalizado.

Nombre del compuesto	Composición porcentual (%)			Intervalo de confianza		
	Media	Desviación estándar	Porcentaje equivalente	95%	Límite inferior	Límite superior
2,4-dimetil-1-hepteno	37.6072	0.7482	1.99	0.9290	36.6782	38.5361
2,3,7-trimetil-4-octeno	18.1296	1.3032	7.19	1.6181	16.5115	19.7477
2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	11.3530	0.9348	8.23	1.1607	10.1923	12.5137
2,3,5-trimetil-hexano	10.3186	0.7720	7.48	0.9585	9.3600	11.2771
2-metil-1-penteno	7.4105	0.9084	12.26	1.1279	6.2827	8.5384

*Nota 1: Las composiciones de las muestras líquidas analizadas para las corridas de pirólisis se presentan en los cuadros de la sección de anexos, obtenidos por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas.

*Nota 2 Los límites inferior y superior del intervalo de confianza se representan gráficamente en las Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41 y Figura 42. El porcentaje equivalente es el porcentaje que equivale la desviación estándar respecto al valor medio.

Cuadro 31. Propiedades fisicoquímicas del producto líquido obtenido de las corridas de la reacción de pirólisis de empaques de polipropileno metalizado

Densidad a 15 °C (g/mL)	Densidad a 25 °C (g/mL)	Poder calorífico(J/g)	Viscosidad cinemática a 40 °C (cSt)*	Gravedad API(60 °F) *	Punto de inflamación(°C) *
0.81060 ± 0.05288	0.77115 ± 0.05007	45,086 ± 333	2.4	25	12

*Nota 1: Para el valor promedio de las densidades a 15 °C y 25 °C se presenta la incertidumbre asociada al dato promedio. Para el poder calorífico se indica la desviación estándar del valor promedio.

*Nota 2: Los datos utilizados y la cantidad de muestras analizadas para la determinación de los valores promedio presentados se encuentran en anexos.

*Nota 3: Los valores de viscosidad, gravedad y punto de inflamación fueron determinados por el laboratorio de análisis de PERENCO, Guatemala.

G. PRODUCTO SÓLIDO

Cuadro 32. Propiedades fisicoquímicas del producto sólido obtenido de las corridas de la reacción de pirólisis de empaques de polipropileno metalizado

Densidad aparente (kg/m^3)	Densidad compactada (kg/m^3)	Humedad (% m/m)	Poder calorífico (J/g)	Contenido de aluminio (ppm)*
107.44 ± 3.14	162.83 ± 2.68	5.78 ± 0.08	21,855 ± 1581	2.698

*Nota 1: Para la densidad aparente, densidad compactada y porcentaje de humedad se presentan los valores promedio y la incertidumbre asociada. Para el poder calorífico se indica la desviación estándar del valor promedio.

*Nota 2: Los datos utilizados y la cantidad de muestras analizadas para la determinación del valor promedio del poder calorífico se encuentran en anexos.

*El contenido de aluminio fue determinado por el agrolaboratorio CERES, Guatemala.

H. ESCALAMIENTO INDUSTRIAL

Cuadro 33. Promedio, desviación estándar y rango de 95% de confianza de rendimientos de productos de las corridas de pirólisis escala laboratorio.

	Líquido (%m/m)	Sólido (%m/m)	Gas (%m/m)
Promedio	84.6844	14.9301	0.6833
Desviación estándar	1.7093	2.0440	0.2708
Rango 95%, ±**	3.3503	4.0062	0.5307

*Notas: Procedimiento para el cálculo del rango de 95% de confianza según Skoog, et.al., 2007

Cuadro 34. Promedio, desviación estándar y rango de 95% de confianza de los rendimientos, tiempo de reacción y corrida del 2,4-dimetil-1-hepteno.

	Tiempo total (min)	Tiempo de reacción (min)	Composición 2,4-dimetil-1-hepteno (%m/m)
Promedio	73	17	24.67
Desviación estándar	4	3	1.58
Rango 95%, ±*	9	5	3.10

* Nota 1: Realizado para las corridas de pirólisis a 475°C.
*Nota 2: Procedimiento para el cálculo del rango de 95% de confianza según Skoog, *et.al.*, 2007

Cuadro 35. Análisis estadístico para datos de consumo de bunker de diferentes días y horas de operación de una caldera de una empresa alimenticia.

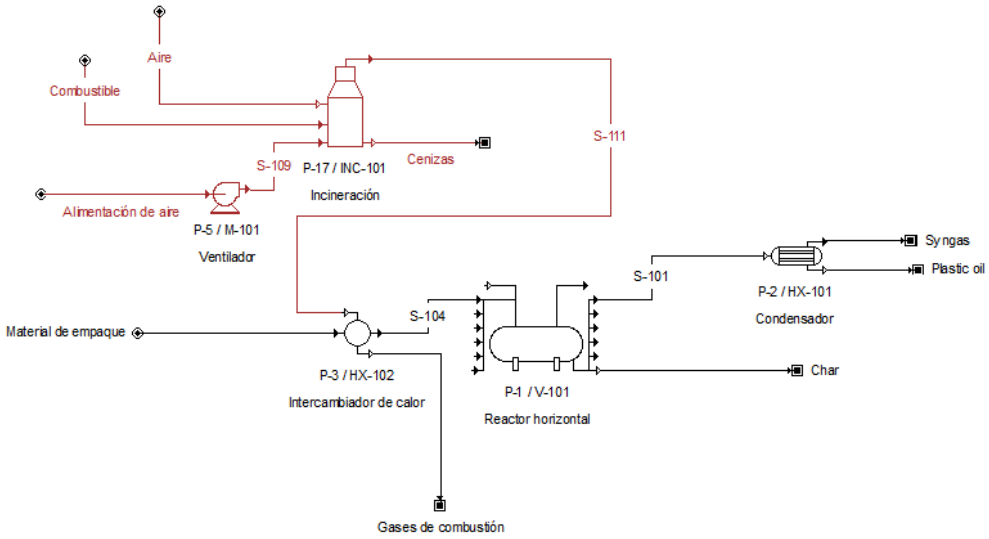
Promedio (±0.01 L/h)	148.15
Desviación estándar (±0.01 L/h)	47.58
Consumo seguro** (±0.01 L/h)	195.73
Densidad (kg/L)	0.98
Flujo másico (±0.01 kg/h)	191.15
Flujo másico (±0.01 kg/día)	4587.57

*Notas: Se utilizó el promedio más una desviación estándar para calcular el consumo de bunker a utilizar para calcular la alimentación de material de empaque.

Cuadro 36. Procesos realizados y resultados en los softwares para la simulación de la pirólisis escala planta piloto de material de empaque metalizado.

Etapa	Proceso	Resultado
1	Uso de la ecuación de cinética escala laboratorio con el lote de escalamiento de material de empaque en Berkeley Madonna	Tiempo y flujos preliminares de operación.
2	Introducir compuestos, flujos y procesos a proceso de simulación en SuperPro Designer	Diagrama de proceso, equipos y dimensiones
3	Realización de modelo de transferencia de calor	Resistividades térmicas, obtención de calentamiento y temperatura respecto al tiempo.
4	Regresión no lineal de los datos de calor cedido y cambio de temperatura en GraphPad Prism	Obtención de modelos de temperatura y calor cedido a reactor.
5	Modificación de la ecuación de T(t) en el guión de Berkely Madona.	Tiempo de reacción Rendimiento de productos
6	Modificación de condiciones de operación en SuperPro Designer según información recolectada y calculada.	Dimensionamiento de equipos y flujos

Figura 43. Diagrama de los procesos y flujos registrados en el simulador SuperPro Designer



*Nota 1: Se utilizó módulos distintos para el intercambiador de calor, incinerador y reactor horizontal para facilitar la simulación del proceso.

*Nota 2: Se utilizó agua fría como fluido de trabajo para el enfriamiento del reactor y el condensador.

Cuadro 37. Procesos y condiciones de operación principales utilizadas en el simulador SuperPro Designer para el escalamiento de la reacción de pirólisis.

Nombre	Equipo	Operación	Condiciones de operación
INC-101	Incinerador	Quema de combustible	- Oxígeno en exceso: 15% - Temperatura de gas de salida: 1200 °C - Compuestos en flujo de gases: Dióxido de Carbono Agua Nitrógeno Oxígeno
M-101	Ventilador	Transporte	- Cambio de presión: 0.02 bar
HX-102	Intercambiador de calor	Calentamiento	-Tipo de proceso: contracorriente - Tiempo de operación: 699 minutos - Temperatura de salida de flujo frío: 475 °C
V-101	Reactor	Carga Reacción Separación Enfriamiento Descarga	- Volumen de llenado 90% - Tiempo de reacción: 669 min - Conversión: 100%

Nombre	Equipo	Operación	Condiciones de operación
			- Reacción: - Separación: Salida 100% 2-4-dimetil-1-hepteno y propeno. - Temperatura de enfriamiento: 40°C - Fluido de enfriamiento: Agua fría - Descarga: 500 kg/h
HX-101	Condensador	Enfriamiento	- Eficiencia de transferencia de calor: 90% - Porcentaje de enfriamiento de plastic oil: 98% - Fluido de trabajo: Agua fría

*Notas: Los flujos de entrada y salida de los procesos se encuentran en la sección de Anexos.

Cuadro 38. Rendimientos de productos de la pirólisis de material de empaque en el reactor escala planta piloto para diferentes tiempos de operación, de acuerdo con sistema de simulación.

Tiempo (min)	598	649	699
Líquido (% m/m)	8.21	26.14	73.46
Sólido (% m/m)	81.42	48.27	11.88
Gas (% m/m)	10.37	25.59	14.66

*Notas: Se varió el tiempo de reacción según el inicio de la reacción de pirólisis.

Cuadro 39. Comparación de rendimientos de los productos de pirólisis de polipropileno y polietileno en literatura y simulación.

	Líquido (% m/m)	Sólido (% m/m)	Gas (% m/m)
Resultados simulación	73.46	11.88	14.66
Arandes, *et.al.*, 2004	70.00	10.0	20.00
Gao, 2010	88.00	*	12.00
Shin, *et. al.*, 2012	50.00	15.00	35.00
Crespo, 2013	77.00	19.00	4.00

*Notas: Los datos del producto sólido no fueron reportados en el documento

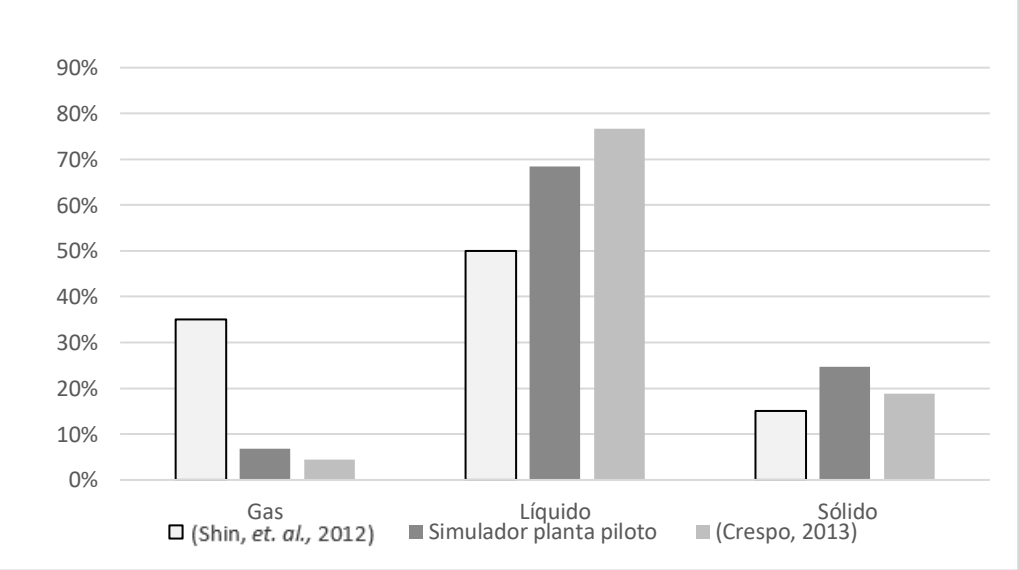
Cuadro 40. Comparación de los resultados de la simulación de pirólisis a escala planta piloto de material de empaque tipo polipropileno metalizado respecto a teoría.

	Líquido (%)	Sólido (%)	Gas (%)	Observaciones
Arandes, *et.al.*, 2004	5	16	36	Planta piloto de pirólisis de polipropileno a 400°C.
Gao, 2010	20	-*	18	Planta semi industrial de pirólisis de polipropileno a 400°C (no se reporta dato para sólidos)
Shin, *et. al.*, 2012	32	26	39	Pirólisis escala laboratorio de polipropileno a 400 °C
Crespo, 2013	5	60	73	Reactor escala laboratorio de polietileno, a 400°C

*Notas: La Cuadro indica los porcentajes de variación respecto a los datos obtenidos en el presente trabajo.

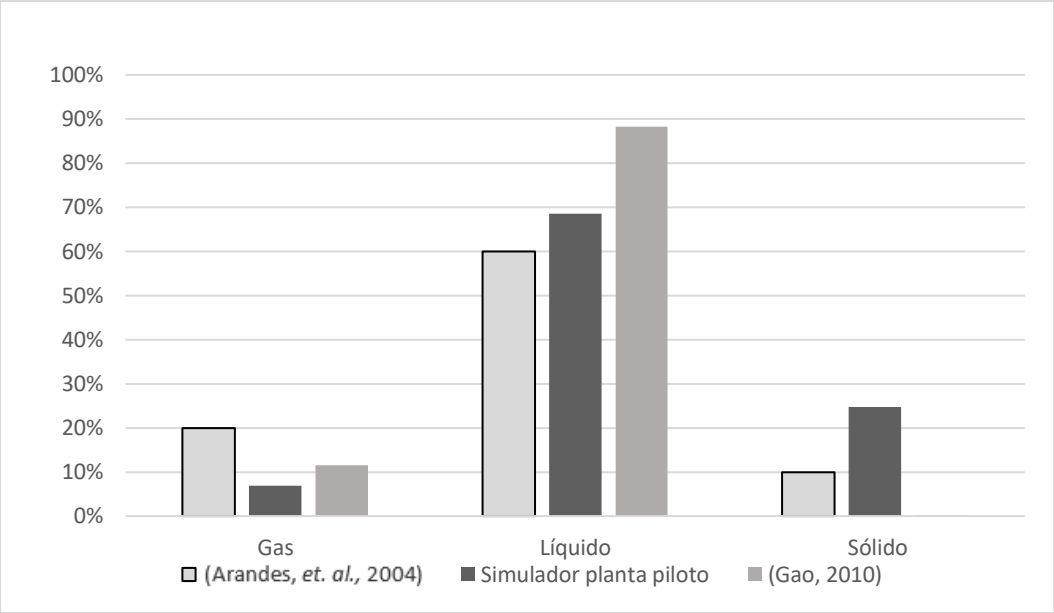
* Datos presentados en artículos científicos de procesos con condiciones y materia prima similar.

Figura 44. Comparación gráfica de los rendimientos obtenidos de la simulación del reactor de pirólisis escala planta piloto con los obtenidos en la literatura.



*Notas: Literatura de pirólisis escala laboratorio con condiciones y materia prima similares a las del simulador.

Figura 45. Comparación de los rendimientos obtenidos de la simulación del reactor de pirólisis escala planta piloto con los obtenidos en la literatura para planta piloto.



*Notas: Literatura de pirólisis escala laboratorio con condiciones y materia prima similares a las del simulador.

Cuadro 41. Dimensiones propuestas del reactor escala planta piloto para el procesamiento de 2.3 t/lote de material de empaque tipo polipropileno metalizado obtenidas con el software SuperPro Designer.

Parámetro	Valor
Largo (m)	4.977
Diámetro interno (m)	1.204
Razón largo/diámetro	4.134
Volumen (L)	6374.72
Coeficiente de transferencia de calor ($W/(m^2K)$)	1500
Temperatura de operación (°C)	475
Calor trasferido (kW-h/lote)	1.17
Presión de diseño (bar)	1.520

*Notas. Otras especificaciones incluyen: Material de construcción: Acero inoxidable. Tipo de reactor: Semicontinuo cilíndrico horizontal. Operación: Carga y descarga manual, con calentamiento por gases de combustión. Entradas y salidas: Compuesta pivoteada para la carga y descarga y salida superior de gases pirolíticos.

H. ANÁLISIS DEL USO INDUSTRIAL DEL PRODUCTO LÍQUIDO

Cuadro 42. Composición en masa de capas que conforman el material de empaque de polipropileno metalizado utilizado para pirólisis.

Capa	Masa (g)	Total (g)
BOPP transparente	27.03	54.06*
BOPP metalizado	27.03	
Adhesivo	3.96	5.94**
Tinta	1.98	

*Nota 1: Las capas de BOPP corresponden al líquido y gas esperado a tener.
* Nota 2: La suma de masa de las capas de adhesivo y tinta corresponden al sólido esperado a tener.

Cuadro 43. Diferencia de masa obtenida de líquido de pirólisis respecto al dato calculado por la composición del empaque.

Pirólisis No.	Masa líquido (±0.0002)	Diferencia*
1	47.5381	2.0%
2	46.7194	3.7%
3	50.1252	2.3%
4	48.8602	0.7%
5	48.9889	1.0%
Promedio	48.4464	2.1%
Desviación estándar	1.3315	1.3%

*Notas: La diferencia se determinó a partir del dato calculado de la masa por el porcentaje de conversión de líquido (48.5183 g) y la cantidad de líquido obtenida. La pirólisis fue realizada con temperatura final de 475°C.

Cuadro 44. Rendimientos del líquido de pirólisis en pruebas a escala laboratorio

Pirólisis No.	Masa líquido (±0.0002)	Rendimiento líquido*
1	47.5381	79.23
2	46.7194	77.87
3	50.1252	83.54
4	48.8602	81.43
5	48.9889	81.65
Promedio	48.4464	80.74
Desviación estándar	1.3315	2.22

*El rendimiento del líquido se calculó a partir de la masa de líquido de pirólisis obtenida respecto a la masa de materia prima ingresada al reactor (60 g). La pirólisis fue realizada con temperatura final de 475°C.

Cuadro 45. Poder calorífico del líquido de pirólisis de material de empaque de polipropileno metalizado

Prueba	Poder calorífico promedio (MJ/kg)	Desviación estándar (MJ/kg)
1	45.004	0.013
2	44.560	0.513
3	45.183	0.191
4	44.811	0.155
5	45.562	0.122
Promedio	45.024	0.198

*Nota: Se realizó triplicado de cada prueba de calorimetría, ver datos originales en Anexos, y se muestra el promedio obtenido. El valor reportado para la comparación de combustible fue el promedio de las 5 mediciones.

Cuadro 46. Comparación de propiedades fisicoquímica entre líquido de pirólisis y combustibles industriales.

Parámetro	Densidad a 15°C (kg/m³)	Viscosidad cinemática a 40°C (cSt)	Gravedad API (60 °F)	Punto de inflamación (°C)	Poder calorífico (MJ/kg)
Líquido pirólisis	810.6	2.4	25***	12***	45.02
Diésel*	820 – 850	1.9 – 4.5	38	52	45.60**
Gasolina*	715 – 780	1.1	55	42	46.40
Bunker*	960 – 975	378	11.90**	60	45.83
Cumple	Diésel	Diésel	Ninguno	Ninguno	Diésel

*Nota 1: Se usaron datos indicados en el Acuerdo Ministerial 211-2017 de Nómina de productos petroleros con sus respectivas denominaciones, características y especificaciones de calidad.

* Nota 2: Datos reportado en fichas técnicas proporcionadas por la empresa.

* Nota 3: Análisis realizados en laboratorio de Perenco.

Cuadro 47. Comparación de propiedades de mezclas de bunker - líquido pirolítico con bunker

Parámetro	Mezcla 90:10	Mezcla 95:05	Bunker	Cumple
Densidad (kg/m³)	954.2	965.4	960 - 975	Sí
Viscosidad cinemática a 40°C (cSt)	278.4	418.9	300 - 400	No
Gravedad API (60 °F)	16.7	15	N/R	N/A
Punto de inflamación (°C)	32	49	60 °C min.	No
Azufre (% m/m)	1.639	1.777	3.0 máx.	Ambos
Cenizas (% m/m)	0.10	0.09	0.1 máx.	Ambos
BS&W (% v/v)	0.2	0.2	2.0 máx.	Ambos
Residuo de carbón Conrad(% m/m)	12.7	14.3	16 - 18	Ambos
Asfáltenos (% m/m)	10.9	12.3	N/R	N/A

*Notas: ***N/R*** - valor no reportado, N/A – No aplica

Cuadro 48. Especificaciones para el diseño del tanque horizontal de recepción de líquido de pirólisis

Parámetro	Resultado
Capacidad (m^3)	3.785
Tipo de tanque	Vertical de pared simplesobre el suelo
Presión de operación	Atmosférica
Material del tanque	SS 304
Diámetro (m)	1.22
Largo (m)	3.25
Espesor de armazón (cm)	0.48
Peso vacío (kg)	572.73
Código	UL 142

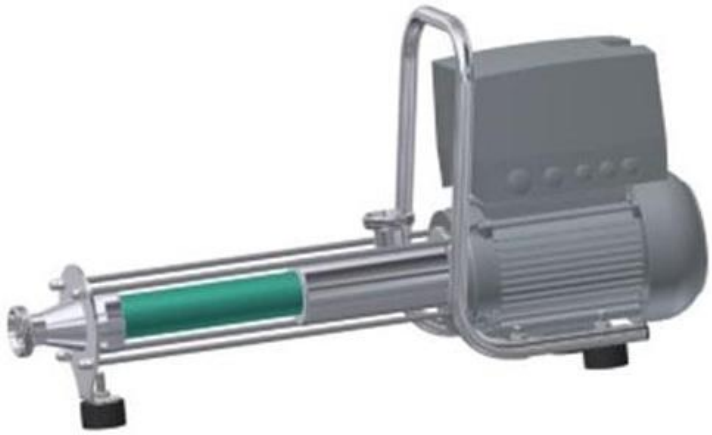
*Notas: Los parámetros de diseño se consultaron de la norma NFPA 30 - Código de líquidos inflamables y combustibles y UL 142 - Norma de seguridad para tanques de acero sobre el suelo para líquidos inflamables y combustibles. **El esquema del tanque propuesto se presenta en el apartado H de la sección de Anexos.

Cuadro 49. Especificaciones para el diseño del tanque vertical de almacenamiento de líquido de pirólisis.

Parámetro	Resultado
Capacidad (m^3)	37.85
Tipo de tanque	Vertical de pared simple sobre el suelo
Presión de operación	Atmosférica
Material del tanque	SS 304
Diámetro (m)	2.44
Largo (m)	8.10
Espesor de armazón (cm)	0.64
Peso vacío (kg)	4027.27
Código	UL 142

*Notas: Los parámetros de diseño se consultaron de la norma NFPA 30 - Código de líquidos inflamables y combustibles y UL 142 - Norma de seguridad para tanques de acero sobre el suelo para líquidos inflamables y combustibles. **El esquema del tanque propuesto se presenta en la sección de Anexos.

Figura 46. Bomba de tornillo propuesta



Cuadro 50. Especificaciones de bomba de desplazamiento positivo de tornillo propuesta

Parámetro	Resultado
Flujo (m^3/h)	2.18
Marca	Netzsch
Modelo	NEMO 015
Potencia (kW)	1.1
Diámetro de succión (mm)	25.4
Diámetro de descarga (mm)	25.4
Rango de temperatura (°C)	-5 a 120
Rango de viscosidad (cSt)	1 a 800

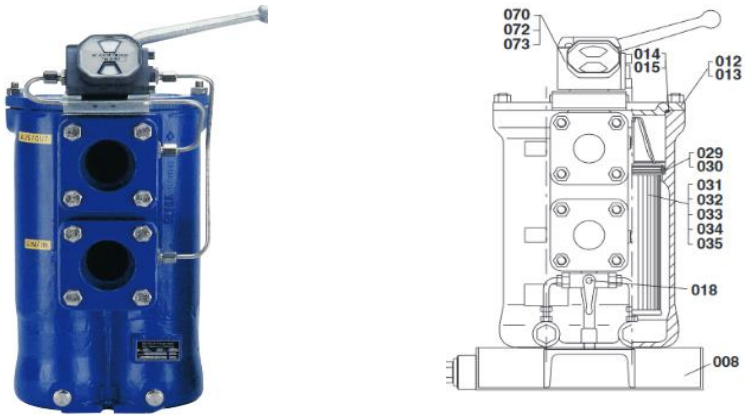
Cuadro 51. Sensor ultrasónico U500.DA0.2-IA1B.72F

Parámetro	Resultado
Rango de escaneo (mm)	70 – 1,000
Frecuencia (kHz)	200
Voltaje (V)	12
Señal (mA)	4 – 20

Cuadro 52. Especificaciones de filtro para combustibles

Parámetro	Resultado
Marca	MAN Diesel & Turbo
Modelo	SL13-577/KEL
Grado de filtración	10 µm - 5 mm
Presión de trabajo (kPa)	250

Figura 47. Filtro SL13-577/KEL



I. ANÁLISIS DEL USO INDUSTRIAL DEL PRODUCTO SÓLIDO

1. Comparación del char obtenido de pirólisis con enmiendas y abonos orgánicos

Cuadro 53. Resultados de análisis de abonos orgánicos para el char de pirólisis y su comparación con una enmieda agrícola comercial.

Parámetro	Unidades	*Char de pirólisis	Enmienda agrícola (FERTICONSA, 2019)	Valores dentro del rango	**Variación respecto al valor más cercano (%)
pH	-	8.55	6.0 – 7.5	No	14.00
Relación C/N	-	26.42	18 – 21	No	25.81
Cenizas	% m/m	36.00	30 – 40	Sí	-
Materia orgánica	% m/m	64.00	40 – 60	No	6.67
Nitrógeno	% m/m	1.35	1.8 – 3.3	No	-25.00
Fósforo	% m/m	0.17	1.8 – 3.0	No	-90.56
Potasio	% m/m	0.01	1.2 – 3.0	No	-99.17
Calcio	% m/m	0.40	2.0 – 3.0	No	-80.00
Magnesio	% m/m	0.04	0.6 – 1.5	No	-93.33
Boro	ppm	0.01	130 – 180	No	-99.99
Cobre	ppm	139.90	15 – 30	No	366.33
Hierro	ppm	288.80	900 - 3000	No	-67.91
Manganeso	ppm	0.77	280 - 350	No	-99.73
Zinc	ppm	20.67	140 - 240	No	-85.24
***Humedad	% m/m	5.78	14 - 20	No	-58.10

*Nota 1: Los resultados para el char de pirólisis se obtuvieron del análisis de abonos orgánicos realizado por el laboratorio Analab de la asociación ANACAFÉ por medio de análisis en ICP. El resto de los datos se obtuvieron de la literatura.

**Nota 2: En el porcentaje de variación, los valores positivos se encuentran sobre el valor más alto del rango de aceptación para la enmienda y los valores negativos son menores al valor más bajo del rango. El pH, relación C/N, contenido de cenizas, materia orgánica y nitrógeno son los parámetros representativos

para el char, el resto de los parámetros se encuentran en cantidades que no son representativas y presentan variaciones mayores a 58%.

***Nota 3: La humedad del char fue medida 1 semana después de realizar las pruebas de pirólisis de laboratorio.

Cuadro 54. Resultados de análisis de abonos orgánicos para el char de pirólisis y su comparación con bocashi.

Parámetro	Unidades	*Char de pirólisis	Bocashi(Pérez, 2008)	**Variación (%)
pH	-	8.55	8.13	5.17
Relación C/N	-	26.42	-	-
Cenizas	%m/m	36.00	-	-
Materia orgánica	%m/m	64.00	44	45.45
Nitrógeno	%m/m	1.35	1.44	-6.25
Fósforo	%m/m	0.17	2.49	-93.17
Potasio	%m/m	0.01	2.46	-99.59
Calcio	%m/m	0.40	10.85	-96.31
Magnesio	%m/m	0.04	1.21	-96.69
Azufre	%m/m	0.05	-	-
Boro	ppm	0.01	-	-
Cobre	ppm	139.90	200	-30.05
Hierro	ppm	288.80	11500	-97.49
Manganeso	ppm	0.77	500	-99.85
Zinc	ppm	20.67	400	-94.83
***Humedad	% m/m	5.78	30.30	-80.92

*Nota 1: Los resultados para el char de pirólisis se obtuvieron del análisis de abonos orgánicos realizado por el laboratorio Analab de la asociación ANACAFÉ. El resto de los datos se obtuvieron de la literatura.

**Nota 2: En el porcentaje de variación, los valores positivos se encuentran sobre el valor reportado para el bocashi y los negativos se encuentran debajo de este. El pH, relación C/N, contenido de cenizas, materia orgánica y nitrógeno son los parámetros representativos para el char, el resto de los parámetros se encuentran en cantidades que no son representativas y poseen variaciones superiores al 30 %.

*** Nota 3: La humedad del char fue medida 1 semana después de realizar las pruebas de pirólisis a escala laboratorio.

Cuadro 55. Resultados de análisis de abonos orgánicos para el char de pirólisis y su comparación con estiércol de vaca, oveja y gallina.

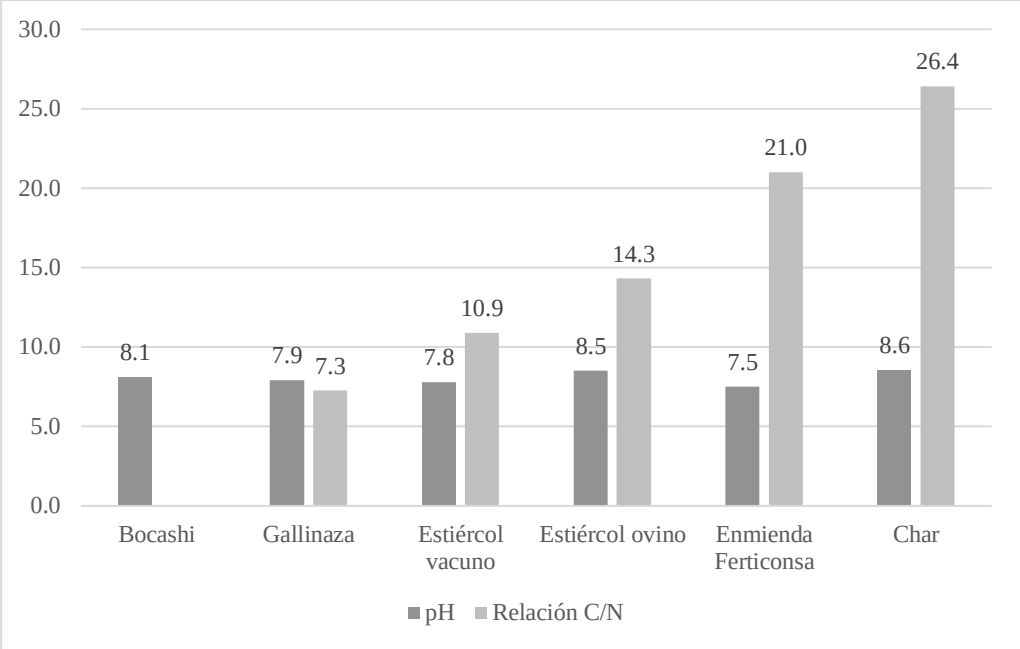
Parámetro	Unidades	*Char de pirólisis	Estiércol vacuno (Durán, 2007)	**Variación (%)	Estiércol ovino (Tortosa, 2012)	**Variación (%)	Gallizana (Tam, 2019)	**Variación(%)
pH	-	8.55	7.80	9.62	8.51	0.47	7.90	8.23
Relación C/N	-	26.42	10.90	142.39	14.30	84.76	7.26	263.91
Materia orgánica	%m/m	64.00	33.10	93.35	45.60	40.35	58.00	10.34
Carbono orgánico	%m/m	35.56	19.20	85.21	25.20	41.11	-	-
Nitrógeno	%m/m	1.35	1.80	-25.00	1.77	-23.73	4.00	-66.25
Fósforo	%m/m	0.17	2.00	-91.50	2.20	-92.27	2.60	-93.46
Potasio	%m/m	0.01	1.10	-99.09	16.50	-99.94	2.30	-99.57
Calcio	%m/m	0.40	2.30	-82.61	10.90	-96.33	9.50	-95.79
Magnesio	%m/m	0.04	0.70	-94.29	1.87	-97.86	0.80	-95.00
Azufre	%m/m	0.05	-	-	13200	-100.00		-
Cobre	ppm	139.90	64.00	118.59	51	174.31	37.40	274.06
Hierro	ppm	288.80	6124.00	-95.28	4139	-93.02	506.10	-42.94
Manganeso	ppm	0.77	422.00	-99.82	226	-99.66	297.50	-99.74
Zinc	ppm	20.67	308.00	-93.29	185	-88.83	531.80	-96.11
***Humedad	% m/m	5.78	-	-	-	-	16.90	-65.80

*Nota 1: Los resultados para el char de pirólisis se obtuvieron del análisis de abonos orgánicos realizado por el laboratorio Analab de la asociación ANACAFÉ. El resto de los datos se obtuvieron de la literatura.

**Nota 2: En el porcentaje de variación, los valores positivos se encuentran sobre el valor reportado y los negativos se encuentran debajo de este. El pH, relación C/N, contenido de cenizas, materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno son los parámetros representativos para el char, el resto de los parámetros se encuentran en cantidades que no son representativas y poseen variaciones mayores a 42 %.

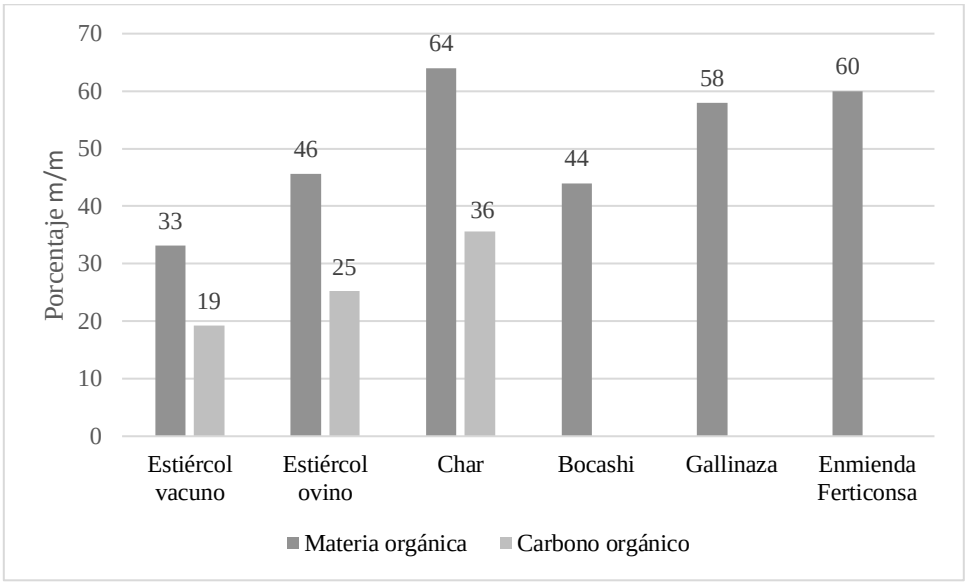
***Nota 3: La humedad del char fue medida 1 semana después de realizar las pruebas de pirólisis de laboratorio.

Figura 48. Comparación de pH y relación C/N en abonos orgánicos y char de pirólisis.



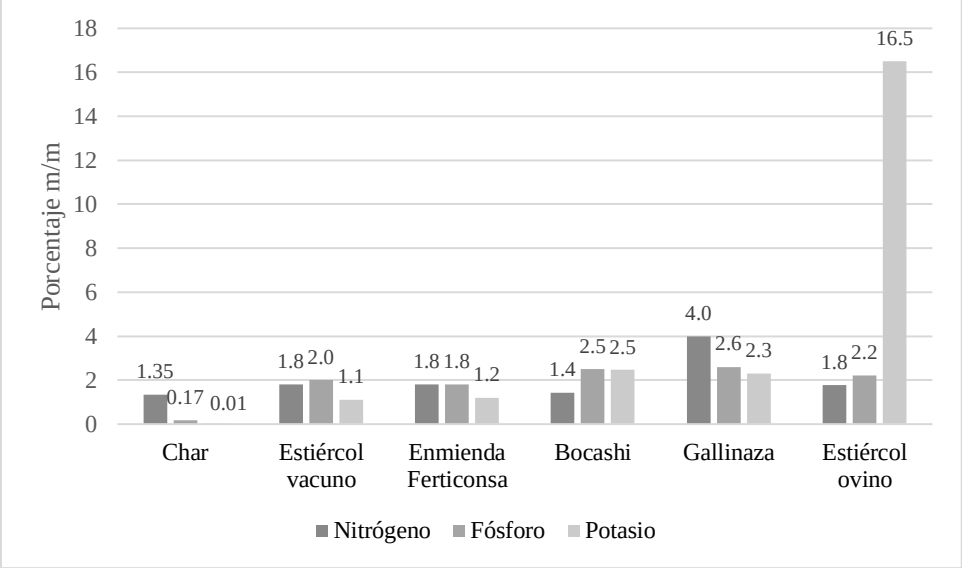
*Notas: El char posee la relación C/N y el pH más alto en la comparación realizada.

Figura 49. Comparación del contenido de materia y carbono orgánicos en abonos orgánicos y char de pirólisis.



*Notas: La materia orgánica de los abonos comerciales contiene carbohidratos, ligninas y proteínas entre otros. Se desconoce la composición de la materia orgánica presente en el char.

Figura 50. Comparación del contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en abonos orgánicos y char de pirólisis.



*Notas: El char posee el menor contenido de los elementos mayores en la comparación realizada.

2. Comparación del char obtenido de pirólisis con combustibles sólidos

Cuadro 56. Poder calorífico del char de pirólisis y su comparación con diferentes tipos de combustibles sólidos.

Parámetro	Unidades	*Char de pirólisis	Coque de carbón (Zapata, 2014)	Carbón mineral (Zapata, 2014)	Carbón vegetal (Zapata, 2014)	Bagazo de caña (Zapata, 2014)	Hulla bituminosa (Zapata, 2014)	Madera seca (Madero, 2010)
Poder calorífico	MJ/kg	21.86	26.89	23.97	32.00	13.18	28.55	19.00
**Variación	%	-	-18.71	-8.80	-31.69	65.86	-23.43	15.05

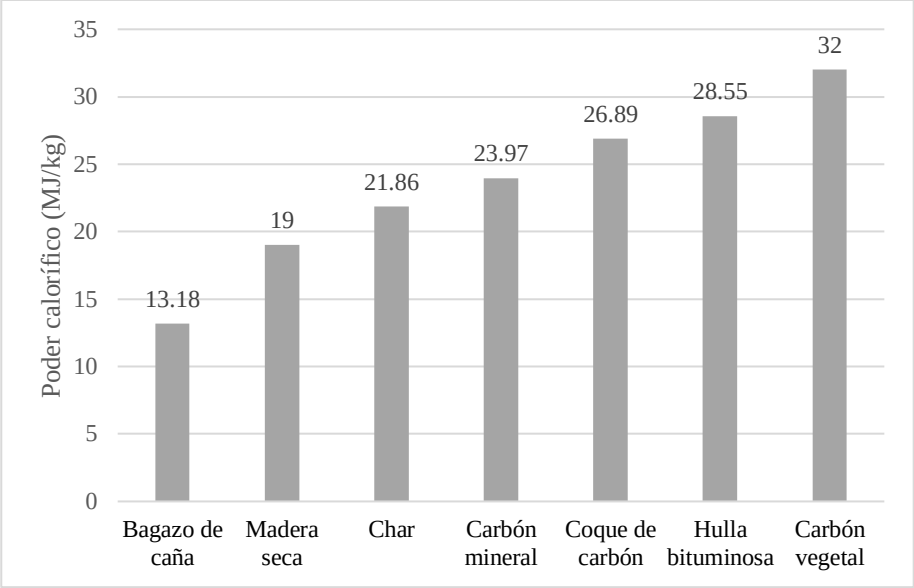
*Notas: En el porcentaje de variación, los valores positivos se encuentran sobre el valor reportado y los negativos se encuentran debajo de este.

Cuadro 57. Características del char de pirólisis y su comparación con diferentes tipos de carbón.

Parámetro	Unidades	*Char de pirólisis	Coque de carbón (Zapata, 2014)	Carbón mineral (Zapata, 2014)	Carbón vegetal (Zapata, 2014)	Bagazo de caña (Zapata, 2014)	Hulla bituminosa (Zapata, 2014)
Humedad	%m/m	5.78	1 – 5	1 – 5	10.00	-	-
Cenizas	%m/m	36.00	9 – 12	7.65 – 25.95	3 - 4	4.02	-
Carbono	%m/m	35.56	83 – 88	80 - 90	75 - 80	47.68	69 - 78

*Notas: Los valores de contenido de cenizas y carbono en el char se obtuvieron del análisis de abonos orgánicos realizado por el laboratorio Analab de la asociación ANACAFÉ. El resto de los datos se obtuvieron de la literatura.

Figura 51. Comparación del poder calorífico del char de pirólisis y combustibles sólidos.



*Notas: El char posee un poder calorífico mayor al del bagazo de caña y la madera seca.

4. Propuesta de sistema de almacenaje del char obtenido de pirólisis

Cuadro 58. Características del producto sólido de la pirólisis a almacenar.

Característica	Unidades	Resultado	Desviación estándar
Densidad aparente	kg/m^3	107.44	3.14
Densidad compactada	kg/m^3	162.83	2.68
Humedad	% m/m	5.78	0.08
Ángulo de reposo	°	43.43	0.13
Ángulo de deslizamiento	°	19.75	0.58
Tamaño de partícula	M	0.00085	-

*Notas: Todos los datos fueron calculados experimentalmente, realizando 5 pruebas para cada característica, se calculó el promedio de cada conjunto de datos y su desviación estándar.

Cuadro 59. Especificaciones para el silo propuesto para almacenaje del char.

Parámetro	Unidades	Valor
Material del silo	-	Acero al carbono
Tipo de techo	-	Cónico
Capacidad de material	kg	1366.10
Volumen de material	m^3	8.39
Volumen total del silo	m^3	10.07
Altura total del silo	m	5.14
Diámetro del silo	m	1.75

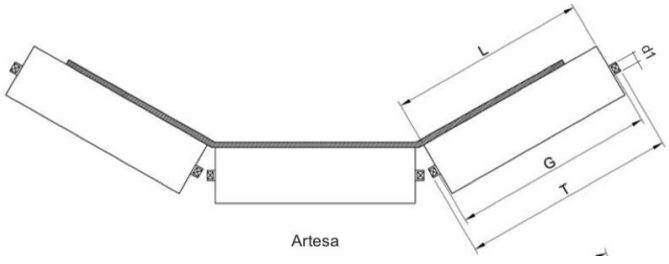
Parámetro	Unidades	Valor
Volumen del cilindro	m^3	8.87
Altura del cilindro	m	3.53
Volumen de la tolva	m^3	0.94
Altura de la tolva	m	0.91
Diámetro de salida de la tolva	m	0.40
Volumen del techo cónico	m^3	0.66
Altura del techo cónico	m	0.70

Los cálculos del dimensionamiento se realizaron con base en una producción de 5 lotes semanales de 2300 kg de materia prima alimentada al reactor de pirólisis y utilizando un rendimiento de 11.88% m/m para el char.

Cuadro 60. Especificaciones de la banda transportadora

Parámetro	Valor
Material de banda	PVC
Largo de banda	10 m
Espesor de banda	4 mm
Ancho de banda	40 cm
Inclinación de banda	Montaje plano
Velocidad de banda	1 m/s
Flujo másico	0.72 kg/s
Disposición de los rodillos	Artesa
Inclinación de los rodillos	30 ◦
Material de la cubierta	Acero galvanizado
Ancho de la cubierta	76 cm
Potencia del motor	5 kW

Figura 52. Esquema del arreglo de los rodillos de la banda.

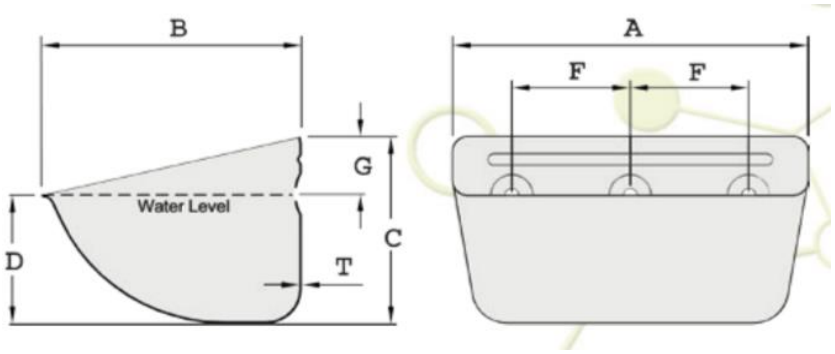


*Notas: Las especificaciones del proveedor de la banda se muestran en el apartado H de la sección de anexos.

Cuadro 61. Especificaciones del elevador de cangilones.

Parámetro	Valor
Altura del elevador	7 m
Velocidad del elevador	1 m/s
Material del cangilón	Acero al carbono
Dimensiones del cangilón	20 x 60 cm
Capacidad del cangilón	0.01 m^3
Paso	0.33 m
Flujo másico	2.77 kg/s
Potencia del motor	5 kW

Figura 53. Esquema de los cangilones.



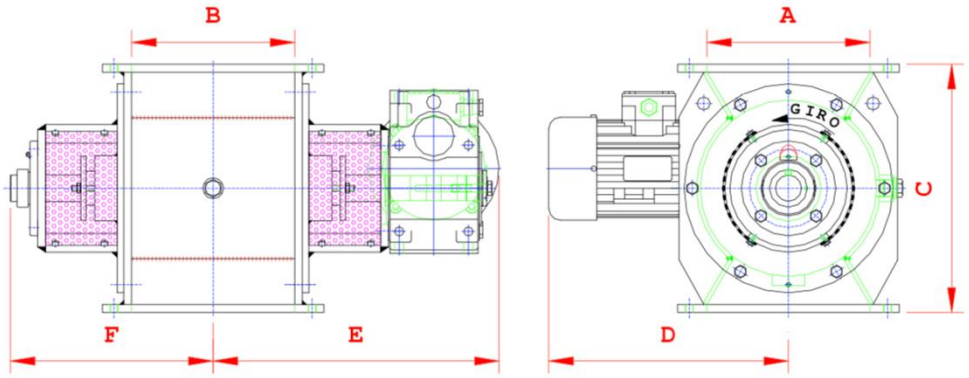
*Las especificaciones del proveedor de los cangilones se muestran en el apartado H de la sección de anexos.

Cuadro 62. Especificaciones de la descarga del silo.

Parámetro	Valor
Tipo de vávula	Dosificadora
Capacidad	150 m^3/h
Ancho de la válvula	50 cm
Largo de la válvula	70 cm
Diámetro de la estrella	54 cm
Largo de la estrella	50 cm
Potencia del motor	3 kW
Rpm	20

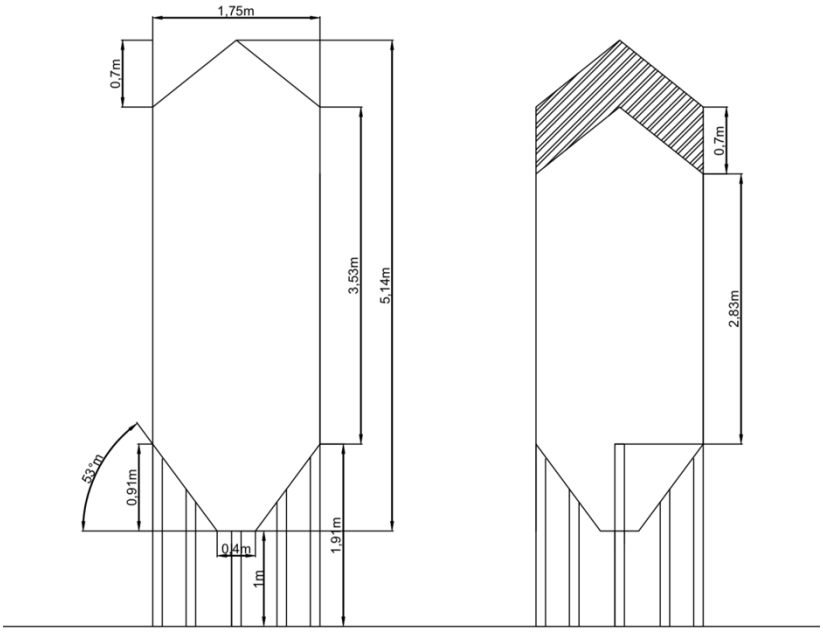
*Notas: Las especificaciones se obtuvieron del catálogo del proveedor Gruber Hermanos

Figura 54. Esquema de la válvula dosificadora.



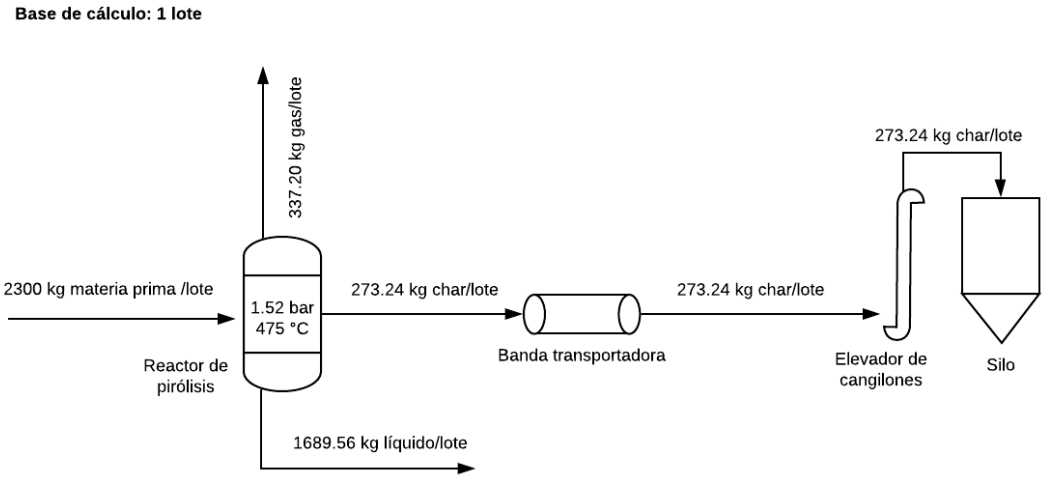
*Las especificaciones del proveedor de la válvula se muestran en anexos.

Figura 55. Esquema del silo propuesto para el almacenaje de char.



Notas: La figura a) muestra las dimensiones del silo propuesto, incluyendo el techo cónico y la tolva. La figura b) muestra el espacio sombreado que representa el 20% del sobre diseño calculado en el silo.

Figura 56. Esquema general de la salida del reactor y almacenamiento de producto sólido para un lote (2,300 kg) diario de producción.



*Notas: Se utilizó una base de cálculo de 1 lote para los flujos, debido a que es un proceso por lotes. La salida del char del reactor se realiza de forma manual empleando paletas, por la compuerta del reactor. Ver detalle en Anexos.

J. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

Según los productos de pirólisis obtenidos y analizados se obtuvieron los siguientes resultados:

1. Propuesta de comercialización de productos de la pirólisis

Se presentan los usos, precios de mercado y propiedades fisicoquímicas de los compuestos encontrados en los productos líquido, gaseoso y sólido con el fin de determinar si serán comercializados o reutilizados dentro de la empresa.

Cuadro 63. Usos, propiedades fisicoquímicas y comercialización de compuestos del producto líquido.

Compuesto	**3-penten-2-eno**	**2,4-dimetil-1-hepteno**	**2,3,7-trimetil-4-octeno**
Usos	Utilizado como un solvente en síntesis orgánicas.	N/A	N/A
Propiedades Fisicoquímicas	**Fórmula Molecular** $C_5H_{10}O$ **Peso molecular** 86.13 g/mol **Punto de Fusión** 21.11°C **Punto de Ebullición** 101.5°C **Densidad** 0.815 g/cm^3	**Fórmula Molecular** C_9H_{18} **Peso Molecular** 126.24 g/mol **Punto de Ebullición** 134.0°C **Densidad** 0.730 g/cm^3	N/A

Compuesto	3-penten-2-eno	2,4-dimetil-1-hepteno	2,3,7-trimetil-4-octeno
¿Es comercializable?	Si	N/A	N/A
Precio	$42.03 / 5g $ 50.47 / 5g	N/A	N/A

* Nota 1: Único compuesto utilizable del producto líquido más no será purificado para su venta.

*Nota 2: N/A se refiere a que no existe información suficiente sobre la utilización y precio comercial, únicamente sobre algunas propiedades fisicoquímicas, de este compuesto.

Se identificó como compuestos 3-penten-2-eno, 2,4-dimetil-1-hepteno y 2,3,7-trimetil-4-octeno en el producto líquido. Se investigaron sus aplicaciones, propiedades fisicoquímicas y su presencia en el mercado internacional. Cabe mencionar que dichos compuestos no se separarán de la mezcla.

Cuadro 64. Precio de mercado de productos líquidos de la pirolisis.

Compuesto	Precio	Precio (Q)	Pureza (%)	Distribuidor
3-penten-2-eno	$ 42.03 / 5g	Q325.73	95%	Sigma Aldrich
	$ 50.47 / 5g	Q391.14	95%	Alfa Aesar

(ChemicalBook, 2019e)

*Notas: Tipo de cambio utilizado a la fecha 22 de septiembre de 2019: 1 USD = 7.75 GTQ (Banco de Guatemala, 2019).

En el Cuadro 64 se muestra el precio de mercado del 3-penten-2-eno obtenido de dos distribuidores: Sigma Aldrich y Alfa Aesar. Se investigó el precio de mercado del 3-penten-2-eno puesto que es el único que tiene un uso conocido en la industria, sin embargo, no será comercializado.

Cuadro 65. Usos, propiedades fisicoquímicas y comercialización de los compuestos del producto gaseoso.

Compuesto	Propileno
Usos	Fabricación de plásticos, alta resistencia al calor, resistencia a solventes, ácidos y bases. Usado en baterías de automóviles, alfombras, etc.
Propiedades Fisicoquímicas	**Fórmula Molecular** C_3H_6 **Peso molecular** 42.08 g/mol **Punto de Fusión** -108 °C **Punto de Ebullición** -47.7°C **Densidad** 1.49 g/cm^3
¿Es comercializable?	Si
Proporción en la mezcla gaseosa	64.85%

(ChemicalBook, 2019f)

En el Cuadro 65 se muestran los usos y propiedades fisicoquímicas del propileno, el gas con mayor proporción en la mezcla gaseosa. Se determinó que dicho gas puede ser comercializable por su proporción en la mezcla y por sus usos en diferentes industrias.

Cuadro 66. Precio de mercado de productos gaseosos de la pirolisis.

Compuesto	Precio	Precio (Q)	Pureza (%)	Distribuidor
Propileno	$ 1.056 / 1kg	Q. 8.184	95%	ICIS

(ICIS, 2019)

*Notas: Tipo de cambio utilizado a la fecha 22 de septiembre de 2019: 1 USD = 7.75 GTQ (Banguat, 2019).

En el Cuadro 66 se presenta el precio de propileno obtenido de ICIS, (Independent Chemical Information Service), que es una unidad de negocios que presenta información y la tendencia en el mercado sobre los precios de venta de productos y compuestos químicos a nivel mundial.

Cuadro 67. Precios de mercado de Mejoradores de Suelos en Guatemala.

Marca	Cantidad	Precio
Ferticonsa	1 quintal	Q. 53.50
Agrocompost	1 quintal	Q. 65.00
Lombricompost	1 quintal	Q. 65.00

(De León, 2019), (Agrocompost, 2019), (Ferticonsa, 2019).

En el Cuadro 67 se presentan los precios de tres mejoradores de suelos a la venta en Guatemala. Esta información da una idea general del estado actual del mercado para este producto.

2. Costos de equipos y obra gris obtenidos de cotizaciones para la implementación y puesta en marcha de la planta de pirólisis

Cuadro 68.Componentes de la Inversión de la Planta de Pirólisis

Propuesta 1*		***Propuesta 2****	
Obra gris	Q699,647.992	Obra gris	Q699,647.992
Equipos**	Q. 2,211,611.27	Equipo	Q. 2,334,836.27
Total	Q. 2,911,259.262	**Total**	Q. 3,034,484.262
Costos de Operación***	Q. 472,733.23	Costos de Operación**	Q. 530,251.23
Imprevistos (15%)****	Q. 39,443.50	Imprevistos (15%)***	Q. 48,071.20
Inversión + COP + Imprevistos	Q. 3,423,435.992	Inversión + COP + Imprevistos	Q. 3,612,806.692

*Nota 1: La propuesta 1 se refiera a la cotización en la *Figura 326* y la propuesta 2 se refiere a la cotización mostrada en la *Figura 327*.

**Nota 2: Los equipos seleccionados para una de las propuestas se pueden observar en los Cuadro 232 y Cuadro 233. Las especificaciones técnicas para cada uno de los equipos se encuentran en los Cuadro 234, Cuadro 235 y Cuadro 236.

***Nota 3: La suma de los costos de operación se pueden observar en los *Cuadro 241* y *Cuadro 242*.

3. Ahorro de la implementación de la planta de pirólisis versus el proceso actual de tercerización de desechos

Cuadro 69. Comparación de propuestas de planta de pirólisis con tercerización de tratamiento

	Propuesta 1	Propuesta 2	Tercerización de Desechos*
n - Período	10	10	10
NPV	**Q-6,372,581.07.30**	**Q-6,720,411.72.34**	**Q-8,951.849.92**
TMAR	12.0%	12.0%	12.0%
Costo Propuesta / Ton	Q2,043.20	Q2,154.72	Q3,500.00

*Notas: Este valor corresponde al valor total que invertiría la corporación para tratar 46 toneladas de material de empaque anuales, durante un período de 10 años, a través de una tercera empresa.

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE EMPAQUE

El objetivo principal era la caracterización y el acondicionamiento de residuos de material de empaque plástico alimenticio tipo BOPP y BOPP metalizado para realizar una pirólisis. Para cumplir con ello, se realizaron pruebas de once distintas propiedades del material de empaque. Las propiedades fueron seleccionadas a partir de la utilidad de ellas para conocer lo que se iba a alimentar el reactor de pirólisis, y cómo afectaban estas a la realización de la misma. Además, ya que la materia prima era un residuo de la producción de frituras de una empresa alimenticia, se estimó la proporción en cantidad de cada material de empaque a someter a la reacción de pirólisis. Por último, a partir de las propiedades físicas y químicas evaluadas de la materia prima, se propuso un proceso previo para adecuar la materia prima al proceso de pirólisis. Por último, de acuerdo a la rentabilidad del proceso según la evaluación y comparación de posibles usos de productos de pirólisis utilizando técnicas de análisis económico para la implementación de una planta de pirólisis se debían realizar 20 lotes de 2,300 kg cada uno, por lo que el acondicionamiento está propuesto para tratar 2,300kg de material de empaque plástico en un tiempo de 5 horas. Esto se planteó así ya que, si existiera un crecimiento en la cantidad de residuos, el cambio que se daría sería el aumento de lotes, el cual podría llegar a ser de hasta 35 lotes al mes. La primera parte del acondicionamiento es retirar el mandril del material de empaque de rechazo, esta acción será realizada por una persona, la cual retirará aproximadamente, según el cálculo 13, tres mandriles por lote.

La primera propiedad obtenida fue la densidad de partícula, esta se realizó con el fin de conocer la densidad del material de empaque en su estado natural. Para esta prueba se obtuvo un resultado de 1.09kg/L, la cual establece la mayor densidad posible a obtener, ya que el material se encuentra en hojas con un grosor no mayor a 41.25um. Esta densidad es poco útil puesto que la mayoría del material se encuentra deformado porque ya ha pasado por distintos procesos, sin embargo, la densidad de partícula establece un dato preliminar para futuras propiedades.

La segunda propiedad obtenida fue la densidad aireada, esta se realizó con el fin de conocer la densidad del material de empaque luego de ser recortado. Es importante resaltar que en la prueba de laboratorio el material fue recortado ya que de esta manera se lograba ingresar una mayor cantidad de material al reactor de escala laboratorio. El material se ingresó a la probeta a una altura de 5cm desde la boquilla para que el material cayera con naturaleza dentro de la probeta y así obtener un dato verídico sobre la densidad aireada. Para esta prueba se obtuvo un resultado de 0.025kg/L, la cual es 44 veces menor que la densidad de partícula que se muestra en el Cuadro 14. Propiedades fisicoquímicas para la mezcla del material de rechazo en bobina y material residual. Esta densidad muestra el comportamiento del material ya recortado que fue alimentado al reactor en la prueba de laboratorio.

La tercera propiedad obtenida fue la densidad compacta, esta se realizó con el fin de simular y conocer la densidad del material de empaque dentro del reactor, puesto que en la prueba de laboratorio se intentó compactar el material dentro del reactor. Para esta propiedad se obtuvo un resultado de 0.034kg/L, la cual es 32 veces menor que la densidad de partícula. A partir de esta diferencia entre la densidad aireada y compacta se demuestra y recomienda compactar el material dentro del reactor en la prueba de laboratorio. Esta densidad es de utilidad para obtener la densidad de trabajo del material. La cuarta propiedad obtenida fue la densidad compacta, esta se realizó con el fin de estimar la densidad real de trabajo que tenía el material dentro del reactor. Para esta propiedad se obtuvo un resultado de 0.02824kg/L, la cual puede expresarse como un promedio entre la densidad aireada y de trabajo, ya que es la densidad real a la cual se encuentra el material.

La quinta propiedad obtenida fue el índice de compresibilidad, la cual muestra la relación que hay entre la densidad aireada y la densidad compacta. Para esta propiedad se obtuvo un resultado promedio de 36%. Esto indica que, según la literatura, el material de empaque presenta pobres características de flujo. Esta propiedad también es resultado de las siguientes propiedades calculadas, las cuales fueron: porcentaje de humedad y porcentaje de grasas presentes en el material de empaque. Para el porcentaje de humedad se obtuvo un resultado promedio de 1.04% y para el porcentaje de grasa presentes se obtuvo un resultado promedio de 8.13%. El porcentaje de grasas presentes, sumado al porcentaje de humedad, tienen un efecto directo en el índice de compresibilidad ya que de estas propiedades depende qué tan bien se puede mover el material.

La sexta propiedad obtenida fue la resistencia a un esfuerzo de tensión para rasgar del material, se realizó la prueba para el material colocado de forma horizontal y vertical. Los resultados obtenidos fueron: 41.6gf y 48.0gf para el material colocado de forma horizontal y vertical respectivamente. Para ello se utilizó una máquina de ensayos de que se muestra en la Figura 80 – Máquina de ensayos de tensión y compresión.

Debido a la densidad de trabajo obtenida, fue requerido evaluar la posibilidad de realizar un precalentamiento del material y una molienda del material ya fundido. Esto debido a que el volumen a ocupar del reactor de la materia prima era de dimensiones muy grandes, alrededor de 80m3. Para ello, fue necesario obtener las últimas dos propiedades del material de empaque. La penúltima propiedad para evaluar era la temperatura de fusión, para la cual se obtuvo un resultado de 220ºC. Este resultado nos permite seleccionar un equipo de precalentamiento para la muestra debido a que según el análisis termo gravimétrico, la temperatura a la que ocurre la pirólisis es mayor a los 350ºC. Es decir, que el proceso puede realizarse sin afectar la cinética de reacción en el reactor. Para comprobar experimentalmente este supuesto, se realizó una corrida para el precalentamiento la cual dio como resultado un sólido amorfo con una densidad distinta a las antes evaluadas. La última propiedad evaluada fue la densidad de este nuevo sólido, para la cual se obtuvo un resultado de 0.451kg/L, la cual es 16 veces más grande que la densidad de trabajo hallada para el material de empaque sin pretratamiento alguno.

Esta propiedad es de gran utilidad debido a que en la propuesta de reactor escala planta piloto de la pirólisis se utiliza este valor de densidad para el diseño del reactor.

Por otra parte, se tenía como objetivo encontrar la proporción adecuada de material residual y de rechazo en bobina para obtener la mezcla adecuada que sería alimentada al reactor. Para esta proporción se obtuvo un resultado de 90% material residual, es decir material contaminado con grasas y residuos de harina, y 10% de material de rechazo en bobina, es decir material que fue rechazado por no cumplir con parámetros de color o de información impresa, o cualquier otro motivo que lo haga ser rechazado previo a ser llenado con el alimento. Sin embargo, es importante mencionar que, durante la experimentación, las pruebas se realizaron con distintas proporciones para evaluar al rendimiento de los subproductos y la calidad de los mismos. Es decir, al utilizar el material residual en menor proporción, se observaban cambios como por ejemplo en el líquido pirolítico, el cual tenía menor viscosidad y un color más claro que al utilizar un 90% de material residual en la mezcla.

Por último, para la proporción de material residual se escogieron las líneas de producción con mayor demanda en el mercado y las que más producían desecho, siendo estas las tres que cumplían con las condiciones: fritura de maíz y de piel de cerdo deshidratada, pellet frito de trigo deshidratado y piel de cerdo frita y deshidratada. Esto con el fin de utilizar la mayor cantidad posible de todas las líneas de producción y aprovechar el material de empaque tanto el residual como el de rechazo en bobina.

Estas propiedades mencionadas nos facilitan tratar el material previo a la reacción de pirólisis. Es decir, que gracias a las pruebas fisicoquímicas y mecánicas realizadas, podemos descartar distintos procesos desde un principio y enfocarnos en la solución adecuada al proceso. Como lo fue el caso de la densidad de partícula y aireada de la muestra. Además, la importancia de identificar y conocer las propiedades, es que nos permitió dimensionar el proceso a una escala industrial, ya que se pudo estimar el comportamiento del material de empaque en un proceso. Sumado a esto, las propiedades evaluadas nos permitieron tener una idea del tipo de material con el que estamos tratando y así, si fuese necesario, compararlo con distintos materiales que presenten propiedades similares. A partir de ello, se evaluaron distintos procesos para lograr un acondicionamiento del material que será discutido posteriormente.

Por último, se tenía como objetivo identificar y determinar los procesos necesarios para el acondicionamiento del material de empaque parar realizar un proceso de pirólisis en escala industrial. Para ello, se analizaron distintas alternativas para el acondicionamiento del material. La primera alternativa que se evaluó fue ingresar el material al reactor sin tratarlo previo a la reacción. Sin embargo, debido a la cantidad de material a ingresar al reactor y a la densidad de trabajo que se muestra en Cuadro 14. Propiedades fisicoquímicas para la mezcla del material de rechazo en bobina y material residual. Esta opción fue descartada ya que el volumen a ocupar por el material era demasiado grande y las dimensiones superaban los 80m3.

Para el material de empaque de rechazo en bobina se optó por contratar a un operario que estuviera a cargo de retirar el mandril de la bobina y así alimentar a la segunda etapa del proceso, únicamente el material de empaque plástico tipo BOPP y BOPP metalizado. Por otra parte, no se escogió una cortadora con sierra para retirar el mandril debido a las características del material, ya que podría provocar que la sierra se atascara e impedir que esta actuara como cortadora de la bobina.

Además de este tratamiento para el material limpio, también se escogió un equipo para tratar la materia prima en mezcla (material residual y material de rechazo en bobina), como segunda etapa del pretratamiento. Las características mostradas en el Cuadro 16. Trituradora para el acondicionamiento de la mezcla de material de rechazo en bobina y material residual, definen que la mezcla de material debe ser triturada para obtener una granulometría con excelentes características de fluidización. Este proceso se escogió a partir de la necesidad del tercer equipo de pretratamiento, ya que este tiene una alimentación que requiere de sólidos con alta fluidización. El proceso se realiza para la mezcla de material residual y de rechazo en bobina ya que esta se estará fundiendo para formar pelets que serán ingresados al reactor de pirólisis. Se observó también la facilidad de la descarga de este equipo ya que el producto de la trituración será recolectado en tanques con ruedas que serán transportados hacia la siguiente etapa del pretratamiento.

Para la tercera etapa del pretratamiento se analizó a partir de pruebas de laboratorio realizadas, como se muestran en la Figura 76-Material dentro de la mufla fundido a 220ºC y en la

Figura 77- Material fundido a temperatura ambiente de 25ºC., la opción de utilizar un tornillo sin fin con resistencia como fundidor, seguido de una cortadora de cuchillas, la cual sería encargada de crear un pelet. Además, la opción de fundir el material de empaque fue el resultado de evaluar el volumen efectivo dentro del reactor propuesto a escala planta piloto, ya que el material podía ser ingresado de dos distintas maneras. La primera manera era utilizar el material con una densidad de trabajo de 0.02824kg/L, con la cual se tendría un volumen necesario en el reactor cercano a 82m^3 . A partir de esta propiedad, se concluyó que debía realizarse un proceso previo para aumentar la densidad del material a ingresar al reactor y así obtener un menor volumen necesario para el reactor

La segunda manera, y la que se escogió para proponer en el proceso, fue hallada a partir de las pruebas de laboratorio realizadas, las cuales dieron como resultado una densidad del material de 0.451kg/L, con la cual se necesitaría un volumen cercano a 6m^3. Por lo tanto, se propone realizar un proceso que servirá para fundir el material que salió de la trituradora y convertirlo en un cilindro de material fundido que será cortado por una cortadora de cuchillas que se encontrará en el exterior al tornillo. El tornillo extrusor debe llegar a los 220ºC como mínimo para poder realizar el proceso de fundición del material para luego de la extrusión del material se colocará un compresor al final del tornillo sin fin, el cual enfriará el material fundido para luego ser transformado por una criba y así formar un pelet. El pelet a realizar tendrá una forma de esfera, con un diámetro de 1cm. Este es el último proceso para realizar para la creación de los pelets a ingresar al reactor de pirólisis. Esta última etapa servirá para crear pelets con un volumen de 5.27x10-7 m3, los cuales serán ingresados al reactor de pirólisis. Se realizó un balance de masa, sin embargo este es un cálculo aproximado ya que en este no se tomaron en cuenta las pérdidas por transferencia de calor de las resistencias del tornillo extrusor hacia la mezcla de material de empaque.

El proceso de fundición previo a la pirólisis se puede realizar sin problema debido a los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico. Estos resultados nos muestran que durante el rango de temperatura de 100-300ºC la muestra no pierde pesos de ningún componente del cual está conformado.

Es decir, no se interviene en la cinética de la reacción si se precalienta el material a someter a pirólisis. Esto sumado a la ineficiencia del volumen efectivo de la reacción en el reactor, nos hace escoger las tres etapas de pretratamiento para el material de empaque tipo BOPP y BOPP metalizado.

En conclusión, el pretratamiento se realizó en función a aprovechar el máximo volumen utilizable del reactor. Esto debido a que, si el material se ingresaba en su estado natural (sin pretratamiento alguno), el reactor en el rango de temperatura de 100-300ºC, iba a fundir el material y a partir de ello el volumen efectivo del reactor iba a ser menor, por las propiedades de densidad mostradas en el Cuadro 14. Propiedades fisicoquímicas para la mezcla del material de rechazo en bobina y material residual. Esto teniendo como consecuencia, un desperdicio de energía y espacio en el funcionamiento del reactor.

B. PRUEBAS A ESCALA LABORATORIO: DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS OPERATIVOS Y CINÉTICOS

Realizando experimentaciones a escala laboratorio, se analizaron cinco reacciones de pirólisis de material de empaque de polipropileno metalizado para estudiar el efecto de la variación de las condiciones de operación. La temperatura fue seleccionada como la condición de operación a variar, ya que es esencial en este tipo de reacción de descomposición térmica y repercute en la distribución y composición de los productos. Esto permitió decidir que en lugar de evaluar pocas condiciones repetitivamente, se evaluara un rango de temperatura más amplio para conocer realmente el comportamiento de la reacción. Se definieron cinco curvas de calentamiento basadas en pruebas preliminares con el sistema escala laboratorio utilizado y en el análisis termogravimétrico del material de empaque.

Para definir las temperaturas a evaluar, primero se realizó una prueba sin sistema de condensación. Según los datos de literatura las reacciones de polipropileno se han realizado entre los 300°C y 500°C por lo que se programó la mufla a 500°C. Los resultados de la prueba se muestran en el Cuadro 77 donde se evidencia que a partir de 415°C empezaron a salir del sistema los productos volátiles proponiendo un posible inicio de la reacción de descomposición del polímero. Alrededor de 475°C disminuye el flujo de gases de pirólisis hasta su finalización, identificando un posible límite de finalización de la reacción.

Para corroborar estos resultados se mandaron muestras del material de empaque al Centro de Investigación y Desarrollo (CI+D/CETEC) de Cementos Progreso para la realización de un análisis termogravimétrico. Las curvas TGA indicaron que la pérdida fundamental de masa ocurrió entre 350°C y 480°C para el material limpio (Figura 90) y entre 350°C y 470°C para el material sucio (Figura 91). En la misma figura se observa, la curva DTG que indica un punto de inflexión en el rango de 400°C a 480°C para ambos materiales, que es donde se dá la mayor pérdida de masa. Para el material limpio la curva DTG indica un punto de inflexión en 453.25°C y la curva DTG del material sucio en 454.50°C. Con ambos resultados se establecieron 5 temperaturas finales de programación en la mufla que permitiera estudiar variaciones significativas en el sistema, realizando la primera cinética en 415°C basado en la prueba sin sistema de condensación y la última en 475°C basada en el rango determinado por la curva TGA del material sucio que es el que se encuentra en mayor proporción. Con el fin de asegurar que la reacción se lleve a cabo,

considerando que la temperatura dentro del reactor será menor que la de mufla, se definió realizarla a 475°C y no a 470°. Incluso la prueba sin sistema de condensación comprueba que a esa temperatura ya el flujo de gases está finalizando.

Basado en los puntos de inflexión de las curvas TGA se estableció analizar la reacción a 450°C ya que es donde se espera la mayor velocidad de cambio de masa en función del tiempo. Las otras dos temperaturas fueron definidas como puntos intermedios entre los límites y 450°C siendo estas de 430°C y 460°C.

Al comparar con el rendimiento teórico esperado según la composición del material de emapque (Sección C de Anexos), los resultados son congruentes ya que efectivamente el producto líquido y gaseoso componen la mayor parte de los productos. El rendimiento del producto sólido no es tan bajo como el 9.90% teórico, ya que puede existir residuo de polipropileno que no reaccionó o compuestos inertes que se adicionan a la tinta y adhesivo residual. En las cinco condiciones evaluadas, el rendimiento del producto líquido y gaseoso incrementó conforme se aumentó la temperatura final del sistema. Esto se debe a que el aumento de temperatura favorece una rápida volatilización, aumentando así la cantidad de gases que son condensables y se recolectan como líquido. El rendimiento del gas presenta valores altos de la incertidumbre calculada en comparación al resultado debido a que incluye más propagación de error por las operaciones aritméticas realizadas. No era posible cuantificar la cantidad de gas en el sistema ya que no salía con suficiente presión como para extraerlo en globos o algún sistema. Aun así, al calcularlo por diferencia se nota que este no presenta un alto rendimiento en comparación a los rendimientos de las otras dos fases de producto. El rendimiento del sólido se comportó de manera contraria, disminuyendo conforme se aumentó la temperatura en las cinco condiciones de temperatura final evaluadas. Esto debido a que a bajas temperaturas hay menos volatilización de compuestos que pueden evacuar del reactor como producto gaseoso y condensar como líquido.

Existieron rendimientos significativos de residuos líquidos y sólidos en el sistema. Estos se sumaron al rendimiento de su producto correspondiente para expresar el rendimiento total porque al final si fueron generados por la reacción. En general, la reacción de pirólisis realizada a la temperatura final de 475°C fue la que presentó mayor rendimiento de líquido y gas de las cinco analizadas en este trabajo con valores de de 87.12% m/m y 0.98% m/m respectivamente. Presentó el menor rendimiento de sólido con un valor 11.88% m/m, tal como se esperaba para la temperatura más alta de las cinco evaluadas.

Por la complejidad de las múltiples reacciones involucradas en la pirólisis y basado en otros estudios cinéticos de polipropileno realizados en condiciones no isotérmicas, se modeló la cinética de la velocidad de reacción monitoreando el cambio de masa reactiva en lugar de la concentración.

La dependencia con la temperatura se relacionó en la constante de velocidad establecida por la ecuación de Arrhenius. Los datos de literatura variaban mucho para establecer un posible orden de reacción así que se planteó una ecuación de orden “n”. Las experimentaciones fueron realizadas en condiciones no isotérmicas por lo que la temperatura debía ser una función del tiempo. Considerando todo lo anterior, se planteó como modelo cinético la ecuación 23 de la sección de resultados.

Primero debían determinarse la función que representaba las curvas de calentamiento del sistema para poder determinar después parámetros cinéticos de factor de frecuencia (A), energía de activación (E_a) y el orden de reacción (n).

Las reacciones fueron realizadas en condiciones no isotérmicas con una velocidad de calentamiento constante como muestran las curvas de calentamiento experimentales. En las gráficas se observa que las temperaturas incrementaron en las cinco experimentaciones con una pendiente constante hasta estabilizarse en la temperatura programada. Al utilizar una velocidad de calentamiento constante se permite una transferencia de calor uniforme en el sistema que permite estudiar la reducción de masa de reactivo en tiempo real tal como ocurre en una termobalanza para análisis termogravimétrico. Esta condición no isotérmica, también permitió conocer la posible temperatura de inicio de reacción en cada condición evaluada ya que se monitoreaba el momento en que los gases comenzaban a salir de la chimenea.

El comportamiento de las curvas de calentamiento experimentales debía expresarse como una función del tiempo que las representará para poder usarla en el modelo de Arrhenius. Inicialmente se notaba que debía realizarse un ajuste no lineal y por la forma de la gráfica parecía una función sigmoide. Revisando previas investigaciones de cinética de pirólisis, se encontró en un estudio realizado en 2012 (Ding, Xiong, Luo, Zhang y Chen) la utilización de la función sigmoidal de Boltzmann para expresar la dependencia de la temperatura con el tiempo en la cinética de reacción de pirólisis de una mezcla de plásticos a condiciones no isotérmicas. Con esta referencia, se utilizó el software GraphPad Prism® para realizar este ajuste de curva no lineal a los datos experimentales de cada condición de cinética. El Cuadro 97, resume los valores de las constantes calculadas para cada curva de calentamiento. La fiabilidad del ajuste obtenido con esta función se corroboró con los coeficientes de determinación (R2), que tal como se presenta en el mismo cuadro, son cercanos a 1. También se compararon gráficamente, donde se visualiza que el modelo es una buena representación de los datos experimentales. A escala laboratorio, la transferencia de calor es muy rápida por lo que el efecto que tiene en los sistemas reactivos se reporta como despreciable. Pero si se pudiera medir la temperatura en la superficie y dentro del reactor podría establecerse un modelo de transferencia de calor para determinar las pérdidas de calor que afectan en la lectura de temperatura de la termocupla de la mufla.

Para la determinación de los parámetros cinéticos debía calcularse el cambio de masa de reactivo conforme transcurría el tiempo de reacción para utilizar como datos experimentales y ajustar el modelo propuesto. Se observó que el gas salía justo al inicio de la reacción por lo que la masa de gas fue la primera que se restó a los 60 gramos de masa reactiva inicial. Luego a esta masa resultante se le restaron consecutivamente las masas de las muestras líquidas cuantificadas, porque conforme se iban produciendo la masa de muestra de reactivo disminuía. El residuo de masa sin descomponer (Wf) es equivalente a la conversión deseada y por lo general es la masa del sólido porque este es el producto queda en el reactor sin descomponer.

A escala industrial también tendrían que considerarse la cantidad de residuos remanentes en el sistema, incluyéndolo en la conversión junto al sólido obtenido para definir el parámetro de residuo de masa

sin descomponer (Wf). Se basó la cinética en el producto líquido porque era el compuesto con mayor rendimiento en todas las experimentaciones realizadas.

Utilizando los datos experimentales calculados para pérdida de masa reactivo conforme el tiempo, se utilizó el software Berkeley Maddona versión 9.1.19 para ajustar el modelo planteado a los datos. Según Moldoveanu (2005) para la pirólisis de polipropileno a 350°C el valor de la energía de activación es de 59000 cal/mol y 5.75*10^15 s-1 el del factor de frecuencia, estos datos fueron utilizados como datos iniciales del modelo. Gao, Kaneko, Amasia y Nakada (2002) determinaron que el orden de no se podía aplicar un modelo de primer orden a la pirólisis de propileno y determinaron un orden de reacción promedio 0.35 en un rango de temperatura de 390°C y 410°C. Este fue el dato utilizado como valor inicial del orden de reacción en el modelo. Ajustando los datos en el software con el método de integración Runge Kutta 4 se obtuvieron las curvas teóricas de pérdida de peso en el tiempo y los resultados en el Cuadro 19 resumen el valor de los parámetros cinéticos para cada experimentación y el promedio obtenido.

Según el Cuadro 103, la energía de activación en las cinco experimentaciones resultó en un valor promedio de 57954.66 Cal/mol. Al compararlo con el valor inicial utilizado para el ajuste de 59000 cal/mol (Moldoveanu, 2005) estos se encuentran muy cercanos. La variación podría deberse a que se trabajaron a mayores temperaturas y la barrera de energía que deben atravesar las moléculas de reactivo para transformarse en los productos disminuyó.

El factor de frecuencia si mostró una tendencia respecto a la temperatura de reacción utilizada. Según el Cuadro 19 de la sección de resultados, disminuyó conforme aumentó la temperatura en las cinco condiciones evaluadas. Esto puede explicarse según la ecuación 12 del marco teórico donde se define que este parámetro es afectado por el exponencial de la entropía y a su vez la entropía es inversamente proporcional a la temperatura. Si la temperatura disminuye, la entropía del sistema aumenta ocasionando que aumente el factor de frecuencia como ocurrió en esta reacción.

El orden de reacción según el Cuadro 19 fue similar en las cinco experimentaciones, resultando en un valor promedio de 0.53. Esto es congruente porque este parámetro es un valor que es específico del tipo de reacción, que en este caso es una pirólisis, no precisamente de las condiciones. En este caso el valor en las cinco experimentaciones fue preciso porque presentó una baja desviación estándar.

Las figuras 12 a 16 de la sección de Resultados permiten visualizar gráficamente la comparación de los datos experimentales con el modelo determinado en el software de cada una de las cinco experimentaciones realizadas.

Según los coeficientes de determinación del Cuadro 19, los cinco modelos determinados para cada curva de calentamiento si predicen el comportamiento de la reacción porque estos valores son cercanos a 1. La Figura 34 correspondiente a la cinética evaluada a temperatura final de 415°C, presenta el ajuste más bajo de las cinco condiciones evaluadas con un R^2 de 0.9562. El modelo planteado se basa en la pérdida de masa reactiva conforme el tiempo y a menor temperatura los compuestos volátiles son menos predecibles, lo que podría explicar este comportamiento en el ajuste del modelo a bajas temperaturas. La Figura 30, correspondiente a la cinética evaluada a temperatura final de 475°C, es la que presenta el mejor ajuste de las

cinco condiciones evaluadas para el modelo cinético con un R^2 de 0.9943. Las principales fuentes de error que afectaron en la determinación de la masa reactiva, esencial en el modelo planteado, se relacionan con la cuantificación del producto líquido a diferentes tiempos. Primero, los valores de masa reactiva dependían de la cantidad de producto líquido que salía del sistema de condensación, pero una parte no salía del sistema y se quedaba en las paredes de los componentes, considerándose en la masa de los residuos. Segundo, se asumió que toda la masa de producto gaseoso sale del sistema antes de iniciar la salida del producto líquido porque no fue posible cuantificar la masa de gas y su cambio en el tiempo, pero se observó que sí continuaba saliendo junto con el producto líquido. Y tercero, también pudieron afectar las fugas en algunas experimentaciones por la manguera que conectaba la chimenea y el sistema de condensación.

La aplicación de este modelo es de gran utilidad para el escalamiento industrial ya que expresa la conversión de la reacción en base a la pérdida de masa del reactivo para la formación de producto líquido, seleccionado porque en las cinco condiciones evaluadas en este trabajo fue el de mayor rendimiento.

Para realizar la cinética del compuesto representativo se analizaron los cromatogramas de la distribución de compuestos en los productos líquidos. Evaluando los compuestos, su tiempo de retención y el área se encontró que el 2,4-dimetil-1-hepteno era un compuesto representativo en las muestras de producto líquido.

Primero, este compuesto se encuentra presente en todas las muestras de cinética de las cinco experimentaciones, condición esencial para ser seleccionado. Segundo, en el Cuadro 115 se presentan los resultados de la evaluación estadística de los tiempos de retención del compuesto en cada experimentación. Las desviaciones estándar son muy bajas confirmando la precisión de los tiempos de retención y los promedios son muy parecidos entre las cinco condiciones evaluadas. Tercero, este compuesto por lo general presenta las mayores áreas en los análisis. También al realizar una revisión de literatura, Moldoveanu (2005) recopiló en un estudió de cinética de reacción de pirólisis de polipropileno que el compuesto 2,4-Dimetil-1-hepteno es un compuesto que aparece en los análisis de cromatografía de gases con picos de alta intensidad. Esto indica que es un compuesto estable y abundante en el producto líquido.

Luego de seleccionar el compuesto representativo, debía analizarse el cambio de concentración en el tiempo para realizar la cinética de reacción. Para esto se realizó un factor de corrección a las áreas determinadas en los cromatograma para poder utilizarlas como un porcentaje másico relativo al cloroformo, que fue el disolvente utilizado. Esto permitió cuantificar la cantidad de gramos del compuesto presentes en las muestras líquidas de cada cinética y calcular los moles con el peso molecular del 2,4-Dimetil-1-hepteno. Los moles fueron determinados como un acumulado ya que los moles totales de cada muestra en un tiempo determinado incluían los moles formados anteriormente, este cálculo permitió visualizar el aumento de concentración del compuesto conforme transcurría la reacción. Basado en las ecuaciones del marco teórico, se planteó la relación entre la pérdida de masa reactiva y la formación de moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno respecto al tiempo, como una constante de proporcionalidad. Para calcular estas constantes, se propuso un ajuste lineal entre los diferenciales de masa de reactivo respecto al tiempo (d WA/dt) y los diferenciales de moles acumulados del producto respecto al tiempo (dNB/dt,). El Cuadro 20 de la sección de resultados,

presenta la constante de proporcionalidad calculada como la pendiente del ajuste lineal en cada cinética evaluada.La constante de mayor valor, de las cinco condiciones evaluadas, lo presentó la cinética a temperatura final 475°C con un valor de 0.0017(mol/g) y la de menor valor la presentó la cinética a temperatura final 415°C con un valor de 0.0011 (mol/g). El promedio resultó en 0.0015 mol/g con una desviación estándar de 0.0002 mol/g, evidenciando la precisión de los datos. Los coeficientes de determinación muy cercanos a 1 indican que el modelo es fiable y representan los datos experimentales tal como se visualiza en los gráficos de la sección F de Anexos. Estas constantes permiten predecir la producción de moles del compuesto 2,4-Dimetil-1-hepteno respecto al cambio de masa reactiva de la reacción de pirólisis de polipropileno metalizado. Y el cambio de masa reactiva en función del tiempo está definido con el modelo y los parámetros de la ecuación de Arrhenius determinados en el Cuadro 19 para cada condición

C. CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS DE LA PIRÓLISIS

Para determinar la viabilidad técnica del uso de los productos obtenidos por la pirólisis de material de empaque de polipropileno, fue necesario obtener un perfil de caracterización para cada producto obtenido. Se tomó en cuenta las propiedades que se debía conocer para cada producto de acuerdo con sus posibles usos industriales y considerando las limitaciones de la tecnología de los laboratorios de análisis.

El producto gaseoso se analizó por cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas lo cual permitió identificar los compuestos presentes en el producto. De acuerdo con los cromatogramas, se obtuvo el porcentaje de área relativo de cada compuesto presente en cada muestra gaseosa (anexos). Cabe mencionar que el porcentaje de composición es relativo al área total del cromatograma que se distribuye en el total de compuestos presentes y en el área que representa la intensidad de cada compuesto. Es decir que la altura del pico está en función de la abundancia de iones del compuesto en la muestra.

La variación en los porcentajes relativos obtenidos para los tres compuestos mayoritarios fue evaluada a partir de la desviación estándar del valor promedio de cada pirólisis. Gráficamente se puede observar la composición de cada uno de los compuestos en las cinco corridas de pirólisis analizadas en las Figura 35, Figura 36 y Figura 37. En la Figura 35 se puede observar que el propeno, presenta una variación dentro del rango establecido por el intervalo de confianza al 95% en el cual el valor promedio de la pirólisis 1 se encuentra por debajo del límite inferior. Tomando en cuenta la desviación estándar de cada valor promedio representada como barras de error, los valores siguen dentro del rango con excepción de la pirólisis 1. De acuerdo con el Cuadro 24, la desviación de la composición del propeno equivale al 35% del valor promedio. Indicando resultados con baja precisión y que no puede considerarse un comportamiento predecible para futuras réplicas.

En la Figura 36 se observa que la composición del 2-penteno en la pirólisis 4 tiene una desviación estándar asociada que sale del intervalo de confianza establecido. De acuerdo con el Cuadro 24, la desviación de la composición equivale al 26% del valor promedio. Mientras que en la Figura 37 se observa que la composición del 2-metil-1-penteno permanece dentro del intervalo establecido con excepción de la pirólisis

3. Tomando en cuenta la desviación estándar de los datos, las pirólisis se encuentran fuera de rango. De acuerdo con el Cuadro 24, la desviación de la composición equivale al 26% del valor promedio. Al igual que el propeno, la desviación de la composición de los compuestos 2-penteno y 2-metil-1-penteno indica resultados de baja precisión con los cuales no es posible establecer un comportamiento estable para la composición del producto gaseoso.

Se puede observar entonces gráficamente, y cuantitativamente, que la composición del producto gaseoso sigue un comportamiento variable aleatoriamente evitando que sea posible el predecir futuras composiciones del producto gaseoso obtenido por pirólisis a la mismas condiciones de operación. La variabilidad de los datos se puede deber principalmente, al rompimiento de enlaces químicos del polipropileno durante la descomposición térmica. El rompimiento de enlaces es aleatorio y forma moléculas simples de bajo peso molecular que se volatilizan inmediatamente no son condensables. Además, la transferencia de calor dentro del reactor de pirólisis también es variable por la velocidad de calentamiento, es decir, el aumento de temperatura respecto del tiempo al cual se somete el material. También se debe considerar que la disposición del material dentro del reactor es aleatoria en cuanto a el tamaño de partícula y orientación de este, factores que influyen en la transferencia de calor en el material y posiblemente en la ruptura de enlaces químicos.

En la Figura 38 se observa el comportamiento del 2,4-dimetil-1-hepteno en el producto líquido, donde las composiciones de las pirólisis 1 y 3 dentro del rango tomando en cuenta la desviación de los datos. Las pirólisis 2, 4 y 6 se encuentran fuera de rango tomando en cuenta la desviación y los datos promedios puntuales. De acuerdo con el Cuadro 30, la desviación del compuesto equivale al 2% del valor promedio, siendo un valor indicador de alta precisión en los resultados.

La Figura 39 muestra que los datos en general se encuentran dentro de rango tomando en cuenta su desviación. De acuerdo con el Cuadro 30, la desviación del compuesto equivale al 7% del valor promedio. La Figura 40 muestra que la composición del 2,3,6,7-tetrametil-4-octeno se encuentra dentro de rango para las pirólisis 1, 2 y 3 considerando la desviación de los datos. Las pirólisis 4 y 5 se desvían sobre el límite superior y por debajo del límite inferior respectivamente. De acuerdo con el Cuadro 30, la desviación de la composición del compuesto equivale al 8% del valor promedio. En la Figura 41 se observa que la composición del 2,3,5-trimetil-hexano se encuentra dentro de rango con excepción de la pirólisis 4, la cual se encuentra sobre el límite superior. De acuerdo con el Cuadro 30, la desviación del compuesto equivale al 7% del valor promedio. Para los tres compuestos mencionados, el porcentaje de variación respecto del valor promedio indica una precisión aceptable para el tipo de proceso en estudio ya que no es un producto que deba cumplir con un criterio de calidad riguroso.

Por último, en la Figura 42 se observa que la composición del 2-metil-1-penteno presenta mayor desviación para las pirólisis 3 y 4 lo cual sitúa los datos fuera de rango y de acuerdo con el Cuadro 30, aumenta la desviación estándar del compuesto a un 12% del valor promedio. Este compuesto presentó el porcentaje más alto de desviación respecto a los demás compuestos del producto líquido. Sin embargo, se considera aceptable al indicar una precisión de los datos en un rango tolerable.

Es importante mencionar que el rango establecido para el intervalo de confianza de los datos es al 95% debido a que es un nivel de significancia aceptable para el tipo de proceso en estudio ya que no se obtuvieron productos con los cuales fuera necesario cumplir con normas internacionales, valores teóricos esperados, o un producto de calidad que se pretenda comercializar individualmente y que la desviación de su composición sea un indicador de rechazar el lote de proceso.

La variación en los resultados puede deberse a las condiciones a escala laboratorio a las cuales se obtuvo el producto. Considerando que el producto se obtiene luego del rompimiento aleatorio de enlaces del polipropileno y volatilización de compuestos gaseosos no condensables, este condensa en zonas con disminución de temperatura en el interior del reactor de pirólisis. Previo a su condensación, las moléculas tienen una estructura determinada que se ve modificada cuando estas condensan por disminución de temperatura o bien no tienen la energía suficiente para volatilizarse y reaccionan entre sí, dando como resultado compuestos con enlaces dobles y de mayor complejidad al ser compuestos sustituidos. Además, los compuestos de mayor peso molecular permanecen dentro del reactor por mayor tiempo dando la posibilidad de mayor formación de enlaces químicos.

De acuerdo con el Cuadro 30, de modo contrario al producto gaseoso, el producto líquido presenta un rango de desviación aceptable del 2 al 12% de los valores promedio. Dicho rango permite establecer la precisión de la composición general del líquido y de los cinco compuestos principales y predecir que para futuras experimentaciones, el producto líquido presentara una composición similar y dentro del rango de datos analizado.

Por otro lado, las propiedades fisicoquímicas del producto líquido presentadas en el Cuadro 31 fueron determinadas para la comparación del producto como posible como combustible alternativo respecto a los combustibles líquidos comunes tales como diésel, gasolina y bunker. Los datos originales y su estadística descriptiva se muestran anexos.

Se obtuvo principalmente que la densidad del líquido para 15 y 25 °C presentó una desviación estándar equivalente a al 0.60% y 2.70% de los valores promedios respectivamente. Los porcentajes indican que la precisión de los resultados es alta y por tanto, aceptable. Para el poder calorífico se obtuvo un desviación de 333 J/g equivalente al 0.74% del valor promedio presentado en el Cuadro 31. Propiedades fisicoquímicas del producto líquido obtenido de las corridas de la reacción de pirólisis de empaques de polipropileno metalizado, dando por aceptable el resultado. Por último, el líquido de pirólisis se clasifica como un crudo mediano con un valor de 25 grados API y como líquido inflamable con un punto de inflamación de 12 °C.

Las propiedades fisicoquímicas del producto sólido presentadas en el Cuadro 32 fueron determinadas para el análisis del uso industrial del producto, presentado en la evaluación del producto sólido obtenido, para estudiar sus aplicaciones posteriores" del mismo megaproyecto de este estudio. Los datos originales y su estadística descriptiva se muestran en anexos.

Se obtuvo un sólido con humedad del 5.78 ± 0.08% m/m y con densidades aparente y compactada de 107.44 ± 3.14 kg/m^3 y 162.83 ± 2.68 kg/m^3. Se puede afirmar que la confiabilidad de los datos debido a

que la precisión obtenida por la desviación estándar asociada es alta. Se obtuvo un contenido de aluminio de 2.698 ppm derivado de la laminación metalizada y tinta del empaque de polipropileno pirolizado. El poder calorífico fue de 21,855 ± 1581 J/g con una desviación estándar equivalente al 7% del valor promedio, indicando un valor de precisión aceptable. Cabe mencionar que el poder calorífico del sólido es menor al del producto líquido debido a que este último está compuesto por hidrocarburos, alquenos principalmente, los cuales aportan la cantidad de energía elevada que se obtiene al combustionar el producto.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, el producto líquido permanece dentro del sistema durante un mayor tiempo respecto al gas y condensando a través de las distintas secciones del sistema de reacción y causando posible pérdida de producto en las paredes internas o bien, en las cenizas del producto sólido residual del material no volátil o degradable térmicamente. Los residuos líquidos pueden causar variación en las propiedades del producto sólido, especialmente en el poder calorífico por trazas de hidrocarburos que aumentan la magnitud de dicha propiedad.

D. ESCALAMIENTO INDUSTRIAL

El objetivo principal del presente trabajo fue la simulación de un proceso de pirólisis, utilizando la cinética, rendimientos y composiciones obtenidos en el análisis escala laboratorio, empleando un sistema de simuladores para proponer el dimensionamiento de un reactor escala planta piloto. Para realizar la simulación se modificó la ecuación de calentamiento de la cinética de la pirólisis escala laboratorio, al incluir el modelo determinado para la transferencia de calor del reactor. El modelo de transferencia de calor se basó en el modelo determinado por Munson (Munson & Spindler, 1961) y por Bockhorn (Bockhorn, Hornung, Hornung, & Jakobströer, 1998), al establecer la transferencia de calor por la convección de vapor dentro del reactor, conducción del material y conducción del reactor. Es importante recalcar que debido a que la cinética determinada a escala laboraotorio es propia para determinadas condiciones, se basó en estas condiciones para establecer la conducción de calor al reactor. Debido a la dificultad de utilizar ecuaciones diferenciales no ordinarias en el software SuperPro Designer, se empleó el sistema de simulación Berkely Madona que complementa oportunamente la simulación SuperPro Designer. El modelo de calentamiento del reactor se introdujo en el software de GraphPad Prism para obtener una función que modele correctamente este comportamiento. Este sistema, basado en la obtención de una función de calentamiento del reactor para la resolución de ecuaciones diferenciales no ordinarias con el software Berkely Madona, permitió obtener las condiciones de operación a introducir en SuperPro Designer para realizar el balance de masa y energía del proceso.

Para modificar la cinética y obtener los rendimientos de los productos se utilizaron los compuestos mayoritarios y constantes obtenidos en los análisis de los productos a escala laboratorio. Se determinó que el compuesto constante mayoritario en todos los análisis realizados fue el 2,4-dimetil-1-hepteno para el líquido y el propeno para el gaseoso, con promedio de 17.0730 ± 2.1960 % y 51.2382 ± 3.5465 %, respectivamente. Al tener un aceptable margen de error, estos compuestos se utilizaron para realizar las simulaciones y obtener los rendimientos a los diferentes tiempos de operación. De igual forma, se analizaron estadísticamente los rendimientos obtenidos para emplear la ecuación de cinética en la primera simulación de la reacción escala

planta piloto y realizar un dimensionamiento inicial del reactor para establecer el modelo de transferencia de calor. La principal fuente de error de esta metodología corresponde a modelar el producto líquido como 2-4-dimetil-1-hepteno, debido a que no tiene un porcentaje alto en la muestra como el propeno, no obstante, este fue el compuesto que se determinó en todos los análisis de laboraotorio realizado al producto líquido, a diferenciad de otros compuestos que no siempre se encontraban en la muestra analizada. Esto puede ocasionar que las propiedades de densidad, capacidad calorífica, punto de ebullición y punto de fusión resulten en un dimensionamiento incorrecto del reactor. Por esto se recomienda realizar la simulación con otro de los compuestos determinados en el análisis al producto líquido y establecer si se tiene una variación significativa en las dimensiones de los equipos.

La materia prima evaluada presenta propiedades de materiales que modifican su estructura física cuando son sometidos a calentamiento, como se demostró en la caracterización y acondicionamiento de residuos de material. Esta característica del material causa una variación considerable en su densidad, volviéndolo más compacto y aumentando el espacio de seguridad en el reactor. Debido a que en el presente proceso de simulación se utilizaron las propiedades del material de empaque condicionado y las ecuaciones de cinética utilizadas están basadas en los datos obtenidos en las corridas con el reactor escala laboratorio que utilizaban material de empaque no condicionado, se considera un error en el rendimiento de los productos y en el dimensionamiento del reactor.

Para establecer los procesos y las condiciones de operación en los simuladores se utilizaron las ecuaciones de cinética para la producción de gas pirólitico y producción de plastic oil de la reacción escala laboratorio, los rendimientos de las reacciones de pirólisis a escala laboratorio y el modelo de transferencia de calor del reactor escala planta piloto. Este último se utilizó para determinar la temperatura respecto al tiempo dentro del reactor y de esta forma escalar la cinética; el modelo de transferencia de calor obtenido, al estar basado en las condiciones de operación del reactor escala laboraotorio, muestra un comportamiento de calentamiento exponencial al inicio, y, luego al llegar a la temperatura de reacción, disminuye significativamente la transferencia de calor hasta un valor casi constante respecto al tiempo, concordando con los modelos determinados para la pirólisis de plásticos (Bockhorn, Hornung, Hornung, & Jakobströer, 1998) (Gao, 2010) y de materiales que se decomponen respecto a su calentamiento (Munson & Spindler, 1961). El modelo también concuerda análisis termogravimétrico realizado al material de empaque, que indica que la producción de gas pirólitico inicia a los 329°C y su punto máximo ocurre a partir a los 448°C. Este comprotamiento se debe principalmente a la energía necesaria para romper los enlaces del polipropileno para la formación de compuestos con cadenas más cortas, produciendo así las fases del char, plastic oil y syngas de la reacción. La variación en la transferencia de calor por el comportamiento del material se contempló al incluir la variación de la masa de material de empaque dentro del reactor respecto al tiempo. El calor utilizado por la reacción de pirólisis se contempló al utilizar como base de diseño el cambio de temperatura dentro y fuera del reactor escala planta piloto. Esto se justifica en que, al alcanzar la temperatura de reacción, el calor cedido al reactor se utiliza para su calentamiento y para la reacción. Los valores del calor transferido y del incremento de la temperatura en el reactor se introdujeron en el software Graph Pad para obtener una función

que describa este comportamiento. Estas funciones demuestran valores de R^2 de 0.91 y 0.94. Para poder predecir el requerimiento calorífico de la reacción de pirólisis en el simulador del proceso escala planta piloto se recomienda realizar un análisis termo gravimétrico detallado del proceso, como el realizado por Bockhorn (1998).

El modelo de trasferencia de calor asume un sistema de trasferencia en estado estacionario basado en el cambio de temperatura entre el centro y las paredes del reactor y las resistencias térmicas de conducción de las paredes del reactor, la conducción del material de empaque dentro del reactor y la convección de los gases dentro del reactor. Se asumió un sistema de trasferencia de calor en estado estacionario ya que el modelo utiliza los datos de diseño utilizados se basaban en la diferencia de temperatura interna y externa del reactor cada dos minutos. Con estos datos, según la diferencia de temperaturas se obtenía el calor trasferido durante ese intervalo de tiempo para obtener el calor total cedido por el sistema de calentamiento. La resistencia térmica para la conducción del reactor se basaba en la trasferencia de un cilindro de acero inoxidable con espesor de 14 milímetros, para igualar la condición de calentamiento que el reactor escala laboratorio. Al observar el inicio de la reacción a partir del minuto 530 de operación, se utilizó para la trasferencia de calor por convección las propiedades del aire como las propiedades del gas dentro del reactor. Esta suposición ocasiona un error sistemático para la transferencia de calor a partir de que se alcanza la temperatura para inicio de la reacción.

Las condiciones de operación obtenidas a partir de la modificación de las ecuaciones de cinética con el modelo de transferencia de calor en Berkely Madona fueron 699 minutos de calentamiento y reacción en el reactor para obtener un rendimiento máximo de 88.12 % de gas pirólitico de salida del reactor, y un rendimiento de 73.46% de plastic oil. Es importante recalcar que estos valores difieren de los obtenidos en los análisis escala laboratorio debido a que se incluyó un 11% de remanente líquido y gaseoso dentro del reactor que resulta en un aumento de la cantidad de char obtenida. Estas condiciones concuerdan con las establecidas en la literatura para un reactor escala planta piloto semi continuo para la pirólisis de material de empaque (Gao, 2010).

A partir de estas condiciones obtenidas para el máximo rendimiento de líquido se varió el tiempo de operación para determinar la composición de los productos de la reacción de pirólisis. Como se demuestra en el Cuadro 38 a menores tiempos de operación se obtiene menor energía trasnferida para la reacción de pirólisis y la producción de compuestos líquidos disminuye significativamente. Con estos resultados se puede concluir a que el incremento en la producción de plastic oil en la reacción de pirólisis se debe a un calentamiento necesario para iniciar los rompimientos de los enlaces del polipropileno. En la misma Cuadro se observa un comportamiento distinto para el syngas, teniendo este un incremento constante conforme avanza la reacción., y una cantidad constante de sólido producido. Debido a que estos valores se obtuvieron por la diferencia en la cantidad de líquido y sólido, se recomienda determinar un modelo de cinética para los productos gaseosos y así estudiar adecuadamente la formación de este compuesto respecto al tiempo de reacción. El comportamiento del sólido se debe a que este valor se fijó para resolver el sistema de ecuaciones en Berkely Madona. Para adecuar este comportamiento con la cinética de la reacción se recomienda modificar

el sistema de ecuaciones para establecer la obtención de líquido como variable en la cinética de la producción de gas pirolítico.

No se encontró en la literatura otro proceso de tratamiento de material de empaque tipo polipropileno metalizado por pirólisis, por lo que los resultados obtenidos para el proceso se compararon con los resultados obtenidos en la literatura para polipropileno virgen y mezclas de residuos plásticos basados en polipropileno y polietileno de alta y baja densidad., para plantas piloto y análisis escala laboratorio. Se observa que los rendimientos obtenidos para la simulación se encuentran entre los dos artículoscomparados, pero teniendo una variación significativa con los productos gaseosos. Debido a que los valores comparados son para rendimienos en corridas a escala laboraotorio y para una materia prima diferente, no se puede rechazar el modelo de simulación obtenido. Las interacciones moleculares en la materia prima en el tratamiento por pirólisis ocurren de forma aleatoria con gran rapidez aumentando el efecto de contaminantes y catalizadores, como puede ocurrir con el aluminio del material de empaque. Para determinar si el modelo empleado es adecuado y los resultados del dimensionamiento del reactor son adecuados para su aplicación se realizó la comparación de los rendimientos de este trabajo con una planta industrial (Arandes) y una planta piloto (Gao) mostrando un comportamiento muy similar en los rendimientos de los tres productos. Cabe mencionar que los procesos comparados utilizan materia prima de desecho, al igual que lo utilizado para este trabajo. Se recomienda el estudio de la cinética simultánea de los productos en la reacción e investigar y solicitar información a plantas recicladoras de material de empaque metalizado por medio de pirólisis a las condiciones del simulador para comparar los rendimientos de la simulación con datos experimentales.

En conclusión, se realizó el dimensionamiento de un reactor escala planta piloto y condiciones de operación a partir de un sistema de simuladores utilizando datos de cinética de la reacción a escala planta piloto. Estos resultados permiten comprender el comportamiento de la reacción de pirólisis en un proceso a mayor escala para ser utilizados por una industria para realizar el tratamiento de sus residuos a nivel semi industrial.

E. PRODUCTO LÍQUIDO

La materia prima usada en este proyecto está compuesta por varias capas; BOPP transparente, aluminio, tinta y BOPP laminado (Ver distribución en Antecedentes). Se determinó la conversión de las capas a los subproductos de la reacción de pirólisis a partir de 60 g de materia prima. Como se observa en el Cuadro 42, 54.06 g corresponden a las capas de BOPP y 5.94 g al aluminio y tinta. Con ello se calculó que hay un diferencial de 48.51 entre esas capas, por lo cual se esperaba obtener como mayoritario el líquido de pirólisis ya que este proviene de las capas de BOPP y el sólido de las capas restantes. No se tomó en cuenta el gas ya que la cantidad obtenida se consideró despreciable 0.31% (m/m).

En el Cuadro 43 se comparó la cantidad de masa obtenida en cada experimentación contra la cantidad calculada de líquido, y se obtuvo la diferencia obtenida por pirólisis. En promedio se tuvo un 2.1%, por lo que el proceso experimental fue adecuado al obtener cantidades cercanas al valor calculado, aunque al observar la desviación entre experimentaciones, 1.3%, no se logró obtener la misma cantidad de líquido en todas las experimentaciones; esto posiblemente a pérdidas del líquido en el reactor o en el sistema de

condensación. Debido a la capacidad del reactor (60 g) y el rendimiento promedio de producción del líquido, 81% (m/m) por reacción de pirólisis, se realizaron las pruebas presentadas en el Cuadro 46 siendo las esenciales para poder clasificar y comparar el líquido obtenido.

Los combustibles líquidos deben cumplir especificaciones para garantizar un rendimiento adecuado en motores de combustión, calderas, hornos, etc. Por ello, para evaluar si el producto líquido de pirólisis de polipropileno puede utilizarse como combustible de calderas, se determinaron propiedades fisicoquímicas; en conformidad al Acuerdo Ministerial 211-2017 "Nómina de productos petroleros con sus respectivas denominaciones, características y especificaciones de calidad" del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala, y con estas evaluar su viabilidad para uso en calderas en una empresa de fabricación de alimentos. Los resultados se compararon de forma cruzada con combustibles que actualmente utiliza dicha empresa y a partir de la comparación específicamente de punto de inflamación que dio como resultado 12°C, no se puede categorizar como combustible líquido, pero sí como un líquido inflamable.

Se determinaron la viscosidad, la densidad, el punto de inflamación y el poder calorífico del líquido de pirólisis y de los combustibles, ya que son los parámetros más importantes para evaluar las características del cualquier líquido inflamable. Las propiedades fisicoquímicas del líquido se muestran en el Cuadro 45 y en el Cuadro 46; los resultados se obtuvieron de 5 reacciones de pirólisis realizadas a nivel laboratorio, con rampas de calentamiento definidas en el sistema utilizado, como se define en los parámetros cinéticos y operativos de la reacción de pirólisis. En general, se observó que los valores de estas propiedades del líquido de pirólisis estaban dentro de un rango comparable a los 3 combustibles: gasolina, diésel y bunker, pero presentaban mayor similitud con el diésel.

Se determinó el poder calorífico del líquido de pirólisis para evaluar la capacidad de generación de energía por combustión. El valor reportado fue el promedio de las mediciones realizadas, el cual se presenta en el Cuadro 45 y es de 45.02 ± 0.198 MJ/kg. De esta primera comparación se observó que el líquido de pirólisis tiene potencial como combustible ya que su poder calorífico se encuentra dentro del rango comparable de los combustibles analizados en donde el mayor es la gasolina 46.80 MJ/kg y el menor el diésel 45.60 MJ/kg.

Del Cuadro 46 se observó que la densidad del líquido fue 810.1 kg/m^3, y se encontró fuera del rango de los combustibles evaluados; gasolina, diésel y bunker, pero se acercó la valor inferior de la densidad del diésel 820 kg/m^3. La fracción líquida de los productos de pirólisis tuvo una gravedad API de 25, esta se clasificó como crudo mediano, según la clasificación de Jafarinejar (2017). Se observa que hay una relación inversamente proporcional entre la gravedad API y la viscosidad puesto que el bunker presenta la gravedad más baja, 11.9, y la gasolina el más alto, 55, pero también es el combustible menos viscoso. El líquido resultante de la pirólisis presenta una viscosidad de 2.4 cSt, Esta viscosidad se encuentra en el rango de 2 a 4 cSt para diésel convencional; por ello se toma la reología del diésel como referencia para el líquido pirolítico.

La prueba de punto de inflamación dio un resultado de 12°C para el líquido de pirólisis, este valor es más bajo respecto a los otros combustibles. Así, el líquido pirolítico se clasificó como líquido inflamable

según el código NFPA 30. Este valor se atribuye a que el estudio de cromatografía de gases con detección de masas mostró que el producto líquido de pirólisis consistió en una mezcla de olefinas; principalmente alquenos alifáticos y en menor proporción alcanos. La composición del líquido pirolítico se diferencia de los otros combustibles evaluados; como en el diésel y gasolina donde predominan los compuestos aromáticos o parafinas. Esto explicó porqué los productos de la reacción de pirólisis condensaron en condiciones normales, ya que los alquenos presentan mayores interacciones moleculares que otros hidrocarburos.

La composición del líquido mostró como compuestos mayoritarios: 2,4-dimetil-1-hepteno y 2,3,7-trimetil-4-octeno. Al investigar aplicaciones de los compuestos en el líquido de pirólisis, el que presentaba un potencial comercial era 3-Penten-2-one, debido al precio del mercado de $2,876.68 por kg, con una pureza arriba del 95% según Merck. No se realizó un proceso de destilación para separar dicho compuesto puesto que: no era uno de los compuestos mayoritarios (0.86%) y la aplicación de este es en la industria alimenticia ya que se usa como saborizante. Por la procedencia de la materia prima, material plástico de rechazo, no es recomendable aislarlo y purificarlo, por ello se decidió no separar el líquido y buscar su utilidad como combustible solamente.

Dadas las propiedades fisicoquímicas evaluadas, el líquido pirolítico obtenido puede explotarse para producir combustible automovilístico o para calderas que sea funcional al mezclarlo con otros productos derivados del petróleo. Sin embargo, se necesitan más estudios y pruebas que sustenten utilizar el líquido por sí solo como combustible. Con base a esta idea, se plantearon otros análisis para comprobar que al realizar mezclas del líquido pirolítico con otro combustible, en este caso bunker, cumpliera con los parámetros establecidos para su uso como combustible. Se realizaron dos pruebas con proporciones de 90:10 y 95:05 de bunker y líquido pirolítico respectivamente.

En el Cuadro 47 se muestra el resumen de las pruebas de mezclas. Estas se compararon con los parámetros establecidos en la Nómina de productos petroleros para bunker y se evaluó si estaban dentro de los rangos establecidos. Se observó que ambas mezclas cumplían la mayoría de los parámetros de análisis realizados, exceptuando el punto de inflamación. Esta es una de las propiedades más importantes en el manejo del combustible ya que con este se pueden tomar medidas para evitar riesgos de incendio durante el almacenamiento.

El punto de inflamación en las mezclas continuó estando debajo del requerimiento mínimo del bunker, 60°C. Esto demuestra que el líquido de pirólisis de Polipropileno se vaporiza fácilmente y, por lo tanto, necesita una precaución adicional al manipularlo. Para corroborarlo, se realizó una evaluación experimental al comparar una tasa de evaporación respecto al tiempo del líquido pirolítico con cloroformo e isopropanol. Se colocaron muestras de 10 mL de todos los líquidos y se midió la pérdida de masa respecto al tiempo. El líquido de pirólisis presenta una tendencia de disminución conforme pasa el tiempo, similar al cloroformo.

Por último, para las pruebas adicionales realizadas a las mezclas se encontró que el contenido de cenizas era menor al límite permisible del bunker en ambos casos. Los remanentes en las muestras pueden

ser restos de colorantes de los empaques, ya que no se realizó ningún tratamiento para removerlos del material previo a su ingreso al reactor, o bien pueden ser trazas presentes en el reactor por su continuo uso.

Para el almacenamiento del líquido pirolítico se toman en cuenta: el tiempo de operación, volumen del líquido obtenido mensualmente, el requerimiento del líquido pirolítico para suplir bunker y las propiedades del líquido. La planta de pirólisis trabaja por lotes; 5 reacciones por semana y cada lote es de 2.3 toneladas de material de rechazo y residual. Para la determinación del volumen del líquido obtenido se toma el porcentaje de conversión utilizando sistemas de simulación que es de 73.46%. Para la demanda esperada se propone trabajar con una mezcla 90:10 ya que los parámetros están de la mezcla se acercan a los requerimientos necesarios con los que debe cumplir el bunker. Con la alimentación propuesta se tendría una producción de líquido pirolítico equivalente al 46.17% del bunker, 11,541.97 galones mensuales del consumo actual. Esto equivale a un 36.17% más de lo requerido para la mezcla propuesta a trabajar.

Para este proceso, se plantea un sistema donde el líquido que sale del condensador se dirige hacia un tanque receptor y al finalizar la operación se dirige hacia un segundo tanque de almacenamiento. Se sugirió esta distribución dado que la capacidad de producción supera a la cantidad requerida, por ello cierto volumen debe almacenarse para su comercialización o posterior uso. El diseño de ambos tanques de cumplen con los requerimientos de la norma UL - 142 que establece los parámetros de diseño para tanques de almacenamiento de hidrocarburos y líquidos inflamables. Además, la norma hace referencia a que la cimentación debe ser de piso fundido con losa de concreto reforzado de 0.1 m.

Debido a que en el análisis cromatográfico no se encontraron compuestos clorados o ácidos orgánicos que indicaran la necesidad de utilizar un acero más resistente a la corrosión, se propuso que el material de ambos tanques fuera SS 304 dado que entre sus propiedades cabe destacar la resistencia a corrosión que presenta, además de que es más económico que el SS 316.

El dimensionamiento del tanque horizontal se determinó a partir de producción de 577 galones de líquido pirolítico por lote. Por ser un volumen menor a 5,000 galones se consultaron las capacidades del Cuadro 5. Dimensiones para tanques horizontales pequeños según Underwriter Laboratories. Se tomó el volumen próximo al estimado que es de 1,000 gal; equivalente a 3.785 m^3. Aunque la capacidad del tanque es mayor a la requerida, se eligió dicho tanque ya que se determinó que se contaría con un "headspace"; esto es recomendable ya que, por la volatilidad del líquido, la norma UL 142 sugiere un mínimo de 15%. Además, el sobredimensionamiento del tanque permite que este pueda utilizarse como un tanque de emergencia por alguna eventualidad con el tanque de almacenamiento. Las características del tanque se presentan en Cuadro 48; el diámetro de 1.22 m y largo de 3.25 m. Cuenta con 2 soportes en la base para fijar el tanque, su peso vacío es de 572.73 kg y el espesor del tanque es de 0.48 cm.

Mensualmente se obtienen 11,542 galones de líquido de pirólisis, mientras que se requieren 2,500 para suplir el 10% de consumo de bunker, por mes se tendrían que almacenar 9,042 galones; 34.22 m^3. Tomando de base las capacidades descritas en el Cuadro 4. Dimensiones para tanques horizontales o verticales según Underwriter Laboratories, se determinó que el tanque vertical recomendado para almacenar la producción sería uno de 10,000 gal; equivalente a 37.85 m^3. El tanque propuesto permitiría tener un

“headspace” de 10%, adecuado según lo indicado en Wallas para el volumen que se maneja en el tanque. En Cuadro 49 se presenta las especificaciones de dicho tanque; las dimensiones de este son: diámetro de 2.44 m y largo de 8.10 m. Cuenta con dos soportes en la base para fijar el tanque, su peso vacío es de 4,027 kg y el espesor del tanque es de 0.64 cm. Para la medición de nivel de combustible en el tanque se propone un sensor ultrasónico U500.DA0.2-IA1B.72F que permite determinar el nivel del tanque hasta 1 m del llenado.

Cada tanque cuenta con aberturas normales y de emergencia para la ventilación para prevenir la presurización. Las aberturas de ventilación se encuentran en la parte superior de los tanques; estas son de 0.10 m. Ambos tanques cuentan con un “manhole”, con una cubierta construida para elevarse bajo presión interna de modo que la presión en el tanque no pueda exceder una presión manométrica de 2.5 psig (17.2 kPa), este puede servir para ventilación de emergencia. El del tanque vertical es de un diámetro de 0.60 m y el del tanque horizontal de 0.15 m Adicionalmente, los tanques cuentan con fosas de 1 m de profundidad para emergencias de derrames por fallo en las estructuras o limpieza de los tanques

Los tanques están distanciados entre ellos 23 m, esto según lo establecido por la norma NFPA 30 para la ubicación de tanques de almacenamiento en superficie que almacenan líquidos inflamables. Adicionalmente, considerando un sistema de seguridad contra incendios y siguiendo lo establecido en la norma NFPA 11 todos los tanques atmosféricos deben protegerse con sistemas externos o internos, fijos y/o semifijos de suministro de espuma física para extinción de incendios. Estos sistemas utilizan los mecanismos de sofocación, separación o aislamiento, enfriamiento e inhibición. Por las indicaciones de la norma debido a que es un fuego de clase B (fuegos que se producen en líquidos combustibles o inflamables), se aplicará una espuma física de baja expansión en inyección superficial en el tanque siniestrado. Adicionalmente, todas las conexiones de los sensores y de las bombas utilizados son instalaciones eléctricas especiales a prueba de explosión.

Para finalizar, dado que el líquido es viscoso y presenta características similares a las del diésel se propone el uso de bombas de desplazamiento positivo; específicamente de tornillo. Estas son comúnmente utilizadas en la industria petrolera por su amplio rango de viscosidades y velocidades de operación. Para un caudal de 2.18 m^3/h se sugiere la bomba cuyas especificaciones se listan en el Cuadro 50. Esta se ajusta al caudal calculado, cumple con el rango de viscosidad del líquido pirolítico y es ampliamente usada para el transporte de combustibles. Adicionalmente se determinó la caída de presión a partir de: el largo de tubería, los accesorios presentes que consisten en válvulas de compuertas ya que solo deben permitir o no el paso del líquido, cheques de unión, codos de 45°, filtro de combustible y uniones de T de la tubería a la bomba; el resultado fue de 39 kPa, el cual esta dentro del rango de trabajo de la bomba.

F. PRODUCTO SÓLIDO

Para obtener el producto sólido de pirólisis, conocido como char, se utilizó un reactor a escala laboratorio trabajando a 475°C y empleando 60.00 g de material de empaque de polipropileno biorientado, obteniendo en promedio 5.41 g de char por cada prueba (Cuadro 218) con una desviación estándar de 0.44.

Según la investigación realizada, el char posee características que permiten que sea utilizado como enmienda agrícola o mejorador de suelos. Para determinar esto fue necesario realizar un análisis de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP) para abonos orgánicos, el cuál permite obtener los parámetros de pH, relación C/N, porcentaje de cenizas, materia orgánica, carbono orgánico y presencia de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio azufre, boro, cobre, hierro, manganeso y zinc, siendo todos estos componentes que tienen un efecto positivo sobre la fertilidad de los suelos, mejorando sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Este análisis fue realizado por un laboratorio externo y los resultados obtenidos fueron comparados con características de otros productos utilizados como mejoradores de suelos.

En el Cuadro 53 se muestra la comparación realizada con una enmienda agrícola comercial marca FERTICONSA, se puede observar que el único parámetro que cumple con el rango de aceptación para esta enmienda es el contenido de cenizas, el cual está presente en un 36.00 % m/m en el char de pirólisis. Esta cantidad de cenizas pueden beneficiar la estructura microbiana del suelo, favorecer la retención de agua e incrementar la disponibilidad de nutrientes. En el mismo cuadro se muestra la variación porcentual de los resultados obtenidos para el char respecto al valor más cercano dentro de los rangos de aceptación de la enmienda. Según estos resultados, los parámetros más cercanos al rango de aceptación son el pH, relación C/N y contenido de materia orgánica, presentando valores mayores a los reportados para la enmienda con variaciones de 14.00%, 25.81%, 6.67%. Además, se observa que el contenido de nitrógeno se encuentra por debajo del menor rango en un -25.00%.

En el Cuadro 54 se muestran los resultados del char comparados con las características de una enmienda orgánica tipo bocashi, en este caso la menor variación se obtuvo para el pH, siendo este 5.17% mayor al valor reportado para el pH. En cuanto al contenido de nitrógeno, se puede observar que el resultado obtenido para el char tiene una variación de -6.25%, ya que esta se encuentra por debajo del valor reportado. Por último, se muestra en el Cuadro 55, la comparación realizada con 3 tipos de estiércol; de vaca, oveja y gallina, los cuales son productos de alto contenido de materia orgánica. Se puede observar que el pH del char y el del estiércol ovino varían en un 0.47%, en un 8.23% respecto al valor presentado para la gallinaza, el cual es el abono orgánico más utilizado en Guatemala, y en un 9.62% para el estiércol vacuno. En cuanto al contenido de materia orgánica, la gallinaza es el tipo de enmienda que posee el valor más elevado, teniendo una variación de 10.34% en relación con el valor reportado para el char.

En las Figuras 48 y 49 se presentan de forma gráfica los resultados obtenidos para el pH, la relación C/N, el contenido de materia orgánica y el contenido de carbono orgánico, siendo estos los parámetros más representativos para el char de pirólisis. En la Figura 48 se observa que el char posee una relación C/N mayor a el resto de abonos, lo cual es beneficioso debido a que esta relación indica una prevalencia del contenido de carbono, según (Thompson,1988) para que haya crecimiento microbiano se necesita que la relación se encuentre entre 20 y 30, ya que esto fomenta la conversión de la materia orgánica en humus, el cual ayuda a desintoxicar el suelo de metales en exceso. En cuanto al pH, se observa que el valor más alto es presentado para el char, sin embargo, la variación respecto a los valores reportados para el bocashi y el estiércol ovino son menores al 5.20%, siendo estos regeneradores de suelo de uso común. Tener un pH fuertemente alcalino

puede ser beneficioso para los suelos afectados por acidificación, disminuyendo la toxicidad por la presencia de aluminio en los suelos, el cual es más soluble a pH bajo.

En la Figura 49 se observa que el char posee el contenido de materia orgánica más alto en comparación a el resto de abonos, siendo este de 64.00% m/m. Este elevado contenido de materia orgánica puede ser beneficioso para suelos maltratados y erosionados. De acuerdo con el contenido de carbono orgánico, se presenta un valor de 35.56% m/m para el char, superando al contenido presente en el estiércol vacuno y ovino, este parámetro beneficia a los suelos evitando el crecimiento de enfermedades y aumentando la diversidad biológica. En la Figura 50 se presenta gráficamente el contenido de los elementos mayores en los abonos, los cuales son nitrógeno, fósforo y potasio. De estos elementos, el que se encuentra en mayor cantidad en el char es el nitrógeno, siendo este un 1.35% m/m del total del sólido, el cual se acerca en un 5.17% al valor reportado para el bocashi. Sin embargo, se puede observar en la gráfica que los resultados obtenidos para el fósforo y potasio son muy bajos comparados con los otros abonos y mejoradores de suelo, por lo que no se consideran representativos en el char. No obstante, los mejoradores de suelo pueden ser empleados solos o en combinación con otros abonos o fertilizantes, por lo que se podría emplear junto con una enmienda que permita fortificar estos elementos para que se logren proporcionar más nutrientes al suelo.

Además, se realizó un análisis de determinación de aluminio por acidez intercambiable para determinar la presencia de aluminio en el char, debido a que el material utilizado como materia prima se encuentra laminado. Los resultados obtenidos para esta prueba se muestran en el Cuadro 225, se observa que el contenido de aluminio es de 2.70 ppm, lo cual no representa un riesgo de toxicidad para los suelos.

El uso de mejoradores de suelos es indispensable para mantener el suelo saludable y fértil y de esta forma mejorar la productividad de las plantaciones, ya que estos permiten mejorar propiedades de los suelos como porosidad, estabilidad estructural, capacidad de intercambio catiónico y fomentan la biodiversidad. Debido a que por cada prueba de pirólisis realizada a escala laboratorio, se obtenían aproximadamente 5 gramos (Cuadro 218), únicamente fue posible realizar una prueba de análisis de abonos orgánicos y se requiere realizar al menos 5 pruebas de este mismo análisis para validar la exactitud de los resultados obtenidos. Las pruebas realizadas a nivel laboratorio son solo un indicio del potencial que puede tener este material, es necesario realizar pruebas en diferentes tipos de suelos y en combinación con otros abonos para evaluar si se obtiene el funcionamiento adecuado y determinar la viabilidad del uso del char como enmienda o mejorador de suelos.

Además del posible uso como mejorador de suelos, el char obtenido de pirólisis posee características de interés energético, para esto fue necesario realizar pruebas de calorimetría para obtener el poder calorífico del char, realizadas. Los resultados de estas pruebas se encuentran en el Cuadro 220 en la sección de anexos, se obtuvo un poder calorífico promedio de 21.86 MJ/kg con una desviación estándar de 1.58. En el Cuadro 56 se muestra una comparación de este dato con el poder calorífico de seis diferentes combustibles sólidos. Se puede observar en la Figura 51 que el char posee un poder calorífico mayor al bagazo de caña (13.18 MJ/kg) y a la madera seca (19.0 MJ/kg); además se encuentra por debajo del poder calorífico del carbón mineral (23.97 MJ/kg) en un 8.80% y en un 18.71% al coque de carbón (26.89 MJ/kg).

Otra de las características del char es que posee un bajo contenido de azufre (Cuadro 54), siendo beneficioso porque disminuye la cantidad de contaminación por dióxido de azufre al ser utilizado en la generación de energía. Así mismo, se deben tener en consideración otras características como el porcentaje de cenizas, la granulometría y humedad para valorar el uso de este material como combustible, estas se muestran en el Cuadro 57. A pesar de tener un poder calorífico lo suficientemente alto para sustituir el uso de otros combustibles comerciales, el char de pirolisis posee un contenido de cenizas del 36.00%, el cual supera la cantidad de ceniza presente en los otros combustibles sólidos, como se muestra en el Cuadro 57, por lo que no es conveniente para la combustión.

Además, según el valor obtenido, el poder calorífico del polipropileno biorientado empleado como materia prima es de 42.67 MJ/kg, el cual es mayor al poder calorífico del char, lo cual indica que la materia disminuye su poder calorífico luego de ser pirolizado, haciendo no muy atractivo el uso del char para la generación de energía. Asimismo, otro problema para su uso como combustible es que la cantidad de char producido por cada reacción de pirólisis no le permite competir con el resto de los combustibles sólidos, teniendo una producción de 273.24 kg de char a escala planta piloto, ya que las industrias que requieren de este tipo de combustible para sus calderas, como los ingenios y generadores de energía, lo emplean en cantidades muy elevadas y teniendo un rendimiento para el char de 11.88% m/m (Cuadro 229) no se lograría cubrir su demanda.

Otra alternativa para el uso del char es ser utilizado como sustituto de leña en el uso doméstico en forma de briquetas, ya que un alto porcentaje de la población emplea leña como fuente de energía. Sin embargo, este posee un olor fuerte y desagradable, por lo que sería necesario evaluar si al utilizarlo como carbón en una casa, este no tenga un efecto negativo en los alimentos o el consumidor para determinar si puede ser un buen sustituto de la leña o el carbón vegetal.

Para el escalamiento del proceso de pirólisis a una planta industrial, se utilizó un rendimiento de 11.88 % m/m para el char (Cuadro 229) el cual se obtuvo empleando un reactor con una capacidad de 2,300 kg de material y con una producción de 5 lotes semanales. Utilizando estos valores, se calculó una producción 273.24 kg de char por cada lote y 1366.20 kg de char semanal. (Cuadro 229). Se partió de este último dato para proponer un sistema de almacenamiento para el char. Las características del material empleadas para realizar el cálculo del almacenamiento se presentan en el Cuadro 224. Para esto fue necesario calcular la granulometría del material empleando un tamizador, el análisis granulométrico se muestra en el Cuadro 226, donde se puede observar que no existe un número de malla donde se detenga el 80% del material, esto es debido a que en las pruebas de laboratorio se producen aproximadamente 5.41 g de char, y a pesar de que se utilizó el producto de varias pruebas para realizar el análisis, la muestra no es representativa porque se necesitan mínimo 250 gramos para obtener la granulometría correcta. Sin embargo, se observa que el mayor pocentaje retenido fue el 32.52% en la malla número 20, representando un tamaño de partícula de 0.85 mm. Se recomienda realizar más pruebas de tamizado con la cantidad de muestra mínima para que los datos sean representativos y se puedan validar.

También se realizaron pruebas de la humedad del char, presentadas en el Cuadro 219, pruebas de densidad aparente y densidad compactada del char, las cuales se muestran en el Cuadro 227 y el ángulo de reposo y ángulo de deslizamiento, presentados en el Cuadro 228. Conociendo estas características del sólido y partiendo de la cantidad producida por semana, se propuso un silo como almacenamiento del char; ya que este facilita la carga y descarga de material y ofrece la facilidad de mantener condiciones de almacenaje óptimas para el material, controlando la humedad del mismo. Por otro lado, una de las ventajas que posee un silo frente a una bodega de almacenamiento, es que requiere de menos superficie, lo cuál es importante si no se dispone de terreno libre y además tiene un menor coste de montaje.

Se calculó el volumen de material por medio de la densidad compactada, ya que esta permite conocer cuánto material compactado se contendrá dentro del silo de almacenamiento. Se propuso un silo de techo cónico de acero al carbono, debido a que este es el tipo acero más común utilizado en la industria, es de bajo costo y el char no requiere de protección contra la corrosión. Las especificaciones del silo propuesto se muestran en el Cuadro 59, siendo la altura total de 5.14 m, con un diámetro de 1.75 m, para una volumen de material de 8.39 m^3, siendo suficiente para almacenar la cantidad de 1366.20 kg de char producidos por semana. Se utilizó un ángulo de 53.53° para el cálculo de la tolva, siendo este 10° mayor al ángulo de reposo del material para que este permita su descarga. Las tolva posee las siguientes dimensiones: altura de 0.91 m y diámetro de salida de 0.40 m. Se calculó un sobrediseño del 20% en la altura del cilindro, el cual es representado como un techo cónico, este tiene una altura de 0.70 m como se muestra en la Figura 55.

Por otra parte, para el transporte del char, se propuso utilizar una banda transportadora en montaje plano y un elevador de cangilones, en el Cuadro 10 se muestran las especificaciones para la banda transportadora, esta tiene un ancho de 40 cm, espesor de 4 mm, posee rodillos inclinados 30° para evitar la pérdida de material, este esquema se muestra en la Figura 52. El largo de la banda es de 10 m, lo cual cumple la norma NFPA 230 que establece la distancia a la cual deben almacenarse los materiales para la protección contra el fuego. El flujo másico para el transporte de material en la banda es de 0.72 kg/s y la velocidad de la banda es de 1 m/s. La banda tiene una cubierta de acero galvanizado para evitar la pérdida de material, esta se muestra en la Figura 37. Las especificaciones para el elevador de cangilones se muestran en el Cuadro 61 este tiene una altura de 7m, con cangilones de acero al carbono de dimensiones 20 x 60 cm, capacidad de 0.01 m^3 y una velocidad de 1 m/s para transportar un flujo de 2.77 kg/s de char.

Al ser un proceso por lotes, la cantidad de char obtenida por cada lote será transportada al finalizar la reacción, para la descarga del material de reactor se propone un sistema manual con paletas, sacando el material por la compuerta del reactor. Se escogió una banda transportadora ya que esta permite transportar materiales a largas distancias y tienen un bajo costo a comparación de otros transportadores, se seleccionó un elevador de cangilones debido a que se requiere elevar el material 5.14 m para alimentar el silo y otros tipos de transporte solo permiten la inclinación en ángulos de 20° o 30°, lo cual requeriría altas distancias del transporte para alcanzar esta altura.

Para la descarga del silo se propone utilizar una válvula dosificadora de estrella, ya que estas se emplean como dosificadores en la descarga continua de productos granulosos o polvos procedentes de silos, las especificaciones de esta se muestran en el Cuadro 62.

Además se propone incluir activadores de flujo para facilitar la descarga del silo, un sistema de control de humedad y temperatura para que el producto se mantenga en las mejores condiciones y sistemas de control de nivel, tanto en la parte superior como en la parte inferior del silo. En este caso se propuso únicamente un silo para el almacenamiento semanal, en caso de que se llegue a necesitar más capacidad de almacenamiento, se puede emplear el mismo cálculo para utilizar silos con las mismas dimensiones. Considerando el rendimiento del char y las comparaciones realizadas, la mejor propuesta para su aplicación es su uso como mejorador de suelos, a pesar de que se necesitaría realizar un estudio a fondo sobre la aplicación del char en diferentes tipos de suelos para corroborar la viabilidad de esta propuesta y comprobar que este no presenta un riesgo en los suelos.

G. ANÁLISIS ECONÓMICO

El primer objetivo específico era proponer la comercialización de los productos líquidos, sólidos o gaseosos de la pirólisis al precio competitivo del mercado o la implementación de su reutilización dentro de la empresa con el fin de generar ganancias. Debido a esto, se determinó información sobre los compuestos que forman parte de estos productos.

Según la información proporcionada, el producto gaseoso está conformado principalmente por propileno. También se encontró otro grupo de gases que el equipo utilizado para el análisis clasificó como "otros" debido a que la composición de cada uno es menor al 1% de la mezcla total, 35.15% de la mezcla, por lo que no se tomaron en cuenta para la investigación. Se encontró el propileno en un 64.85% de la mezcla gaseosa, el cual es parte importante en la producción de plásticos, pues forma parte de la síntesis para la formación de polipropileno, y en la industria textil forma parte de las fibras que constituyen las prendas. Se encontró el precio del propileno a nivel mundial, brindado por ICIS, es de $1.056 por 1 kilogramo de producto a una pureza del 95%. La comercialización del producto gaseoso es viable únicamente a través de la separación y venta del propileno. Será separado de la mezcla y purificado a través de una de fibra hueca y una membrana especial para propileno, con un costo de Q263,500.00 de la inversión inicial, obteniéndose a un 95% de pureza, con la cual, la venta del producto es factible al precio indicado por ICIS. Los demás gases de la mezcla no serán comercializados porque estos conllevarían un gran aumento en la inversión inicial, puesto que, al igual que el propileno, requerirían de membranas especiales para su separación y torres de destilación para llevarlos a una pureza similar a la presentada por los proveedores. Sin embargo, estos gases de descarte serán recirculados a la planta de pirólisis, específicamente al proceso de separación debido a que aún poseen un bajo porcentaje de propileno, por lo que debe ser purificado, y posterior a la primera recirculación, llegarán al tanque de almacenamiento utilizando un compresor como transporte, adicional a los equipos propuestos, teniendo un costo adicional de Q46,500. En el tanque de almacenamiento será almacenado durante un mes y después se utilizará en las operaciones de la planta principal de la empresa de alimentos

En el caso del producto sólido, este está conformado por varios compuestos, tales como el nitrógeno, fosforo, calcio, magnesio, azufre, entre otros. Con estos datos y la investigación realizada, se tiene la posibilidad de definir el uso del producto sólido como un mejorador de suelos, sustancia que tiene como finalidad la mejora estructural del suelo a través de la adición de aire, humedad y nutrientes al mismo. Se pueden encontrar más detalles sobre este tema en la sección Componentes Principales Encontrados en el Producto Sólido del marco teórico. En Guatemala existen empresas que proporcionan el servicio de venta de mejoradores de suelo, y el método de venta es a través de quintales. Algunas ventajas que presenta el producto sólido es el alto contenido de materia orgánica, formada por restos vegetales y animales que al descomponerse se convierten en macro y micronutrientes, y de carbono orgánico, en su composición. En cambio, algunas desventajas es la alta relación C/N (carbono/nitrógeno), pues representa un exceso de carbono y energía en los suelos, y los bajos niveles en %m/m de calcio, potasio y fósforo. Se puede observar en la Cuadro 67 que el costo de un quintal varía entre Q53.50 a Q65.00. Con la información previa, se definió la venta de este como un mejorador de suelos, representando un costo de producción anual de Q9,987.84 y será almacenado en un silo de 5 metros de altura. Debido a la cantidad de producto sólido producido, será distribuido en 6 sacos de 1 quintal, correspondiente a 45.35 kilogramos, y ordenado en tarimas de 1.1 m x 1.2 m aproximadamente, proceso que se realizará una vez al mes. Esto se determinó debido a la composición que fue encontrada a través de los análisis de laboratorio realizados. Cabe mencionar que ningún mejorador de suelos tiene las mismas composiciones en cuanto a los parámetros evaluados, puesto que cada uno tiene una función especial para el suelo. Debido a esto, se recomienda realizar más pruebas sobre el comportamiento del producto sólido en suelos con diferentes características, con el fin de determinar qué tipo de suelo es el adecuado para su utilización, de manera que se delimite el mercado al cual se le puede ofrecer el producto. También se recomienda elevar el porcentaje de compuestos químicos de la composición del sólido, con el fin que se asemeje a los otros mejoradores de suelos con los que fue comparado en el *Cuadro* 238.

Por último, en el caso del producto líquido, el único compuesto que es posible utilizar de los encontrados en los análisis es el 3-penten-2-eno. La única función que se le puede dar a este compuesto es como saborizante para diferentes alimentos, tal y como lo indica el *Cuadro 63*. Su rango de precio de venta se encuentra desde $42.03 hasta $50.47, según el país de origen, distribuidor, pureza y cantidad. Los otros dos compuestos encontrados en el análisis fueron el 2,4-dimetil-1-hepteno y el 2,3,7-trimetil-4-octeno, a los cuales se pudo determinar únicamente algunas propiedades fisicoquímicas como el peso molecular y su fórmula química debido que no se encontró información disponible en literatura y en textos en línea sobre utilización en la industria y precios de mercado. Este no será comercializado, pues existe la posibilidad de ser reutilizado en diferentes procesos de las operaciones generales de la planta principal de la empresa debido a su poder calorífico de 45.024 MJ/kg, similar al del bunker y tiene una composición del 68.48% del total de los productos de la pirólisis, que representa 11,459 galones al mes. Sin embargo, para su reutilización, debe ser mezclado con bunker en una proporción de 90% bunker – 10% líquido, debido a que, es la proporción que mejor se ajusta a los parámetros del bunker. Una ventaja de realizar esta mezcla es que el equipo lo puede utilizar sin la realización de alguna adaptación al sistema, gracias a que el producto líquido cumple con los

límites permisibles del bunker. Con esta proporción, la empresa tendrá un ahorro en el gasto de combustible anual de Q213,842.00, como se puede observar en el *Cuadro 248* en la sección de anexos. Sin embargo, al producirse 11,459 galones mensuales del producto líquido y debido a la proporción del 90% - 10% con bunker, se recircularán únicamente 1145.49 galones mensuales a la planta, siendo el resto almacenado en un tanque de 10,000 galones. Se recomienda evaluar la venta de este excedente por el volumen que ocupa dentro de la planta, y a través de estudios posteriores, evaluar su purificación y adaptación a una mezcla más efectiva de bunker – líquido, para poder acercarse más al objetivo de reducir el consumo del 30% de bunker de la empresa en los procesos de las operaciones generales.

El segundo objetivo específico fue la obtención de cotizaciones de los equipos, material de construcción para la obra gris, entre otros, necesarios para la implementación y puesta en marcha de la planta de pirólisis propuesta, ubicada dentro de las instalaciones actuales de la planta en un espacio determinado. Para ello, y tomando en cuenta la necesidad de la empresa por tratar 46 toneladas de material por lote, se cotizaron dos propuestas para la implementación de la planta de pirólisis, brindadas a través de dos cotizaciones de diferentes proveedores. En la primera, dada por "Henan Lingfine Machinery Co., Ltd" la inversión inicial es de Q2,211,611.27, que está compuesta por todos los equipos necesarios para el montaje de la planta (precio de envío CIF) y equipos necesario para el transporte, almacenamiento y purificación de los productos (la purificación únicamente aplica para el propileno del producto gaseoso) (ver detalle en Resultados, apartado J). Para la segunda cotización, proporcionada por "Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co., Ltd", la inversión inicial fue de Q2,334,836.27, compuesta por todos los equipos necesario para el montaje de la planta, a un precio de envío CIF. Se tomaron los mismos equipos para el transporte, almacenamiento y purificación de los productos; sin embargo, el aumento se da en el costo de la planta total, puesto que el costo en esta propuesta es de Q333,250.00, que incluye una planta de purificación de aceite, la cual no es necesaria para la empresa, puesto que no se purificará el producto líquido, en cambio, un 10% será reutilizado en diferentes procesos de la planta general de la empresa. En cambio, la primer propuesta tiene un costo de Q177,475.00 que no incluye esta planta de purificación. En el caso de la obra gris, ambas plantas propuestas ocupan el mismo espacio, por lo que el metraje de construcción total es de 690.82 m2, con el suelo donde estarán colocados los equipos acabado en concreto. El área está abierta a la intemperie de los lados pero estará cubierta por láminas acrílicas, a 4 metros del suelo, con agujeros de salida para el silo y el tanque de almacenamiento del producto líquido, soportadas por costaneras y con canales de agua por condiciones climáticas no controladas. La finalidad del laminado es brindar condiciones apropiadas de trabajo para los empleados. El costo estimado de construcción es de Q699,647.99.

Con el fin de darle una idea a la empresa sobre la distribución de los equipos y los ambientes necesarios para la planta, se propuso un plano de la planta de pirólisis para la propuesta "Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co., Ltd". Los equipos encargados del pretratamiento del material no están conectados debido a que estos serán llenados y vaciados de forma manual, y el material pretratado se introducirá al reactor manualmente. A la salida del reactor, el producto sólido será removido de este manualmente y será introducido en la banda transportadora que lo llevará al elevador de cangilones y por

último, será almacenado en el silo. En el caso de los productos líquido y gaseoso, estos serán transportados de forma mecánica desde el reactor hasta sus tanques de almacenamiento. Los equipos de almacenamiento del producto líquido se encuentran a un mínimo de 4 metros del reactor, esto debido a indicaciones de seguridad al tratar con productos combustibles, propuesto por el Ministerio de Energía y Minas (Minas, 2019b) en el Decreto Número 109-97 "Ley de Comercialización de Hidrocarburos" ubicadas en el artículo 43 y al Decreto Número 1335 de 1987 donde se indica los requerimientos mínimos de seguridad para el almacenamiento y posicionamiento de combustibles

Como tercer y último objetivo específico, se realizó un análisis de flujo de efectivo de acuerdo con la inversión inicial e implementación para una planta de pirólisis, utilizando como indicadores la tasa interna de retorno, el valor presente neto y la tasa mínima atractiva de retorno, proporcionada por la empresa, y el índice de conversión de productos de la pirólisis.

Se realizó un análisis simple de flujos de efectivo, con la finalidad de determinar la mejor opción entre la reutilización y venta de los productos de la pirólisis. Este consta con un flujo de efectivo que tiene como ingresos la venta del producto sólido y la venta del propileno separado y purificado de la mezcla gaseosa. Se tomó como supuesto lo siguiente: el precio de venta del propileno será el mismo al presentado por ICIS. Se asumieron dos operarios fijos para cada lote producido por la planta en base a las indicaciones provistas por los proveedores cotizados (Henan Lingfine Machinery Co., Ltd. y Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co., Ltd.), trabajando la planta 20 días al mes, así como un asistente administrativo que tendrá como función verificar los ingresos y egresos monetarios del proyecto, y un técnico de mantenimiento que supervisará el funcionamiento de los equipos en la planta. Los operarios se encargaran de llevar a cabo todo el proceso de pirólisis, y una vez al mes de llenar los sacos con el producto sólido para su posterior venta. Cabe mencionar que en el apartado de egresos, el salario de los operarios será el mínimo para actividades no agrícolas, tiene un aumento del 2% cada cuatro años, como lo informa el Ministerio de Trabajo, donde se demuestra que el aumento del salario mínimo en los últimos 15 años ha aumentado, estancándose en un aumento cada 2 años a partir del año 2015.

La realización del análisis de flujo de efectivo dejo los siguientes resultados : para la propuesta de "Henan Lingfine Machinery Co., Ltd", se obtuvo un valor neto actual (VAN) de Q. -6,372,581.07 y la Tasa Interna de Retorno no se pudo determinar debido a que el proyecto no presenta ganancias, únicamente pérdidas monetarias para la empresa. Para la propuesta de "Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co. Ltd", el valor neto actual (VAN) fue de Q. -6,720,411.72 y, al igual que para la primer propuesta, la tasa interna de retorno no se pudo determinar debido a que el proyecto presenta perdidas monetarias. Un factor que demuestra la no viabilidad económica de ambas propuestas es el resultado de la separación del propileno de la mezcla gaseosa, debido a la baja cantidad de propileno separado, siendo de 99.36 kg al mes. Se calculó que la empresa sería capaz de disminuir costos recirculando el producto líquido, en Q213,842.54 en el primer año de la inversión, utilizando una proporción 10% líquido – 90% bunker (Cuadro 33). Adicional a esto, la empresa ahorraría en la tercerización del tratamiento de los empaques plásticos en un total anual de Q162,932.67, debido a que el costo de tratamiento terciario es de Q3.50/ kg . A pesar del ahorro calculado al

primer año de la inversión, se obtuvo un costo efectivo total del primer año de -Q2,841,509.26, incluyendo los ahorros mencionados, las ganancias de la venta del propileno y del sólido, costos de operación y obra gris. Esto demuestra que para el primer año de inversión en el proyecto, este no es económicamente viable, ya que los gastos exceden las ganancias de la venta del propileno y el producto solido así como los ahorros en el tratamiento de los desechos. Esto se respalda con los valores calculados de la tasa interna de retorno para el primer año, los cuales son nulos y por ende, son menores al 12% de la tasa mínima atractiva de retorno impuesta por la empresa para la aceptación de un nuevo proyecto. Se calculó el costo efectivo del proyecto para 10 años, obteniendo valores negativos, y el valor de la tasa interna de retorno para 10 años, el cual fue nulo para cada año. Con base a esta información, se puede establecer que el proyecto no es económicamente viable no solo en el primer año sino a un periodo de 10 años de implementación.

Debido a que el valor actual neto de ambas propuestas de plantas de pirólisis fue negativo, se consideró el costo de tercerización de tratamiento de empaques de desecho producidos por la empresa a la que se le realizó el estudio (4 toneladas al mes, aproximadamente) y por las tres empresas hermanas que proporcionarán el resto de material para suplir la demanda de la empresa de alimentos (42 toneladas de material de empaque de desecho), que forman parte de la corporación. Para este costo fue calculado el valor actual neto, con el fin de verificar si era mayor o menor que el de ambas propuestas de implementación de planta de pirólisis. El valor actual neto de los costos de tercerización del material de empaque fue de Q.-8,951,849.92 para el tratamiento de las 46 toneladas de la corporación, siendo menor que el VAN de las propuestas de planta de pirólisis para la empresa de alimentos (Propuesta 1: Q.-4,152,629.30; Propuesta 2: Q.-4,486,348.34) . Al ser menor el VAN de la propuesta de la corporación en comparación con los de las propuestas de la empresa de alimentos, y a pesar de que el proyecto no sea económicamente viable solamente para la empresa de alimentos, se podría considerar que la implementación de la planta de pirólisis podría llegar a ser viable, ya que reduciría el costo de tratamiento de empaques de deshecho de la corporación.

IX. CONCLUSIONES

1. Las pruebas fisicoquímicas realizadas a la mezcla de material de empaque plástico residual y de rechazo en bobina dieron como resultados principales los siguientes valores: la densidad de partícula fue de 1.09kg/L, la densidad aireada fue de 0.025 kg/L, la densidad compacta fue de 0.034 kg/L, la densidad de trabajo fue de 0.02824 kg/L y el índice de compresibilidad fue de 36%.El porcentaje de humedad presente en el material de empaque fue de 1.04% y el porcentaje de grasa presente fue de 8.13%.
2. La temperatura de fusión del material fue de 220ºC y la densidad del material fundido a 25ºC fue de 0.451kg/L, lo cual de acuerdo al análisis termogravimétrico realizado, el proceso de extrusión propuesto no interviene en el rango de temperatura donde ocurre la pirólisis.
3. La proporción de material residual y material de rechazo en bobina seleccionada para el proceso de pirólisis fue de 90% y 10% respectivamente, de acuerdo a la tendencia mostrada en los registros de residuos de producción y desechos que se encuentran en la empresa alimenticia.
4. Se seleccionó un pretratamiento de extrusión debido a que la densidad del material fundido 0.451 kg/L es 16 veces mayor que la densidad de trabajo de 0.02824 kg/L del material sin pretratamiento alguno, lo cual permite que la pirólisis del material de empaque se realice en un reactor de menor volumen.
5. Se determinó el rendimiento del producto líquido, en un rango de temperatura final del sistema entre 415°C y 475°C a presión atmosférica, el cual aumentó conforme se incrementó la temperatura hasta obtener el valor más alto en la condición final de 475°C con un rendimiento de 87.12 ±3.236 % m/m.
6. Se determinó el rendimiento del producto sólido, en un rango de temperatura final del sistema entre 415°C y 475°C a presión atmosférica, el cual disminuyó conforme se aumentó la temperatura hasta obtener el valor más bajo en la condición final de 475°C con un rendimiento de 11.88 ±3.531 % m/m.
7. Se determinó el rendimiento del producto gaseoso, en un rango de temperatura final del sistema entre 415°C y 475°C a presión atmosférica, el cual aumentó conforme se incrementó la temperatura hasta obtener el valor más alto en la condición final de 475°C con un rendimiento de 0.98 ±0.06 % m/m.
8. El análisis termogravimétrico del material de empaque de polipropileno indica que la mayor pérdida de masa del material ocurre entre 400°C y 480°C, estableciendo así un posible intervalo de temperatura para que la reacción de descomposición térmica ocurra.
9. Utilizando la ecuación de Arrhenius para expresar el efecto de la temperatura en la velocidad de reacción y una relación potencial para el efecto de la masa de la mezcla reactiva, se propuso el siguiente modelo cinético para la reacción de pirólisis de polipropileno: $-\frac{dW_A}{dt} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT(t)}\right)(W_A - W_f)^n$.
10. En un rango de temperatura final del sistema entre 415°C y 475°C a presión atmosférica, los parámetros cinéticos promedio resultaron en $A=4.2567 * 10^{17}$ min^{-1}, $E_a=242.48$ kJ/mol y $n=0.53$.
11. El modelo correspondiente a la cinética evaluada a temperatura final de 415 °C presenta el ajuste más bajo con un R^2 de 0.9562 en el rango de temperaturas evaluadas, debido a que a menores temperaturas los compuestos volátiles que componen los productos líquidos y gaseosos son menos predecibles y cuantificables.

12. El modelo correspondiente a la cinética evaluada a temperatura final de 475 °C presenta el mejor ajuste con un R^2 de 0.9943 para la predicción del comportamiento de la reacción en el rango de temperaturas evaluadas.
13. La ecuación que representa la velocidad de producción del 2,4-Dimetil-1-hepteno de acuerdo con una constante de proporcionalidad promedio de las cinco curvas de calentamiento evaluadas es la siguiente: $\frac{dN_B}{dt} = -0.0015\ (\frac{mol}{g})\frac{dW_A}{dt}$.
14. La composición del producto gaseoso de pirólisis fue representada principalmente por 64.8469 % de propeno, 12.7532 % de 2-penteno y 6.8429 % de 2-metil-1-penteno.
15. La desviación de los resultados de composición del producto gaseoso se mantuvo en un rango del 26 al 35% respecto de los valores promedio. La composición fue variable aleatoriamente con lo cual no fue posible establecer una predicción para futuros productos gaseosos obtenidos por pirólisis de polipropileno metalizado a las mismas condiciones de operación de este estudio.
16. La composición del producto líquido de pirólisis fue representada principalmente por 37.6072 % de 2,4-dimetil-1-hepteno; 18.1296 % de 2,3,7-trimetil-4-octeno; 11.3530 % de 2,3,6,7-tetrametil-4-octeno; 10.3186 % de 2,3,5-trimetil-hexano y 7.4105 % de 2-metil-1-penteno.
17. La desviación de los resultados de composición del producto líquido se mantuvo en un rango del 2 al 12% respecto de los valores promedio, permitiendo estimar la composición de futuros productos líquidos obtenidos por pirólisis de polipropileno metalizado a las mismas condiciones de operación de este estudio.
18. Como propiedades físicas del producto líquido se obtuvo una densidad de 0.81060 ± 0.05288 g/mL y 0.77115 ± 0.05007 g/mL para las temperaturas de 15 y 25 °C respectivamente. También se obtuvo una viscosidad cinemática de 2.4 cSt a 40 °C y un poder calorífico de 45,086 J/g con desviación estándar de 333 J/g obtenido por el método de calorimetría a volumen constante. Por último, se clasificó el producto líquido como un crudo mediano con 25 grados API y líquido inflamable a 12 °C.
19. Como propiedades físicas del producto sólido se obtuvo una densidad aparente y densidad compactada de 107.44 ± kg/m3 y 162.83 ± kg/m3 respectivamente con una humedad de 5.78 % m/m. Se cuantificó un contenido de aluminio de 2.698 originado por la laminación metalizada del material de empaque de pirólisis. Se obtuvo un poder calorífico menor con un valor de 21,855 J/g y desviación estándar de 1581 J/g obtenido por el método de calorimetría a volumen constante.
20. Para realizar la simulación de pirólisis escala planta piloto se utilizó los rendimientos de 87.22 ± 3.35 %, 16.52± 4.01 % y 0.98± 0.53%, para plastic oil, char y syngas, respectivamente; 24.67 ± 1.58% de porcentaje de 2,4-dimetil-1-hepteno en la muestra y un flujo másico de 148.15 ± 47.58 de bunker para la determinación de la masa del lote.
21. Se estableció un tiempo de operación de 699 minutos para una temperatura de 475°C, con el modelo de transferencia de calor empleando los módulos de incineración, ventilador, intercambiador de calor, reactor y condensador del software SuperPro Designer para obtener 73.46 % m/m, 11.88 % m/m y 14.66 % m/m de rendimiento de plástico, char, y syngas, respectivamente.

22. En toda la literatura consultada con respecto a pirólisis de materiales de polipropileno, se encontró estudios donde se lleva a cabo la misma, pero no se contó con toda la información necesaria para alimentar el sistema utilizado de simuladores. De esta forma no se pudo comprobar la validez del proceso de escalamiento que realiza SuperPro Designer, como se había propuesto y se espera que los resultados obtenidos sean confiables.
23. Se empleó un sistema de simuladores para escalar la reacción de pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado, proponiendo las dimensiones del reactor cilíndrico horizontal semicontinuo de acero inoxidable de 4.977 m de largo, 1.04 m de diámetro, coeficiente de transferencia de calor de 1500 W/m^2K, presión de diseño de 1.520 bar, temperatura de operación 475 °C y calor trasferido de 1.117 kW-h/lote.
24. De acuerdo en el análisis fisicoquímico, el líquido de pirólisis de polipropileno no se clasifica como un combustible líquido por la prueba de punto de inflamación estipulado en el Acuerdo Ministerial 211-2017 de Nómina de productos petroleros con sus respectivas denominaciones. No obstante, se observó su potencial como combustible alternativo dado el valor del poder calorífico obtenido.
25. A partir del método de calorimetría a volumen constante se determinó el poder calorífico del líquido de pirólisis de plástico de polipropileno, el cual fue de 45.024 ± 0.198 MJ/kg.
26. Se realizó una comparación de las características fisicoquímicas del líquido obtenido de la pirólisis de polipropileno con tres combustibles industriales; estas presentaron valores similares a las del diésel, al estar dentro de los rangos reportados según el Acuerdo Ministerial 211-2017.
27. Los resultados de las pruebas realizadas para la caracterización fisicoquímica del líquido de pirólisis fueron: densidad, 779.1 kg/m^3, viscosidad cinemática, 2.4 cSt, y gravedad API, 25 y punto de inflamación 12°C.
28. El líquido de pirólisis se clasifica como un líquido inflamable ya que, según el código NFPA 30, al tener un punto de inflamación de 12°C, entra en dicha clasificación.
29. Al realizar una mezcla de líquido pirolítico con bunker en proporciones 90:10 se observaron propiedades semejantes del bunker puro de acuerdo al Acuerdo Ministerial 211-2017.
30. Para el almacenamiento del líquido de pirólisis se plantea un sistema de 2 tanques; uno horizontal de recepción del líquido y otro tanque vertical para el almacenamiento.
31. El dimensionamiento del tanque horizontal para volumen de 3.785 m^3 es de 1.22 m de diámetro y largo de 3.25 m.
32. Con la alimentación propuesta se tendría una sobreproducción de líquido pirolítico de 36.17% para cumplir con el requerimiento de la mezcla 90:10 bunker – líquido de pirólisis indicada, por ello se requiere almacenar 34.22 m^3.
33. El dimensionamiento del tanque vertical para volumen de 37.85 m^3 es de 2.44 m de diámetro y largo de 8.10 m, con un “headspace” de 10% por la volatilidad del líquido pirolítico.
34. Se propone un sistema de bombeo que consiste en utilizar bombas de desplazamiento positivo, específicamente de tornillo, por la viscosidad del líquido pirolítico.

35. El char obtenido de pirólisis posee propiedades parecidas a la enmienda agrícola FERTICONSA, ya que los valores para el pH, relación C/N, contenido de cenizas, nitrógeno y materia orgánica, no exceden al 26% de variación.
36. Los valores para las características de pH y contenido de materia orgánica del char son cercanos a los valores reportados para la gallinaza, con variaciones de 8% y 10% sobre los valores reportados.
37. El char podría utilizarse como mejorador de suelos acidificados porque posee un pH de 8.6 y un contenido de cenizas del 36.00% m/m, el cual podría disminuir la toxicidad por presencia de aluminio (neutralizando) y estimular la actividad bacteriana en la tierra.
38. El char tiene un poder calorífico de 21.86 MJ/kg, el cual es mayor en un 66% al poder calorífico reportado para el bagazo de caña y en un 15% al de la madera seca. No se considera su uso para la generación de energía debido al bajo rendimiento de producción de este en la reacción de pirólisis (11.88% m/m) y al alto contenido de cenizas (36.00% m/m), lo cual no beneficia la combustión.
39. Se propuso un silo de acero al carbono con techo cónico para el almacenamiento del char este cuenta con una capacidad de 1.37 t, volumen total de 10 m^3, sobredimensionamiento del 20 %, altura total de 5.14 m, diámetro del cuerpo cilíndrico de 1.75 m, con una tolva de 0.91 m de altura, 0.40 m de diámetro de salida y ángulo de inclinación de 53°.
40. Para el transporte del char se propuso una banda transportadora de PVC de 40 cm de ancho, 10 m de largo, con una estructura artesa de 3 rodillos en un ángulo de 30°, con velocidad de 1 m/s, capacidad de transporte de 2.60 t/h y flujo másico de 0.72 kg/s, con una cubierta de acero galvanizado de 76 cm de ancho.
41. Se propuso un elevador de cangilones de acero al carbón de 7 m de alto, con cangilones de 20 x 60 cm, con capacidad de 0.01 m^3, velocidad de 1 m/s y flujo másico de 2.77 kg/s para la alimentación del char al silo.
42. Se propone la comercialización del producto gaseoso únicamente a través de la separación y venta del propileno, debido a su composición en la mezcla gaseosa (64.85%) y a su precio de mercado de $1.045 por 1 kilogramo según ICIS. En el caso del producto sólido, es posible su comercialización únicamente de ser vendido como mejorador de suelos a un rango de precio de venta en el mercado local de Q53.50 a Q65.00 debido a los compuestos que lo conforman. Por último, el producto líquido tiene la posibilidad de ser reutilizado en la planta de alimentos en una proporción de 90% bunker – 10% líquido para ajustarse a los parámetros del bunker.
43. A partir de las cotizaciones realizadas, el costo de los equipos necesarios para la implementación y puesta en marcha de la planta de pirólisis de la Propuesta 1 fue de Q2,211,611.27, mientras que el costo de equipos para la Propuesta 2 fue de Q2,334,484.262. Además, el costo de obra gris para ambas propuestas fue de Q699,647.992, esto debido a que ambas plantas propuestas ocupan la misma área de trabajo.
44. Se demostró que la implementación de una planta de pirolisis no es económicamente viable en ninguna de las dos propuestas ni escenarios presentados en el análisis de sensibilidad de la venta de propileno. Para la Propuesta 1, el valor actual neto fue de Q.-6,372,581.07mientras que para la Propuesta 2, el valor

actual neto fue de Q.-6,720,411.72. En ambos, el valor de la TIR fue nulo en un periodo de 10 años debido a que los costos de operación superan los ingresos obtenidos de la venta de propileno al precio propuesto de $1.056 (ICIS) y del producto sólido, así como del ahorro por el tratamiento de desechos dentro de la planta.

45. Se realizó un análisis de VAN para la tercerización del tratamiento de la suma de empaques de deshecho de la empresa de alimentos y de las tres empresas hermanas, obteniendo un valor de Q.-8,951,849.92, menor al de ambas propuestas de pirólisis. Al ser menor este valor, indica que los gastos de la tercerización de los desechos son mayores que la implementación de la planta de pirólisis, por lo que se podría considerar implementar la planta para los desechos de la corporación, y no solamente para los de la empresa de alimentos.

X. RECOMENDACIONES

- Realizar y probar el proceso de pretratamiento sin retirar el mandril de la bobina para establecer si existen cambios significativos en las propiedades tales como la temperatura de fusión, la densidad y la degradación de materia dentro del extrusor.

- Realizar el proceso de pretratamiento en una planta piloto de 1kg para establecer si existen cambios significativos en las propiedades tales como la temperatura de fusión, la densidad y la degradación de materia dentro del extrusor.

- Se debe considerar la automatización de la alimentación al reactor para evitar atrasos en el tiempo de acondicionamiento de la mezcla del material de empaque residual y de rechazo en bobina.

- Realizar una caracterización específica de la cantidad de aluminio presente en el material BOPP de rechazo en bobina, para establecer las variables que pudiera provocar la presencia de este componente en el proceso de pirólisis.

- Utilizar bolsas Tedlar para la recolección de los gases no condensables de la reacción, para comparar la cuantificación del producto gaseoso con el método utilizado en este megaproyecto.

- Realizar modificaciones al reactor para agregar una termocupla que permita medir la temperatura dentro del reactor y estudiar la transferencia de calor en el sistema.

- Estudiar otro material de empaque con características similares, empleando el sistema a escala laboratorio y los métodos de determinación de cinética utilizados en este trabajo, para evaluar si se ajusta el modelo cinético propuesto.

- Estudiar el efecto en la cinética de la reacción de pirólisis de polipropileno metalizado a temperaturas diferentes del rango evaluado en este trabajo, para evaluar si existe un cambio en los parámetros cinéticos.

- Evaluar la pirólisis de polipropileno metalizado en una atmósfera inerte, usando gas nitrógeno u otro gas dentro del reactor, para evaluar su efecto en la cinética de reacción y en los rendimientos de los productos.

- Evaluar el efecto de la presión en la cinética de reacción y los rendimientos obtenidos de la pirólisis de polipropileno metalizado modificando la salida de gases del reactor para comparar su comportamiento.

- Realizar la reacción de pirólisis de polipropileno en otro tipo de reactor que aumente el contacto entre las fases sólida y gaseosa para comparar con los rendimientos y cinética obtenida en este trabajo. Para esto se propone un horno rotatorio, que es un tipo de reactor de lecho móvil, ya que eleva las velocidades de transferencia de calor y masa.

- Respecto al producto gaseoso, es recomendable complementar la metodología de toma de muestras utilizando bolsas tedlar las cuales no permiten la contaminación ni pérdidas de muestra.

- También, conociendo los principales compuestos y el porcentaje relativo de composición de estos, contar con estándares internos que permitan la cuantificación de los gases utilizando la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas.

- A partir de la cuantificación de los compuestos gaseosos, evaluar técnicas de separación de gases multicomponentes para la separación de propeno ya que este compuesto es punto de partida para la síntesis de polipropileno.

- Adicionalmente, considerar el análisis de calorimetría de gases para la determinación del poder calorífico con la finalidad de interés en su uso como combustible.

- Para el producto líquido, similar al producto gaseoso, tomar en cuenta los porcentajes relativos de composición y estándares internos que permitan la cuantificación de los productos mayoritarios o de interés utilizando la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas.

- También hay que considerar que el comportamiento del líquido a escala laboratorio se ve influenciado por pérdidas del producto en la superficie interna del reactor desde que se volatiliza hasta su condensamiento en el sistema de enfriamiento por disminución de temperatura y posibles fugas.

- Considerar estudiar el comportamiento reológico del producto líquido para la comparación del producto líquido respecto a fluidos newtonianos y no newtonianos.

- En el producto sólido se debe realizar un análisis de metales tomando en cuenta los metales presentes en las tintas del empaque de estudio ya que la cuantificación de metales permite obtener el valor másico esperado de producto.

- A partir de la cuantificación de metales, evaluar técnicas de separación que permitan recuperar el aluminio contenido en el producto sólido.

- Además, expandir el perfil de caracterización del producto con un análisis de elementos utilizando la técnica de espectrometría de masa con plasma acoplado inductivamente.

- Realizar la caracterización fisicoquímica de los productos obtenidos de la pirólisis a escala industrial y comparar la desviación en los resultados obtenidos con los parámetros presentados en este estudio para evaluar si se obtienen los mismos comportamientos en los tres productos.

- Determinar la cinética de otro compuesto mayoritario en el plastic oil y aplicarla en la metodología realizada para determinar si existe una variación significativa en el dimensionamiento del reactor escala planta piloto.

- Realizar un análisis termogravimétrico detallado para determinar el requerimiento calorífico y el efecto de la descomposición del material de empaque en el volumen y altura de este durante la reacción de pirólisis para incluir los valores en el simulador del proceso escala planta piloto. Además, es necesario revisar el comportamiento de los pellets propuestos en el megaproyecto, en un proceso de pirólisis para determinar si hay cambios en la composición de los productos y el comportamiento del proceso.

- Realizar el estudio de la cinética simultánea de los productos de la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado para incluirla en el sistema de ecuaciones del simulador y de esta forma incluir la variación de producción syngas y ajustar la transferencia de calor en el reactor.

- Ya que el sistema empleado para el trabajo fue escala laboratorio, se recomienda realizar una planta piloto previo al escalamiento industrial, con un mayor volumen de producción caracterizar completamente la mezcla de olefinas obtenidas de la reacción para completar la caracterización según requiere el Acuerdo Ministerial 211-2017.

- Determinar en qué porcentaje de mezcla con otro combustible, como bunker, es recomendable utilizar el líquido pirolítico para emplearlo como fuente de energía en otros equipos, asegurando que cumpla con los parámetros establecidos en el Acuerdo Ministerial 211-2017.

- Debido a la elevada producción de líquido de pirólisis, 36% arriba de lo requerido para realizar mezclas 90:10 con bunker, se sugiere realizar un estudio de mercado para patentar el líquido obtenido y así comercializarlo.

- Determinar la reología del líquido de pirólisis empleando un reómetro para clasificarlo como un fluido Newtoniano o No Newtoniano y así comparar con el método utilizado en este trabajo.

- Realizar un estudio económico para evaluar viabilidad de utilizar SS 316 en vez de SS 304 como material de los tanques.

- Realizar pruebas de tamizado al char, empleando 250 gramos de muestra para que los datos sean representativos y se puedan validar.

- Realizar más pruebas al char, para el análisis de abonos orgánicos y determinación de aluminio para validar la exactitud de los resultados obtenidos.

- Realizar análisis de metales pesados para determinar su presencia en el char.

- Realizar un análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier o cromatografía líquida de alta eficacia para estudiar la composición de la materia orgánica presente en el char.

- Realizar pruebas de la aplicación del char en diferentes tipos de suelos para determinar la viabilidad de su uso como mejorador de suelos y el alcance de sus beneficios.

- Utilizar el char en combinación con otros abonos que permitan fortificar la cantidad de fósforo y potasio en el suelo.

- Realizar pruebas de combustión en calderas empleando el char de pirólisis para verificar su comportamiento como combustible.
- Realizar un análisis de la dispensabilidad del char para evitar la dispersión del equipo al ambiente.

- Implementar en el silo un sistema de control de humedad y temperatura para mantener el almacenaje de material en óptimas condiciones.

- Implementar activadores de flujo en el silo para facilitar la descarga de material.

- Se recomienda evaluar la venta de excedente del producto líquido por el volumen que ocupa dentro de la planta, y a través de estudios posteriores, evaluar su purificación y adaptación a una mezcla más efectiva de bunker – líquido.

- Realizar más pruebas sobre el comportamiento del producto sólido en suelos con diferentes características, para poder determinar qué tipo de suelo es el adecuado para su utilización de manera que se delimite el mercado al cual se le puede ofrecer el producto.

- Reformular el producto solido por medio de la adición de compuestos químicos y reajuste de proporciones de estos, para que este tenga la posibilidad de ser utilizado como mejorador de suelos de uso en distintos suelos.

XI. BIBLIOGRAFÍA

4B Components Limited. (2019). *Componentes para elevadores de cangilones*.

Abbas-Abadi , M., Yeganeh , H., & McDonald, A. (2014). *Evaluation of pyrolysis process parameters onpolypropylene degradation products. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 272-277.

Achyut, K., Panda, R., Singh, D., & Mishra. (2010). *Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 233-248.

Agrocompost. (2019). *Fertilizantes Orgánicos.* Retrieved July 29, 2019, from https://ciudaddeguatemala.olx.com.gt/fertilizantes-organicos-iid-1043907797

Alonso, M. (2008). *Obtención de sólidos carbonosos mediante pirólisis de polietileno de baja densidad*. . Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid.

Al-Salem, S., Lettieri, P., & Baeyens,, J. (2010). *The Valorization of Plastic Solid Waste (PSW) by Primary to Quaternary Routes: From Re-use to Energy and Chemicals*. Prog Energ Combust 36, 103-129.

Amorós, J.L. *et al.* (2000). *Instituto de Tecnología Cerámica*. Universitat Jaume I. Castellón. España.

Anderson, D., Sweeney, D., & Williams, T. (2012). *Estadística para Negocios y Economía* (11 a. ed.). Cengage Learning.

Aranda, Alfonso; Ortego, Abel. 2011. *Energías Renovables: Integración de energías renovables en edificios.* España: Universidad de Zaragoza. 271 págs.

Arandes, J. M., Bilbao, J., & López Valerio, D. (2004). *Reciclado de residuos plásticos.* Revista Iberoamericanda de Polímeros, Volumen 5(1).

Argüello , W., & Cabezas , R. (2011). *Diseño y simulación de un tanque de techo fijo para almacenar petroleo de 3.000 bls de capacidad en la plataforma del pozo sacha 192, ubicada en la provincia de orellana*. Quito, Ecuador: Universidad politécnica salesiana.

Arteaga, Juan, *et. al.* 2012. «*Obtención de biocombustibles producto de la pirólisis rápida de residuos de palma africana»* Revista de Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial. 10 (2): 144 – 151.

Atkins, P., & De Paula, J. (2010). *Physycal Chemistry* (9 na ed.). Nueva York: W.H. Freeman and Company.

Austin, D. (1979). *Chemical Engineering Drawing Symbols*. The Builder Group.

Banco de Guatemala. (2019). Obtenido de Banco de Guatemala: http://www.banguat.gob.gt/inc/ver.asp?id=/estaeco/sr/sr005

Beaumont, O., & Schwob, Y. (1984). *Influence of Physical and Chemical Parameters on Wood Pyrolisis.* Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 23, 637-641.

Biotrash. (2019). *Procesos Ambientales Responsables*. Retrieved May 24, 2019, from http://www.biotrash.net/?fbclid=IwAR0p5O1rlTC3xjYBAb6QGeMoN7dpKNcO9Ydk3F8VXd7STV3YeWEXqJN_I4M

Bockhorn, H., Hornung, A., Hornung, U., & Jakobströer, P. (1998). *Modelling of isothermal and dynamic pyrolysis of plastics considering non-homogeneuos temperature distribution and detailed degradation mechanism*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 53-74.

Boslaugh, S. E. (2012). *Pyrolisis: Chemical Reaction.* Retrieved April 8, 2019, from https://www.britannica.com/science/pyrolysis

Bridgwater, A. (2008). *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*. United States of America: John Wiley & Sons.

Calhoun, A. (2010). *Multilayer Flexible Packaging; Plastics Design Library*. Kidlington: Elsevier Inc.

Callister, W. (1996). *Introducción a la ciencia de los materiales*. Volumen 2. Versión Ilustrada.

Camacho, A. (2010). *La madera como combustible*. Industria de la madera y corcho. AITIM.

Cano, I. (2015). *Medición estática detanques de almacenamiento*. 115. México: Universidad nacionalautonoma de mexico.

Canteros, F. E. (2014). *Estudio de la pirólisis catalítica de polietileno en un reactor sem-batch.* Santiago de Chile: Universidad de Chile.

Careaga, J. 1993. *Manejo y reciclaje de los residuos de envases y embalajes*. México: Instituto Nacional de Ecología. 159 págs.

Castañeda, L. (2008). *Empaques y medio ambiente: gestión de residuos sólidos*. Retrieved April 8, 2019, from http://sites.paginasamarillas.com/empaqueeditorial/docs/Empaques y medio ambiente.pdf

Castellanos, M., Imeri, L., Morfin, I., Méndez, P., Súchite, A., Maldonado, H., & Piedrasanta, M. (2017). *Estudio técnico y evaluación económica de la pirólisis de estípite de palma africana Deli x Avros a nivel laboratorio y su escalamiento.* Tesis de Licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala.

Castells, Xavier; Velo, Enric. 2012. *Tratamiento y valorización energética de residuos*. España: Díaz de Santos. 537 págs.

Cengel et al. (2011). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y Aplicaciones*. Ciudad de México: Mc Graw Hill.

ChemicalBook. (2019a). *2-Methyl-1-pentene*. Retrieved July 31, 2019, from https://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB9854260_EN.htm

ChemicalBook. (2019b). *2,3,7-Trimethyl-4-octene*. Retrieved October 11, 2019, from https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB82343046.htm

ChemicalBook. (2019c). *2,4-Dimethyl-1-heptene*. Retrieved October 11, 2019, from https://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB2404073_EN.htm
ChemicalBook. (2019d). *3-pentanone.*

ChemicalBook. (2019e). *3-penten-2-one*. Retrieved July 31, 2019, from https://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB4157470_EN.htm

ChemicalBook. (2019f). *Propylene*. Retrieved July 31, 2019, from https://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB3750579_EN.htm

Chiras, D. D. (1994). *Environmental Science: action for a sustainable future*. Redwood City, California: Benjamin Cummings.

Christian, Gary. 2009. *Química analítica*. México: McGraw-Hill. 858 págs.

Conesa, J. (1996). *Estudio de la pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados.* Tesis doctoral, Universidad de Alicante.

CORPOICA. (2015*). Producción de abonos orgánicos de buena calidad*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Centro de Investigación Palmira. Colombia.

Cortázar, M. (2014). *Estudio comparativo de tecnologías comerciales de valorización de residuos sólidos urbanos*. España: Euskal Herriko.

Crespo, Carlos. 2004. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Limusa. 650 págs.

Crespo, S. (2013). *Evaluación de la pirólisis térmica de residuos de polietileno proveniente de la producción debanano en un reactor batch*. Quito, Perú: Escuela Politécnica Nacional.

Czernik , S., & Bridgwater , A. (2004). *Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil.* Energy & Fuels, 2(18), 590-598.

Damanet, R. (2017). *Aluminio en el suelo.* Plan lechero Watts. Chile.

David Anderson, D. S. (2012). *Estadística para negocios y economía*. México D.F.: Cengage Learning Editores, S.A.

De la Fuente, David, *et. al*. 2006. *Organización de la producción en ingenierías*. España: Universidad de Oviedo. 253 págs.

De León, M. (2019). *Lombricompost (abono orgánico).* Retrieved September 29, 2019, from https://villacanales.olx.com.gt/lombricompost-abono-organico-iid-1063908297

Devesa, J. (1990). *Producción de Gases por Pirólisis de Cáscara de Almendra a Elevadas Temperaturas*. Alicante: Universidad de Alicante

Ding, F., Xiong, L., Luo, C., Zhang, H., & Chen, X. (2012). *Kinetic study of low-temperature conversion of plastic mixtures to value added products*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 94, 83-90.

DISMET. (2019). *Catálogo de componentes para bandas transportadoras*. Colombia Flow, S. (s.f.). Twinro - twin screw pumps. Recuperado el 23 de 10 de 2019, de http://www.spxflow.com/en/assets/pdf/plp-206-twinro-pty-us_tcm11-9619.pdf

Durán, L. (2007). *Caracterización química, física y biológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos.* Costa Rica.

Eco-Procesos. (2019). *Manejo Profesional de Desechos Industriales*. Retrieved May 24, 2019, from http://www.eco-reprocesos.com/#why-us

Ecotermo. (2019). *¿Quiénes somos?* Retrieved May 24, 2019, from http://www.ecotermo.com.gt/quienes-somos/

Everett E., A. (1991). *Administración de la producción y las operaciones: conceptos, modelos y funcionamiento*. Mexico DF: Pearson Educación.

FACMA. (2019). *Elevador de Cangilones*. Retrieved November 12, 2019, from https://www.agriexpo.online/es/prod/facma/product-175229-50225.html

FAO. (2010). *Evaluación de cosecha y seguridad alimentaria en Guatemala*. Organización de las Naciones Unidad para la Agricultura y la Alimentación. Obtenido en: http://www.fao.org/3/ak344s/ak344s00.htm

FAO. (2014). *Anuario estadístico de la alimentación y la agricultura en América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FERTICONSA. (2019). *Grupo FERTICONSA*. Obtenido de Enmiedas Agrícolas: https://www.grupo-paf.com/fertilizantes.

FEUM. (2016). *Densidad aparente y densidad compactada de polvos*. Obtenido en: https://www.farmacopea.org.mx/Repositorio/Documentos/258.pdf

Fondo de las Naciones Unidas para el Desarrollo de la Mujer (UNIFEM). 1998. *Técnicas de envasado y empaqu*e. Perú: ITDG. 49 págs.

Fristam. (s.f.). Fristam FKL *Bombas de desplazamiento positivo*.

Gao, F. (2010). *Pyrolys of Waste Plastics into Fuels. Canterbury: university of Canterbury*.

Gao, Z., Kaneko, T., Amasaki, I., & Nakada, M. (Diciembre de 2002). *A kinetic study of thermal degradation of polypropylene*. Polymer Degradation and Stability, 80, 269-274.

GraphPad. (2014). *GraphPad Curve Fitting Guide*. GraphPad Software Inc.

Gray, M., Corcoran, W., & Gavalas, G. (1985). *Pyrolisis of a Wood-Derived Material. Effects of Moisture and Ash Content*. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 24, 646-651.

Guajardo, G., & Andrade, N. (2005). *Contabilidad para no contadores*. México D.F.: Mc Graw Hill.

Harris, D. (2001). *Análisis Químico Cuantitativo* (2 a. ed.). Reverté, S.A.

ICIS. (2019). *Propylene* Europe. (February), 1–4.

IFA. (2002). *Los fertilizantes y su uso*. Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes.

IKA. 2018. *Instrucciones de manejo de calorímetro C 200*. Alemania: IKA. 32 págs.

Illanes, J. (2004). *Envases flexibles plásticos: Uso y aplicación en la industria alimentaria*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.

Illanes, J. (2004). *Envases flexibles plásticos: Uso y aplicación en la industria alimentaria*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.

Ind., U. (2019). *Separation Membranes.* Retrieved November 12, 2019, from https://www.ube.com/contents/en/chemical/separation/index.html

Industriales, C. (2019). *Bomba de Tornillo Nemo*. Retrieved November 12, 2019, from http://www.componentes.com.gt/producto-Bombas_Industriales-16-9

Ingham, J., Dunn, I., Heinzle, E., Prenosil, J., & Snape, J. (2007). *Chemical Engineering Dynamics: An Introduction to Modelling and Computer Simulation*. Weinheim: John Wiley & Sons.

Instituto Americano de cooperación en agricultura (IICA). 1988. *Manual de métodos analíticos de formulaciones de plaguicidas.* México. 192 págs.

Intelligen, I. (2017). *SuperPro Designer*. Recuperado el 18 de octubre de 2019, de http://www.intelligen.com/superpro_overview.html

IPPE. (2019a). *10,000 Gallon Tank.* Retrieved November 12, 2019, from http://www.ippe.com/Equipment/s/cl/gclid/CjwKCAiAzanuBRAZEiwA5yf4upWb3g-nWQZiFVHHnuGGqP5W6eFEmwiutJUNcoC6362GRDvIDdEsChoCB_IQAvD_BwE/Descr/vertical/StockDetails/233282

IPPE. (2019b). *1000 Gallon Tank.* Retrieved November 12, 2019, from http://www.ippe.com/Equipment/s/cl/gclid/CjwKCAiAzanuBRAZEiwA5yf4upWb3g-nWQZiFVHHnuGGqP5W6eFEmwiutJUNcoC6362GRDvIDdEsChoCB_IQAvD_BwE/Descr/horizontal/StockDetails/232097

IPPE. (2019c). *1000 Gallon Tank for Gas*. Retrieved November 12, 2019, from http://www.ippe.com/Equipment/Subcategory0/TANK/Subcategory1/CARBON STEEL/Subcategory2/PRESSURE/s/cl/Categories/All/StockDetails/229023

IPPE. (2019d). *5000 Gallon Tank for Gas*. Retrieved November 12, 2019, from http://www.ippe.com/Equipment/Subcategory0/TANK/Subcategory1/CARBON STEEL/Subcategory2/PRESSURE/s/cl/Categories/All/StockDetails/232179

IPPE. (2019e). *Centrifugal Compressor*. Retrieved November 12, 2019, from http://www.ippe.com/Equipment/Subcategory0/COMPRESSOR/Subcategory1/CENTRIFUGAL/s/cl/Categories/All/StockDetails/109465

IPPE. (2019f). *Conveyor Belt.* Retrieved November 12, 2019, from http://www.ippe.com/Equipment/Subcategory0/CONVEYOR/s/cl/Categories/All/StockDetails/208799

IPPE. (2019g). *Extruder with Blade.* Retrieved November 12, 2019, from http://www.ippe.com/Equipment/Subcategory0/EXTRUDER/s/cl/Categories/All/StockDetails/705278

IPPE. (2019h). *Heat Exchanger.* Retrieved November 12, 2019, from http://www.ippe.com/Equipment/Subcategory0/HEAT EXCHANGER/Subcategory1/SHELL TUBE - CARBON STEEL/s/cl/Categories/All/StockDetails/232130

Jafarinejad, S. (2017). *Petroleum Waste Treatment and Pollution Control*. Iran: Butterworth-Heinemann.

Jin, J. (2002). *Characteristics of LDPE Pyrolisis*. Korean Chemical engineering, 19(4), 658 - 662.
Johanson, J. R. (19769. Properties of solids. Chemical Engineering.

Kalpakjian, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*.

Korn, G. (2007). *Advanced Dynamic-State Simulation*. Nueva Jersey, Estados Unidos: John Wiley.

Kotler, P. (2003). *Fundamentos de marketing* (Sexta edic). Mexico DF: Pearson Educación.
Kuester, J. (1980). *Fluidized Bed Pyrolisis to Gases Containing Olefins*. Washington, D.D.: U.S. Government Printing Office.

Kumar, A. (2015). *Process Modelling and Simulation in Chemical, Biochemical and*. Florida, Estados Unidos: CRC Press - Taylor & Francis Group.

Larraín, José. (2017). *Relación entre estructura y reactividad en la pirólisis de plásticos: una comparación con polímeros naturales.* Universidad de Concepción. Chile.

LCEC. (2019a). *Positive Displacement Pump*. Retrieved November 12, 2019, from https://www.lcec.com/commerce/catalog/product.jsp;jsessionid=BE1C45DB7922E0FC121C513249E59D9B?product_id=89236

LCEC. (2019b). *Silo for Storage*. Retrieved November 12, 2019, from https://lcec.com/commerce/catalog/product.jsp?product_id=75502

Lease, T. J. (2008). *A silo design checklist*. WL Port-Land Systems, Inc.

Levenspiel, O. (2004). *Levenspiel: Ingeniería de las reacciones químicas*. Guadalajara, México: Editorial Limusa S.A. de C.V Macey, R., Oster, G., & Zahnley, T. (2009). *Berkeley Madonna User´s Guide.* Universidad de California.

MAGA. (2013). *Evaluación del programa de fertilizantes del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación*. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. Universidad Rafael Landivar.

Maldonado, H. (2017). *Simulación de pirólisis de estípite de palma africana Deli x AVROS empleando SuperPro Designer®* . Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.

Mancheno, Myriam. *et. al*. 2017. «*Análisis fisicoquímico de combustibles líquidos obtenidos en el proceso de pirólisis de caucho vulcanizado*». Revista de Ciencias de la Vida. Universidad Politécnica Salesiana. 26 (2): 106 – 118.
Martinez, R. (2016). *Plásticos alimentarios, ¿cuáles son seguros?* Bioeco: Actual. Obtenido de https://www.bioecoactual.com/2016/12/04/plasticos-alimentarios-cuales-son-seguros-por-raul-martinez/

McCabe, W; Smith, J. 2003. *Operaciones básicas de ingeniería química*. España: Reverté. 564 págs.

McCabe, W., Smith , J., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México: Mc Graw Hill.

Mendoza, N. (2012). *El uso de utensilios y materiales de plástico en la industria alimenticia*. IDEA FSI (Food Safety Innovation). Recuperado el 18 de 11 de 2018, de http://www.ideafoodsafetyinnovation.com/newsletters/2012/08/el-uso-de-utensilios-y-materiales-de-plastico-en-la-industria-alimenticia/.

Mete, M. (2014). *Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión.* Revista de Difusión Cultural y Científica de La Universidad La Salle En Bolivia, 7(7). Retrieved from http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2014000100006

Miandad, R., Barakat, M., & Aburiazaiza, A. (2016*). Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil*. International Biodeterioration & Biodegradatio, 30(10), 1-14.

Minas, M. de E. y. (2019a). *Almacenamiento y Manejo de Combustibles*. Retrieved November 17, 2019, from http://responsiblemines.org/centrodecapacitacion/descargables/Alamacenamiento_combustibles.pdf
Minas, M. de E. y. (2019b). *Decreto Número 109-97*. 1, 16. Retrieved from https://asisehace.gt/media/DECRETO 109-97.pdf

Miravete, A., & Larrodé, E. (2004). *Transportadores y elevadores*. Zaragoza: Editorial Reverté.

Moldoveanu, S. (2005). *Analytical Pyrolisis of Synthetic Organic Polymers*. Elsevier B.V.

Montoya, J. (2013). *Pirólisis rápida de de biomasa.* Universidad Nacional de Colombia.

Mott, R. 1996. *Mecánica de fluidos aplicada.* México: Pearson Educación. 580 págs.

Munson, T., & Spindler, R. (1961). *Transient thermal behaviour of decomposing materials: Part I General theory and application to convective heating.* Inglewood, California: United States Airforce.

NFPA. (2015). *NFPA 30: Código de Líquidos Inflamables y Combustibles*. 102. Estados Unidos: National Fire Protection Association.

NFPA. (2003). *NFPA 230. Standard for the fire protection of storage*. Estados Unidos.

Niessen, W. (1978). *Combustion and Incineration Processes*. New York: Marcel.

Nonhebel, G. (1979). *El secado de los sólidos en la industria química*.

Obando, G. (2015). *Condiciones de diseño de un Reactor de Pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de residuos sólidos orgánicos.* . Manizales, Colombia: Universidad de Manizales.

Orbegozo, U. (2012). *Firms' waste management in the company: Motivations for their implementation and associated improvements.* Retrieved April 8, 2019, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1135252312000020

Ortega, D. (2016). *Diseño de un silo de fondo cónico para almacenar maíz.* Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador.

Ortíz, M. *et al*. (2004). *Aluminio intercambiable en suelos con propiedades ándicas y su relación con la toxicidad.* Cenicafé.

Ospina, J. E. (2001). *Características físicomecánicas y análisis de calidad de granos.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
Oxford. (2012). *Fuels and combustion.* Retrieved April 8, 2019, from http://www.em-ea.org/guide books/book-2/2.1 fuels and combustion.pdf

Panda, A., Singh, R., & Mishra, D. (2010). *Thermolysis of waste plastics to liquid fuel. A sustable method for plastic wate management and manufacture of value added products.* A world perspective. Renew Sust Energ Rev 14, 233-248.

Park, S. S., Seo, D. K., Lee, S. H., & Hwang, J. (2012). *Study on pyrolysis characteristics of refuse plastic fuel using lab-scale tube furnance and thermogravimetric analysis reactor*. Journal of Analitic and Applied Pyrolysis 97, 29-38.

Parker, L. (2019). *El 91 por ciento del plástico que fabricamos no se recicla*. National Geographic. Recuperado el 18 de 11 de 2018, de https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2017/07/el-91-por-ciento-del-plastico-que-fabricamos-no-se-recicla
Pascual, R. (2016*). La materia orgánica del suelo: papel de los microorganismos*. Microbiología. Chile.

Pellegrini, N. y. (2009). *Reciclaje de papel en la Universidad Simón Bolivar*. . Revista de Investigación 67 Vol 33, 45-57.

Pérez, A. *et al.* (2008*). Caracterización física – química y biológica de enmiendas orgánicas aplicadas en la producción de cultivos*. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. República Dominicana.

Perry, R. (1997). *Perry´s chemical engineers´ handbook (7 ma ed., Vol. 1).* Estados Unidos: McGraw-Hill.

Peters, M. (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw Hill.

Phillips, T. (2 de Abril de 2018). *What is hydrolysis*. Obtenido de The Balance: https://www.thebalance.com/what-is-hydrolysis-375589

Proaño, Oswaldo; Crespo, Sara. 2009. *«Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos».* Revista Politécnica. 30 (1): 144-137.

Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente, O. (2018). *PLÁSTICOS DE UN SOLO USO*: Una hoja de ruta para la sostenibilidad.

ProVerde. (2013). *ProVerde*. Retrieved May 22, 2019, from https://www.proverde.com.gt/

Pulido, M. (2003). *Hidrólisis ácida y enzimática del residuo de poda de olivo*. Fermentación de hidrolizados con Pachysolen Tannophilus. . España: Jaén.

Pyrzynski, K. (2016). *Chemical and Structure Modification of Polymers*. CRC Press. Canada.
Quirós, S. (1979). *Neutralización del aluminio intercambiable y aprovechamiento del fósforo en tres suelos de Costa Rica*. Costa Rica.

RAE. (21 de septiembre de 2018). *Real Academia española*. Obtenido de http://dle.rae.es/srv/fetch?id=NZJWMiV

R, G., & D, T. (2003). *Energy, Mineral and Ground-Water Resources of Carbon and Emery Counties, Utah.* Utah: Utah Geological Survey.

Ramos, A. (2018*). Diseño de la estructura de un silo de acero.* Escuela técnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicación. Universidad de Cantabria.

Rasmuson, A., Andersson, B., Olsson, L., & Andersson, R. (2014). *Mathematical Modeling in Chemical Engineering.* Nueva York: Cambridge University Press.

Ravenet, J. (1992). *Silos*. Barcelona: RAVENET.

Research and Technology Development Div. (1994). *Integrated energy systems in China: the cold northeastern region experience* . Rome: FAO.

Ricardo, H. (2008). *Ecuaciones diferenciales: una introducción moderna*. Editorial Reverté.

Roldán, J. 2008. *Fuentes de energía*. España: Paraninfo CENGAGE Learning. 237 págs.

Rolle, Kurt. 2006. *Termodinámica*. México. Pearson Educación. 765 págs.

Salamanca, A. (2005). *La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetaleria colombiana.* Cenicafé.

Santiago, C. (2011). *Producción y comercialización de fertilizantes orgánicos provenientes de la lombricultura y abonera orgánica*. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Sarkar, D. (2015). *Thermal Power Plant. Design and Operation (1 ra ed.).* Amsterdam , Paises Bajos: Elsevier. doi:https://doi.org/10.1016/C2014-0-00536-9

Scheirs, J., & Kaminsky, W. (2006). *Feedstock Recycling and Pyrolisis of Waste Plastics*. Londres: John Wiley & Sons.

Sharuddin, S., Abnisa, F., & Kheireddine, M. (2016). *A review on pyrolysis of plastic wastes*. Energy Conversion and Management, 115, 308-326.

Shelley, S., Fouhy, K., & Moore, S. (1992). *Alemania:* Chem. Eng.

Shin, T., Hajime, O., & Chuichi, W. (2011). *Pyrolysis-GC/MS Data Book of Synthetic Polymers*. Elsevier B.V.

Skoog, Douglas, *et. al*. 2015. *Fundamentos de química analítica*. México: Cengage Learning. 1090 págs.

Sólidos, C. N. para el M. de los D. (2005). *Política Nacional para el Manejo Integral de los Residuos y Desechos Sólidos*. Retrieved May 14, 2019, from http://www.marn.gob.gt/Multimedios/59.pdf
Soto, G. (2003). *Taller de abonos orgánicos*. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica.

Speight, J. (2002). *Handbook of Petroleum Product Analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
Standar oil company. (2013). *El petróleo. Breve reseña de su historia e industrialización*. Recuperado el 27 de 09 de 2019, de https://www.bcn.cl/obtienearchivo?id=documentos/10221.1/56310/2/198701.pdf&origen=BDigital

Stas, Martin, et. al. 2013. *«Overview of analytical methods used for chemical characterization of pyrolisis bio-oil»*. Revista de la Universidad de Química y Tecnología de Praga. (28): 385-402.
Stas, Martin, et. al. 2015. *«Chemical characterization of pyrolysis bio-oil: Application of Orbitrap Mass Spectrometry»*. Revista de la Universidad de Química y Tecnología de Praga. (29): 3233-3240.

TAM. (2019). *Tecnificación Agraria y Medioambiental*. Gallinaza seca. Obtenido en: https://www.agromaquinaria.es/pdf/empresas/Gallinaza_Seca_6111453022072011.pdf

T., C. (2010). *Biochar and the nitrogen cycle*. Introduction Journal of Environmental.
Techopedia. (10 de 09 de 2018). *Techopedia*. Obtenido de Techopedia: https://www.techopedia.com/definition/2342/head-mounted-display-hmd

Thahir, R., Altway, A., & Sri, J. (2019). *Production of liquid fuel from plastic waste using integrated pyrolysis method with refinery distillation bubble cap plate column*. Energy reports, 5, 70-77.

The Franlin Institute. (20 de 09 de 2018). *The Franlin Institute*. Obtenido de The Franlin Institute: https://www.fi.edu/virtual-reality/history-of-virtual-reality

Thompson, L. M. (2002). *Los suelos y su fertilidad*. Editorial Reverté. 4ta Edición. Barcelona.

Tormos, Bernardo. 2005. *Diagnóstico de motores diésel mediante el análisis del aceite usado*. España: Reverté. 361 págs.

Tortosa, G. (2012). *The production of commercial organic amendments of fertilizers by composting two-phase olive mil waste*. Journal of Cleaner Production.

Treybal, R. 1988. *Operaciones de transferencia de masa*. McGraw-Hill. 822 págs.

Trowsdale *et al*, A. (2017). *5 gráficos para entender por qué el plástico es una amenaza para nuestro planeta. BBC News*. Obtenido de https://www.bbc.com/mundo/noticias-42304901

Underwriters Laboratories . (2006). *UL 142 - Standard for Safety for Steel Aboveground Tanks for Flammable and Combustible Liquids,*. 9na. Estados Unidos: UNDERWRITERS LABORATORIES INC.

Universidad de Barcelona. *Polipropileno*. https://www.ub.edu/web/ub/ca/. [octubre del 2019].

Universidad de Burgos. (2019). *Espectrometría de masas de plasma ICP*. Obtenido en: https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/espectrometria/espectrometria-de-masas-de-plasma-icp-ms

URL. (2018). *Perfil energético de Guatemala*. Universidad Rafael Landivar, Vicerrectoría de Investigación y Proyección.

Urrestarazu, M. (2015). *Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía*. Madrid: Paraninfo.

Valenzuela, C. (1995). *Química general. Introducción a la Química Teórica.* Salamanca, España: Ediciones Universidad de Salamanca.

Vazquez, M. (2001). *Avances en Seguridad Alimentaria.* Universidad de Vigo, España: Editorial Altanga.

Vélez Bone, V. E., & Mosquera González, B. A. (2011). *Reciclaje de plásticos*. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil.

Verdú, E. (1988). *Pirólisis de cáscara de almendra*. Alicante: Universidad de Alicante.

Villena, M. (2012). *TALLER PRÁCTICO DE USO DE HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS PARA LA DOCENCIA EN EL ÁREA DE INGENIERÍA QUÍMICA*. Recuperado el 30 de 09 de 2019, de http://calidad.ugr.es/pages/secretariados/form_apoyo_calidad/formacion-en-centros-iii/cursos/51-h/!

Wade, L. (2011). *Química Orgánica*. Volumen 2. México: Pearson Educación.

Walas, S. (2012). *Chemical Process Equipment Selection and Design (3 ra ed.)*. Estados Unidos: Butterworth-Heinernam.

Weast, R., & Selby, S. (1967). *Handbook of Chemistry and Physics a ready-reference book of chemical and physical data (48 ed.).* Ohio: The Chemical Rubber Co.

Westerhout, R., Waander, J., Kuipiers, J., & van Swaaij, W. (1997). *Kinetics of the Low-Temperature Pyrolysis of Polyethene,Polypropene, and Polystyrene Modeling, Experimental Determination, and Comparison with Literature Models and Data*. Industrial and Engineering Chemistry Research, 36, 1955-1964.

Zaman, C., Pal, K., & Yehye, W. (2017). *Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy*. Malasia: NANOCAT.

Zapata, R. *et al.* (2014). *Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas*. Departamento de ingeniería química. Universidad de Antioquia. Colombia.

XII. ANEXOS

A. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE EMPAQUE

1. Identificación del material de empaque de la industria alimenticia.

Cuadro 70. Ficha técnica código DPN-E-002 con fecha de actualización 11/02/19.

Material	BOPP Transparente 15mc/BOPP Metalizado 20mc
Origen del material	Polímeros Sintéticos
Método de producción	Extrusión del material, impresión de arte (dorso material extremo), laminación y corte.
Características Biológicas	De conformidad para estar en contacto directo con los alimentos.
Características Químicas	Libre de contaminación Química. Uso de resinas de conformidad para entrar en contacto directo con alimentos.
Temperatura y fuerza de sellado:	
Calibre (micras o pulgadas)	Mínimo: 33.75micras Estándar 37.5micras Máximo 41.25micras
Gramaje (g/m2)	Mínimo 31.41g/m2 Estándar: 34.85g/m2 Máximo: 38.39g/m2
Peso Bobina (máximo Kg)	Según diámetro máximo: No debe pasar los 80kg
Rendimiento	Mínimo 26.05m2/kg Estándar: 28.69m2/kg Máximo: 31.84m2/kg
COF:	Dinámico Frente/Frente Mínimo: 0.15 Estándar 0.25 Máximo: 0.35
Tipo de embobinado:	5
Ancho (mm):	262
Alto (mm):	190
Diámetro interno (mm)	76
Diámetro externo (mm)	381
Fotocelda:	12x6mm del lado derecho de la impresión y centrada verticalmente.
Impresión	Aprobar de acuerdo a Estándar de impresión 8 colores.
Barrera de humedad (WVTR	<0.40g/m2/24horas
Barrera de oxígeno	< 80cm3/m2/24h
Destino:	-----
Condiciones de almacenamiento	12 meses a partir de la fecha de elaboración del certificado de calidad. Temperatura ambiente, sin humedad, polvo ni luz solar directa sobre el producto.
Código de Barra	-----
Registro Sanitario	B-23442
Empalmes:	Utilizar cinta transparente e identificar con tape (bandera) de color rojo

Nota: Esta ficha fue solicitada a la empresa proveedora del material de empaque, se colocó incompleta por acuerdo de confidencialidad.

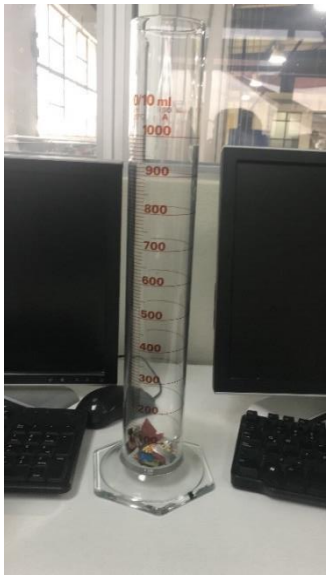
Figura 57-Ficha técnica código DPN-E-002 con fecha de actualización 01/05/17.

Material	Bopp Transparente (13.65g/m2), tinta (1g/m2), adhesivo (2g/m2) / Bopp Metalizado (13.65g/m2)
Origen del material	Polímeros sintéticos
Métodos de producción	Extrusión de material, impresión de arte(dorso material externo), laminación y corte.
Características Biológicas	De conformidad para estar en contacto directo con los alimentos.
Características Químicas	Libre de contaminación Química. Uso de resinas de conformidad para estar en contacto directo con los alimentos.
Temperatura de sellado:	
Calibre (micras o pulgadas):	32.5 micras
Rendimiento (g/m2)	30.2 g/m2
Peso bobina (máximo kg)	
Rendimiento (m2/kg)	32.11m2/kg
COF:	
Tipo de embobinado	5
Ancho (mm)	204
Alto (mm)	150
Diámetro interno (mm)	76
Diámetro Externo (mm)	381
Fotocelda:	12*6mm del lado derecho de la impresión, y centrada verticalmente.
Impresión	Aprobar de acuerdo a Estándar de Impresión
Barrera de Humedad (WVTR)	<0.30g/m2/24horas
Barrera de oxígeno	<46c3/M"/24horas

*Nota: Esta ficha fue solicitada a la empresa proveedora del material de empaque, se colocó incompleta por acuerdo de confidencialidad.

2. Instrumento utilizado para las propiedades: densidad aireada, densidad compacta e índice de compresibilidad.

Figura 58**.**Probeta utilizada para medir volumen de material, con capacidad de 1L



*Nota: Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 59**.**Volumen medido en la probeta para la densidad aireada.



*Nota: Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 60**.**Volumen medido en la probeta para la densidad compacta.



Figura 61**.**Muestra utilizada para realizar la medición de la densidad aireada, densidad compacta y densidad aireada.



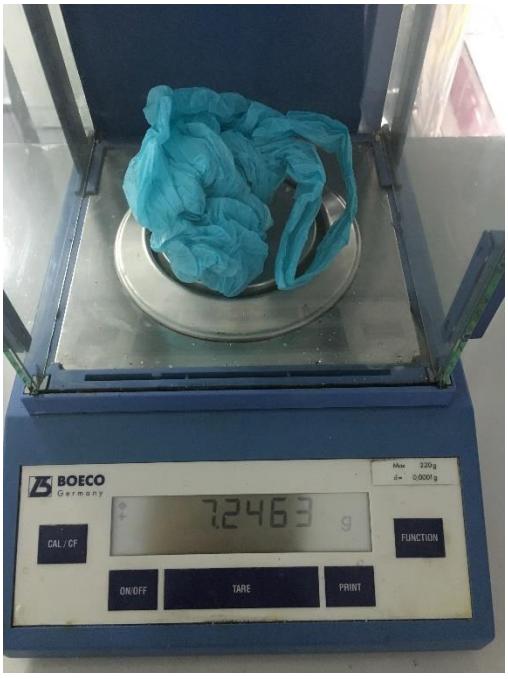
*Nota: Muestra con fines ilustrativos. Se utilizaron 12.1694g de material de empaque recortado en segmentos de aproximadamente 1x1cm.

Figura 62**.** Peso de muestra utilizada junto con la bolsa que lo contenía.



*Nota: Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 63-Peso de bolsa sin la muestra.



*Nota: Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 64- Mezcla de material según la composición de Cuadro 8.

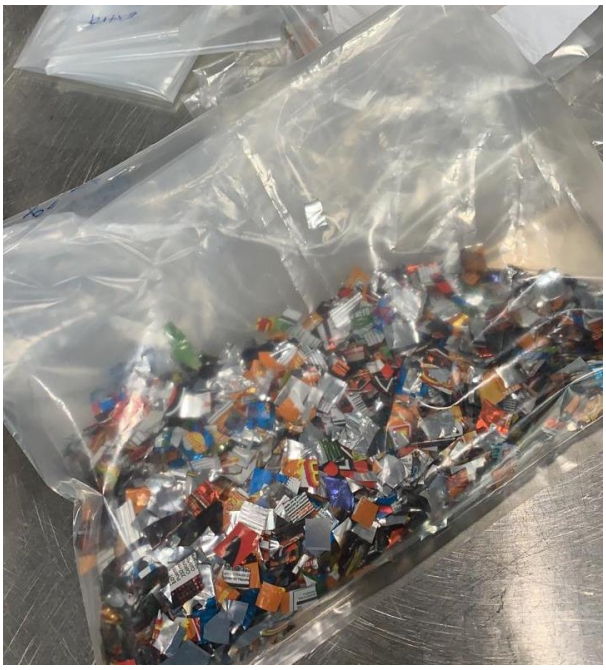


Figura 65-Material de empaque residual con grasa utilizado para la prueba del porcentaje de grasa presente.

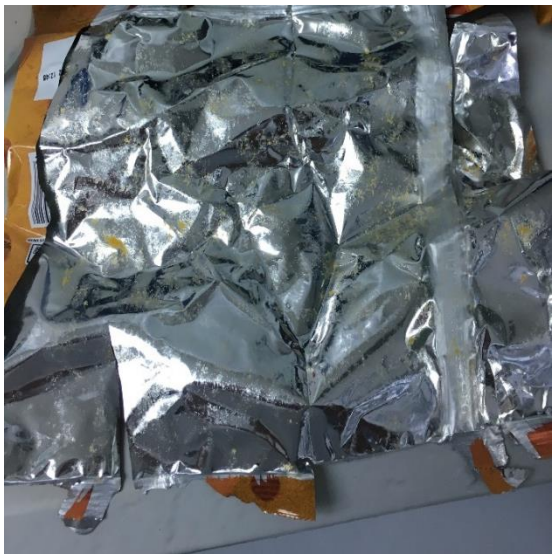


Figura 66- Material que fue lavado con etanol.



*Nota: Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 67-Etanol con residuos de grasa para el lavado de material.



*Nota: Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 68-Material limpio luego de ser lavado con etanol.



Figura 69- Beaker con etanol y residuos de grasa.



*****Nota: El etanol se muestra en mezcla con las grasas presentes en el empaque. Se evaporó a 100ºC.

Figura 70- Peso de beaker con grasa restante de la evaporación del etanol.

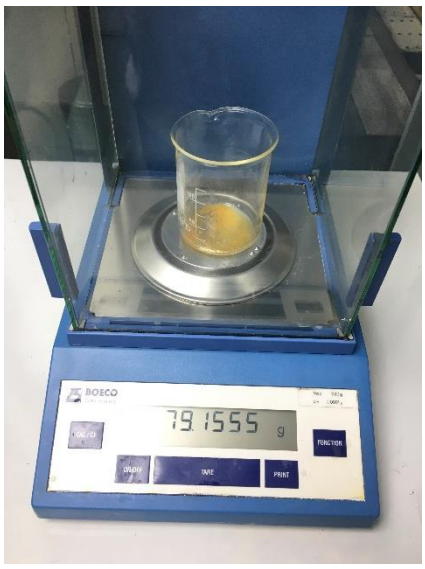


Figura 71-Peso de beaker utilizado para lavar las muestras de material de empaque.

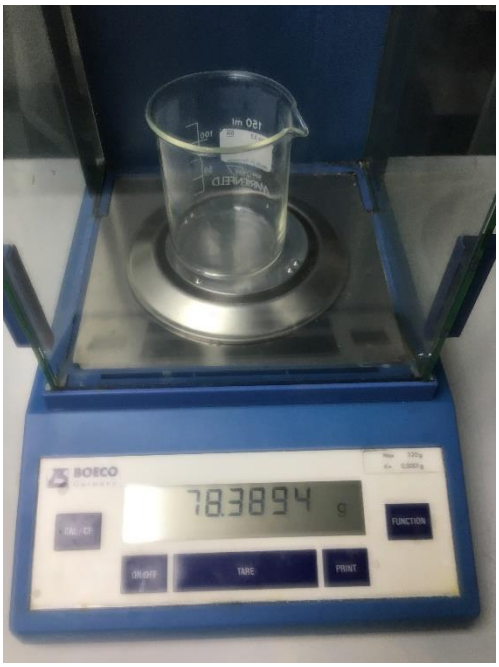


Figura 72-Recipiente a utilizar para la medición de la temperatura de fusión.



Figura 73- Medición del volumen del recipiente.



Figura 74-Material dentro de la mufla durante la medición de la temperatura de fusión.



Figura 75 Mufla utilizada

Figura 76-Material dentro de la mufla fundido a 220ºC



Figura 77- Material fundido a temperatura ambiente de 25ºC.



Figura 78- Balanza de humedad utilizada para realizar la medición del porcentaje de humedad.



*Nota: Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 79- Balanza analítica utilizada para la medición de distintos pesos



*Nota: Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 80 – Máquina de ensayos de tensión y compresión.



Figura 81 -Desperdicio de bobinas de material de empaque de la empresa.

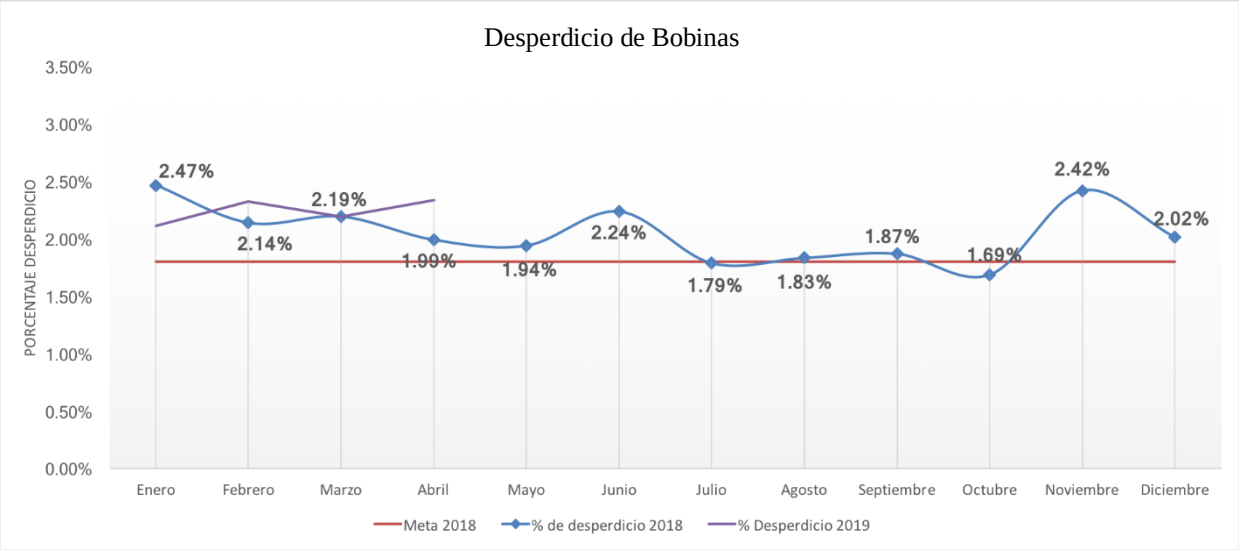


Figura 82- Kilogramos de desperdicio de bobinas de material de empaque de la empresa en el año 2018.

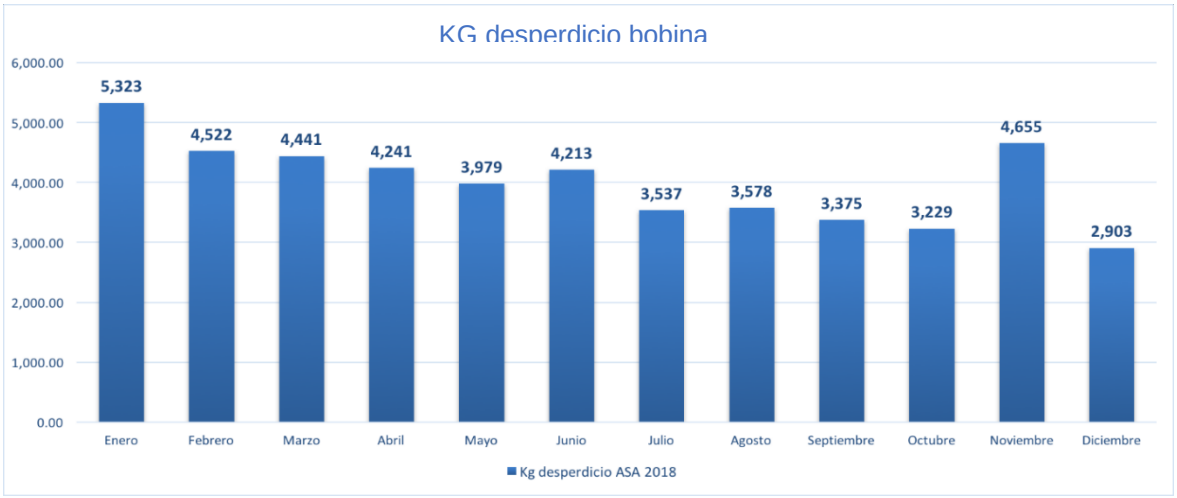


Figura 83 -Desviación estándar para porcentajes de grasa y humedad, calculado en Microsoft Excel.

Propiedad /Corrida	1	2	3	4	5	Promedio	Desviación Estándar
Porcentaje de Grasas	7.46% (p/p)	8.38% (p/p)	7.67% (p/p)	8.20% (p/p)	8.96% (p/p)	8.13% (p/p)	0.595
Porcentaje de Humedad	1.04% (p/p)	1.04% (p/p)	1.05% (p/p)	1.05% (p/p)	1.05% (p/p)	1.04% (p/p)	0.00548

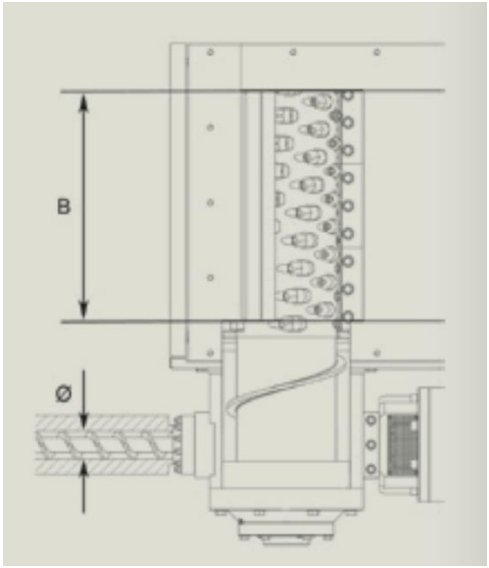
Figura 84-Desviación estándar para porcentaje de volumen aireado y compacto, calculado en Microsoft Excel.

Elemento /Corrida	1	2	3	4	5	Promedio	Desviación Estándar
Volumen Aireado	0.450L	0.510L	0.510L	0.505L	0.435L	0.483L	0.0365
Volumen Compactado	0.360L	0.350L	0.350L	0.365L	0.355L	0.356L	0.00652

Figura 85 – Mandril a retirar del material de rechazo en bobina.



Figura 86 – Ilustración aproximada del ancho de la trituradora y del tornillo extrusor.



*Nota: El ancho B corresponde a la trituradora y el diámetro Ø corresponde al tornillo extrusor.

Figura 87 – Ilustración de la trituradora, el alimentador y el tornillo extrusor.

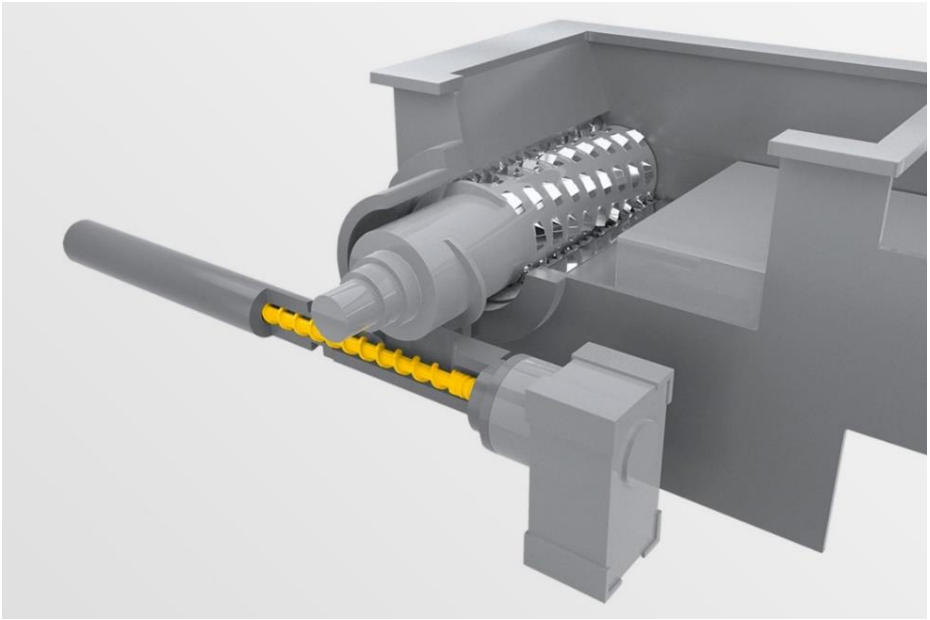
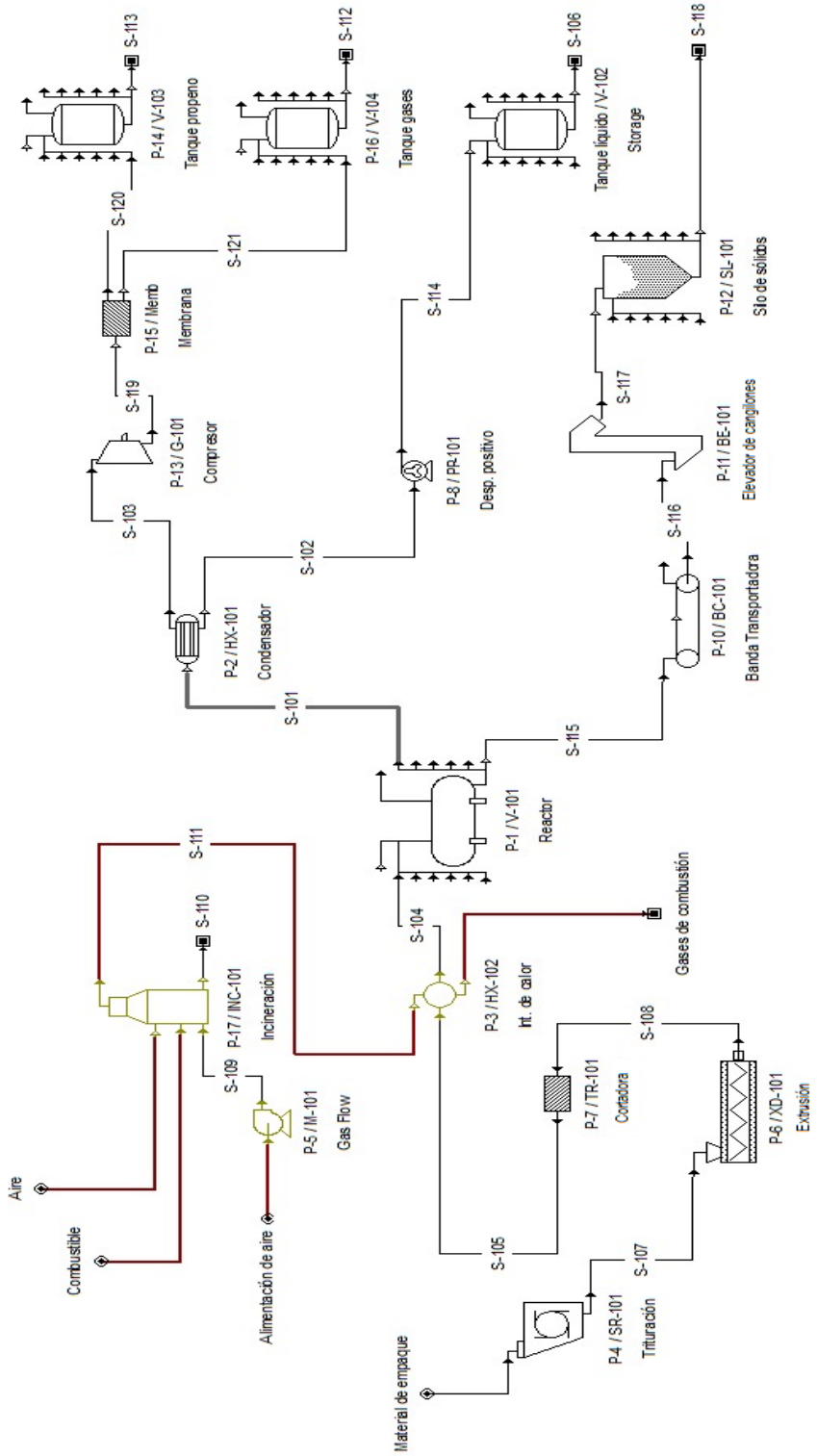


Figura 88. Máquina de referencia para el proceso acondicionamiento del material de empaque.



*Nota: La máquina de referencia consta de la trituradora y el tornillo extrusor en conjunto. La máquina es de marca NGR.

Figura 89. Diagrama general del proceso de pirólisis evaluado.



3. Datos originales e intermedios

Cuadro 71. Resultados para la prueba de tensión realizada para el material de empaque.

Muestra	Resistencia al rasgado vertical (gf)	Resistencia al Rasgado Horizontal (gf)
Fritura de maíz horneado 26g	48.0	41.6
Fritura de maíz y piel de cerdo deshidratada 17g	48.0	41.6
Pellet frito de trigo deshidratado 18g	48.0	41.6

*Nota: Prueba realizada para el material colocado tanto de forma horizontal como de forma vertical. Esta prueba se realizó en un laboratorio externo del proveedor del material de empaque.

Cuadro 72. Volumen medido por corrida para la muestra utilizada para la medición de densidad aireada y compacta.

Elemento/Corrida	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Promedio**	**Desviación Estándar**
Volumen Aireado	0.450L	0.510L	0.510L	0.505L	0.435L	0.483L	0.0365L
Volumen Compactado	0.360L	0.350L	0.350L	0.365L	0.355L	0.356L	0.00652L

Cuadro 73. Índice de compresibilidad para el material de empaque.

Propiedad	**Valor promedio medido**
Densidad aireada	0.025kg/L
Densidad compacta	0.034kg/L
Densidad de trabajo*	0.02824kg/L
Índice de compresibilidad*	36%

*Nota: Tanto la densidad como el índice de compresibilidad se calcularon en base a los promedios de la densidad aireada y densidad compacta.

Cuadro 74. Resultados obtenidos para el porcentaje de humedad y de grasas presentes en el material de empaque.

Propiedad/Corrida	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Promedio**	**Desviación Estándar**
Porcentaje de grasas	7.46%(p/p)	8.38%(p/p)	7.67%(p/p)	8.20%(p/p)	8.96%(p/p)	8.13%(p/p)	0.595% (p/p)
Porcentaje de humedad	1.04%(p/p)	1.04%(p/p)	1.05%(p/p)	1.05%(p/p)	1.05%(p/p)	1.04%(p/p)	0.00548%(p/p)

Cuadro 75. Resultado para la temperatura de fusión del material de empaque.

Propiedad	Temperatura
Temperatura de fusión	220ºC

Cuadro 76. Resultado para la densidad del material fundido.

Propiedad	Valor obtenido
Densidad de material fundido	0.451kg/L

4. Cálculos de muestra

Cálculo de muestra 1. Cálculo de la cantidad de BOPP a someter al proceso de acondicionamiento.

Base de cálculo: 2,300kg.

$$Área\ de\ empaque = Masa\ x\ \left(\frac{1}{rendimiento}\right)$$

$$Área\ de\ empaque = 2{,}300kg\ x\ \left(\frac{1m^2}{0.0303kg}\right) = \frac{78{,}944m^2}{lote}$$

$$BOPP\ transpartene = \left(Área\ de\ empaque\right)\left(BOPP\ transparente\right)$$

$$BOPP\ transparente = \left(\frac{78{,}944m^2}{lote}\right)\left(\frac{0.01365kg}{m^2}\right) = \frac{1078\ kg\ BOPP\ Transparente}{lote}$$

$$BOPP\ metalizado = \left(\frac{78{,}944m^2}{lote}\right)\left(\frac{0.01365kg}{m^2}\right) = \frac{1078\ kg\ BOPP\ metalizado}{lote}$$

Cálculo de muestra 2. Cálculo de la cantidad de tinta y adhesivo presentes.

Base de cálculo: 2,300kg

$$compuesto\ presente = \left(Área\ de\ empaque\right)\left(compuesto\right)$$

$$tinta\ presente = \left(\frac{78{,}944m^2}{lote}\right)\left(\frac{0.001kg}{m^2}\right) = \frac{79\ kg\ tinta}{lote}$$

$$adhesivo\ presente = \left(\frac{78{,}944m^2}{lote}\right)\left(\frac{0.002kg}{m^2}\right) = \frac{158\ kg\ adhesivo}{lote}$$

Cálculo de muestra 3. Cálculo de densidad de partícula

$$Densidad\ de\ Partícula = \frac{Masa}{Volumen} = \frac{1.54x10^{-5}kg}{1.41x10^{-8}L} = 1.09kg/L$$

Nota: Este es un cálculo de ejemplo, este cálculo se realizó en quintuplicado. Además, se utiliza el mismo cálculo para la densidad del material fundido a temperatura de 25ºC.

Cálculo de muestra 4. Cálculo de densidad aireada

$$Densidad\ de\ Partícula = \frac{Masa}{Vol.de\ masa\ aireada} = \frac{0.012kg}{0.480L} = 0.025kg/L$$

Nota: Este es un cálculo de muestra, este cálculo se realizó en quintuplicado.

Cálculo de muestra 5. Cálculo de densidad compacta

$$Densidad\ de\ Partícula = \frac{Masa}{Vol.\,de\ masa\ compacatada} = \frac{0.012kg}{0.350L} = 0.034kg/L$$

Nota: Este es un cálculo de ejemplo, este cálculo se realizó en quintuplicado.

Cálculo de muestra 6. Índice de compresibilidad

$$Índice\ Compresibilidad = \frac{(D.Compacta - D.Aireada)}{D.Aireada} * 100$$

$$= \frac{\left(\frac{0.034kg}{L} - \frac{0.025kg}{L}\right)}{\frac{0.025kg}{L}} * 100\% = 36\%$$

Cálculo de muestra 7. Cálculo densidad de Trabajo

$$D.trabajo = (\bar{X}\,D.Compacta - \bar{X}\,D.Aireada) * Índice\ de\ Compresibilidad + \bar{X}\,Densidad\ Aireada$$

$$= \left(\frac{0.034kg}{L} - \frac{0.025kg}{L}\right) * 36\% + \frac{0.025kg}{L} = 0.02824kg/L$$

Cálculo de muestra 8. Porcentaje de grasas presentes en el material

$$Porcentaje\ de\ grasa = \frac{Peso\ de\ grasas\ recuperadas}{Peso\ muestra} = \frac{0.1756g}{2.3547g} * 100 = 7.46\%(\frac{p}{p})$$

Nota: Este es un cálculo de ejemplo, este cálculo se realizó en quintuplicado.

Cálculo de muestra 9. Cálculo del área por unidad del pelet a realizar:

$$Área = 2\pi r(h + r) = 2\pi(0.025m)(0.03m + 0.025m) = 8.64 * 10^{-3}m$$

Nota: El pelet a realizar tendrá una forma semejante a la de un cilindro, el área se calcula de la misma manera en la que se calcularía el área de un cilindro.

Cálculo de muestra 10. Cálculo del área de la base por unidad del pelet a realizar:

$$Área = 4\pi r^2 = 7.84 * 10^{-3}m$$

Nota: El pelet a realizar tendrá una forma semejante a la de un cilindro, el área de la base se calcula de la misma manera en la que se calcularía el área de un cilindro.

Cálculo del volumen por unidad del pelet a realizar:

$$Volumen\ por\ unidad\ de\ pelet = \frac{4}{3}\pi r^3 = \left(\frac{4}{3}\right)\pi(0.005m)^3 = 5.23\ x10^{-7}m^3$$

Nota: El pelet a realizar tendrá una forma semejante a la de un cilindro, el volumen se calcula de la misma manera en la que se calcularía el volumen de un cilindro.

Cálculo de la alimentación al proceso:

$$\frac{Alimentación}{hora} = \frac{2300kg}{5h} = \frac{460kg}{h}$$

Nota: El cálculo de la alimentación se realizó para el proceso en general ya que se trata de un sistema semi-continuo. El cálculo incluye el flujo para el proceso de alimentación al triturador, el proceso de alimentación al extrusor y el proceso de peletización.

Cálculo de los kg de material residual por lote:

$$kg\ de\ material\ residual = (Proporción\ en\ la\ mezcla *)\left(\frac{2300kg}{lote}\right) = (90\%)\left(\frac{2300kg}{lote}\right)$$

$$= 2070kg/lote$$

Cálculo de los kg de material de rechazo en bobina por lote:

$$kg\ de\ material\ de\ rechazo\ en\ bobina = (Proporción\ en\ la\ mezcla *)\left(\frac{2300kg}{lote}\right)$$

$$= (10\%)\left(\frac{2300kg}{lote}\right) = \frac{230kg}{lote}$$

Cálculo estimado de la cantidad de calor que se necesita para fundir la mezcla de material residual y de rechazo en bobina.

$$Calor\ Q = mcp\Delta T$$

$$Q = (2{,}300kg)\left(\frac{1700J}{kgK}\right)(493.15K - 293.15K) = 782{,}000{,}000J\ x\left(\frac{1kJ}{1000J}\right) =$$

$$782{,}000kJx\left(\frac{1kWs}{1kj}\right)\left(\frac{1kwh}{3200kWs}\right) = 217kwh$$

Cálculo de la cantidad de mandriles a retirar:

Báse de cálculo: 1 lote

$$mandriles = \left(\frac{material\ de\ rechazo\ en\ bobina}{lote}\right)\left(\frac{bobina}{material\ de\ rechazo}\right)\left(\frac{1\ mandril}{1\ bobina}\right)$$

$$mandriles = \left(\frac{230kg}{1\ lote}\right)\left(\frac{1\ bobina}{79kg}\right)\left(\frac{1\ mandril}{1\ bobina}\right) = 2.91 \approx 3\ \ mandriles$$

Cálulo de la masa por pelet:

$$\frac{masa}{pelet} = (Volumen\ por\ unidad\ de\ pelet)(densidad\ del\ material)$$

$$\frac{masa}{pelet} = (5.27x10^{-7}m^3)\left(\frac{451kg}{m^3}\right) = 2.36\ x10^{-4}kg$$

Cálculo de la cantidad de pelets a realizar:

Base de cálculo: 1h.

$$\frac{kg\ producidos/h}{kg/pelet} = \frac{460kg/h}{2.36\ x10^{-4}kg} \approx \frac{1{,}948{,}960pelets}{h}$$

Cálculo del volumen a ocupar por los pelets por hora:

Base de cálculo: 1h.

$$Volumen = \left(\frac{cantidad\ de\ pelets}{h}\right)\left(\frac{volumen}{pelet}\right) = (1{,}948{,}960 pelets)\left(\frac{5.27x10^{-7}m^3}{pelet}\right)$$

$$Volumen = 1.02m^3$$

Cálculo en metros cúbicos de producción de material fundido por hora:

$$\frac{m^3\ de\ material\ fundido}{h} = (flujo\ másico\ de\ producción)(\frac{1}{Densidad\ del\ material})$$

$$\frac{m^3 de\ materia\ fundido}{h} = \left(\frac{460kg}{h}\right)\left(\frac{1m^3}{451kg}\right) = \frac{1.02m^3}{h}$$

B. PRUEBAS A ESCALA LABORATORIO Y CINÉTICA DE LA REACCIÓN DE PIRÓLISIS

1. Experimentación inicial sin sistema de condensación.

Realizada para observar la aparición de los gases de pirólisis conforme aumentaba la temperatura en la mufla. El Cuadro 77 presenta las observaciones y mediciones de la prueba.

Cuadro 77. Mediciones de tiempo y temperatura para la prueba sin sistema de condensación.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Observaciones
0	28	Encendido de mufla para iniciar calentamiento.
17	190	Inicio de gases procedentes de la mufla.
29	380	Aparición gases provenientes de la chimenea.
41	420	Inicio de gases de pirólisis
43	440	Flujo constante de gases pirólisis
50	475	Disminución del flujo de gases de pirólisis
60	500	Finalización del flujo de gases de pirólisis

2. Análisis termogravimétrico del material de empaque de polipropileno

Las muestras fueron analizadas en el Centro de Investigación y Desarrollo (CI+D/CETEC) de Cementos Progreso con las siguientes condiciones:

- Velocidad de calentamiento: 10°C/min
- Crisol: Óxido de aluminio
- Atmósfera: Nitrógeno
- Rango de temperatura: 0°C a 1000°C
- Masa de muestra: Aproximadamente 6 mg

Figura 90. Análisis termogravimétrico de la muestra de material de empaque de polipropileno limpio.

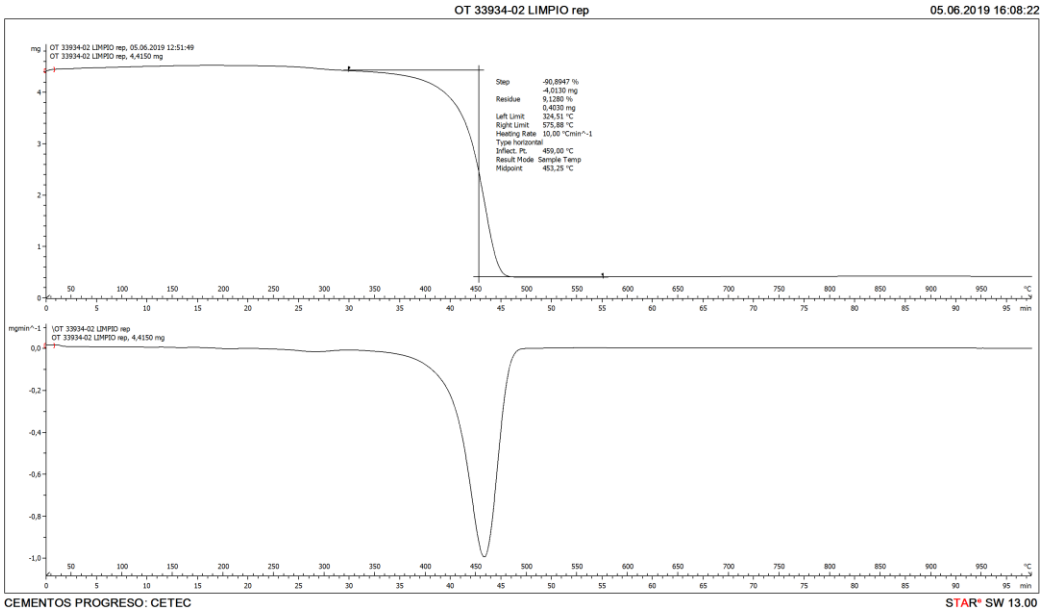
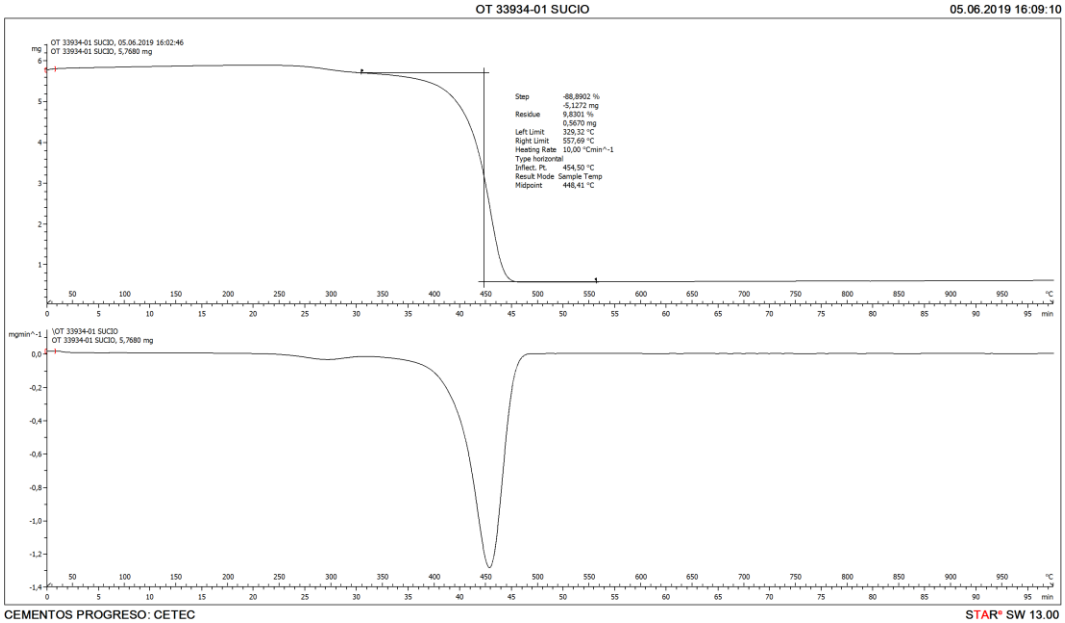


Figura 91. Análisis termogravimétrico de la muestra de material de empaque de polipropileno sucio.



3. Datos experimentales de las reacciones de pirólisis

a. Equipo experimental

Los principales equipos utilizados para la realización de las reacciones de pirólisis incluyen la mufla, el reactor y las balanzas detalladas a continuación con sus especificaciones.

Cuadro 78. Especificaciones de la mufla utilizada para las pruebas a escala laboratorio.

Marca	Thermo Sciencitfic®
Modelo	F6030CM-33-AVL
Voltaje	240 V
Amperaje	18.3 A
Frecuencia	60 Hz
Consumo de energía	4400 W
Rango de temperatura	100°C a 1200°C

Cuadro 79. Especificaciones del reactor utilizado para las pruebas a escala laboratorio.

Material	Acero inoxidable 304 DN 50
Diámetro	9.5 cm
Largo	21.6 cm
Brida	Acero inoxidable
Pernos	4
Apertura de pernos	0.635

Tomado de: (Castellanos, y otros, 2017)

Cuadro 80. Especificaciones de la balanza analítica utilizada para las pruebas a escala laboratorio.

Marca	BOECO
Modelo	BAS 31 220
Sensibilidad	±0.0001
Rango de medición	0-220 g

Cuadro 81. Especificaciones de la balanza semi analítica utilizada para las pruebas a escala laboratorio.

Marca	OHAUS
Serie	Valor 3000 Xtreme
Sensibilidad	±0.01
Rango de medición	0-300

b. Identificación de cinéticas realizadas.

Se establece en el siguiente cuadro el número definido para cada cinética de acuerdo con la temperatura programada en la mufla como final para poder referirse a los resultados en las diferentes secciones de Anexos.

Cuadro 82. Identificación del número de cinética de acuerdo con la temperatura programada en la mufla.

Cinética No.	Temperatura programada en mufla (°C)
1	415
2	430
3	450
4	460
5	475

c. Determinación de la duración del proceso de pirólisis

Se midió el tiempo de operación desde el inicio del calentamiento del sistema hasta que salía la última gota de producto líquido del sistema de condensación.

Cuadro 83. Tiempo de duración de las cinco reacciones de pirólisis realizadas a diferentes curvas de calentamiento.

Cinética No.	Temperatura programada en mufla (°C)	Hora de incio	Hora de finalización	Tiempo de duración del proceso (min)
1	415	10:35	12:10	95
2	430	10:50	12:21	91
3	450	9:35	10:57	82
4	460	8:10	9:35	75
5	475	10:30	11:39	69

4. Rampas de calentamiento experimentales

En cada cinética evaluada se midió el cambio de temperatura por minuto durante el transcurso de la reacción.

Cuadro 84. Rampas de temperatura medidas en la reacción de la cinética 1.

Cambio de temperatura por minuto		Rampa (°C/min)
Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	
64	73	9
80	89	9
154	164	10
228	237	9
262	271	9
282	291	9
323	331	8
344	352	8
372	377	5
380	384	4
404	406	2
64	73	9

Cuadro 85. Rampas de temperatura medidas en la reacción de la cinética 2.

Cambio de temperatura por minuto		Rampa (°C/min)
Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	
75	84	9
86	95	9
241	250	9
271	279	8
320	328	8
386	391	5
403	406	3
410	412	2

Cuadro 86.Rampas de temperatura medidas en la reacción de la cinética 3.

Cambio de temperatura por minuto		Rampa (°C/min)
Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	
86	96	10
116	124	8
151	160	9
182	191	9
215	223	8
250	258	8
280	288	8
332	339	7
410	414	4
422	425	3

Cuadro 87. Rampas de temperatura medidas en la reacción de la cinética 4.

Cambio de temperatura por minuto		Rampa (°C/min)
Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	
84	94	10
122	132	10
172	182	10
237	247	10
275	284	9
320	328	8
360	368	8
412	417	5
426	430	4

Cuadro 88. Rampas de temperatura medidas en la reacción de la cinética 5.

Cambio de temperatura por minuto		Rampa (°C/min)
Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	
90	101	11
110	120	10
168	177	9
180	189	9
224	233	9
256	264	8
288	296	8
360	368	8
380	388	8
413	420	7
440	444	4

5. Análisis de los productos de las cinéticas de reacción

a. Balance de masa del sistema

Para un reactor de operación semi continua como el utilizado en el siguiente trabajo el balance de masa queda establecido con la siguiente expresión:

$$Entrada = Salida + Acumulación$$

La entrada lo constituye el material de empaque con las capas de polipropileno biorientado (BOPP), adhesivo y tintas. Asumiendo que todas las capas de BOPP reaccionaron, la salida corresponde al producto líquido y gaseoso recolectados a la salida de la chimenea del reactor en el sistema de condensación. La acumulación corresponde a lo que no reaccionó, en este caso el producto sólido que debería estar compuesto principalmente por tintas y adhesivo.

Se realizó un análisis de los rendimientos esperados de acuerdo con los componentes del material de empaque de polipropileno biorientado (BOPP) presentado en el siguiente cuadro:

Cuadro 89. Composición de capas que conforman el material de empaque de polipropileno metalizado utilizado en la pirólisis.

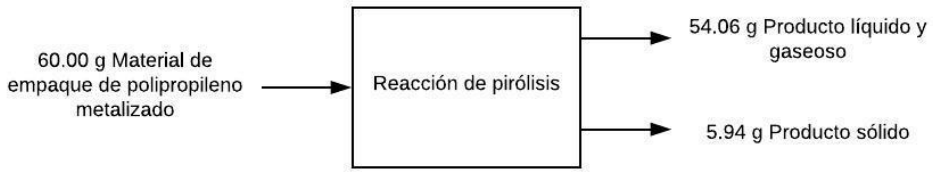
Capa	Masa (g)	Total (g)	Rendimiento (%)
BOPP transparente	27.03	54.06	90.10%
BOPP metalizado	27.03		
Adhesivo	3.96	5.94	9.90%
Tinta	1.98		

*Nota 1: Las capas de BOPP corresponden al líquido y gas esperado a tener.

*Nota 2: La suma de las capas de adhesivo y tinta corresponden al sólido esperado a tener.

Utilizando este análisis el balance de masa propuesto para la pirólisis de 60 gramos de material de empaque es el siguiente:

Figura 92. Diagrama de entradas y salidas para el balance de masa general de la reacción de pirólisis teórica.



En el diagrama de la Figura 92 no se consideran los residuos acumuados en el sistema de condensación y reactor del sistema a escala laboratorio.

b. Cálculo de rendimiento de productos

Pesando el producto líquido, sólido y residuos en cada condición de cinética, se calculó por diferencia la masa de gas producida. Las masas de productos de cada una de las cinco reacciones se presentan en el Cuadro 90.

Cuadro 90. Masa de productos y residuos obtenidos en las diferentes reacciones de pirólisis.

Masa de productos en reacción de pirólisis					
Temperatura final(° C)	Líquido (± 0.0007 g)	Sólido (± 0.01g)	Gas (± 0.04 g)	Residuo líquido en el sistema (± 0.01 g)	Residuo sólido en el sistema (± 0.01 g)
15	37.1212	5.30	0.53	12.44	0.61
30	56.6502	8.00	0.19	24.86	0.30
50	10.0309	8.80	0.31	38.77	0.09
60	12.2568	4.30	0.43	10.05	0.96
75	66.5634	5.60	0.59	25.71	0.53

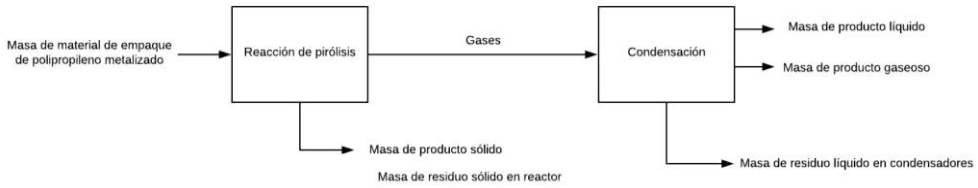
Cálculo de muestra para el rendimiento del producto líquido de la cinética 1 utilizando los datos de la Cuadro 90 y propagación de error:

$$\text{Rendimiento producto líquido: } \left(\%\frac{m}{m}\right) = \frac{37.1212 \pm 0.0007}{60.00 \pm 0.01} * 100 = (61.87 \pm 1.038)\ \%$$

$$\text{Propagación de error: } e_c = 61.87 * \sqrt{\left(\frac{0.0007}{37.1212}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{60.00}\right)^2} * 100 = 1.038$$

Considerando los residuos el balance de masa para el sistema experimental quedaría expresado según la Figura 93:

Figura 93. Diagrama de entradas y salidas para el balance general de la reacción de pirólisis experimental.



*Nota 1: La masa de entradas y salidas quedaría definida por los datos del Cuadro 90 para cada condición de temperatura.

En el rendimiento total presentado en resultados se sumaron los residuos a su respectivo producto y se calcularon con propagación de error la suma de las incertidumbres, resultando en el cuadro anterior.

Cuadro 91. Rendimientos totales de los productos en cada reacción de pirólisis evaluada.

		Rendimiento de productos (%m/m)		
No.	Temperatura (°C)	Líquido	Sólido	Gas
1	415	82.60 ± 2.746	16.52± 3.343	0.88± 0.07
2	430	84.18 ± 3.085	15.50± 3.592	0.32± 0.07
3	450	83.00 ± 3.167	16.48± 3.608	0.52± 0.07
4	460	85.51 ± 3.309	13.77± 3.563	0.72± 0.06
5	475	87.12± 3.236	11.88± 3.531	0.98± 0.06

c. Resultados de la cromatografía de gases de la cinética del producto líquido.

A continuación, se presentan los cromatogramas y reportes de composición de cada muestra de las cinco condiciones de cinética evaluadas.

Figura 94. Cromatograma de la muestra 1 de la condición de cinética 1.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190729-000001.D
Operator   : AdeM
Acquired   : 29 Jul 2019  12:26     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C 1
Misc Info  : Cinetica 6
Vial Number: 1
```

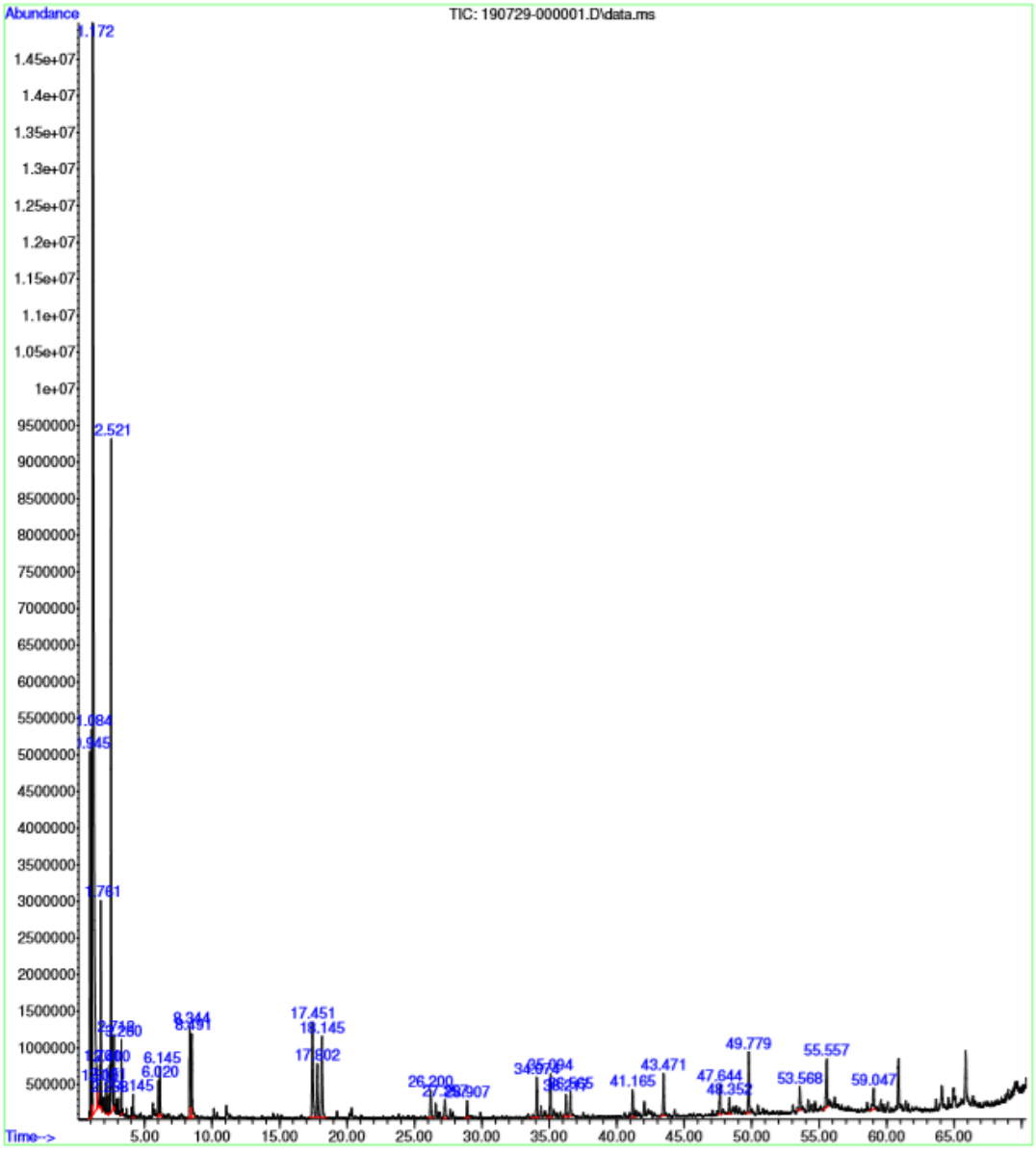


Figura 95. Reporte de cromatografía de la muestra 1 de la condición de cinética 1

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000001.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 12:26
Operator : AdeM
Sample : C 1
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.943	3.22	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	86
2	1.084	2.59	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1462	000763-29-1	91
3	1.170	46.67	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	59
			Methane, dichloronitro-	12675	007119-89-3	59
			Trichloromethane	8712	000067-66-3	45
4	1.502	0.45	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8712	000067-66-3	80
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	72
			Ethane, 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoro-	24431	000306-83-2	64
5	1.702	0.34	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Hexene, 3,4-dimethyl-	6526	030951-95-2	64
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	55
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	53
6	1.761	1.81	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	95
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7444	000584-94-1	90
7	2.152	0.26	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	46
			Cyclopentane, 1-ethyl-1-methyl-	6619	016747-50-5	38
			1,1,4-Trimethylcyclohexane	11216	007094-27-1	35
8	2.257	0.24	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12289	002213-23-2	81
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12302	002213-23-2	64
			Hexane, 2,4-dimethyl-	7434	000589-43-5	58
9	2.403	0.65	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	81
10	2.521	10.97	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	97
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	93
			Cyclopentane, 1,2,3-trimethyl-, (1.alpha.,2.alpha.,3.alpha.)-	6657	002613-69-6	53
11	2.712	0.76	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	93

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000001.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 12:26
Operator : AdeM
Sample : C 1
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-, (1. alpha.,2.beta.,4.beta.)-	11276	007667-60-9	90
12	3.281	0.90	C:\Database\NIST05a.L			
			1H-Pyrazole, 4,5-dihydro-3-methyl-	1341	001911-30-4	43
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38
			Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	17442	1000152-79-7	38
13	4.145	0.40	C:\Database\NIST05a.L			
			trans-1-Butyl-2-methylcyclopropane	6635	038851-70-6	47
			Octane, 2-chloro-	22222	000628-61-5	47
			Octane, 3-chloro-	22219	001117-79-9	47
14	6.019	0.75	C:\Database\NIST05a.L			
			Decane, 4-methyl-	27242	002847-72-5	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Ether, hexyl pentyl	37797	032357-83-8	64
15	6.146	0.96	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	83
			Decane, 3,3,5-trimethyl-	46158	062338-13-0	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	64
16	8.343	2.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			2-Pentene, 2-methyl-	1448	000625-27-4	30
17	8.489	2.35	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	49
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
18	17.450	3.64	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	30
19	17.804	1.88	C:\Database\NIST05a.L			
			2,3-Dimethyl-3-heptene, (Z)-	11220	059643-73-1	47
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	38
20	18.145	3.09	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	27
21	26.201	0.96	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			3-Isopropyl-5-methyl-hex-4-en-2-on	25664	077142-85-9	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, cis-	17451	062238-31-7	35

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000001.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 12:26
Operator : AdeM
Sample : C 1
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
22	27.256	0.72	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Isopropyl-5-methyl-hex-4-en-2-on	25664	077142-85-9	35
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	27
			3-Hexene, 2,5-dimethyl-	6549	015910-22-2	25
23	28.908	0.55	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	43
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
24	34.075	1.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Bacchotricuneatin c	148777	066563-30-2	45
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
25	35.094	1.56	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
26	36.217	0.64	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
27	36.567	0.80	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
28	41.166	0.91	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl met hyl	25685	017983-26-5	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, trans-	17459	062238-29-3	35
29	43.472	1.32	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1- one	24154	025183-82-8	64
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
30	47.643	1.01	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			4,4,7-Trimethyl-oct-5-enal	34863	1000144-08-6	38
31	48.353	0.57	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
32	49.781	1.95	C:\Database\NIST05a.L			

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000001.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 12:26
Operator : AdeM
Sample : C 1
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	43
33	53.570	0.66	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	49
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35054	016538-89-9	35
34	55.558	1.76	C:\Database\NIST05a.L			
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
35	59.047	0.89	C:\Database\NIST05a.L			
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	59
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46

Figura 96. Cromatograma de la muestra 2 de la condición de cinética 1.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190729-000002.D
Operator   : AdeM
Acquired   : 29 Jul 2019  13:45     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C 2
Misc Info  : Cinetica 6
Vial Number: 2
```

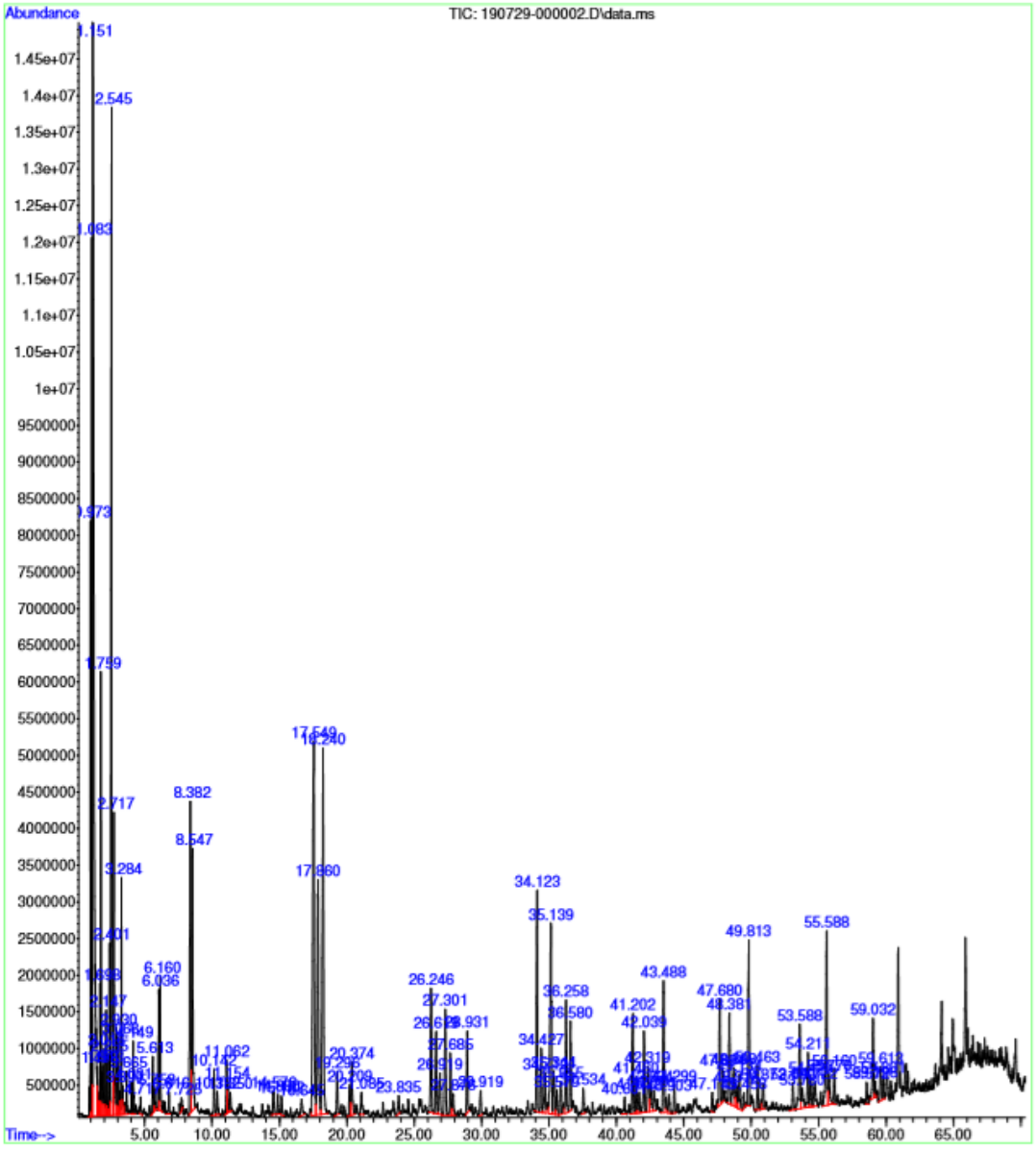


Figura 97. Reporte de cromatografía de la muestra 2 de la condición de cinética 1.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000002.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 13:45
Operator : AdeM
Sample : C 2
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.974	1.60	C:\Database\NIST05a.L			
			Pentane	693	000109-66-0	90
			Pentane	692	000109-66-0	90
			Pentane	695	000109-66-0	90
2	1.083	2.12	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	95
			1-Pentene, 2-methyl-	1462	000763-29-1	93
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	81
3	1.152	14.87	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	90
			Trichloromethane	8712	000067-66-3	74
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	64
4	1.497	0.30	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	76
			Trichloromethane	8712	000067-66-3	64
			Acetyl chloride, dichloro-	20878	000079-36-7	50
5	1.698	0.49	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	70
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	70
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	64
6	1.757	1.49	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7430	000589-53-7	96
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	96
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
7	1.911	0.29	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Heptene, 2-methyl-	6493	015870-10-7	76
			1-Heptene, 2-methyl-	6502	015870-10-7	76
			2,4-Dimethyl-1-hexene	6510	016746-87-5	64
8	2.016	0.33	C:\Database\NIST05a.L			
			1,3-Dimethyl-1-cyclohexene	5824	002808-76-6	76
			Cyclopentene, 1,2,3-trimethyl-	5846	000473-91-6	70
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5820	001515-79-3	70
9	2.148	0.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentane, 1,1,3,4-tetramethyl-, trans-	11272	020309-77-7	72
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	46
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11209	013427-43-5	38
10	2.257	0.28	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12300	002213-23-2	94
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12302	002213-23-2	94
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12289	002213-23-2	91
11	2.403	0.90	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	93

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Mon Aug 05 10:42:50 2019 Page: 1

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000002.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 13:45
Operator : AdeM
Sample : C 2
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	2.544	8.20	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	97
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	90
			Cyclopentane, 1,2,3-trimethyl-, (1 .alpha.,2.alpha.,3.alpha.)-	6656	002613-69-6	53
13	2.716	1.47	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	91
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
14	2.930	0.47	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	87
			1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	10357	074779-65-0	74
15	3.067	0.36	C:\Database\NIST05a.L			
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	93
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	10357	074779-65-0	76
16	3.285	1.04	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	47
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	38
17	3.390	0.22	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentane, 1-ethyl-1-methyl-	6620	016747-50-5	47
			3-Methyl-2-butenoic acid, 2-ethylc yclohexyl ester	64237	1000279-23-5	47
			Oxalic acid, cyclohexyl nonyl este	123468	1000309-31-1	47
18	3.667	0.28	C:\Database\NIST05a.L			
			1,4-Hexadiene	1176	000592-45-0	50
			Cyclohexene	1168	000110-83-8	50
			Cyclohexene	1167	000110-83-8	50
19	4.031	0.16	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	47
			Boranamine, 1-ethyl-N,N-dimethyl-1 -(1-methyl-2-propenyl)-	17266	042843-12-9	47
			Cyclopropane, 1-hexyl-2-methyl-	17419	062238-09-9	45
20	4.149	0.44	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Decene, (Z)-	17338	020348-51-0	38
			3,7-Dimethyl-3-octyl methylphospho nofluoridate	83429	159395-79-6	35
			Cyclopentane, 1-ethyl-2-methyl-, c is-	6649	000930-89-2	35
21	4.718	0.14	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 4-methyl-	18501	017301-94-9	72
			Nonane, 4-methyl-	18502	017301-94-9	49
			Heptane, 3-ethyl-	12273	015869-80-4	47
22	5.614	0.52	C:\Database\NIST05a.L			

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000002.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 13:45
Operator : AdeM
Sample : C 2
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	53
			1-Octene, 3,3-dimethyl-	17377	074511-51-6	53
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11209	013427-43-5	53
23	5.759	0.16	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropane, (1,2-dimethylpropyl)	6646	006976-27-8	50
			2-Decene, 4-methyl-, (Z)-	25955	074630-30-1	49
			1-Butene, 3,3-dimethyl-	1480	000558-37-2	43
24	6.037	0.76	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Ether, hexyl pentyl	37797	032357-83-8	64
25	6.160	0.95	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Octane, 2,3,6,7-tetramethyl-	36467	052670-34-5	78
			Decane, 4-methyl-	27242	002847-72-5	72
26	6.815	0.19	C:\Database\NIST05a.L			
			5-Undecene	25903	004941-53-1	87
			3-Undecene, (E)-	25916	001002-68-2	87
			4-Undecene, (E)-	25923	000693-62-9	83
27	7.724	0.11	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Methyl-2-butenoic acid, 6-ethyl-3-octyl ester	85376	1000279-22-7	59
			Cyclohexane, butyl-	17356	001678-93-9	53
			Oxalic acid, cyclohexyl undecyl ester	140132	1000309-31-3	53
28	8.384	2.87	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	38
29	8.548	2.70	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	49
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	45
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
30	10.144	0.44	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	38
			2,2-Dimethyl-3-heptene trans	11219	019550-75-5	38
			2,3-Dimethyl-2-heptene	11184	003074-64-4	30
31	10.381	0.24	C:\Database\NIST05a.L			
			2,2-Dimethyl-3-heptene trans	11219	019550-75-5	38
			1.alpha.,2.beta.,3.alpha.,4.beta.-Tetramethylcyclopentane	11274	002532-67-4	38
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	30
32	11.063	0.49	C:\Database\NIST05a.L			
			2,6-Octadiene, 2,7-dimethyl-	16336	016736-42-8	43
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	38

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000002.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 13:45
Operator : AdeM
Sample : C 2
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
33	11.154	0.32	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanecarboxaldehyde, 2-meth yl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-, trans -(.+-.)-	33479	097231-35-1	45
			1,4-Hexadiene, 3,3,5-trimethyl-	10369	074753-00-7	43
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
34	11.350	0.17	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexanecarboxylic acid, 4-prop yl-, 4-cyanophenyl ester, trans-	106270	062439-33-2	47
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	38
			Cyclopropanecarboxylic acid, 3-chl oroprop-2-enyl ester	29856	1000299-38-3	37
35	14.575	0.32	C:\Database\NIST05a.L			
			Decane, 4-methyl-	27248	002847-72-5	45
			2,4,4-Trimethyl-1-hexene	11196	051174-12-0	41
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	30
36	14.879	0.19	C:\Database\NIST05a.L			
			Undecane, 4,6-dimethyl-	46121	017312-82-2	78
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	68
			Dodecane, 4,6-dimethyl-	55992	061141-72-8	68
37	15.152	0.21	C:\Database\NIST05a.L			
			Dodecane, 4,6-dimethyl-	55992	061141-72-8	83
			Hexane, 3,3-dimethyl-	7445	000563-16-6	72
			Hexane, 3,3-dimethyl-	7446	000563-16-6	72
38	16.644	0.26	C:\Database\NIST05a.L			
			9-Eicosene, (E)-	112106	074685-29-3	72
			5-Octadecene, (E)-	93546	007206-21-5	72
			Cyclodecane	17324	000293-96-9	62
39	17.549	5.85	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
40	17.859	3.15	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	30
41	18.241	4.75	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	38
42	19.296	0.48	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Octene, 2,2-dimethyl-	17380	086869-76-3	43
			Cyclohexane, 1,1,2-trimethyl-	11231	007094-26-0	41
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
43	20.210	0.36	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 3-ethyl-5-methyl-1-pr	35085	1000151-39-5	38

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000002.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 13:45
Operator : AdeM
Sample : C 2
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			opyl-			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
			Cyclohexane, 1,1,2-trimethyl-	11231	007094-26-0	38
44	20.374	0.67	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	27
			2-Isobutylideneamino-3-methylbutyronitrile	25051	125213-17-4	22
45	21.084	0.28	C:\Database\NIST05a.L			
			11-Dodecen-1-ol, 2,4,6-trimethyl-, (R,R,R)-	76047	027829-54-5	64
			1-Nitrododecane	67813	016891-99-9	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-1-methyl-	25976	061141-79-5	38
46	23.836	0.24	C:\Database\NIST05a.L			
			Dodecane, 4,6-dimethyl-	55993	061141-72-8	59
			Heptacosane	165301	000593-49-7	59
			Sulfurous acid, nonyl 2-propyl ester	91714	1000309-12-0	58
47	26.247	1.43	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	35
			3-Hexene, 2,5-dimethyl-	6549	015910-22-2	25
48	26.619	0.95	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	43
49	26.920	0.58	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	46
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
50	27.302	1.29	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	46
			Dichloroacetic acid, heptadecyl ester	159590	1000282-98-2	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	17436	061142-69-6	35
51	27.684	0.62	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	53
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	38
52	27.875	0.29	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
			2-Propanamine, N,N'-methanetetrayl bis-	10898	000693-13-0	30
			Decane, 1,1'-oxybis-	123793	002456-28-2	25

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000002.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 13:45
Operator : AdeM
Sample : C 2
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
53	28.930	0.83	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Cyclohexane, 3-ethyl-5-methyl-1-propyl-	35085	1000151-39-5	47
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
54	29.917	0.29	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	43
			4-Decene, 3-methyl-, (E)-	25944	062338-47-0	43
55	34.125	2.17	C:\Database\NIST05a.L			
			Bacchotricuneatin c	148777	066563-30-2	45
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
56	34.425	0.63	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
57	34.712	0.54	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
58	35.139	2.68	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
59	35.344	0.60	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
60	35.580	0.28	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Decene, 2,2-dimethyl-, (E)-	35053	055499-02-0	55
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			2-Propanamine, N,N'-methanetetrayl bis-	10898	000693-13-0	27
61	35.853	0.41	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	35
62	36.258	1.22	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
63	36.581	0.97	C:\Database\NIST05a.L			

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000002.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 13:45
Operator : AdeM
Sample : C 2
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
64	37.536	0.28	C:\Database\NIST05a.L			
			4-Octene, 2,3,6,7-tetramethyl-	35055	063830-66-0	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	38
			4-Nonene, 2,3,3-trimethyl-, (Z)-	35069	063830-68-2	35
65	40.602	0.22	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	53
			2,3,6-Trimethylhept-3-en-1-ol	27112	1000111-56-8	50
			2-Isopropenyl-5-methylhex-4-enal	24118	075697-98-2	50
66	41.202	1.23	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	38
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
67	41.462	0.40	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	38
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	35
68	41.671	0.26	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	45
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	43
69	42.039	0.92	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
70	42.317	0.64	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	30
71	42.535	0.38	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	41
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35054	016538-89-9	22
72	42.790	0.28	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	43
			1-Hexadecanol, 2-methyl-	96338	002490-48-4	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
73	43.486	1.57	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			4,8-Dimethyl-nona-3,8-dien-2-one	33403	1000190-70-5	47

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000002.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 13:45
Operator : AdeM
Sample : C 2
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
74	43.904	0.20	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	49
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	43
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	38
75	44.300	0.31	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1-one	24154	025183-82-8	64
			2-Hepten-4-one, 6-hydroxy-2-methyl-6-(4-methyl-3-cyclohexen-1-yl)-	82514	038043-98-0	56
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
76	47.111	0.21	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			Decanoic acid, 5,5-dimethyl-9-oxo-, methyl ester	77094	077384-10-2	50
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, trans-	17459	062238-29-3	43
77	47.680	1.21	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35054	016538-89-9	35
78	47.893	0.26	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	49
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	35
79	48.380	0.99	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	38
			Cyanamide, dibutyl-	26626	002050-54-6	35
80	48.699	0.63	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,2-trimethyl-	11232	007094-26-0	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35054	016538-89-9	35
81	48.917	0.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	45
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
82	49.135	0.45	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Trichloroacetic acid, 3-methylbut-2-enyl ester	78875	1000299-25-5	27
83	49.458	0.16	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	49
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000002.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 13:45
Operator : AdeM
Sample : C 2
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	30
84	49.813	1.94	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	47
85	50.463	0.45	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	58
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
86	50.873	0.33	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	38
87	53.093	0.31	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	53
			1-Ethyl-2,2,6-trimethylcyclohexane	25974	071186-27-1	50
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
88	53.588	1.11	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			4,4,7-Trimethyl-oct-5-enal	34863	1000144-08-6	38
89	53.779	0.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	55
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
90	54.212	0.61	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Sulfurous acid, butyl heptadecyl ester	163811	1000309-18-4	35
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	35
91	54.425	0.36	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	49
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, trans-	17459	062238-29-3	35
92	54.721	0.40	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	45
			Cyclohexane, 1,1,2-trimethyl-	11232	007094-26-0	30
93	55.590	2.10	C:\Database\NIST05a.L			
			(+-)-3-(2-Carboxy-trans-propenyl)-2,2-dimethylcyclopropane-trans-1-carboxylic acid,[1.alpha., 3.beta.(E)]-	55435	040253-03-0	60

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000002.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 13:45
Operator : AdeM
Sample : C 2
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
94	55.776	0.48	C:\Database\NIST05a.L			
			(+-)-3-(2-Carboxy-trans-propenyl)-2,2-dimethylcyclopropane-trans-1-carboxylic acid,[1.alpha., 3.beta.(E)]-	55435	040253-03-0	78
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	47
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
95	56.158	0.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	53
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50
96	58.574	0.25	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,4-dimethyl-, cis-	17452	062238-30-6	47
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	43
97	59.033	0.93	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,4-dimethyl-, trans-	17460	062238-32-8	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, trans-	17459	062238-29-3	35
98	59.197	0.14	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	27
			Acetic acid, trifluoro-, 1-methylethenyl ester	26093	000400-39-5	25
99	59.611	0.40	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	49
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Carbonic acid, hexadecyl isobutyl ester	148886	1000314-61-3	43
100	59.802	0.27	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-, cis-	17421	000824-43-1	35

Figura 98. Cromatograma de la muestra 3 de la condición de cinética 1.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190729-000003.D
Operator   : AdeM
Acquired   : 29 Jul 2019  15:02     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C 3
Misc Info  : Cinetica 6
Vial Number: 3
```

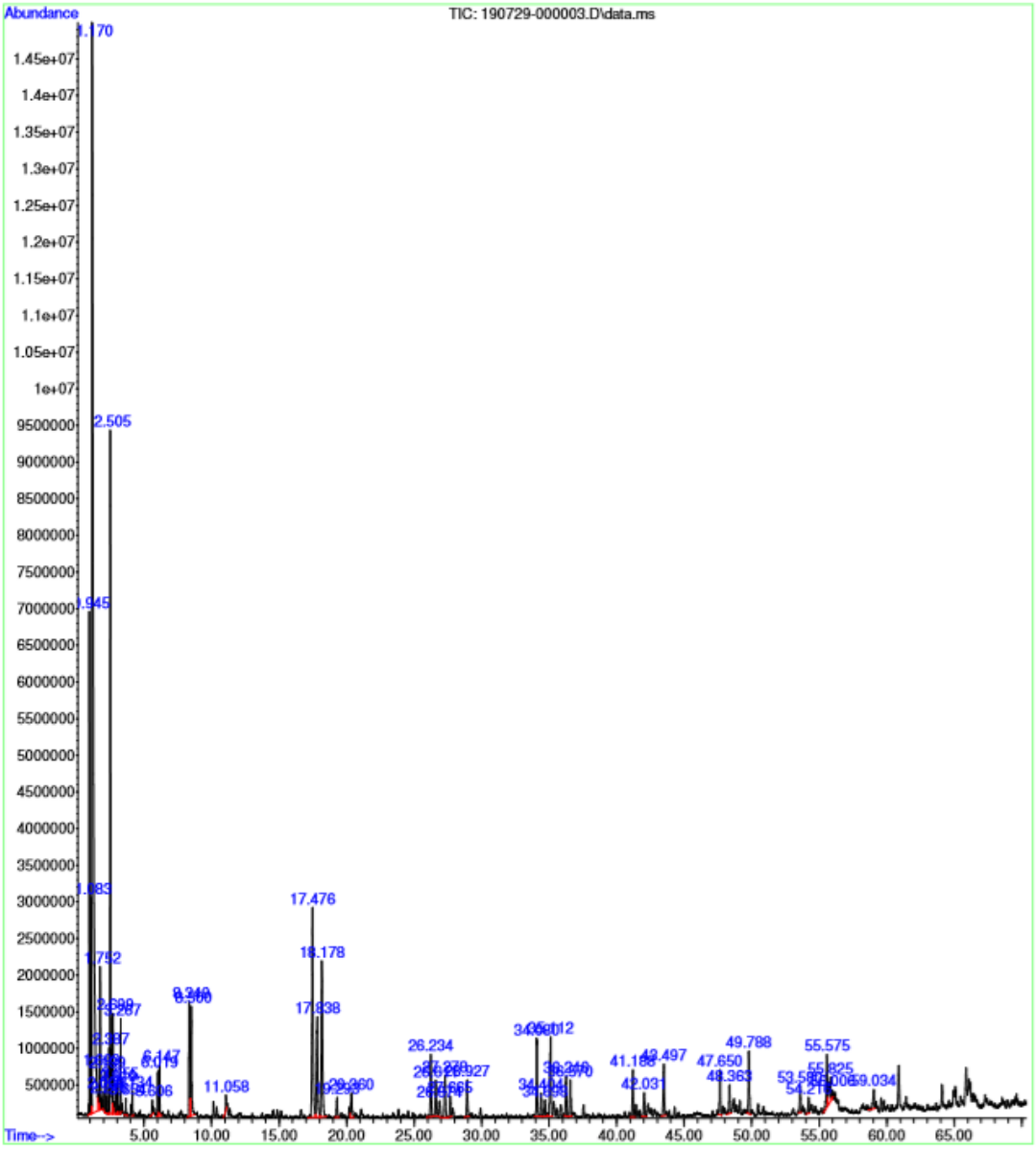


Figura 99. Reporte de cromatografía de la muestra 3 de la condición de cinética 1.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000003.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 15:02
Operator : AdeM
Sample : C 3
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	2.50	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	52
2	1.083	0.98	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.170	37.30	C:\Database\NIST05a.L			
			Methane, dichloronitro-	12675	007119-89-3	72
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	59
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	50
4	1.693	0.28	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Hexene, 3,4-dimethyl-	6526	030951-95-2	64
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	55
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	55
5	1.752	1.02	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	90
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	81
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	76
6	2.011	0.14	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentene, 1,2,3-trimethyl-	5846	000473-91-6	60
			1,3-Dimethyl-1-cyclohexene	5824	002808-76-6	60
			Cyclohexene, 3,5-dimethyl-	5814	000823-17-6	55
7	2.139	0.27	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Decene, 2,2-dimethyl-, (E)-	35053	055499-02-0	59
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	43
			Cyclopentane, 1-ethyl-1-methyl-	6619	016747-50-5	38
8	2.248	0.12	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12289	002213-23-2	64
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12302	002213-23-2	58
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12300	002213-23-2	52
9	2.389	0.62	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	93
10	2.507	8.76	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	97
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	93
			Cyclopentane, 1,2,3-trimethyl-, (1 .alpha.,2.alpha.,3.alpha.)-	6656	002613-69-6	53
11	2.698	0.91	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	96
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000003.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 15:02
Operator : AdeM
Sample : C 3
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	90
12	2.921	0.37	C:\Database\NIST05a.L			
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	93
			2,4-Heptadiene, 2,4-dimethyl-	10355	074421-05-9	83
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
13	3.053	0.34	C:\Database\NIST05a.L			
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	93
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			Cyclopentane, 2-ethylidene-1,1-dim ethyl-	10390	056324-66-4	80
14	3.267	0.84	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	53
			2-Pentanone, 3-[(acetyloxy)methyl] -3,4-dimethyl-, (.+-.)-	47073	078641-04-0	50
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	47
15	3.653	0.21	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Cyclopentyl-1-propanol	12170	000767-05-5	53
			4-Methyl-1,3-pentadiene	1207	000926-56-7	53
			1,4-Hexadiene	1176	000592-45-0	50
16	4.136	0.32	C:\Database\NIST05a.L			
			cis-1-Butyl-2-methylcyclopropane	6621	038851-69-3	58
			Acetic acid, octyl ester	37521	000112-14-1	53
			trans-1-Butyl-2-methylcyclopropane	6635	038851-70-6	53
17	5.605	0.28	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Decene, 4-methyl-, (Z)-	25955	074630-30-1	70
			1-Octene, 3,3-dimethyl-	17377	074511-51-6	50
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	47
18	6.019	0.65	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Decane, 2,8,8-trimethyl-	46157	1000060-81-2	64
			Sulfurous acid, hexyl 2-pentyl est er	82079	1000309-15-6	64
19	6.146	0.82	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Octane, 2,3,6,7-tetramethyl-	36467	052670-34-5	78
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
20	8.348	2.40	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	46
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	43
21	8.498	2.45	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	49
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
22	11.059	0.19	C:\Database\NIST05a.L			

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000003.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 15:02
Operator : AdeM
Sample : C 3
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			2,6-Octadiene, 2,7-dimethyl-	16336	016736-42-8	47
			Cyclohexane, 1,1'-(1-methylethylidene)bis-	63053	054934-90-6	38
			1,4-Hexadiene, 3,3,5-trimethyl-	10369	074753-00-7	37
23	17.477	5.97	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
24	17.836	3.03	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	42
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
25	18.177	4.75	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	38
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
26	19.292	0.45	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Octene, 2,2-dimethyl-	17380	086869-76-3	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
			Hexane, 2,3,4-trimethyl-	12319	000921-47-1	38
27	20.360	0.72	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	38
			4-Hexen-1-ol, 2-ethenyl-2,5-dimethyl-	25680	050598-21-5	27
			Methanone, dicyclopropyl-	5667	001121-37-5	22
28	26.233	1.49	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	43
29	26.610	0.89	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	17436	061142-69-6	38
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
30	26.874	0.49	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, trans-	17459	062238-29-3	35
31	27.279	1.18	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	53
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Bacchotricuneatin c	148777	066563-30-2	38
32	27.666	0.47	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	43
			1,3-Dimethyl-5-isobutylcyclohexane	35077	013131-76-5	38

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000003.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 15:02
Operator : AdeM
Sample : C 3
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
33	28.926	0.81	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
34	34.079	1.98	C:\Database\NIST05a.L			
			Bacchotricuneatin c	148777	066563-30-2	45
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
35	34.402	0.57	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35058	016538-89-9	27
36	34.698	0.44	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	38
37	35.112	2.49	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
38	36.244	1.03	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
39	36.572	0.96	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1,1'-(1,2-dimethyl-1,2-ethanediyl)bis-	73084	074663-71-1	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	37
40	41.189	1.05	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
41	42.030	0.69	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
42	43.495	1.30	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Hepten-4-one, 6-hydroxy-2-methyl-6-(4-methyl-3-cyclohexen-1-yl)-	82514	038043-98-0	64
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000003.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 15:02
Operator : AdeM
Sample : C 3
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	27143	013702-56-2	47
43	47.648	1.03	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	35
			4,4,7-Trimethyl-oct-5-enal	34863	1000144-08-6	35
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35058	016538-89-9	27
44	48.362	0.81	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	38
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35054	016538-89-9	35
45	49.790	1.67	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	64
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	38
46	53.579	0.53	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	49
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
47	54.216	0.40	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	45
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	27
48	55.576	1.29	C:\Database\NIST05a.L			
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	38
49	55.826	1.07	C:\Database\NIST05a.L			
			(+-)-3-(2-Carboxy-trans-propenyl)-2,2-dimethylcyclopropane-trans-1-carboxylic acid,[1.alpha., 3.beta.(E)]-	55435	040253-03-0	68
			2-Hepten-4-one, 6-hydroxy-2-methyl-6-(4-methyl-3-cyclohexen-1-yl)-	82514	038043-98-0	56
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	53
50	56.004	0.10	C:\Database\NIST05a.L			
			(+-)-3-(2-Carboxy-trans-propenyl)-2,2-dimethylcyclopropane-trans-1-carboxylic acid,[1.alpha., 3.beta.(E)]-	55435	040253-03-0	59
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	53
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50
51	59.033	0.63	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	45
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	27

Figura 100. Cromatograma de la muestra 4 de la condición de cinética 1.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190729-000004.D
Operator   : AdeM
Acquired   : 29 Jul 2019  16:19     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C 4
Misc Info  : Cinetica 6
Vial Number: 4
```

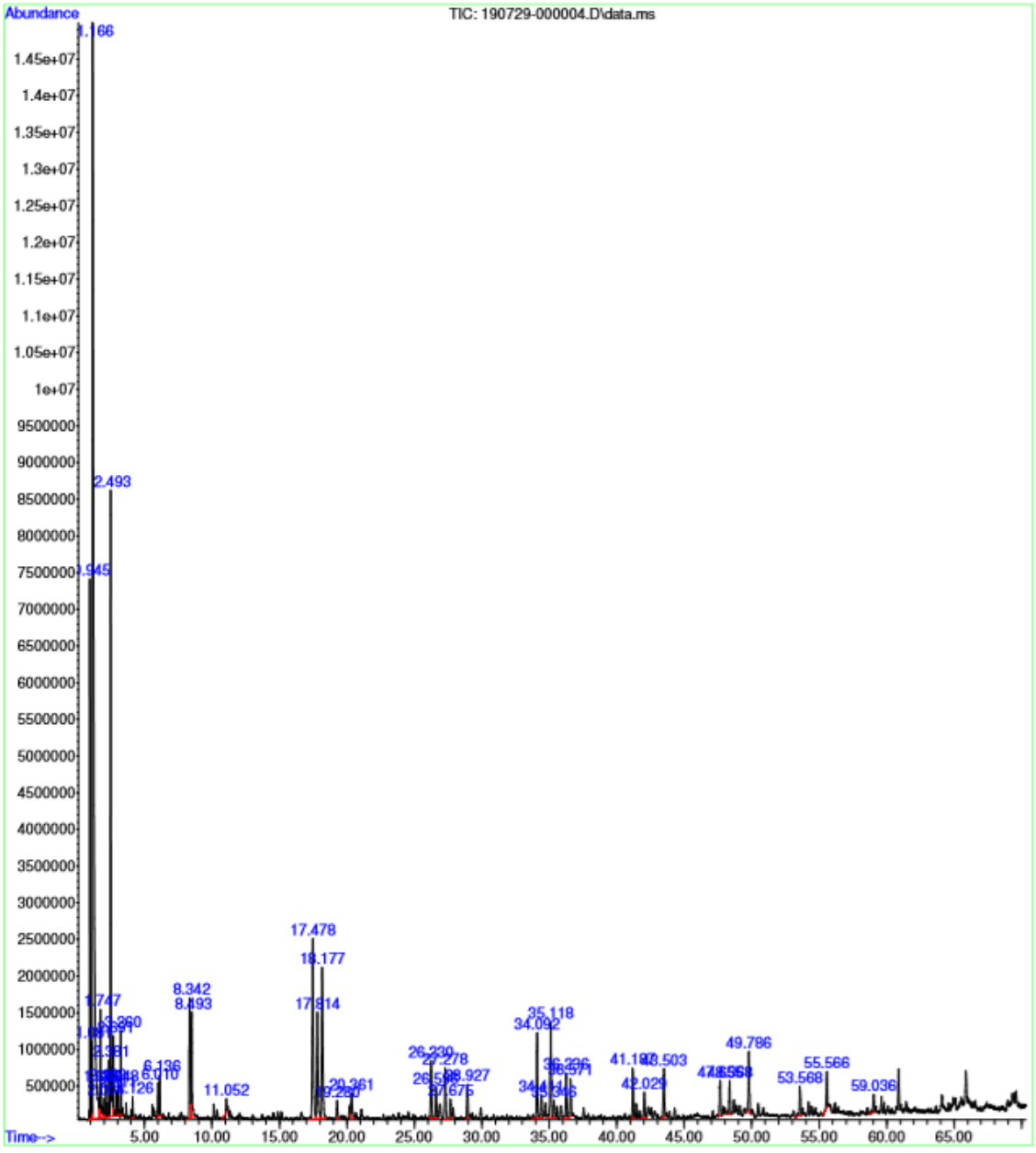


Figura 101. Reporte de cromatografía de la muestra 4 de la condición de cinética 1.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000004.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 16:19
Operator : AdeM
Sample : C 4
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	3.08	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
2	1.079	0.37	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.165	39.42	C:\Database\NIST05a.L			
			Methane, dichloronitro-	12675	007119-89-3	72
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	59
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	47
4	1.688	0.29	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	49
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	45
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	42
5	1.748	1.04	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	93
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	87
			Heptane, 4-methyl-	7432	000589-53-7	83
6	2.002	0.21	C:\Database\NIST05a.L			
			trans-3,5-Dimethylcyclohexene	5844	056021-63-7	55
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5820	001515-79-3	55
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5821	001515-79-3	55
7	2.134	0.27	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	49
			1-Nonanol, 4,8-dimethyl-	37804	033933-80-1	40
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11209	013427-43-5	40
8	2.380	0.56	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	76
9	2.494	7.84	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	97
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	93
			Cyclopentane, 1,2,3-trimethyl-, (1 .alpha.,2.alpha.,3.alpha.)-	6656	002613-69-6	58
10	2.689	0.92	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11281	001795-26-2	90
11	2.912	0.27	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Mon Aug 05 10:50:06 2019 Page: 1

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000004.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 16:19
Operator : AdeM
Sample : C 4
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	74
			Cyclopropane, 1,1-dimethyl-2-(2-methyl-1-propenyl)-	10397	033422-32-1	72
12	3.048	0.28	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			Cyclopropane, 1,1-dimethyl-2-(2-methyl-1-propenyl)-	10397	033422-32-1	72
			Cyclohexene, 3,3,5-trimethyl-	10361	000503-45-7	47
13	3.262	0.83	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	53
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	47
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	47
14	4.126	0.30	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Heptanol, 3-methyl-	13253	001070-32-2	64
			1-Undecanol	37779	000112-42-5	59
			Octane, 2-chloro-	22222	000628-61-5	53
15	6.010	0.52	C:\Database\NIST05a.L			
			Hexane, 3,3-dimethyl-	7446	000563-16-6	80
			Octane, 2,3,6,7-tetramethyl-	36467	052670-34-5	78
			Ether, hexyl pentyl	37797	032357-83-8	64
16	6.137	0.61	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	83
			Decane, 4-methyl-	27242	002847-72-5	72
			Octane, 2,3,6,7-tetramethyl-	36467	052670-34-5	72
17	8.343	2.44	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	43
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	38
			2-Pentene, 2-methyl-	1448	000625-27-4	30
18	8.493	2.39	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	49
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	38
19	11.054	0.08	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanecarboxaldehyde, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-, trans-(.+-.)-	33479	097231-35-1	45
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	42
20	17.477	5.88	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	38
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	35
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	35
21	17.813	3.27	C:\Database\NIST05a.L			

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000004.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 16:19
Operator : AdeM
Sample : C 4
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	42
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	35
22	18.177	4.77	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	30
23	19.278	0.46	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	46
			Cyclopropane, 1,1,2-trimethyl-3-(2-methylpropyl)-	17468	041977-43-9	27
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	25
24	20.361	0.79	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	35
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	27
			Cyclohexane, 1,1'-(1-methyl-1,3-propanediyl)bis-	73083	041851-35-8	22
25	26.228	1.59	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
26	26.597	0.85	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, cis-	17451	062238-31-7	35
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	35
27	27.279	1.44	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	46
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	46
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
28	27.675	0.50	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	53
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	50
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
29	28.926	0.93	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			3-Decene, 2,2-dimethyl-, (E)-	35053	055499-02-0	43
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
30	34.093	2.21	C:\Database\NIST05a.L			
			Bacchotricuneatin c	148777	066563-30-2	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	30
31	34.411	0.59	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000004.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 16:19
Operator : AdeM
Sample : C 4
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
32	35.116	2.83	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
33	35.344	0.51	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	27
34	36.235	1.33	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	30
35	36.572	0.98	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	38
36	41.189	1.14	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, trans-	17459	062238-29-3	35
37	42.030	0.74	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	43
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
38	43.504	1.45	C:\Database\NIST05a.L			
			(+-)-3-(2-Carboxy-trans-propenyl)-2,2-dimethylcyclopropane-trans-1-carboxylic acid,[1.alpha., 3.beta.(E)]-	55435	040253-03-0	60
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
39	47.657	0.97	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			4,4,7-Trimethyl-oct-5-enal	34863	1000144-08-6	38
40	48.367	0.94	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000004.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 16:19
Operator : AdeM
Sample : C 4
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35058	016538-89-9	35
41	49.786	1.74	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	47
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
42	53.566	0.79	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35058	016538-89-9	35
43	55.567	0.96	C:\Database\NIST05a.L			
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohe xane	35080	219783-06-9	47
44	59.038	0.62	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			4,4,7-Trimethyl-oct-5-enal	34863	1000144-08-6	35

Figura 102. Cromatograma de la muestra 5 de la condición de cinética 1.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190729-000005.D
Operator   : AdeM
Acquired   : 29 Jul 2019  17:36     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C 5
Misc Info  : Cinetica 6
Vial Number: 5
```

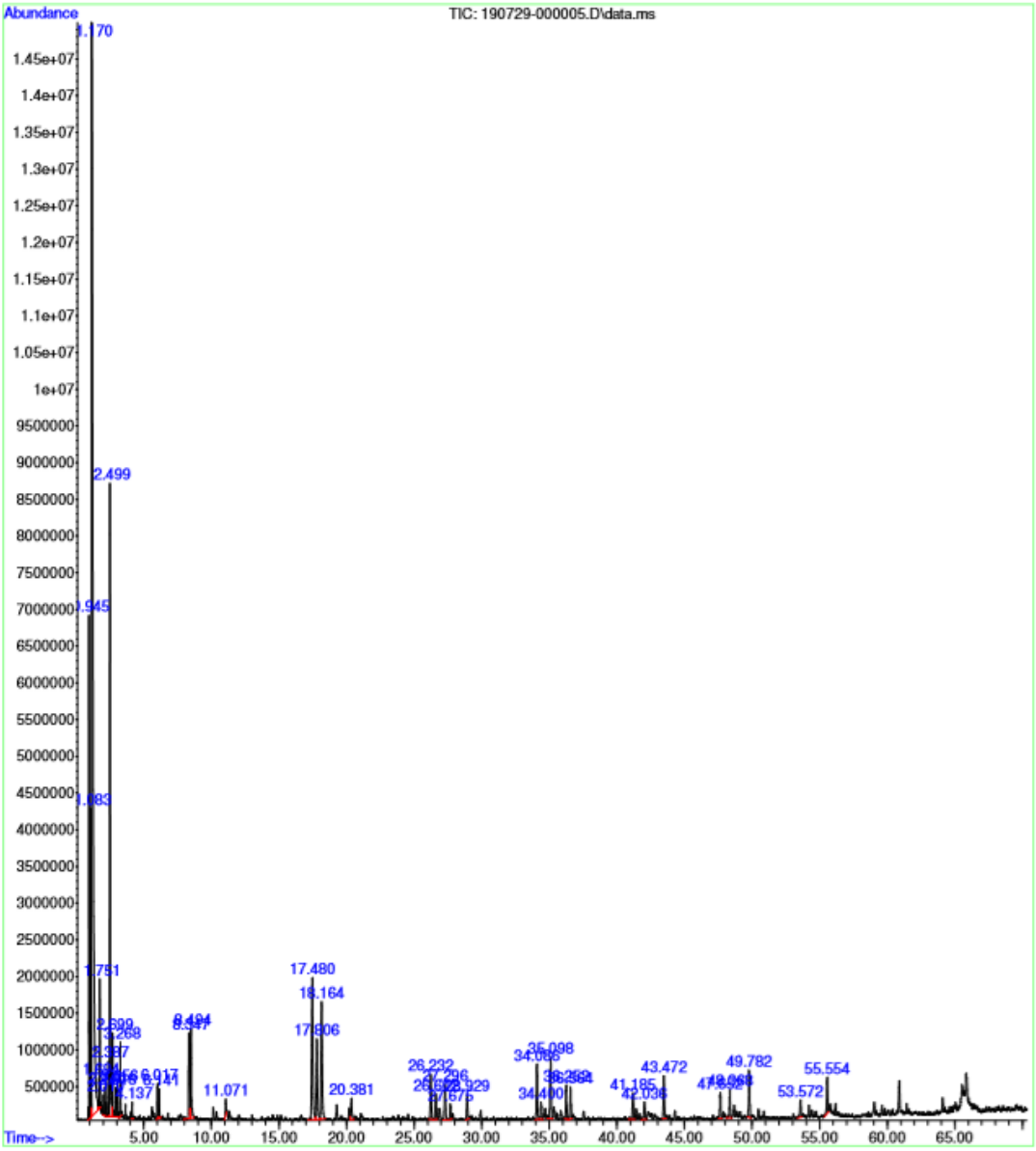


Figura 103. Reporte de cromatografía de la muestra 5 de la condición de cinética 1.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000005.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 17:36
Operator : AdeM
Sample : C 5
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	3.55	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
2	1.084	1.63	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	95
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1462	000763-29-1	91
3	1.170	44.43	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	59
			Methane, dichloronitro-	12675	007119-89-3	59
			Trichloromethane	8712	000067-66-3	45
4	1.693	0.29	C:\Database\NIST05a.L			
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	55
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	55
			trans-3,4-Dimethyl-2-hexene	6571	019550-82-4	53
5	1.752	0.82	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	87
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	87
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	81
6	2.011	0.19	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentene, 1,2,3-trimethyl-	5846	000473-91-6	60
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5820	001515-79-3	55
			trans-3,5-Dimethylcyclohexene	5844	056021-63-7	55
7	2.139	0.24	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	46
			Cyclopentane, 1-ethyl-1-methyl-	6619	016747-50-5	38
			Cyclopentanone, 2,4,4-trimethyl-	11098	004694-12-6	38
8	2.389	0.59	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	95
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	93
9	2.498	8.91	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	97
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			1-Heptene, 5-methyl-	6498	013151-04-7	50
10	2.698	0.98	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	91
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
11	2.917	0.36	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			2,4-Heptadiene, 2,4-dimethyl-	10355	074421-05-9	74
			2,4-Heptadiene, 2,6-dimethyl-	10358	004634-87-1	72

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000005.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 17:36
Operator : AdeM
Sample : C 5
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	3.058	0.47	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			Cyclohexene, 3,5,5-trimethyl-	10364	000933-12-0	80
			1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	10357	074779-65-0	76
13	3.267	0.85	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	53
			2-Pentanone, 3-[(acetyloxy)methyl]-3,4-dimethyl-, (.+-.)-	47073	078641-04-0	50
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	47
14	4.136	0.28	C:\Database\NIST05a.L			
			cis-1-Butyl-2-methylcyclopropane	6621	038851-69-3	53
			5-Chloro-5-methylnonane	40036	067282-24-0	43
			4-Decene	17317	019689-18-0	43
15	6.019	0.59	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Ether, hexyl pentyl	37797	032357-83-8	64
16	6.142	0.52	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	83
			Decane, 4-methyl-	27242	002847-72-5	80
			Decane, 3,3,5-trimethyl-	46158	062338-13-0	72
17	8.348	2.06	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	38
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	30
18	8.493	2.08	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	45
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
19	11.072	0.30	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	42
			(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	27143	013702-56-2	42
20	17.481	5.22	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	43
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
21	17.804	2.64	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
22	18.164	4.13	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	43

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000005.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 17:36
Operator : AdeM
Sample : C 5
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	35
23	20.379	0.74	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	35
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	27
			Bicyclo[3.1.1]heptan-3-one, 2,6,6-trimethyl-, (1.alpha.,2.beta.,5.alpha.)-	24334	015358-88-0	22
24	26.233	1.31	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
25	26.601	0.79	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	43
			2-Hexene, 4-ethyl-2,3-dimethyl-	17420	1000149-19-7	38
26	27.297	1.12	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Bacchotricuneatin c	148777	066563-30-2	43
			Cyclohexane, 1,1,4,4-tetramethyl-	17429	002223-52-1	38
27	27.675	0.43	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	45
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	38
28	28.930	0.79	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
29	34.088	1.67	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	38
30	34.402	0.54	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
31	35.098	2.17	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
32	36.254	0.98	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	30

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000005.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 17:36
Operator : AdeM
Sample : C 5
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
33	36.563	0.98	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,4-dimethyl-, cis-	17452	062238-30-6	38
34	41.184	0.90	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	38
35	42.035	0.63	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	30
36	43.472	1.23	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	43
37	47.652	0.78	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35054	016538-89-9	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
38	48.367	0.76	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	35
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	27
39	49.781	1.45	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,4-dimethyl-, cis-	17452	062238-30-6	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,4-dimethyl-, trans-	17460	062238-32-8	38
40	53.570	0.54	C:\Database\NIST05a.L			
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
41	55.553	1.05	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	38
			8-(2-Nitrophenoxy)octan-1-ol	103198	167685-26-9	38

Figura 104. Cromatograma de la muestra 6 de la condición de cinética 1.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190729-000006.D
Operator   : AdeM
Acquired   : 29 Jul 2019  18:53     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C 6
Misc Info  : Cinetica 6
Vial Number: 6
```

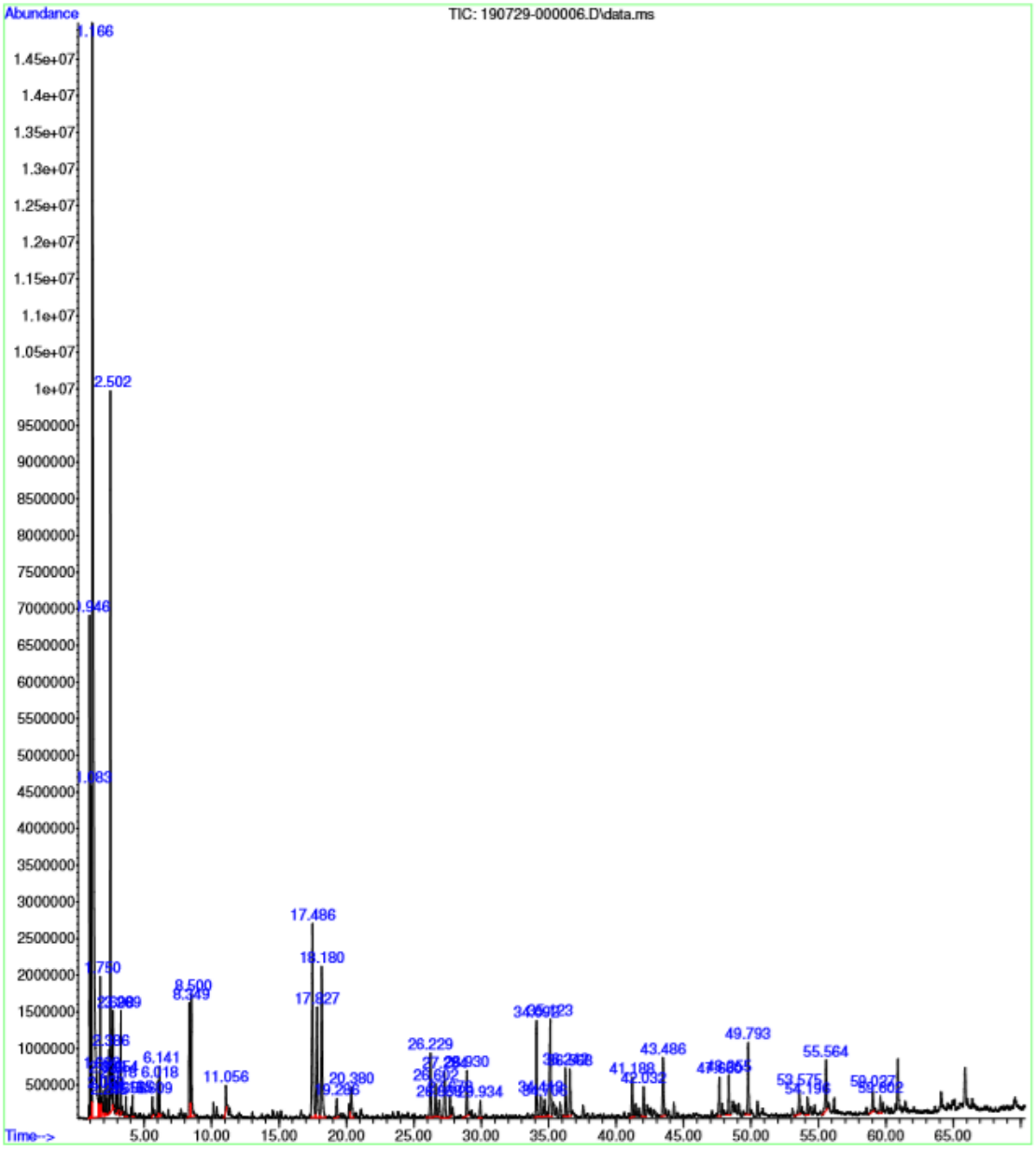


Figura 105. Reporte de cromatografía de la muestra 6 de la condición de cinética 1.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000006.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 18:53
Operator : AdeM
Sample : C 6
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-			
12	2.917	0.33	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			2,4-Heptadiene, 2,6-dimethyl-	10358	004634-87-1	80
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	74
13	3.053	0.30	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			2,4-Heptadiene, 2,4-dimethyl-	10355	074421-05-9	83
			Cyclopentane, 2-ethylidene-1,1-dim ethyl-	10390	056324-66-4	72
14	3.271	1.04	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	50
			3-Penten-2-one	1370	000625-33-2	47
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	47
15	3.653	0.25	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Propenoic acid, cyclohexyl ester	26506	003066-71-5	64
			1,6-Octadiene, 2,6-dimethyl-, (Z)-	16376	006874-34-6	59
			Cyclopropane, 2-(1,1-dimethyl-2-pr openyl)-1,1-dimethyl-	16441	081051-15-2	53
16	4.136	0.29	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecanol	37779	000112-42-5	59
			cis-1-Butyl-2-methylcyclopropane	6621	038851-69-3	53
			trans-1-Butyl-2-methylcyclopropane	6635	038851-70-6	53
17	5.609	0.33	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11209	013427-43-5	59
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	59
			1-Octene, 3,3-dimethyl-	17377	074511-51-6	50
18	6.019	0.55	C:\Database\NIST05a.L			
			Octane, 2,3,6,7-tetramethyl-	36467	052670-34-5	78
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	72
			Heptane, 2,5,5-trimethyl-	18539	001189-99-7	64
19	6.142	0.66	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Undecane, 4-methyl-	36439	002980-69-0	64
20	8.348	2.20	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			2-Pentene, 2-methyl-	1448	000625-27-4	30
21	8.502	2.31	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	52
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
22	11.054	0.30	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	53

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Mon Aug 05 10:53:51 2019 Page: 2

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000006.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 18:53
Operator : AdeM
Sample : C 6
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclopropanecarboxaldehyde, 2-meth yl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-, trans -(.+-.)-	33479	097231-35-1	45
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
23	17.486	5.12	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	35
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
24	17.827	3.05	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	42
			4-Decene, 3-methyl-, (E)-	25944	062338-47-0	35
25	18.182	4.26	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	38
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
26	19.287	0.51	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	38
			Cyclohexane, 1,1,4,4-tetramethyl-	17429	002223-52-1	35
27	20.379	0.93	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	30
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	27
			cis-2,6-Dimethyl-2,6-octadiene	16346	002492-22-0	22
28	26.228	1.61	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	38
29	26.601	0.83	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	38
			Hexane, 2,3,4-trimethyl-	12319	000921-47-1	35
30	26.888	0.52	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	38
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	17436	061142-69-6	38
31	27.284	1.23	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Decene, 2,2-dimethyl-, (E)-	35053	055499-02-0	38
			3-Isopropyl-5-methyl-hex-4-en-2-on	25664	077142-85-9	35
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	27
32	27.679	0.48	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	53

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000006.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 18:53
Operator : AdeM
Sample : C 6
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
33	28.930	1.06	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 3-ethyl-5-methyl-1-propyl-	35085	1000151-39-5	43
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	42
			3,7-Nonadien-2-one, 4,8-dimethyl-	33405	000817-88-9	42
34	29.935	0.38	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			4-Octene, 2,3,6,7-tetramethyl-	35055	063830-66-0	38
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	38
35	34.093	2.18	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
36	34.411	0.57	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	43
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
37	34.707	0.48	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	30
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
38	35.121	2.64	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
39	36.240	1.05	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	27
40	36.567	1.21	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
41	41.189	1.02	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
42	42.030	0.76	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	43

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000006.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 18:53
Operator : AdeM
Sample : C 6
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			2-Hexyl-1-octanol	67337	019780-79-1	38
43	43.486	1.50	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35058	016538-89-9	35
44	47.661	0.95	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
			3-Isopropyl-5-methyl-hex-4-en-2-on	25664	077142-85-9	35
45	48.357	0.94	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35058	016538-89-9	27
			1-Butene, 3,3-dimethyl-	1480	000558-37-2	18
46	49.795	1.82	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
			Bicyclo[2.2.2]octan-1-amine	10566	001193-42-6	38
47	53.575	0.66	C:\Database\NIST05a.L			
			4,4,7-Trimethyl-oct-5-enal	34863	1000144-08-6	38
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35058	016538-89-9	35
			3-Isopropyl-5-methyl-hex-4-en-2-on	25664	077142-85-9	35
48	54.198	0.42	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	49
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
49	55.562	1.42	C:\Database\NIST05a.L			
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
50	59.029	0.54	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			3-Trifluoroacetoxy-6-ethyldecane	113014	116436-59-0	43
51	59.602	0.36	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Sulfurous acid, butyl heptadecyl ester	163811	1000309-18-4	35

Figura 106. Cromatograma de la muestra 1 de la condición de cinética 1.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190729-000007.D
Operator   : AdeM
Acquired   : 29 Jul 2019  20:11     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C 7
Misc Info  : Cinetica 6
Vial Number: 7
```

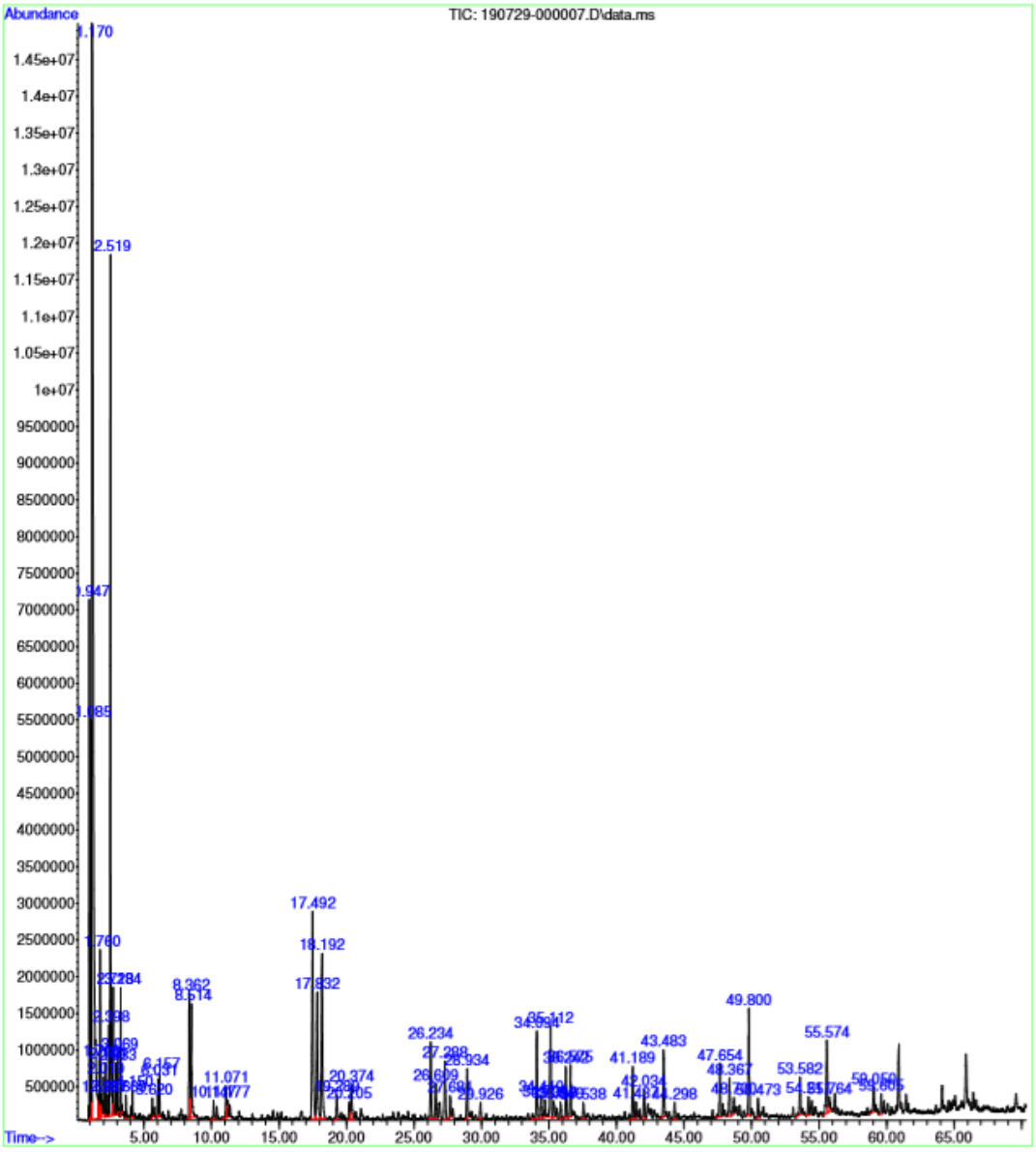


Figura 107. Reporte de cromatografía de la muestra 1 de la condición de cinética 1.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000007.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 20:11
Operator : AdeM
Sample : C 7
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 7 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	2.712	1.06	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	95
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11281	001795-26-2	90
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	90
13	2.935	0.41	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Heptadiene, 2,6-dimethyl-	10358	004634-87-1	86
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			Cyclohexene, 3,5,5-trimethyl-	10364	000933-12-0	80
14	3.071	0.42	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	10357	074779-65-0	81
			Cyclopropane, 1,1-dimethyl-2-(2-methyl-1-propenyl)-	10397	033422-32-1	80
15	3.285	1.07	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	53
			Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	17442	1000152-79-7	53
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	47
16	3.667	0.26	C:\Database\NIST05a.L			
			Germacyclopent-3-ene, 1,1-dichloro-3,4-dimethyl-	76156	005764-64-7	50
			1,3-Pentadiene, 2-methyl-, (E)-	1236	000926-54-5	47
			Cyclopentene, 1-methyl-	1218	000693-89-0	47
17	4.149	0.27	C:\Database\NIST05a.L			
			trans-1-Butyl-2-methylcyclopropane	6635	038851-70-6	53
			2-Propenoic acid, octyl ester	45733	002499-59-4	53
			1-Heptanol, 2,4-dimethyl-, (R,R)-(+)-	20368	018450-73-2	53
18	5.619	0.29	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Octene, 3,3-dimethyl-	17377	074511-51-6	59
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	53
			2-Decene, 4-methyl-, (Z)-	25955	074630-30-1	50
19	6.033	0.49	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	83
			Hexane, 3,3-dimethyl-	7446	000563-16-6	80
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
20	6.155	0.52	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	83
			Dodecane, 2,7,10-trimethyl-	66079	074645-98-0	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
21	8.362	2.09	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Pentene, 2-methyl-	1448	000625-27-4	30
			1-Butene, 3,3-dimethyl-	1480	000558-37-2	25
			3-Hexene, 3,4-dimethyl-	6526	030951-95-2	25

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Mon Aug 05 10:55:27 2019 Page: 2

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000007.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 20:11
Operator : AdeM
Sample : C 7
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 7 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
22	8.516	2.19	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6547	003404-78-2	38
23	10.149	0.36	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	47
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	38
			Dichloroacetic acid, 6-ethyl-3-octyl ester	103654	1000282-56-6	38
24	11.073	0.58	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	53
			Cyclopropanecarboxaldehyde, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-, trans-(.+-.)-	33479	097231-35-1	45
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
25	11.177	0.28	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	47
			Cyclopropanecarboxaldehyde, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-, trans-(.+-.)-	33479	097231-35-1	42
			1,4-Hexadiene, 3,3,5-trimethyl-	10369	074753-00-7	38
26	17.491	4.86	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
27	17.832	2.82	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
28	18.191	3.89	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	38
29	19.287	0.53	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	43
			3-Octene, 2,2-dimethyl-	17380	086869-76-3	43
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	38
30	20.206	0.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	50
			3-Decene, 2,2-dimethyl-, (E)-	35053	055499-02-0	46
			2(3H)-Furanone, 4,5-dihydro-4-(2-methyl-3-methylenebut-4-yl)-	34762	1000153-91-4	43
31	20.374	0.88	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	38

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000007.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 20:11
Operator : AdeM
Sample : C 7
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 7 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			1,4-Hexadiene, 3,3,5-trimethyl-	10369	074753-00-7	35
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	27
32	26.233	1.48	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1,1,4,4-tetramethyl-	17429	002223-52-1	38
33	26.611	0.79	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, trans-	17459	062238-29-3	35
			Hexane, 2,3,4-trimethyl-	12319	000921-47-1	35
34	27.288	1.24	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
35	27.680	0.42	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	53
			Bacchotricuneatin c	148777	066563-30-2	43
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
36	28.935	1.06	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Cyclohexane, 3-ethyl-5-methyl-1-propyl-	35085	1000151-39-5	47
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
37	29.927	0.33	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	43
38	34.093	2.16	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
39	34.421	0.54	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4,6-Diketo-1-heptanol	19897	057245-94-0	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
40	34.703	0.41	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	38
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
41	35.112	2.26	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000007.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 20:11
Operator : AdeM
Sample : C 7
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 7 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
42	35.358	0.41	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	50
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	27
43	35.844	0.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35058	016538-89-9	27
44	36.240	0.98	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
45	36.577	1.10	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	77416	006750-34-1	47
46	37.536	0.33	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Ethyl-1,5-octadiene	16314	1000114-87-7	43
			4-Octene, 2,3,6,7-tetramethyl-	35055	063830-66-0	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
47	41.189	1.09	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
48	41.435	0.32	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			5-Methyl-(E)-2-hepten-4-one	11048	102322-83-8	27
49	42.035	0.70	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35054	016538-89-9	35
50	43.482	1.51	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1-one	24154	025183-82-8	68
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
			8-(2-Nitrophenoxy)octan-1-ol	103198	167685-26-9	47
51	44.296	0.36	C:\Database\NIST05a.L			
			n-Nonenylsuccinic anhydride	74169	028928-97-4	64
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	37

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000007.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 20:11
Operator : AdeM
Sample : C 7
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 7 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
52	47.653	1.10	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Heptafluorobytyryloxy-6-ethyldec ane	165607	1000215-97-2	43
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl met hyl	25685	017983-26-5	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
53	48.367	0.88	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
54	48.699	0.38	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
55	49.800	2.11	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohe xane	35080	219783-06-9	47
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
56	50.473	0.44	C:\Database\NIST05a.L			
			(+-)-3-(2-Carboxy-trans-propenyl)- 2,2-dimethylcyclopropane-trans-1-c arboxylic acid,[1.alpha., 3.beta.(E)]-	55435	040253-03-0	60
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
57	53.584	0.73	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			4,4,7-Trimethyl-oct-5-enal	34863	1000144-08-6	38
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35054	016538-89-9	35
58	54.212	0.44	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	49
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			4,4,7-Trimethyl-oct-5-enal	34863	1000144-08-6	35
59	55.572	1.81	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			8-(2-Nitrophenoxy)octan-1-ol	103198	167685-26-9	38
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	38
60	55.763	0.42	C:\Database\NIST05a.L			
			(+-)-3-(2-Carboxy-trans-propenyl)- 2,2-dimethylcyclopropane-trans-1-c arboxylic acid,[1.alpha., 3.beta.(E)]-	55435	040253-03-0	78
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	64
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
61	59.052	0.67	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000007.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 20:11
Operator : AdeM
Sample : C 7
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 7 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			4,4,7-Trimethyl-oct-5-enal	34863	1000144-08-6	38
62	59.606	0.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Oxalic acid, isobutyl octadecyl es ter	170757	1000309-38-3	46
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35

Figura 108. Cromatograma de la muestra 8 de la condición de cinética 1.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190729-000008.D
Operator   : AdeM
Acquired   : 29 Jul 2019  21:30     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C 8
Misc Info  : Cinetica 6
Vial Number: 8
```

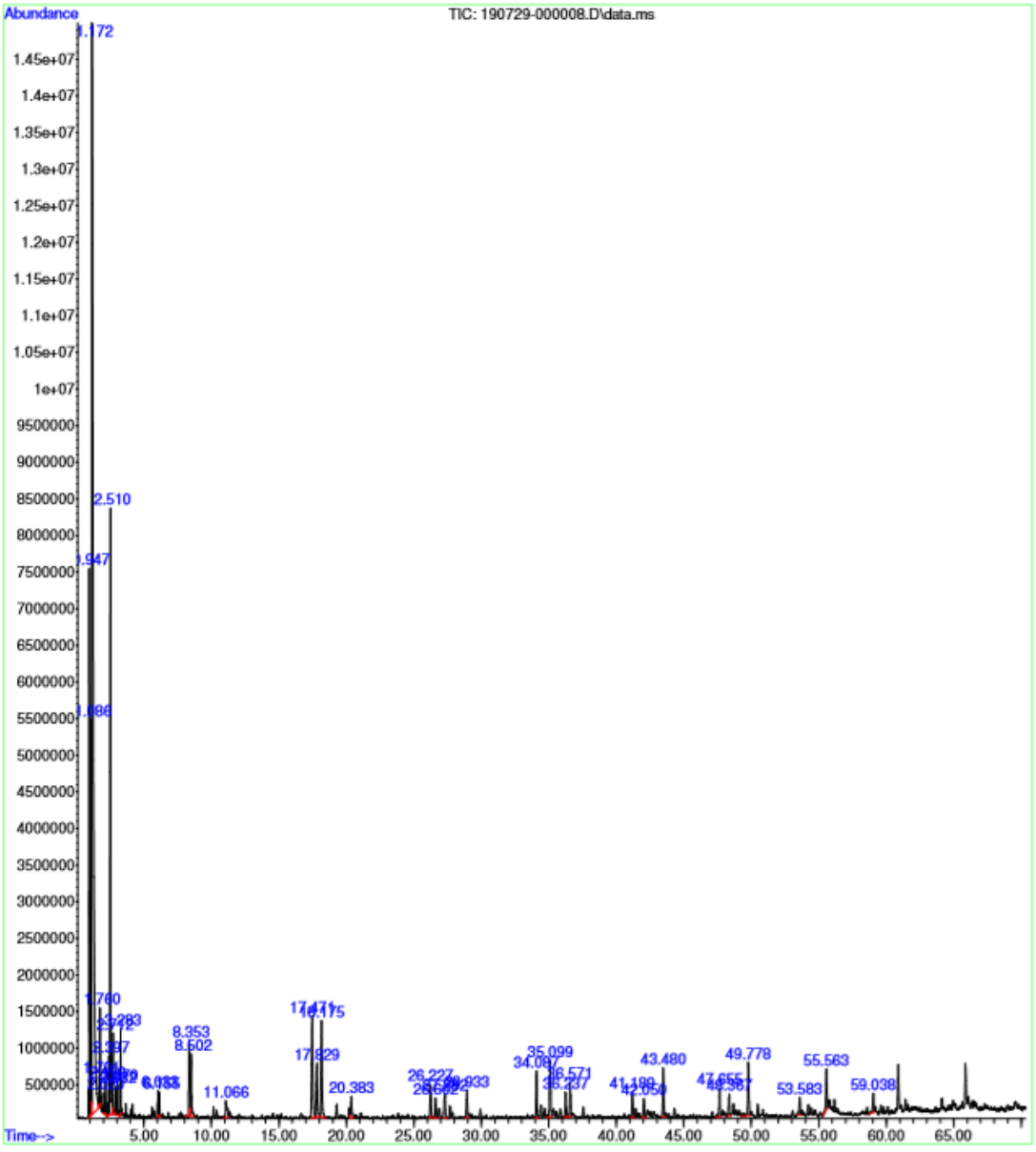


Figura 109. Reporte de cromatografía de la muestra 8 de la condición de cinética 1.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000008.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 21:30
Operator : AdeM
Sample : C 8
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 8 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	4.35	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
2	1.088	2.52	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.170	46.83	C:\Database\NIST05a.L			
			Methane, dichloronitro-	12675	007119-89-3	72
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	59
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	47
4	1.702	0.30	C:\Database\NIST05a.L			
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	86
			trans-3,4-Dimethyl-2-hexene	6571	019550-82-4	53
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	50
5	1.761	0.65	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	87
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	87
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	81
6	2.021	0.22	C:\Database\NIST05a.L			
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5820	001515-79-3	50
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	46
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5816	001515-79-3	45
7	2.148	0.29	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	46
			Cyclopentane, 1-ethyl-1-methyl-	6619	016747-50-5	38
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11209	013427-43-5	37
8	2.398	0.68	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	76
9	2.512	8.46	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	97
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	90
			1-Heptene, 5-methyl-	6498	013151-04-7	59
10	2.712	0.93	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	95
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
11	2.930	0.31	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Heptadiene, 2,6-dimethyl-	10358	004634-87-1	87
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Mon Aug 05 10:56:46 2019 Page: 1

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000008.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 21:30
Operator : AdeM
Sample : C 8
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 8 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	68
12	3.071	0.45	C:\Database\NIST05a.L			
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	81
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			Cyclohexene, 3,3,5-trimethyl-	10361	000503-45-7	64
13	3.285	0.98	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	53
			2-Pentanone, 3-[(acetyloxy)methyl]-3,4-dimethyl-, (.+-.)-	47073	078641-04-0	50
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	47
14	6.032	0.48	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Sulfurous acid, 2-pentyl undecyl ester	128317	1000309-16-0	64
15	6.155	0.46	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	83
			Octane, 2,3,6,7-tetramethyl-	36467	052670-34-5	78
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
16	8.352	1.69	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			2-Pentene, 2-methyl-	1448	000625-27-4	30
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	30
17	8.502	1.76	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	49
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	45
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6550	003404-78-2	38
18	11.068	0.72	C:\Database\NIST05a.L			
			1,4-Hexadiene, 3,3,5-trimethyl-	10369	074753-00-7	38
			(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	27143	013702-56-2	38
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	38
19	17.472	3.79	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
20	17.827	2.08	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	43
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	42
21	18.177	3.26	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
22	20.383	0.76	C:\Database\NIST05a.L			

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000008.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 21:30
Operator : AdeM
Sample : C 8
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 8 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	38
			1,4-Hexadiene, 3,3,5-trimethyl-	10369	074753-00-7	35
			Bicyclo[3.1.1]heptan-2-one, 6,6-di methyl-, (1R)-	17047	038651-65-9	27
23	26.228	1.12	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	46
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
24	26.601	0.66	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
25	27.284	0.89	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl- , cis-	17451	062238-31-7	35
			Cyclohexane, 1,1,4,4-tetramethyl-	17429	002223-52-1	35
			3-Isopropyl-5-methyl-hex-4-en-2-on	25664	077142-85-9	35
26	28.935	0.87	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	43
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
27	34.088	1.52	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Hexane, 2,3,4-trimethyl-	12311	000921-47-1	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
28	35.098	2.01	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
29	36.235	0.76	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
30	36.572	1.08	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	35
31	41.189	0.85	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35058	016538-89-9	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
32	42.049	0.61	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190729-000008.D
Title :
Acq On : 29 Jul 2019 21:30
Operator : AdeM
Sample : C 8
Misc : Cinetica 6
ALS Vial : 8 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
33	43.481	1.49	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1-one	24154	025183-82-8	64
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50
34	47.657	0.97	C:\Database\NIST05a.L			
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	53
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	35
35	48.367	0.72	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35058	016538-89-9	35
36	49.777	2.01	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
37	53.584	0.55	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	38
			Cyanamide, dibutyl-	26626	002050-54-6	38
38	55.563	1.30	C:\Database\NIST05a.L			
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47
39	59.038	0.62	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	49
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			3-Trifluoroacetoxy-6-ethyldecane	113014	116436-59-0	43

Figura 110. Cromatograma de la muestra 1 para la condición de cinética 2.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190703-000001.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  3 Jul 2019   9:05     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C1
Misc Info  : Cinetica 2
Vial Number: 1
```

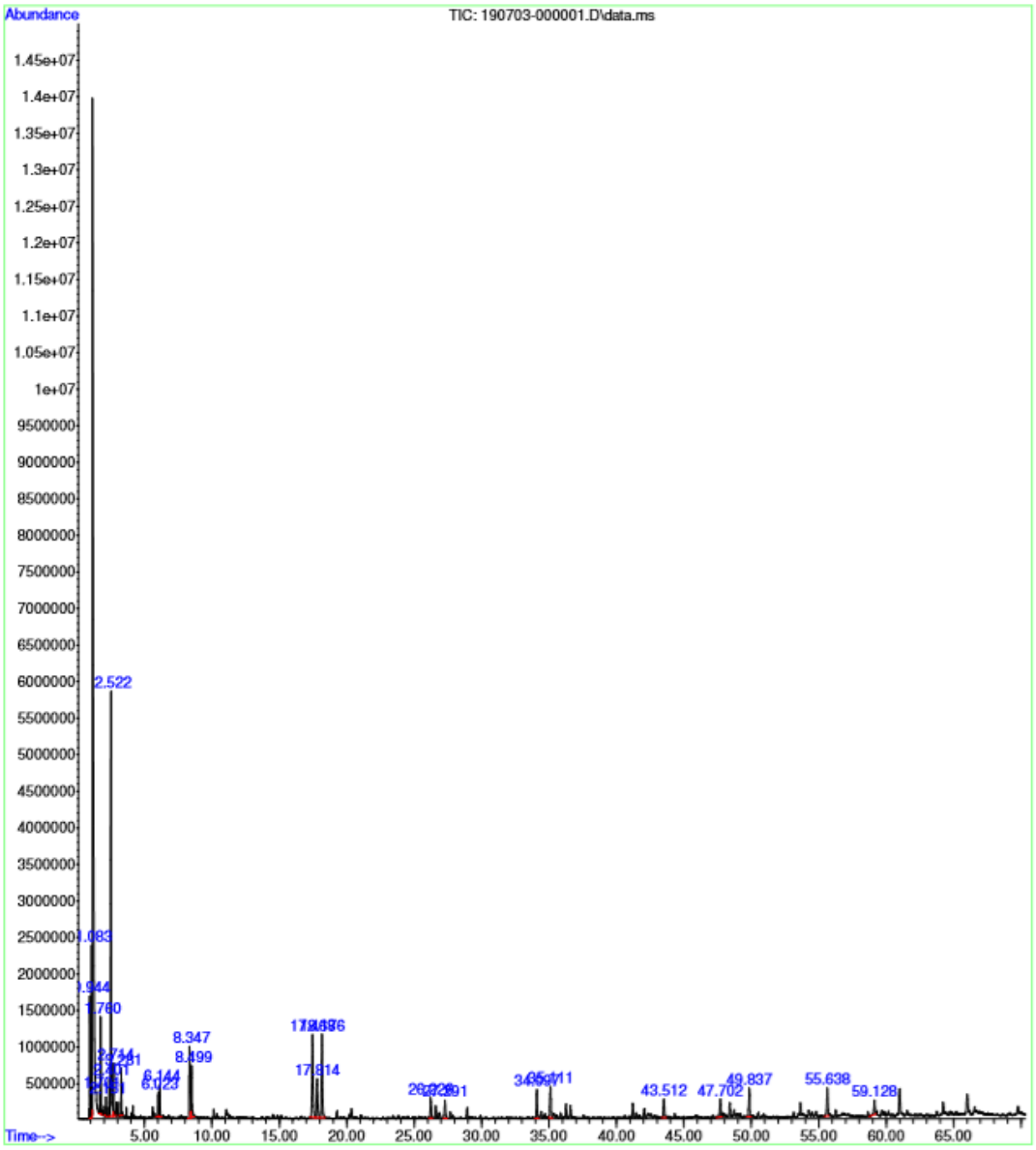


Figura 111. Reporte de cromatografía de la muestra 1 para la condición de cinética 2.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000001.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 9:05
Operator : AdeM
Sample : C1
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Decane, 3,3,5-trimethyl-	46158	062338-13-0	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
12	8.348	5.87	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	35
13	8.498	4.89	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6547	003404-78-2	38
14	17.468	10.04	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	35
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
15	17.813	5.31	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
16	18.177	8.82	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	38
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
17	26.228	2.15	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, cis-	17451	062238-31-7	35
18	27.293	1.90	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	53
			Cyclopentane, (2-methylbutyl)-	17408	053366-38-4	50
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	46
19	34.098	3.05	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
20	35.112	3.89	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
21	43.513	2.30	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			8-(2-Nitrophenoxy)octan-1-ol	103198	167685-26-9	47
			Cyclohexanone, 3,5-dimethyl-	11064	002320-30-1	35
22	47.703	2.23	C:\Database\NIST05a.L			

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Wed Jul 03 13:16:59 2019 Page: 2

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000001.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 9:05
Operator : AdeM
Sample : C1
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
23	49.836	3.41	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			(+-)-3-(2-Carboxy-trans-propenyl)-2,2-dimethylcyclopropane-trans-1-carboxylic acid,[1.alpha., 3.beta.(E)]-	55435	040253-03-0	60
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50
24	55.640	3.25	C:\Database\NIST05a.L			
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	43
25	59.129	1.67	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyanamide, dibutyl-	26626	002050-54-6	35

Figura 112. Cromatograma de la muestra 2 de la condición de cinética 2.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190703-000002.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  3 Jul 2019  10:22     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C2
Misc Info  : Cinetica 2
Vial Number: 2
```

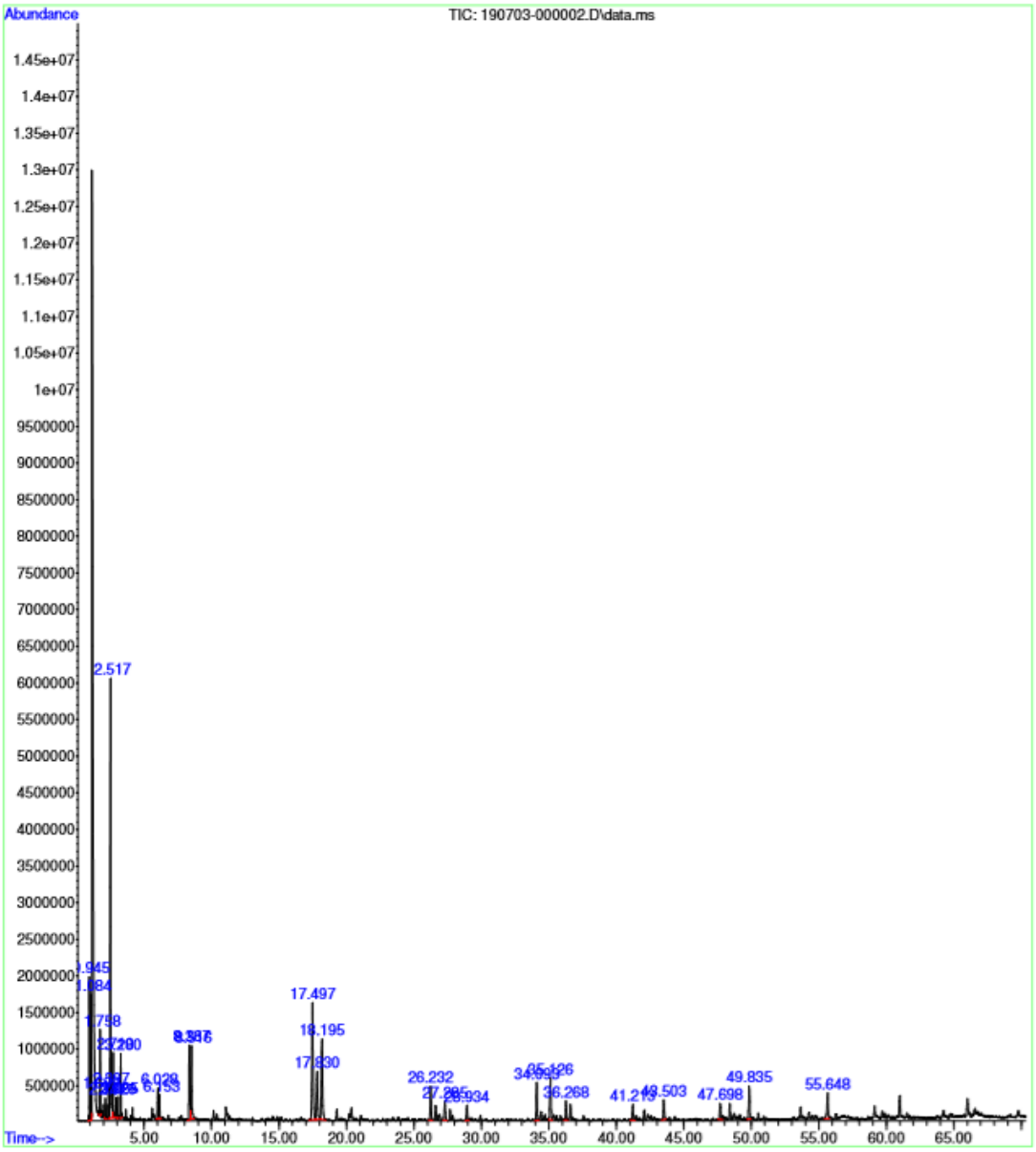
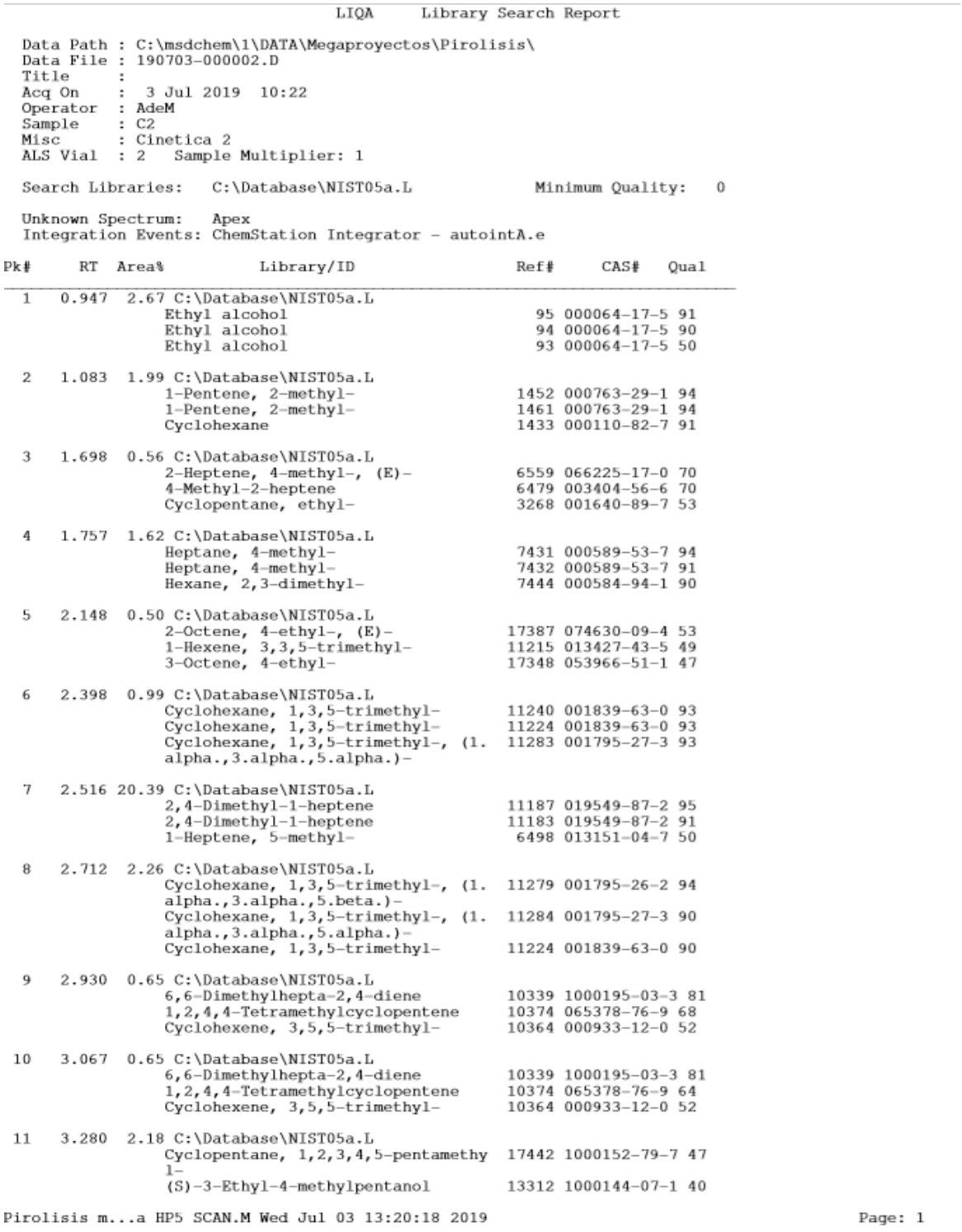


Figura 113.Reporte de cromatografía de la muestra 2 de la condición de cinética 2.



LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000002.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 10:22
Operator : AdeM
Sample : C2
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	2.67	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	50
2	1.083	1.99	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.698	0.56	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	70
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	70
			Cyclopentane, ethyl-	3268	001640-89-7	53
4	1.757	1.62	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7432	000589-53-7	91
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7444	000584-94-1	90
5	2.148	0.50	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Octene, 4-ethyl-, (E)-	17387	074630-09-4	53
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	49
			3-Octene, 4-ethyl-	17348	053966-51-1	47
6	2.398	0.99	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	93
7	2.516	20.39	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	95
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			1-Heptene, 5-methyl-	6498	013151-04-7	50
8	2.712	2.26	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
9	2.930	0.65	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	68
			Cyclohexene, 3,5,5-trimethyl-	10364	000933-12-0	52
10	3.067	0.65	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	64
			Cyclohexene, 3,5,5-trimethyl-	10364	000933-12-0	52
11	3.280	2.18	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	17442	1000152-79-7	47
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	40

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Wed Jul 03 13:20:18 2019 Page: 1

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000002.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 10:22
Operator : AdeM
Sample : C2
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38
12	6.028	1.49	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Hexane, 3,3-dimethyl-	7446	000563-16-6	80
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
13	6.155	1.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Decane, 4-methyl-	27242	002847-72-5	80
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
14	8.366	5.61	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	35
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	30
15	8.516	5.22	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6547	003404-78-2	38
16	17.499	11.94	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
17	17.832	5.45	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	43
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
18	18.195	8.87	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
19	26.233	2.91	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
20	27.284	1.89	C:\Database\NIST05a.L			
			Bacchotricuneatin c	148777	066563-30-2	38
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	38
21	28.935	1.47	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 3-ethyl-5-methyl-1-propyl-	35085	1000151-39-5	38
22	34.093	3.24	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000002.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 10:22
Operator : AdeM
Sample : C2
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
23	35.125	4.00	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
24	36.267	1.67	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentane, hexyl-	25938	004457-00-5	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
25	41.212	1.48	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
			3-Heptafluorobytyryloxy-6-ethyldecane	165607	1000215-97-2	38
26	43.504	1.84	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
			Cyclohexanone, 3,5-dimethyl-	11064	002320-30-1	38
			3-Ethyl-4-octene	17345	019781-32-9	35
27	47.698	1.55	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	27
28	49.836	3.08	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
29	55.649	2.50	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47
			8-(2-Nitrophenoxy)octan-1-ol	103198	167685-26-9	38

Figura 114. Cromatograma de la muestra 3 de la condición de cinética 2.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190703-000003.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  3 Jul 2019  11:39     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C3
Misc Info  : Cinetica 2
Vial Number: 3
```

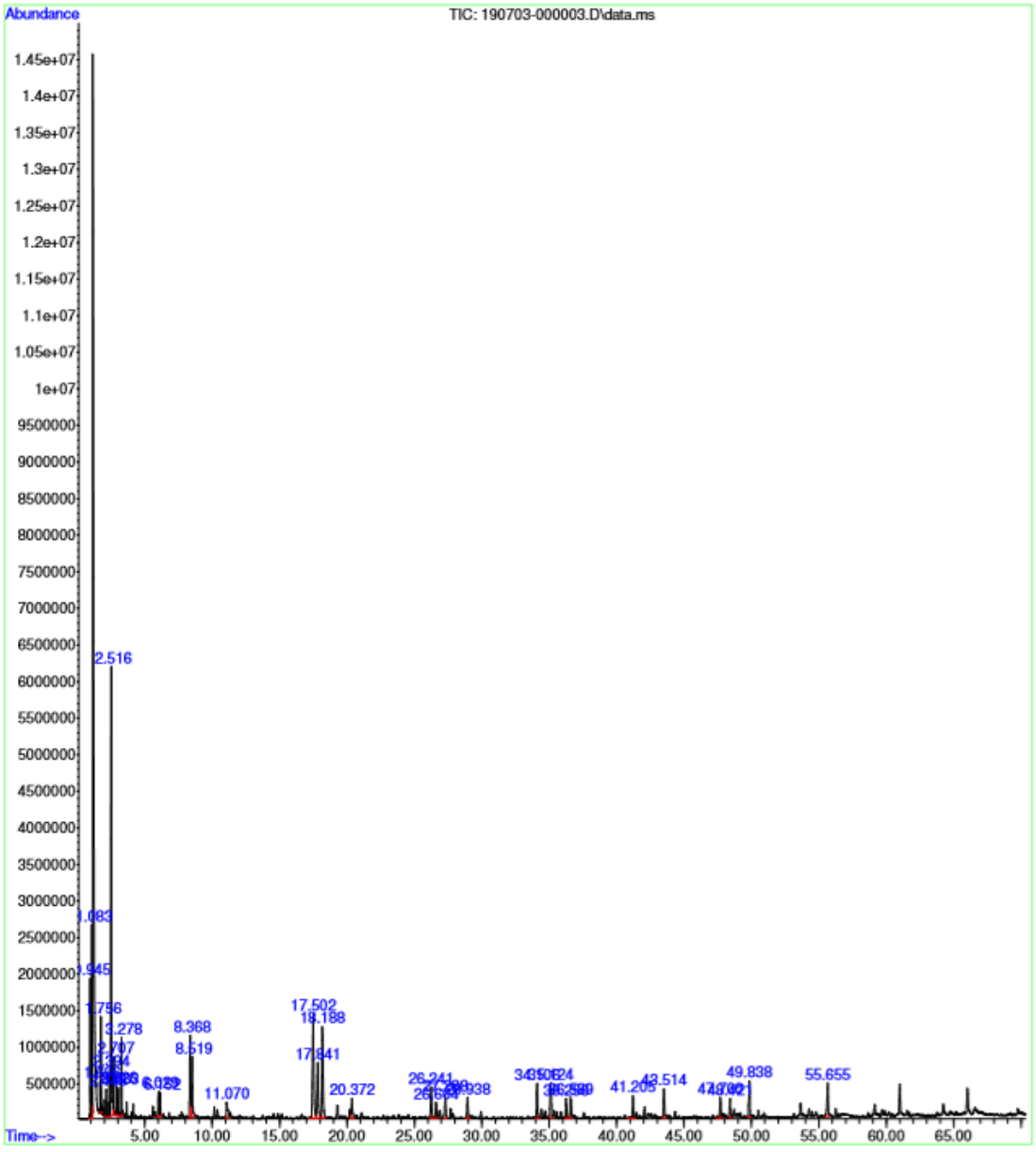


Figura 115. Reporte de cromatografía de la muestra 3 de la condición de cinética 2.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000003.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 11:39
Operator : AdeM
Sample : C3
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.942	2.48	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	59
2	1.083	2.65	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.697	0.60	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	70
			Cyanamide, dimethyl-	489	001467-79-4	50
			3,3'-Bifuran, 2,2',3,3'-tetrahydro	16788	098869-94-4	38
4	1.757	1.55	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	95
			Heptane, 4-methyl-	7430	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
5	2.143	0.58	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentane, 1,1,3,4-tetramethyl-, trans-	11272	020309-77-7	72
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	47
			Cyclopentane, 1-ethyl-1-methyl-	6619	016747-50-5	46
6	2.393	1.31	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11236	001839-63-0	83
7	2.516	18.59	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	95
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			Cyclopentane, 1,2,3-trimethyl-, (1.alpha.,2.alpha.,3.alpha.)-	6657	002613-69-6	59
8	2.707	1.68	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
9	2.926	0.83	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			2,4-Heptadiene, 2,6-dimethyl-	10358	004634-87-1	80
			1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	10357	074779-65-0	72
10	3.062	0.98	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			Cyclopropane, 1,1-dimethyl-2-(2-methyl-1-propenyl)-	10397	033422-32-1	80
			Cyclohexene, 3,5,5-trimethyl-	10364	000933-12-0	58
11	3.280	2.36	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethy	17442	1000152-79-7	47

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000003.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 11:39
Operator : AdeM
Sample : C3
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			1-			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	47
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38
12	6.028	1.06	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Decane, 4-methyl-	27242	002847-72-5	72
13	6.151	1.06	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Dodecane, 2,7,10-trimethyl-	66079	074645-98-0	72
14	8.366	4.46	C:\Database\NIST05a.L			
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	35
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
15	8.520	4.09	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
16	11.072	1.60	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(	34921	098678-70-7	50
			4-methyl-3-pentenyl)-			
			1,4-Hexadiene, 3,3,5-trimethyl-	10369	074753-00-7	43
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
17	17.499	9.97	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.	11279	001795-26-2	27
			alpha.,3.alpha.,5.beta.)-			
18	17.841	5.22	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
19	18.186	8.29	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
20	20.374	1.66	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclododecanemethanol	55891	001892-12-2	53
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	38
			Bicyclo[3.1.1]heptan-2-one, 6,6-di	17047	038651-65-9	27
			methyl-, (1R)-			
21	26.242	2.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	53
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			1-Undecene, 8-methyl-	34980	074630-40-3	43

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000003.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 11:39
Operator : AdeM
Sample : C3
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
22	26.606	1.25	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, cis-	17451	062238-31-7	35
23	27.288	1.82	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	53
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	43
			Cyclohexane, 1,1,4,4-tetramethyl-	17429	002223-52-1	38
24	28.939	1.66	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			2-(2-Methyl-acryloyl)-cyclohexanon	33220	1000185-67-7	38
25	34.106	2.72	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
26	35.125	3.30	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
27	36.253	1.46	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
28	36.590	1.66	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
29	41.207	1.76	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	38
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	35
30	43.513	2.26	C:\Database\NIST05a.L			
			Bicyclo[2.2.1]heptane-2,5-dione, 1,7,7-trimethyl-	33284	004230-32-4	59
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
			8-(2-Nitrophenoxy)octan-1-ol	103198	167685-26-9	47
31	47.698	1.67	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			2-Hexyl-1-octanol	67337	019780-79-1	38
32	48.421	1.31	C:\Database\NIST05a.L			

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000003.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 11:39
Operator : AdeM
Sample : C3
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	35
33	49.840	2.95	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
34	55.653	2.78	C:\Database\NIST05a.L			
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47

Figura 116. Cromatograma de la muestra 4 de la condición de cinética 2.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190703-000004.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  3 Jul 2019  12:56     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C4
Misc Info  : Cinetica 2
Vial Number: 4
```

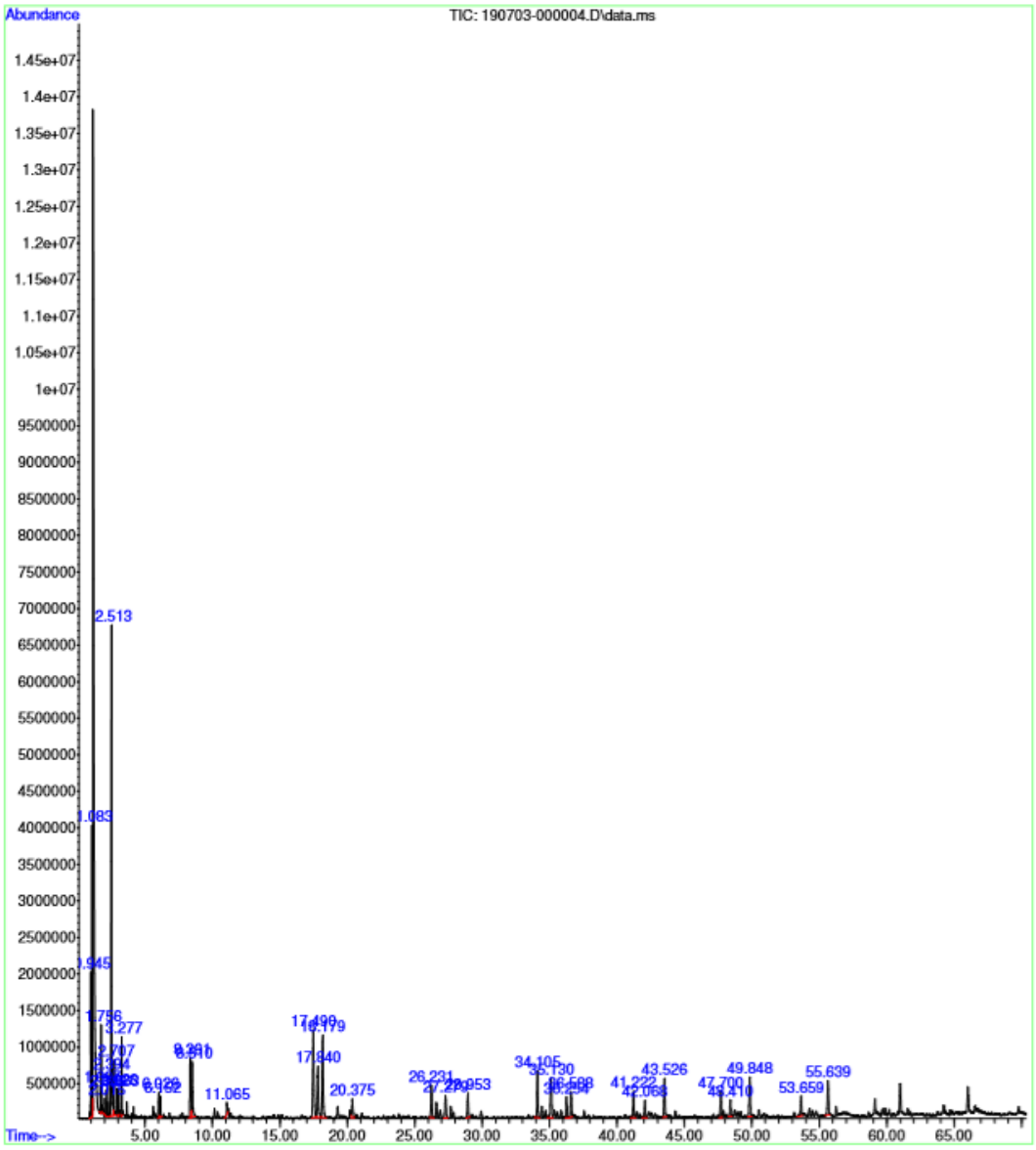


Figura 117. Reporte de cromatografía de la muestra 4 de la condición de cinética 2.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000004.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 12:56
Operator : AdeM
Sample : C4
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	3.64	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	64
2	1.083	4.12	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	91
			1-Pentene, 2-methyl-	1462	000763-29-1	91
3	1.697	0.52	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	70
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	64
			Cyanamide, dimethyl-	489	001467-79-4	50
4	1.757	1.40	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7432	000589-53-7	91
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7444	000584-94-1	90
5	2.016	0.28	C:\Database\NIST05a.L			
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5820	001515-79-3	55
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5816	001515-79-3	53
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5821	001515-79-3	49
6	2.143	0.50	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	46
			Cyclopentane, 1-ethyl-1-methyl-	6619	016747-50-5	43
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11209	013427-43-5	37
7	2.393	1.21	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.	11283	001795-27-3	93
			alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-			
8	2.512	17.67	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	96
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	90
			Cyclopentane, 1,1,3,3-tetramethyl-	11258	050876-33-0	53
9	2.707	1.64	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.	11284	001795-27-3	90
			alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	90
10	2.926	0.77	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			2,4-Heptadiene, 2,6-dimethyl-	10358	004634-87-1	80
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	74
11	3.062	0.68	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	10357	074779-65-0	81
			Diaminopyridine	5384	004318-76-7	49

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Thu Jul 04 09:42:14 2019 Page: 1

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000004.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 12:56
Operator : AdeM
Sample : C4
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	3.276	2.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	43
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	40
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38
13	6.028	1.03	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Decane, 4-methyl-	27242	002847-72-5	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
14	6.151	0.91	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	83
			Dodecane, 2,7,10-trimethyl-	66079	074645-98-0	72
			Decane, 3,3,5-trimethyl-	46158	062338-13-0	64
15	8.361	3.78	C:\Database\NIST05a.L			
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
			3-Hexene, 3,4-dimethyl-	6526	030951-95-2	25
16	8.511	3.83	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6550	003404-78-2	38
17	11.063	0.54	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	53
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
			2,6-Octadiene, 2,7-dimethyl-	16336	016736-42-8	43
18	17.490	8.46	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
19	17.840	4.35	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	30
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	30
20	18.177	6.97	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	38
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
21	20.374	1.63	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	27
			Bicyclo[3.1.1]heptane, 2,6,6-trimethyl-	16398	000473-55-2	22
			Bicyclo[3.1.1]heptan-3-one, 2,6,6-trimethyl-, (1.alpha.,2.beta.,5.alpha.)-	24334	015358-88-0	22
22	26.233	2.50	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000004.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 12:56
Operator : AdeM
Sample : C4
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
23	27.279	1.90	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	47
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
24	28.953	1.89	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-1-methyl-	25976	061141-79-5	38
25	34.106	3.13	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
26	35.130	3.63	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
27	36.253	1.63	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
28	36.590	1.99	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
29	41.221	1.84	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	38
			1-Decanol, 2-hexyl-	86864	002425-77-6	35
30	42.067	1.26	C:\Database\NIST05a.L			
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	53
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
31	43.527	2.85	C:\Database\NIST05a.L			
			(+-)-3-(2-Carboxy-trans-propenyl)-2,2-dimethylcyclopropane-trans-1-carboxylic acid,[1.alpha., 3.beta.(E)]-	55435	040253-03-0	60
			n-Nonenylsuccinic anhydride	74169	028928-97-4	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
32	47.702	1.80	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26626	002050-54-6	38
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	35

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000004.D
Title   :
Acq On   : 3 Jul 2019 12:56
Operator : AdeM
Sample   : C4
Misc   : Cinetica 2
ALS Vial : 4   Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
33	48.412	1.21	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyanamide, dibutyl-	26626	002050-54-6	43
34	49.849	3.56	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	43
35	53.661	1.53	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4,4,7-Trimethyl-oct-5-enal	34863	1000144-08-6	38
36	55.640	3.02	C:\Database\NIST05a.L			
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43

Figura 118. Cromatograma de la muestra 5 de la condición de cinética 2.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190703-000005.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  3 Jul 2019  14:13     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C5
Misc Info  : Cinetica 2
Vial Number: 5
```

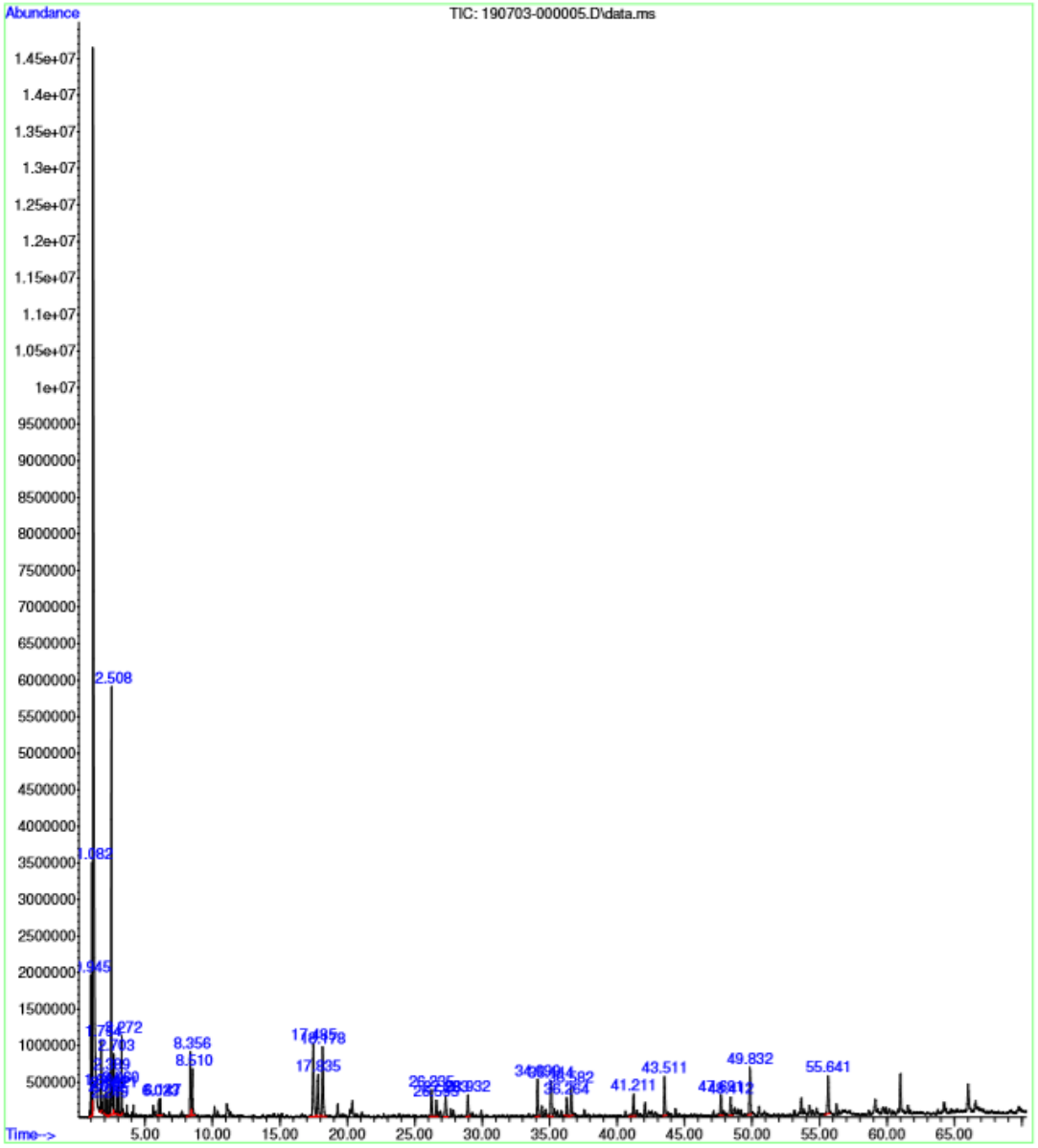
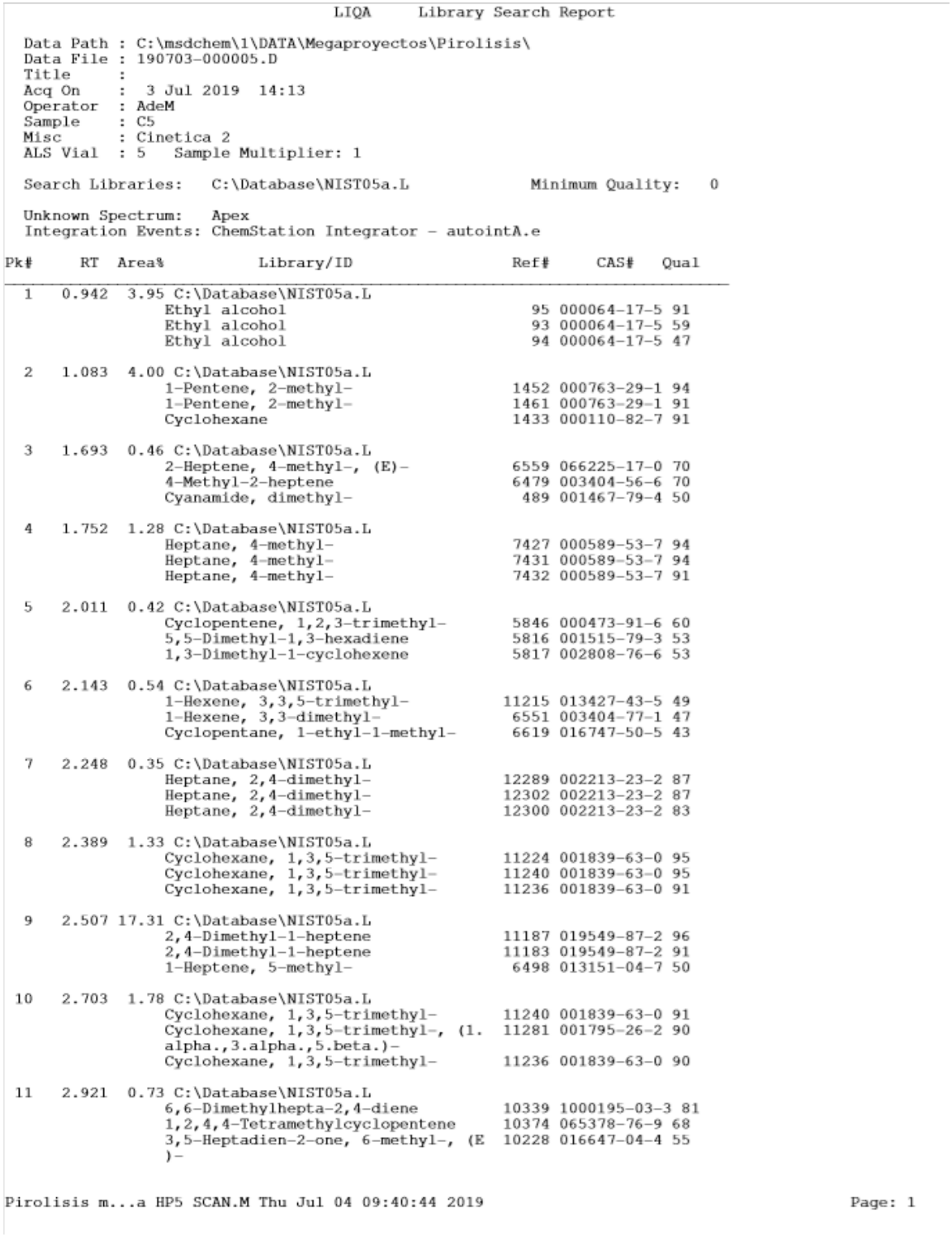


Figura 119. Reporte de cromatografía de la muestra 5 de la condición de cinética 2.



LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000005.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 14:13
Operator : AdeM
Sample : C5
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.942	3.95	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	59
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	47
2	1.083	4.00	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	91
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.693	0.46	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	70
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	70
			Cyanamide, dimethyl-	489	001467-79-4	50
4	1.752	1.28	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7432	000589-53-7	91
5	2.011	0.42	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentene, 1,2,3-trimethyl-	5846	000473-91-6	60
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5816	001515-79-3	53
			1,3-Dimethyl-1-cyclohexene	5817	002808-76-6	53
6	2.143	0.54	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	49
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	47
			Cyclopentane, 1-ethyl-1-methyl-	6619	016747-50-5	43
7	2.248	0.35	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12289	002213-23-2	87
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12302	002213-23-2	87
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12300	002213-23-2	83
8	2.389	1.33	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	95
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	95
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11236	001839-63-0	91
9	2.507	17.31	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	96
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			1-Heptene, 5-methyl-	6498	013151-04-7	50
10	2.703	1.78	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	91
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11281	001795-26-2	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11236	001839-63-0	90
11	2.921	0.73	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	68
			3,5-Heptadien-2-one, 6-methyl-, (E)-	10228	016647-04-4	55

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Thu Jul 04 09:40:44 2019 Page: 1

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000005.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 14:13
Operator : AdeM
Sample : C5
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	3.062	1.11	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	81
			Cyclopropane, 1,1-dimethyl-2-(2-methyl-1-propenyl)-	10397	033422-32-1	72
13	3.271	2.54	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	17442	1000152-79-7	47
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	43
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38
14	6.023	0.81	C:\Database\NIST05a.L			
			Sulfurous acid, 2-pentyl undecyl ester	128317	1000309-16-0	64
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18540	007154-80-5	64
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	64
15	6.146	0.86	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Octane, 2,3,6,7-tetramethyl-	36467	052670-34-5	78
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
16	8.357	4.15	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6550	003404-78-2	30
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6548	003404-78-2	30
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	30
17	8.511	3.43	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	45
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
18	17.486	7.76	C:\Database\NIST05a.L			
			Octane, 4-methyl-	12272	002216-34-4	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	35
19	17.836	4.23	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	43
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	38
20	18.177	6.59	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	30
21	26.233	2.41	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
22	26.597	1.41	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000005.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 14:13
Operator : AdeM
Sample : C5
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
23	27.284	1.97	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	53
			Cyclohexane, 1,1,4,4-tetramethyl-	17429	002223-52-1	38
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
24	28.930	1.96	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
25	34.097	3.16	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
26	35.112	4.11	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
27	36.263	1.58	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
28	36.581	2.56	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclopropanol, 1-(3,7-dimethyl-1-o ctenyl)-	54447	065147-72-0	38
29	41.212	2.18	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl met hyl	25685	017983-26-5	38
			3-Heptafluorobytyryloxy-6-ethyldec ane	165607	1000215-97-2	38
30	43.513	3.27	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1- one	24154	025183-82-8	64
			2-Hepten-4-one, 6-hydroxy-2-methyl -6-(4-methyl-3-cyclohexen-1-yl)-	82514	038043-98-0	56
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
31	47.689	1.92	C:\Database\NIST05a.L			
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl met hyl	25685	017983-26-5	38
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			2-Hexyl-1-octanol	67337	019780-79-1	38
32	48.412	1.73	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	35

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000005.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 14:13
Operator : AdeM
Sample : C5
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,4-dimethyl-, cis-	17452	062238-30-6	35
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35054	016538-89-9	35
33	49.831	4.43	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	38
34	55.640	3.68	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47

Figura 120. Cromatograma de la muestra 6 de la condición de cinética 2.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190703-000006.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  3 Jul 2019  15:32     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C6
Misc Info  : Cinetica 2
Vial Number: 6
```

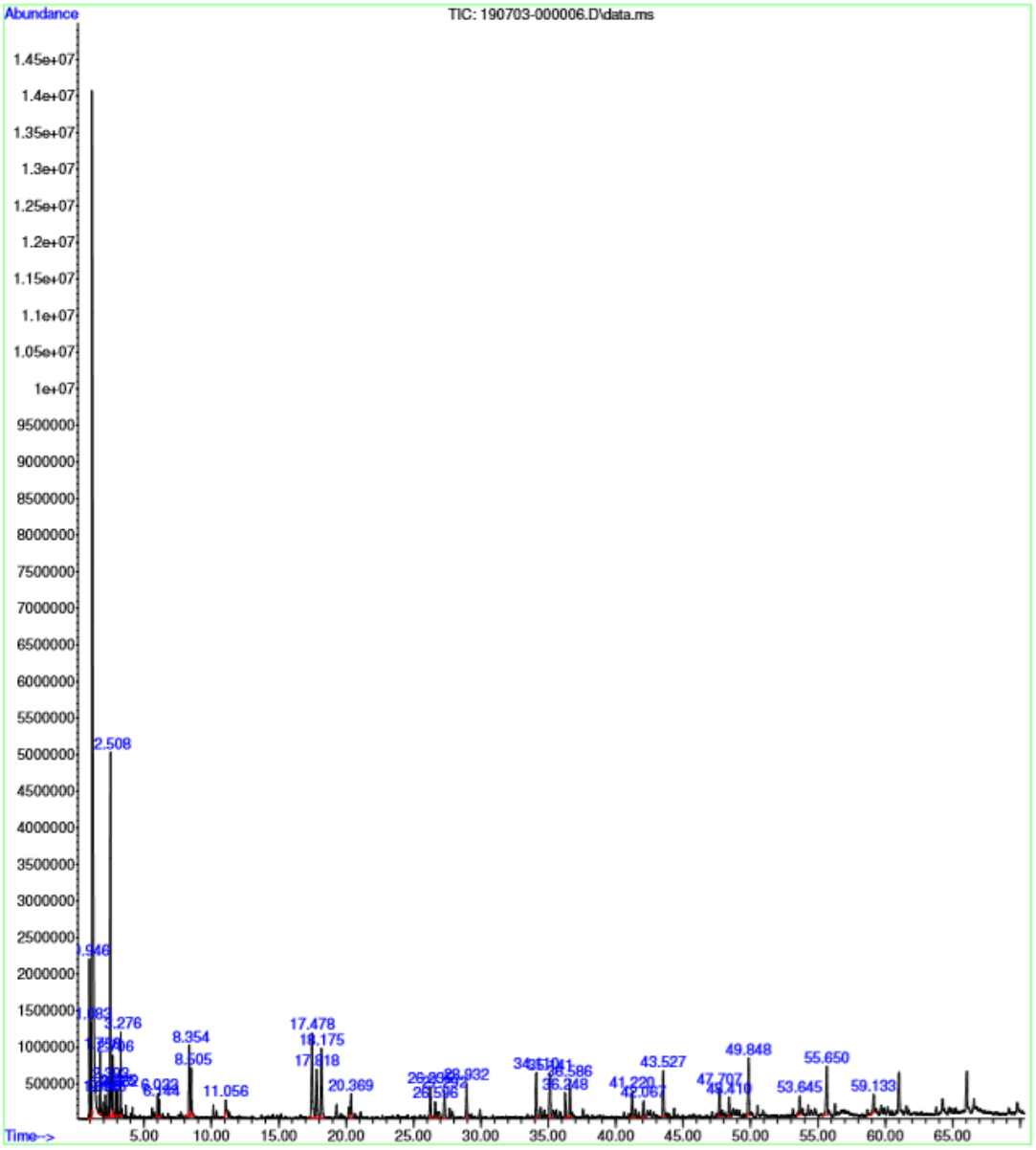


Figura 121. Reporte de cromatografía de la muestra 6 de la condición de cinética 2.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000006.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 15:32
Operator : AdeM
Sample : C6
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	2.59	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	87
2	1.083	1.31	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.697	0.33	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	55
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6533	003404-78-2	38
			3-Hexene, 3,4-dimethyl-, (Z)-	6597	019550-87-9	35
4	1.757	1.07	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7432	000589-53-7	91
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	90
5	2.143	0.47	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	49
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	43
			Cyclopentanone, 2,4,4-trimethyl-	11098	004694-12-6	43
6	2.393	1.11	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	90
7	2.507	13.05	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	96
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			1-Heptene, 5-methyl-	6498	013151-04-7	50
8	2.707	1.68	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
9	2.926	0.81	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	76
			3,5-Heptadien-2-one, 6-methyl-, (E)-	10228	016647-04-4	55
10	3.062	0.69	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			2,4-Heptadiene, 2,4-dimethyl-	10355	074421-05-9	72
			Cyclopentane, 2-ethylidene-1,1-dimethyl-	10390	056324-66-4	64
11	3.276	2.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	43

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000006.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 15:32
Operator : AdeM
Sample : C6
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	40
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38
12	6.023	0.99	C:\Database\NIST05a.L			
			Decane, 2,8,8-trimethyl-	46157	1000060-81-2	64
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18540	007154-80-5	64
			Dodecane, 2,7,10-trimethyl-	66079	074645-98-0	64
13	6.146	0.81	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	83
			Decane, 4-methyl-	27242	002847-72-5	72
			Octane, 2,3,6,7-tetramethyl-	36467	052670-34-5	72
14	8.352	3.76	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
			4-Chloro-2,4-dimethylhexane	22232	054059-76-6	27
			3-Hexene, 3,4-dimethyl-	6526	030951-95-2	25
15	8.507	3.36	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	45
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
16	11.054	0.70	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanecarboxaldehyde, 2-meth yl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-, trans -(.+-.)-	33479	097231-35-1	45
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	42
17	17.477	7.71	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
18	17.818	4.59	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	27
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-, (1. alpha.,2.beta.,4.beta.)-	11275	007667-60-9	27
19	18.173	6.44	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	38
			4-Decene, 3-methyl-, (E)-	25944	062338-47-0	30
20	20.370	1.85	C:\Database\NIST05a.L			
			1,4-Hexadiene, 3,3,5-trimethyl-	10369	074753-00-7	35
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	30
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	27
21	26.233	2.42	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000006.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 15:32
Operator : AdeM
Sample : C6
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
22	26.597	1.35	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, trans-	17459	062238-29-3	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, cis-	17451	062238-31-7	35
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35058	016538-89-9	35
23	27.293	2.12	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentane, (2-methylbutyl)-	17408	053366-38-4	50
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
24	28.930	2.43	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
25	34.111	3.43	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	35
26	35.144	3.88	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
27	36.249	1.75	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	35
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
28	36.585	2.85	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	37
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	35
29	41.221	2.23	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
30	42.067	1.51	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
31	43.527	3.75	C:\Database\NIST05a.L			
			n-Nonenylsuccinic anhydride	74169	028928-97-4	64
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000006.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 15:32
Operator : AdeM
Sample : C6
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
32	47.707	2.28	C:\Database\NIST05a.L			
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	59
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
33	48.412	1.63	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	35
34	49.849	4.91	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47
35	53.643	1.75	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	49
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
36	55.649	4.23	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	38
			8-(2-Nitrophenoxy)octan-1-ol	103198	167685-26-9	38
37	59.133	1.73	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			3-Trifluoroacetoxy-6-ethyldecane	113014	116436-59-0	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43

Figura 122. Cromatograma de la muestra 7 de la condición de cinética 2.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190703-000007.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  3 Jul 2019  16:49     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C7
Misc Info  : Cinetica 2
Vial Number: 7
```

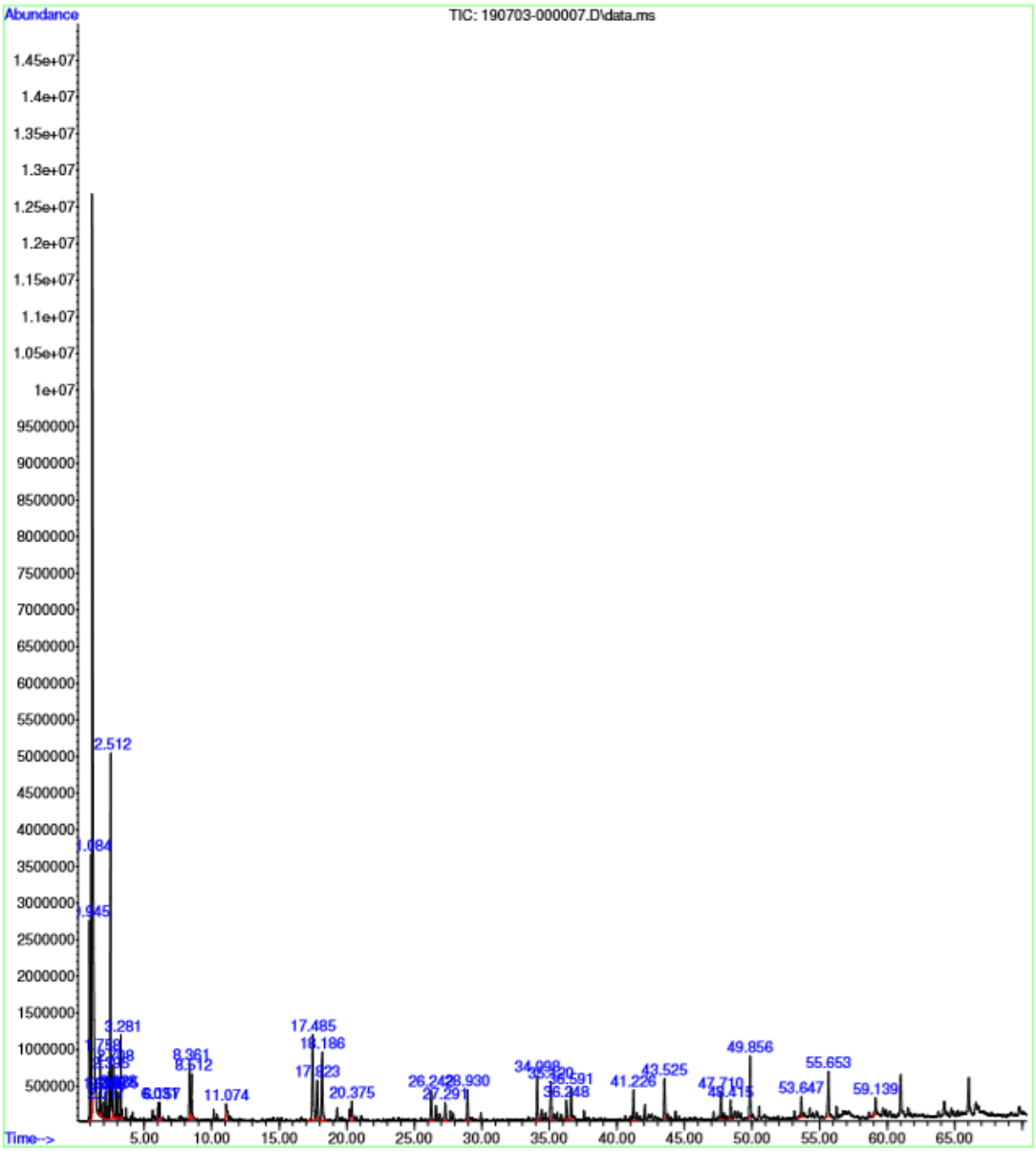


Figura 123. Reporte de cromatografía de la muestra 7 de la condición de cinética 2.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000007.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 16:49
Operator : AdeM
Sample : C7
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 7 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	3.281	2.53	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	17442	1000152-79-7	50
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	43
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38
13	6.032	0.93	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Decane, 3,3,5-trimethyl-	46158	062338-13-0	64
14	6.155	0.90	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	83
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18543	007154-80-5	72
15	8.361	3.59	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	38
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	38
16	8.511	3.06	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	45
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
17	11.072	0.48	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanecarboxaldehyde, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-, trans-(.+-.)-	33479	097231-35-1	45
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	42
18	17.486	7.51	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
19	17.823	3.83	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	35
20	18.186	5.88	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	30
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	30
			4-Decene, 3-methyl-, (E)-	25944	062338-47-0	30
21	20.374	1.72	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	27
			9-Undecenol, 2,10-dimethyl-	55900	1000131-86-0	27

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000007.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 16:49
Operator : AdeM
Sample : C7
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 7 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
22	26.242	2.37	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	47
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	43
23	27.293	1.61	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	17436	061142-69-6	35
			3-Isopropyl-5-methyl-hex-4-en-2-on	25664	077142-85-9	35
24	28.930	2.19	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(	34921	098678-70-7	50
			4-methyl-3-pentenyl)-			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
25	34.098	3.28	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
26	35.121	3.48	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
27	36.249	1.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-,	17454	050876-31-8	30
			trans-			
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	27
28	36.590	2.55	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-,	17447	050876-32-9	38
			cis-			
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	37
29	41.225	2.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			2-Hexyl-1-octanol	67337	019780-79-1	38
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl met	25685	017983-26-5	38
			hyl			
30	43.527	3.61	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1-	24154	025183-82-8	64
			one			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			Cyclohexane, 1,1'-(1,2-dimethyl-1,	73084	074663-71-1	40
			2-ethanediyl)bis-			
31	47.712	2.33	C:\Database\NIST05a.L			
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	38
			2-Hexyl-1-octanol	67337	019780-79-1	38
32	48.417	1.52	C:\Database\NIST05a.L			

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000007.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 16:49
Operator : AdeM
Sample : C7
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 7 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	53
			2-Hexyl-1-octanol	67337	019780-79-1	43
			3-Heptafluorobytyryloxy-6-ethyldecane	165607	1000215-97-2	38
33	49.854	5.00	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Bromoacetic acid, 6-ethyl-3-octyl ester	110302	1000282-67-0	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	43
34	53.648	2.06	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			4,4,7-Trimethyl-oct-5-enal	34863	1000144-08-6	38
35	55.654	4.21	C:\Database\NIST05a.L			
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47
36	59.138	1.70	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	49
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,4-dimethyl-, cis-	17452	062238-30-6	38

Figura 124. Cromatograma de la muestra 8 de la condición de cinética 2.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190703-000008.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  3 Jul 2019  18:06     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C8
Misc Info  : Cinetica 2
Vial Number: 8
```

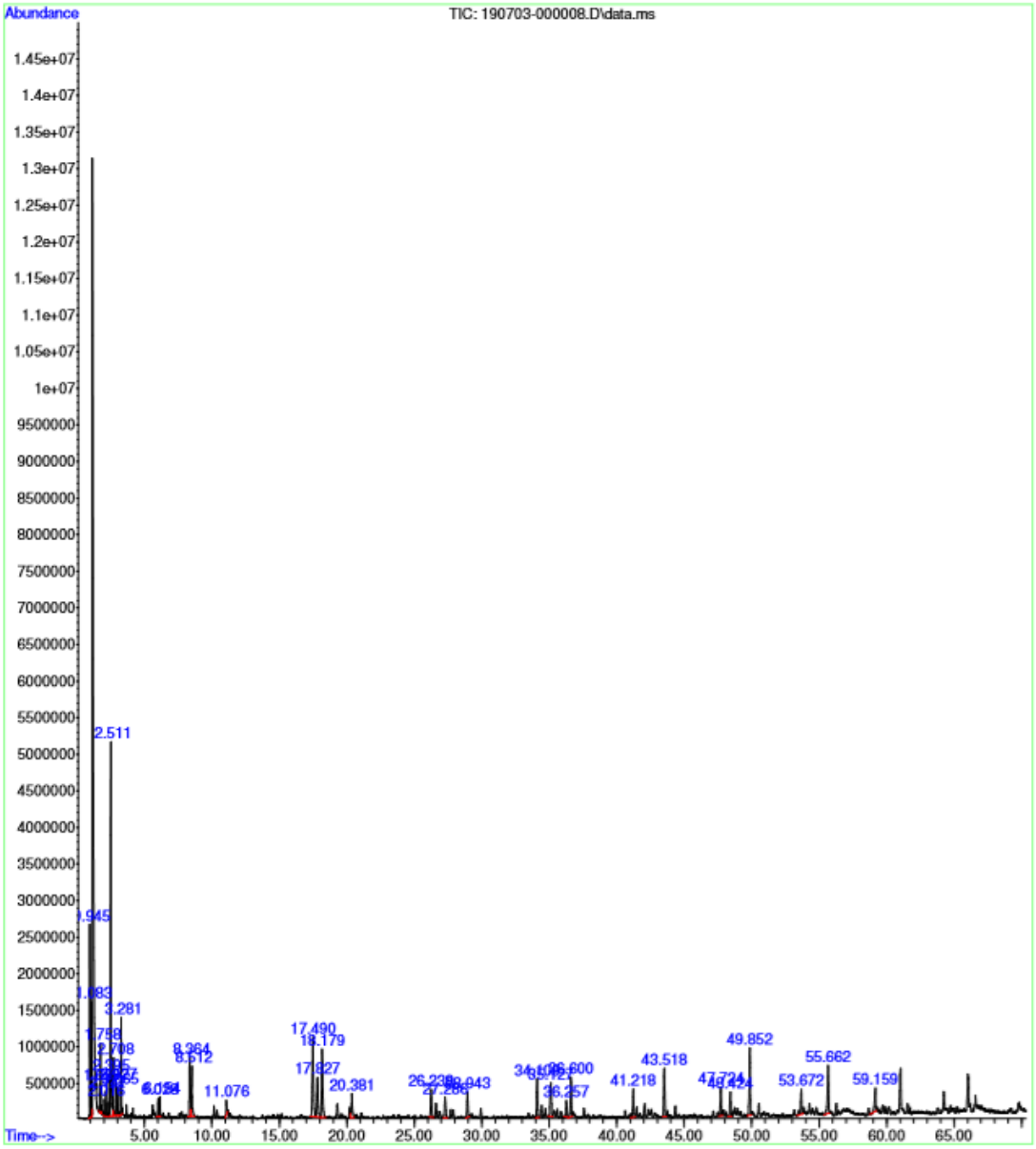


Figura 125. Reporte de cromatografía de la muestra 8 de la condición de cinética 2.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000008.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 18:06
Operator : AdeM
Sample : C8
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 8 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.942	3.20	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
2	1.083	1.54	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	87
3	1.698	0.57	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	70
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	64
			Cyanamide, dimethyl-	489	001467-79-4	50
4	1.757	1.20	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7432	000589-53-7	91
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	90
5	2.016	0.45	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Hexadiene, 2,5-dimethyl-	5837	000764-13-6	62
			1,3-Dimethyl-1-cyclohexene	5817	002808-76-6	62
			1,3-Dimethyl-1-cyclohexene	5824	002808-76-6	60
6	2.148	0.51	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	49
			1-Butene, 3,3-dimethyl-	1473	000558-37-2	30
			1-Butene, 3,3-dimethyl-	1480	000558-37-2	30
7	2.394	1.26	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	90
8	2.512	14.46	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	95
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			Cyclopentane, 1,2,3-trimethyl-, (1 .alpha.,2.alpha.,3.alpha.)-	6656	002613-69-6	59
9	2.707	1.71	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	90
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	90
10	2.926	0.99	C:\Database\NIST05a.L			
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	87
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			1,3-Hexadiene, 2,3,5-trimethyl-	10372	061142-34-5	83
11	3.067	0.94	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			Cyclopropane, 1,1-dimethyl-2-(2-me	10397	033422-32-1	72

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190703-000008.D
Title :
Acq On : 3 Jul 2019 18:06
Operator : AdeM
Sample : C8
Misc : Cinetica 2
ALS Vial : 8 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			thyl-1-propenyl)-			
			1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	10357	074779-65-0	72
12	3.280	2.81	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	47
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	40
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38
13	6.028	0.91	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Octane, 2,3,6,7-tetramethyl-	36467	052670-34-5	78
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
14	6.155	0.91	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18540	007154-80-5	64
15	8.366	3.71	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
16	8.511	3.61	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	49
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	45
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
17	11.077	0.75	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
			1,4-Hexadiene, 3,3,5-trimethyl-	10369	074753-00-7	43
			Cyclopropanecarboxaldehyde, 2-meth yl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-, trans -(.+-.)-	33479	097231-35-1	38
18	17.490	7.28	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
19	17.827	3.89	C:\Database\NIST05a.L			
			Dichloroacetic acid, 6-ethyl-3-oct yl ester	103654	1000282-56-6	43
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	42
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	38
20	18.177	6.27	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloroacetic acid, 6-ethyl-3-oc tyl ester	125632	1000282-57-4	47
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	30
21	20.383	2.02	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1'-(1,2-dimethyl-1, 2-ethanediyl)bis-	73084	074663-71-1	38
			Methanone, dicyclopropyl-	5670	001121-37-5	18
			Cyclohexane, 2-propenyl-	10321	002114-42-3	18

Figura 126. Cromatograma de la muestra 1 de la condición de cinética 3.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190704-000001.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  4 Jul 2019    9:54      using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C1
Misc Info  : Cinetica 3
Vial Number: 1
```

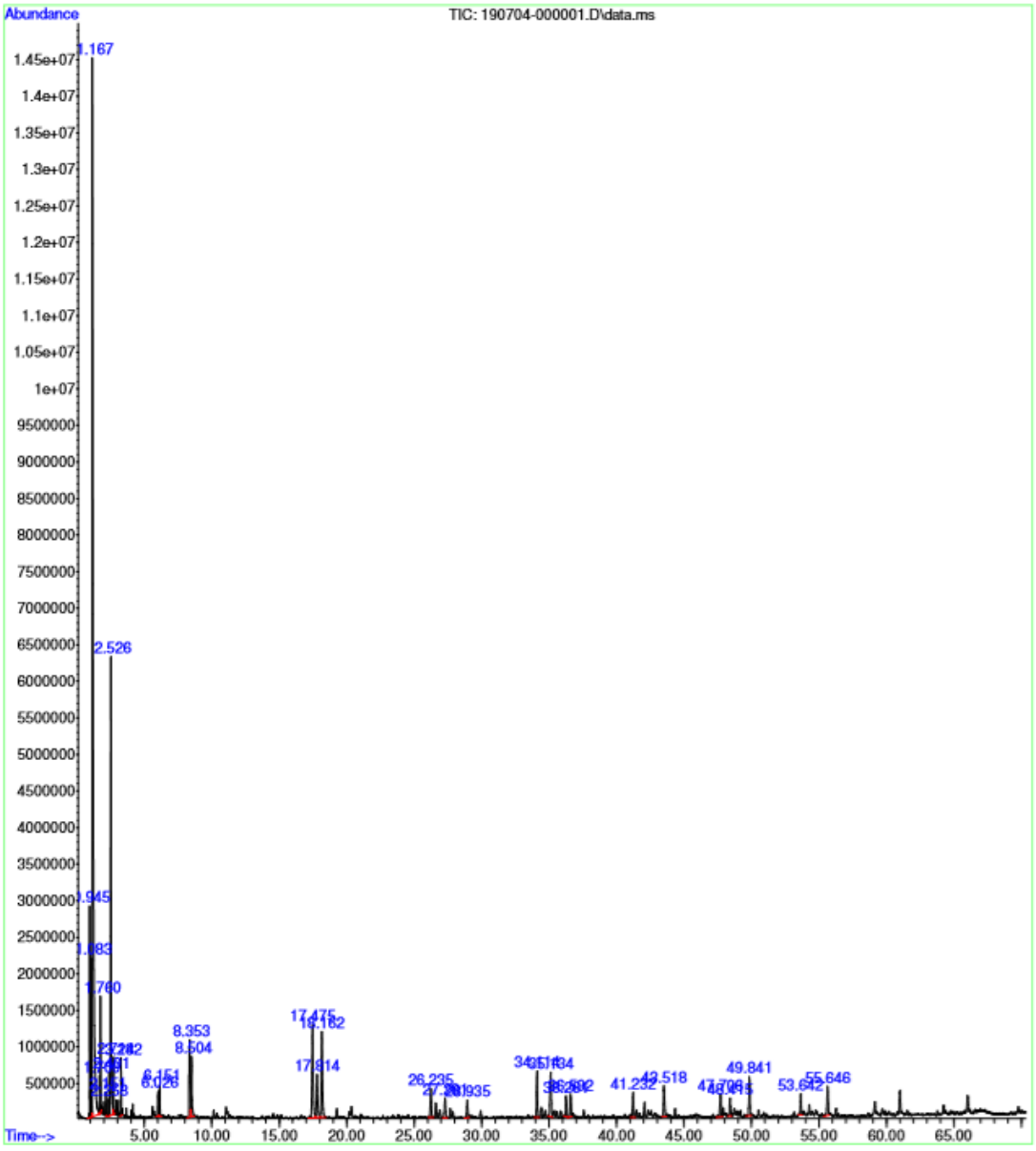


Figura 127. Reporte de cromatografía de la muestra 1 de la condición de cinética 3.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000001.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 9:54
Operator : AdeM
Sample : C1
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.942	2.15	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	49
2	1.083	1.30	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	91
3	1.165	42.21	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	90
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	50
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	42
4	1.702	0.46	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	81
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	64
			Cyanamide, dimethyl-	489	001467-79-4	50
5	1.761	1.15	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	95
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7430	000589-53-7	94
6	2.152	0.29	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	49
			1,1,4-Trimethylcyclohexane	11216	007094-27-1	35
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	35
7	2.257	0.25	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12300	002213-23-2	93
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12302	002213-23-2	81
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12289	002213-23-2	81
8	2.402	0.73	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	93
9	2.525	11.81	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	96
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			1-Heptene, 5-methyl-	6498	013151-04-7	50
10	2.716	0.96	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	91
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	90
11	3.280	0.97	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	43
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	38
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000001.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 9:54
Operator : AdeM
Sample : C1
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	6.028	0.72	C:\Database\NIST05a.L			
			Decane, 4-methyl-	27242	002847-72-5	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18543	007154-80-5	64
13	6.151	0.90	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	83
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Decane, 3,3,5-trimethyl-	46158	062338-13-0	72
14	8.352	2.80	C:\Database\NIST05a.L			
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	30
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
			2-Undecene, 9-methyl-, (Z)-	35046	074630-45-8	25
15	8.507	2.48	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
16	17.477	5.05	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Ethyl-6-heptafluorobutyryloxyoctane	154207	1000215-97-4	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-1-methyl-	25976	061141-79-5	38
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
17	17.813	2.50	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	30
18	18.163	4.27	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloroacetic acid, 6-ethyl-3-octyl ester	125632	1000282-57-4	47
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
19	26.233	1.42	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	53
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
20	27.279	1.08	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
			3-Isopropyl-5-methyl-hex-4-en-2-on	25664	077142-85-9	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, cis-	17451	062238-31-7	35
21	28.935	0.82	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 3-ethyl-5-methyl-1-propyl-	35085	1000151-39-5	43
22	34.116	1.92	C:\Database\NIST05a.L			

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000001.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 9:54
Operator : AdeM
Sample : C1
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
23	35.134	2.42	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
24	36.263	0.99	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	27
25	36.590	1.10	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	38
26	41.230	1.24	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			2-Hexyl-1-octanol	67337	019780-79-1	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	38
27	43.518	1.55	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	37
28	47.707	1.27	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35054	016538-89-9	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	17436	061142-69-6	35
29	48.416	0.88	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyanamide, dibutyl-	26626	002050-54-6	35
30	49.840	1.88	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
31	53.643	0.84	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	49
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	35
32	55.644	1.60	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38

Figura 128. Cromatograma de la muestra 2 de la condición de cinética 3.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190704-000002.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  4 Jul 2019  11:11     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C2
Misc Info  : Cinetica 3
Vial Number: 2
```

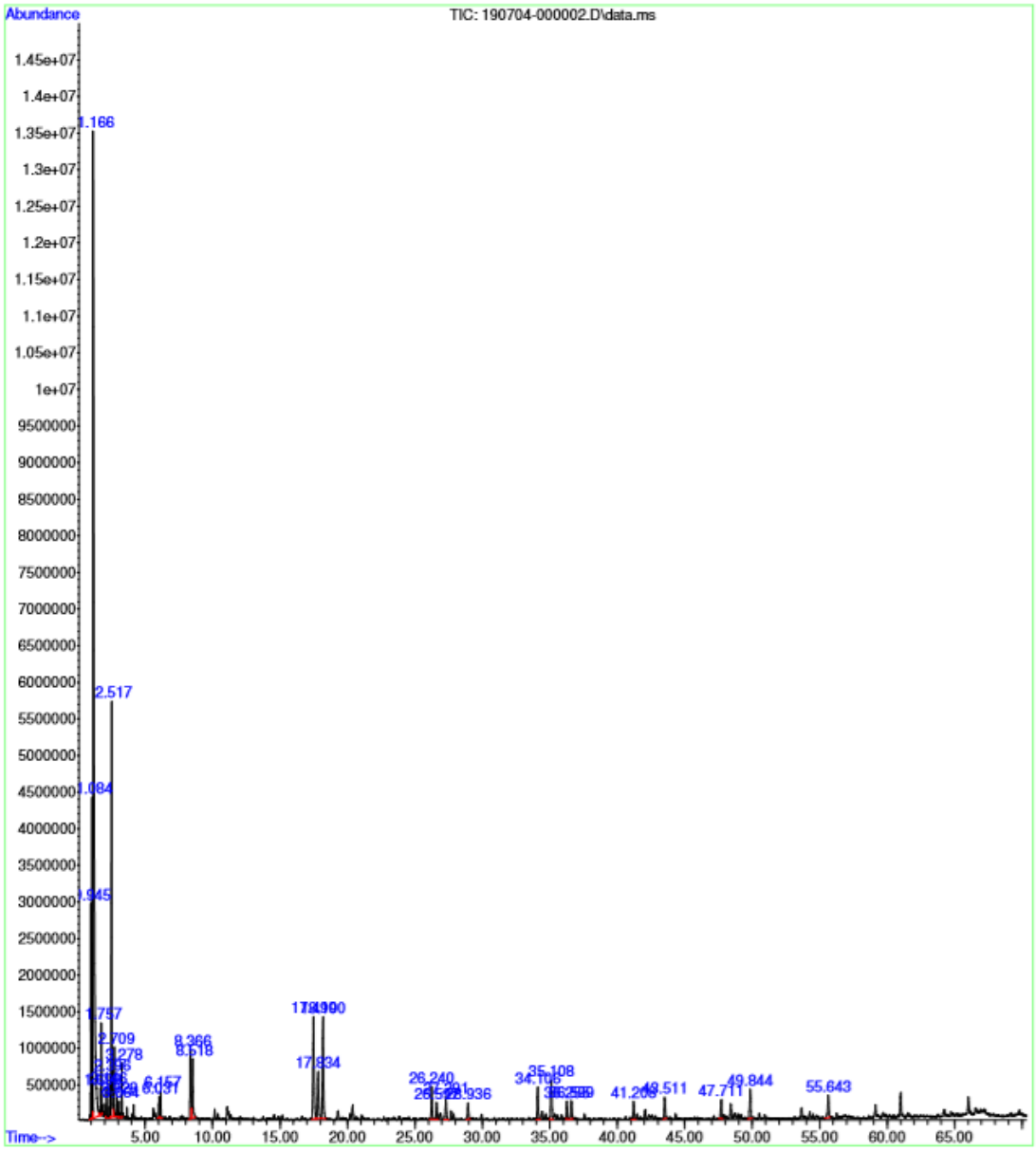


Figura 129. Reporte de cromatografía de la muestra 2 de la condición de cinética 3.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000002.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 11:11
Operator : AdeM
Sample : C2
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.943	3.31	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	59
2	1.084	3.09	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	91
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.165	42.27	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	90
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	53
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	50
4	1.698	0.37	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	81
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	64
			Cyclopentane, ethyl-	3268	001640-89-7	53
5	1.757	0.98	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7432	000589-53-7	91
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	90
6	2.148	0.37	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	49
			Cyclopentane, 1-ethyl-1-methyl-	6619	016747-50-5	43
			1,1,4-Trimethylcyclohexane	11216	007094-27-1	35
7	2.398	0.78	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	93
8	2.516	10.13	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	95
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			Cyclopentane, 1,2,3-trimethyl-, (1 .alpha.,2.alpha.,3.alpha.)-	6656	002613-69-6	59
9	2.707	1.22	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	90
10	2.930	0.32	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			2,4-Heptadiene, 2,4-dimethyl-	10355	074421-05-9	83
			2,4-Heptadiene, 2,6-dimethyl-	10358	004634-87-1	80
11	3.062	0.27	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	81

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000002.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 11:11
Operator : AdeM
Sample : C2
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclopentane, 2-ethylidene-1,1-dim ethyl-	10390	056324-66-4	72
12	3.276	0.98	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	47
			3-Penten-2-one	1370	000625-33-2	47
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	45
13	6.032	0.63	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Dodecane, 2,7,10-trimethyl-	66079	074645-98-0	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
14	6.155	0.79	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	83
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Heptane, 2,5,5-trimethyl-	18539	001189-99-7	72
15	8.366	2.76	C:\Database\NIST05a.L			
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			Cyclooctane	6448	000292-64-8	25
			3-Hexene, 2,3-dimethyl-	6528	007145-23-5	25
16	8.516	2.57	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	43
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
17	17.491	5.91	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
18	17.832	2.80	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
19	18.191	4.92	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	38
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
20	26.238	1.40	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
			Cyclohexane, 1,1,4,4-tetramethyl-	17429	002223-52-1	38
21	26.597	0.77	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	53
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35058	016538-89-9	35
22	27.293	1.10	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	50
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	47

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000002.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 11:11
Operator : AdeM
Sample : C2
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-, cis-	17421	000824-43-1	38
23	28.935	0.88	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			3,7-Nonadien-2-one, 4,8-dimethyl-	33405	000817-88-9	42
24	34.107	1.64	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
25	35.107	2.19	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Decane, 1,1'-oxybis-	123793	002456-28-2	35
26	36.254	0.86	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, trans-	17459	062238-29-3	27
			Cyclooctane, ethyl-	17357	013152-02-8	27
27	36.599	0.96	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	38
28	41.207	0.87	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
29	43.509	1.11	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1-one	24154	025183-82-8	64
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
			Cyclohexane, (1,2-dimethylbutyl)-	35073	061142-37-8	37
30	47.712	0.90	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	35
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	27
			Heneicosane	122436	000629-94-7	25
31	49.845	1.60	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50
			11,13-Dimethyl-12-tetradecen-1-ol acetate	113394	1000130-81-0	45
32	55.644	1.27	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38

Figura 130. Cromatograma de la muestra 3 de la condición de cinética 3.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190704-000003.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  4 Jul 2019  12:28     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C3
Misc Info  : Cinetica 3
Vial Number: 3
```

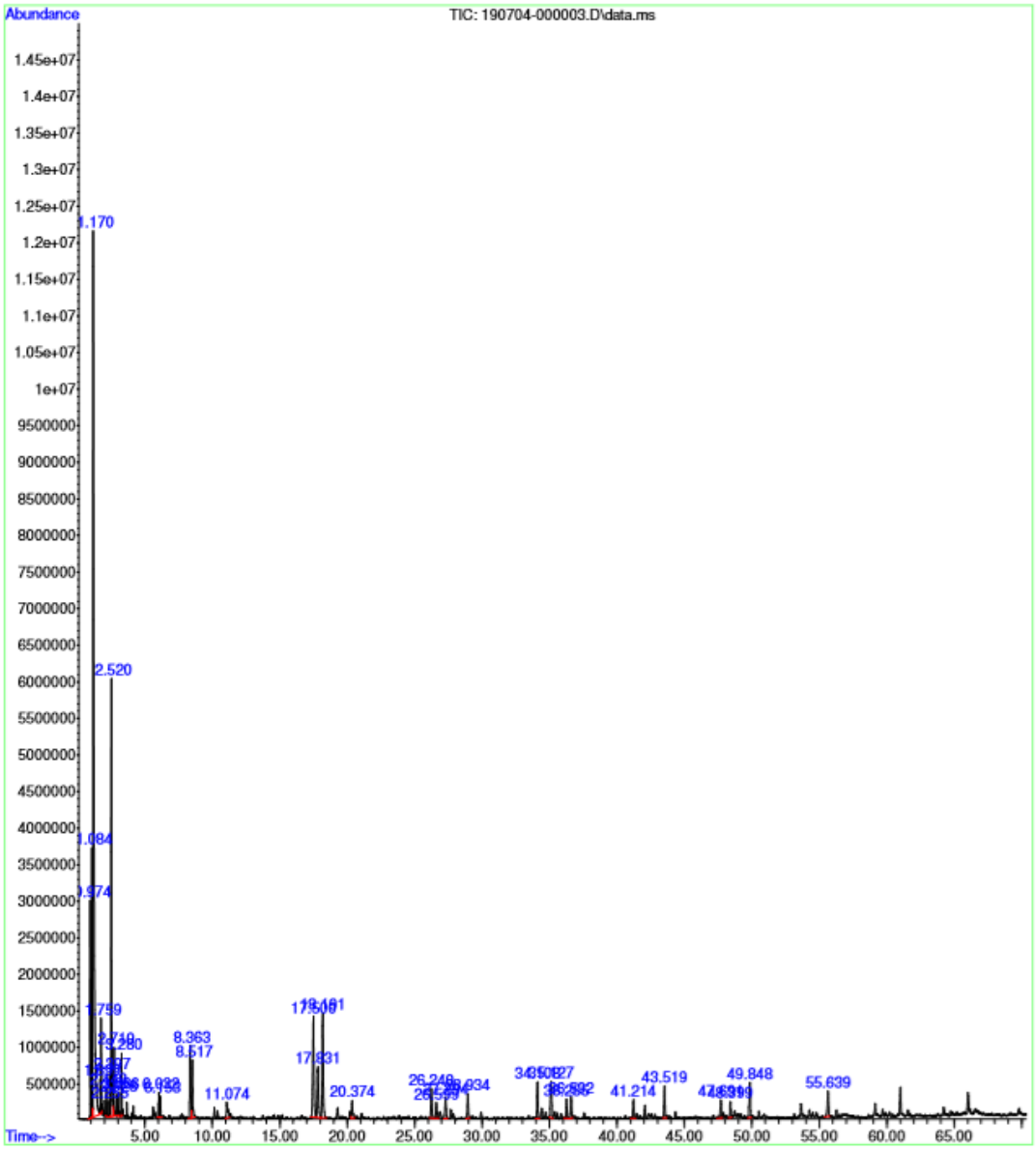


Figura 131. Reporte de cromatografía de la muestra 3 de la condición de cinética 3.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000003.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 12:28
Operator : AdeM
Sample : C3
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.974	3.20	C:\Database\NIST05a.L			
			Pentane	695	000109-66-0	94
			Pentane	694	000109-66-0	91
			Pentane	691	000109-66-0	90
2	1.084	2.58	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1462	000763-29-1	91
3	1.170	39.91	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	90
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	53
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	50
4	1.698	0.41	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	70
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	64
			Cyanamide, dimethyl-	486	001467-79-4	50
5	1.757	0.91	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7430	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7432	000589-53-7	91
6	2.148	0.32	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	53
			Cyclopentanone, 2,4,4-trimethyl-	11098	004694-12-6	43
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	35
7	2.257	0.20	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12302	002213-23-2	81
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12289	002213-23-2	81
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12300	002213-23-2	74
8	2.398	0.74	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11236	001839-63-0	93
9	2.521	10.48	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	97
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			Cyclopentane, 1,2,3-trimethyl-, (1.alpha.,2.alpha.,3.alpha.)-	6657	002613-69-6	59
10	2.712	1.24	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	91
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	90
11	2.930	0.34	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			Cyclohexene, 3,5,5-trimethyl-	10364	000933-12-0	80
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	76

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Fri Jul 05 07:37:58 2019 Page: 1

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000003.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 12:28
Operator : AdeM
Sample : C3
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	3.067	0.35	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			Cyclohexene, 3,3,5-trimethyl-	10361	000503-45-7	64
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	59
13	3.281	1.06	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	43
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	40
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38
14	6.032	0.61	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18543	007154-80-5	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Decane, 2,8,8-trimethyl-	46157	1000060-81-2	64
15	6.151	0.58	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	83
			Octane, 2,3,6,7-tetramethyl-	36467	052670-34-5	78
			Decane, 4-methyl-	27242	002847-72-5	72
16	8.361	2.69	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	38
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			3-Hexene, 2,3-dimethyl-	6528	007145-23-5	25
17	8.516	2.19	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	38
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6547	003404-78-2	38
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
18	11.072	0.96	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanecarboxaldehyde, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-, trans-(.+-.)-	33479	097231-35-1	45
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	38
19	17.500	5.49	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	43
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
20	17.832	2.89	C:\Database\NIST05a.L			
			2,3-Dimethyl-3-heptene, (Z)-	11220	059643-73-1	43
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
21	18.191	4.89	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Ethyl-6-heptafluorobutyryloxyoctane	154207	1000215-97-4	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	38
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	30
22	20.374	0.94	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	38

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000003.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 12:28
Operator : AdeM
Sample : C3
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	27
			Bicyclo[3.1.1]heptan-3-one, 2,6,6-trimethyl-, (1.alpha.,2.beta.,5.alpha.)-	24334	015358-88-0	22
23	26.242	1.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
24	26.597	0.77	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	53
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	46
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
25	27.293	1.09	C:\Database\NIST05a.L			
			Bacchotricuneatin c	148777	066563-30-2	43
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	17436	061142-69-6	35
26	28.935	1.08	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			3,7-Nonadien-2-one, 4,8-dimethyl-	33405	000817-88-9	42
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-1-methyl-	25976	061141-79-5	38
27	34.107	1.77	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
28	35.126	1.99	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4,6-Diketo-1-heptanol	19897	057245-94-0	38
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
29	36.254	0.83	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
30	36.590	1.01	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	38
31	41.216	0.87	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
			2-Hexyl-1-octanol	67337	019780-79-1	38
32	43.518	1.33	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000003.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 12:28
Operator : AdeM
Sample : C3
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	37
33	47.689	0.97	C:\Database\NIST05a.L			
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	53
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
34	48.398	0.76	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	35
35	49.850	1.70	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	47
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
36	55.640	1.44	C:\Database\NIST05a.L			
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38

Figura 132. Cromatograma de la muestra 4 de la condición de cinética 3.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190704-000004.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  4 Jul 2019  13:45     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C4
Misc Info  : Cinetica 3
Vial Number: 4
```

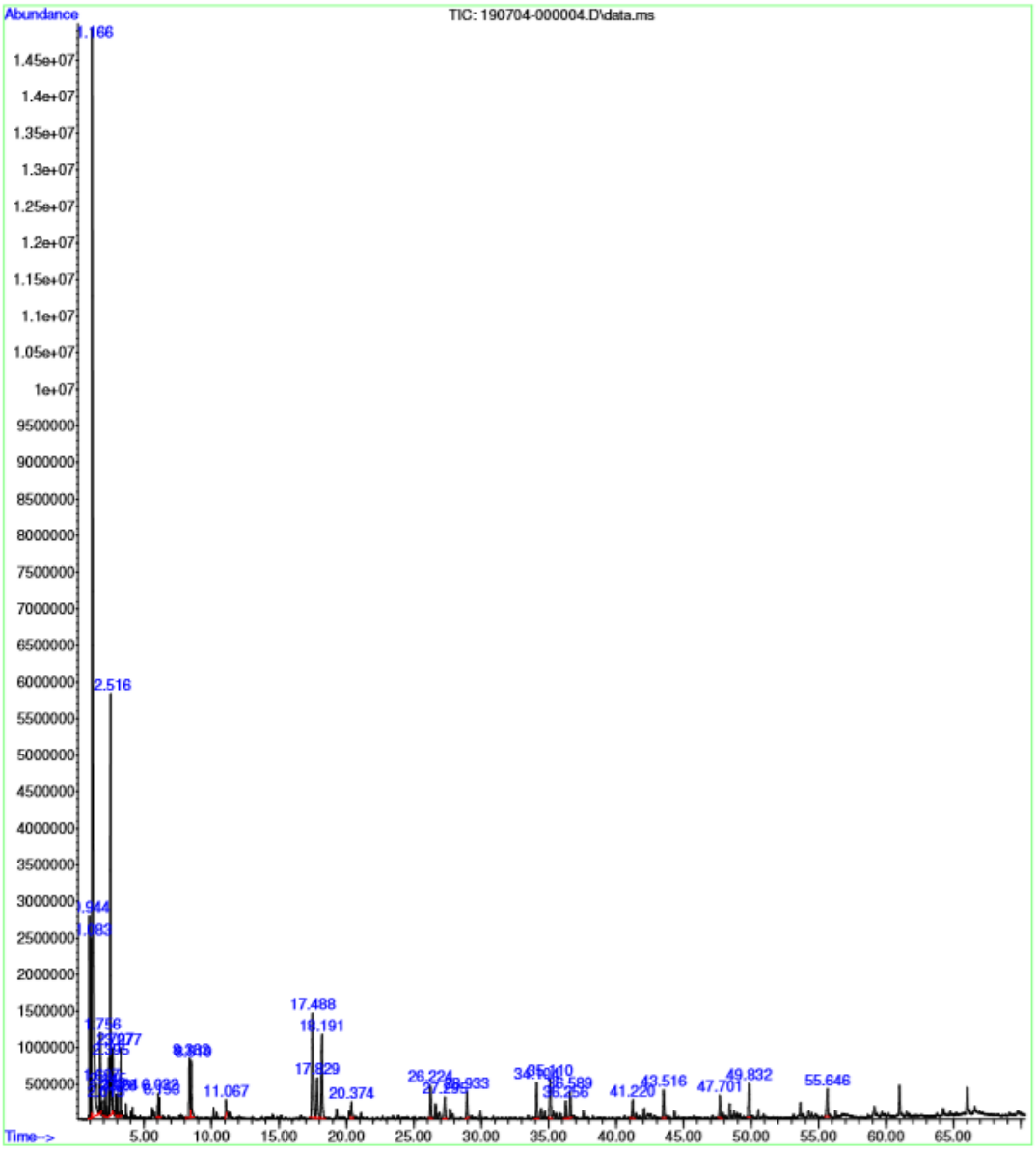
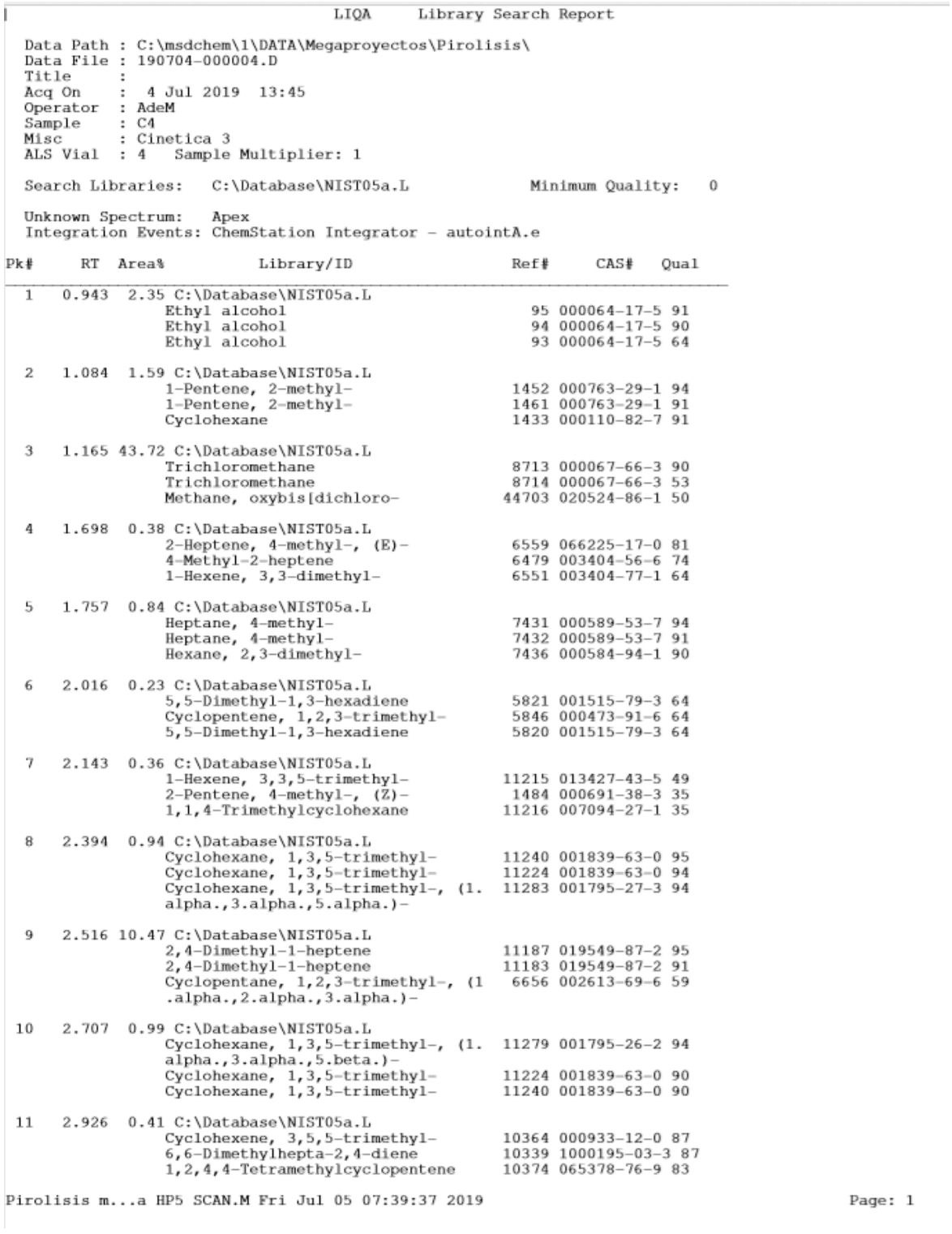


Figura 133. Reporte de cromatografía de la muestra 4 de la condición de cinética 3.



LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000004.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 13:45
Operator : AdeM
Sample : C4
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.943	2.35	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	64
2	1.084	1.59	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	91
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.165	43.72	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	90
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	53
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	50
4	1.698	0.38	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	81
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	74
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	64
5	1.757	0.84	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7432	000589-53-7	91
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	90
6	2.016	0.23	C:\Database\NIST05a.L			
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5821	001515-79-3	64
			Cyclopentene, 1,2,3-trimethyl-	5846	000473-91-6	64
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5820	001515-79-3	64
7	2.143	0.36	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	49
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	35
			1,1,4-Trimethylcyclohexane	11216	007094-27-1	35
8	2.394	0.94	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	95
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	94
9	2.516	10.47	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	95
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			Cyclopentane, 1,2,3-trimethyl-, (1 .alpha.,2.alpha.,3.alpha.)-	6656	002613-69-6	59
10	2.707	0.99	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	90
11	2.926	0.41	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexene, 3,5,5-trimethyl-	10364	000933-12-0	87
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	83

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Fri Jul 05 07:39:37 2019 Page: 1

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000004.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 13:45
Operator : AdeM
Sample : C4
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	3.062	0.36	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	10357	074779-65-0	81
			Cyclohexene, 3,3,5-trimethyl-	10361	000503-45-7	70
13	3.276	1.21	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17453	050876-31-8	40
			3-Penten-2-one	1370	000625-33-2	38
14	6.032	0.65	C:\Database\NIST05a.L			
			Hexane, 3,3-dimethyl-	7446	000563-16-6	80
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18543	007154-80-5	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
15	6.151	0.57	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18540	007154-80-5	64
16	8.361	2.35	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	35
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	30
17	8.511	2.31	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	35
18	11.068	0.45	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
			1,4-Hexadiene, 3,3,5-trimethyl-	10369	074753-00-7	43
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	42
19	17.486	5.16	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	43
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
20	17.827	2.55	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			3-Ethyl-6-heptafluorobutyryloxyoctane	154207	1000215-97-4	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
21	18.191	4.36	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Hexane, 3-ethyl-	7422	000619-99-8	38
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	38
22	20.374	0.91	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	38

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000004.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 13:45
Operator : AdeM
Sample : C4
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Bicyclo[3.1.1]heptan-2-one, 6,6-di methyl-, (1R)-	17047	038651-65-9	27
			(Cyclopropyl)trivinylsilane	23623	1000109-93-8	27
23	26.224	1.56	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	43
24	27.293	1.09	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
			3-Isopropyl-5-methyl-hex-4-en-2-on	25664	077142-85-9	35
25	28.930	1.18	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			4-Octene, 2,3,6,7-tetramethyl-	35055	063830-66-0	38
26	34.102	1.83	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
27	35.112	2.18	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
28	36.254	0.90	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	30
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
29	36.590	1.32	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	38
30	41.221	0.96	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
31	43.518	1.43	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1-one	24154	025183-82-8	64
			Bicyclo[2.2.1]heptane-2,5-dione, 1,7,7-trimethyl-	33284	004230-32-4	59
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000004.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 13:45
Operator : AdeM
Sample : C4
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
32	47.703	0.98	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			3-Isopropyl-5-methyl-hex-4-en-2-on	25664	077142-85-9	35
33	49.831	1.90	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	50
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
34	55.644	1.53	C:\Database\NIST05a.L			
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38

Figura 134. Cromatograma de la muestra 5 de la condición de cinética 3.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190704-000005.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  4 Jul 2019  15:02     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C5
Misc Info  : Cinetica 3
Vial Number: 5
```

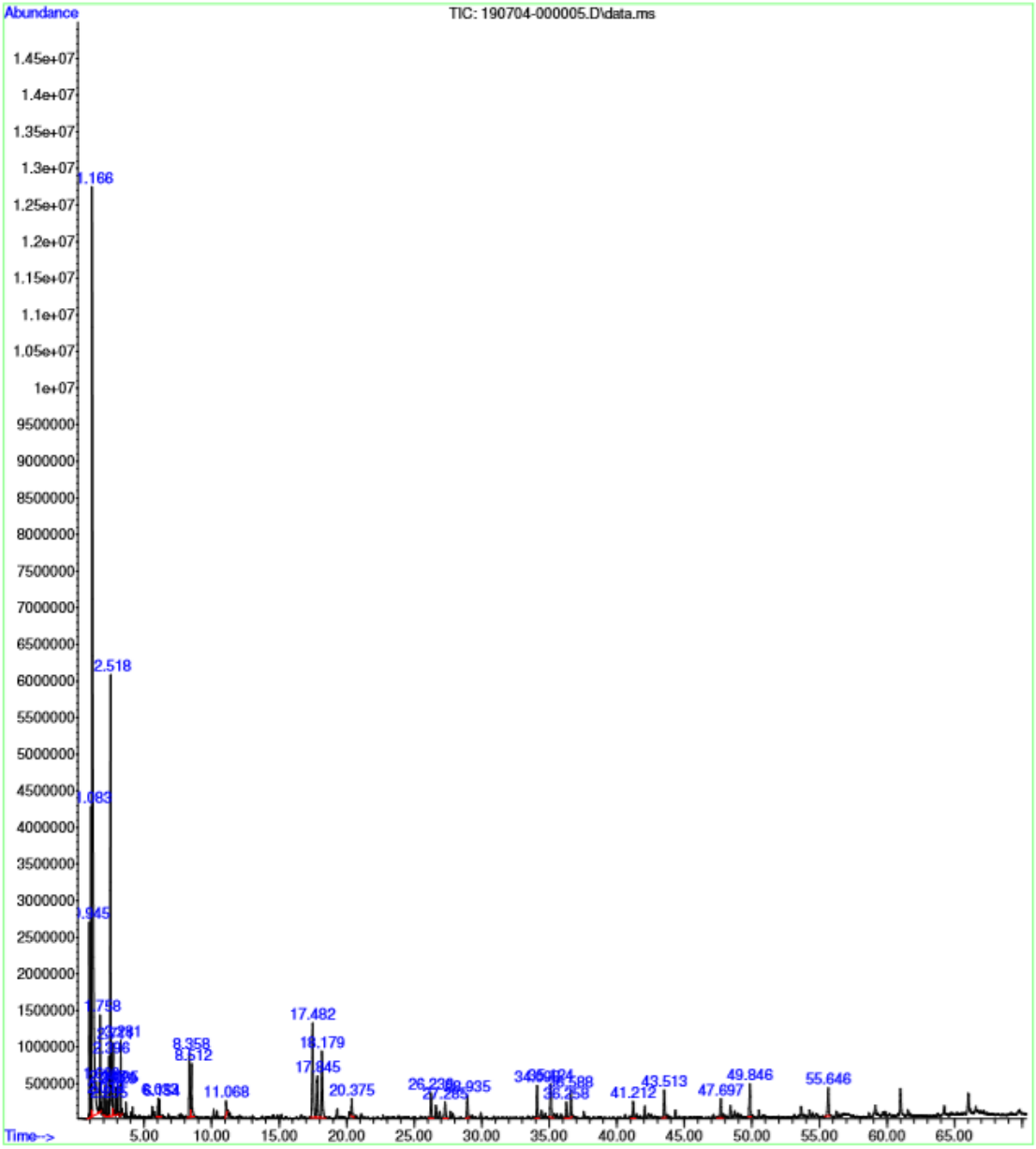


Figura 135. Reporte de cromatografía de la muestra 5 de la condición de cinética 3.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000005.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 15:02
Operator : AdeM
Sample : C5
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.943	2.74	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	64
2	1.084	2.79	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	91
			1-Pentene, 2-methyl-	1462	000763-29-1	91
3	1.165	42.17	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	90
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	50
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	50
4	1.698	0.39	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	64
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	64
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	59
5	1.757	1.02	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7432	000589-53-7	91
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	90
6	2.016	0.30	C:\Database\NIST05a.L			
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5820	001515-79-3	70
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5821	001515-79-3	70
			Cyclopentene, 1,2,3-trimethyl-	5846	000473-91-6	70
7	2.148	0.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentane, 1-ethyl-1-methyl-	6619	016747-50-5	47
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	46
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11209	013427-43-5	38
8	2.253	0.20	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12300	002213-23-2	87
			Octane	7421	000111-65-9	72
			Octane	7420	000111-65-9	72
9	2.398	1.01	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	93
10	2.516	11.48	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	95
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			Cyclopentane, 1,2,3-trimethyl-, (1 .alpha.,2.alpha.,3.alpha.)-	6656	002613-69-6	59
11	2.712	1.52	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	91
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.	11281	001795-26-2	90

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000005.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 15:02
Operator : AdeM
Sample : C5
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			alpha.,3.alpha.,5.beta.)-			
12	2.930	0.51	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			Cyclohexene, 3,5,5-trimethyl-	10364	000933-12-0	87
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	83
13	3.067	0.44	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	81
			Cyclohexene, 3,3,5-trimethyl-	10361	000503-45-7	58
14	3.281	1.38	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	47
			1-Silacyclo-3-pentene	1346	007049-25-4	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	38
15	6.032	0.56	C:\Database\NIST05a.L			
			Octane, 2,3,6,7-tetramethyl-	36467	052670-34-5	78
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Octane, 2-bromo-	51581	000557-35-7	64
16	6.155	0.53	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	83
			Octane, 2,3,6,7-tetramethyl-	36467	052670-34-5	78
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
17	8.357	2.51	C:\Database\NIST05a.L			
			2,3-Dimethyl-3-heptene, (Z)-	11220	059643-73-1	49
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
18	8.511	2.15	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
19	11.068	0.48	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	53
			Cyclopropanecarboxaldehyde, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-, trans-(.+-.)-	33479	097231-35-1	53
			1,6-Octadiene, 2,7-dimethyl-	16335	040195-09-3	43
20	17.481	4.99	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	35
21	17.845	2.44	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	30
22	18.177	3.82	C:\Database\NIST05a.L			

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000005.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 15:02
Operator : AdeM
Sample : C5
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	30
23	20.374	0.85	C:\Database\NIST05a.L			
			Bicyclo[3.1.1]heptan-3-one, 2,6,6-trimethyl-, (1.alpha.,2.beta.,5.alpha.)-	24333	015358-88-0	38
			Bicyclo[2.2.1]heptan-2-one, 1,4,7,7-tetramethyl-	33444	010309-50-9	37
			(Cyclopropyl)trivinylsilane	23623	1000109-93-8	27
24	26.238	1.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
25	27.284	0.93	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	53
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
26	28.935	1.15	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			1-Nitrododecane	67813	016891-99-9	43
27	34.098	1.57	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
28	35.126	1.76	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
29	36.258	0.77	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Methoxycarbonylspiro[2.3]hexane	17818	1000222-10-1	35
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	30
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	17436	061142-69-6	27
30	36.590	1.16	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	38
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	37
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	37
31	41.212	0.95	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	43
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl met	25685	017983-26-5	38

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000005.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 15:02
Operator : AdeM
Sample : C5
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			hyl			
32	43.513	1.44	C:\Database\NIST05a.L			
			Bicyclo[2.2.1]heptane-2,5-dione, 1	33284	004230-32-4	59
			,7,7-trimethyl-			
			(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methan	27143	013702-56-2	47
			ol			
			Cyclohexane, 3-ethyl-5-methyl-1-pr	35085	1000151-39-5	47
			opyl-			
33	47.698	0.99	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	50
			Cyanamide, dibutyl-	26626	002050-54-6	43
			3-Heptafluorobytyryloxy-6-ethyldec	165607	1000215-97-2	43
			ane			
34	49.845	1.68	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	64
			Cyclohexane, 3-ethyl-5-methyl-1-pr	35085	1000151-39-5	47
			opyl-			
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
35	55.644	1.54	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	42
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38

Figura 136. Cromatograma de la muestra 6 de la condición de cinética 3.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190704-000006.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  4 Jul 2019  16:19     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C6
Misc Info  : Cinetica 3
Vial Number: 6
```

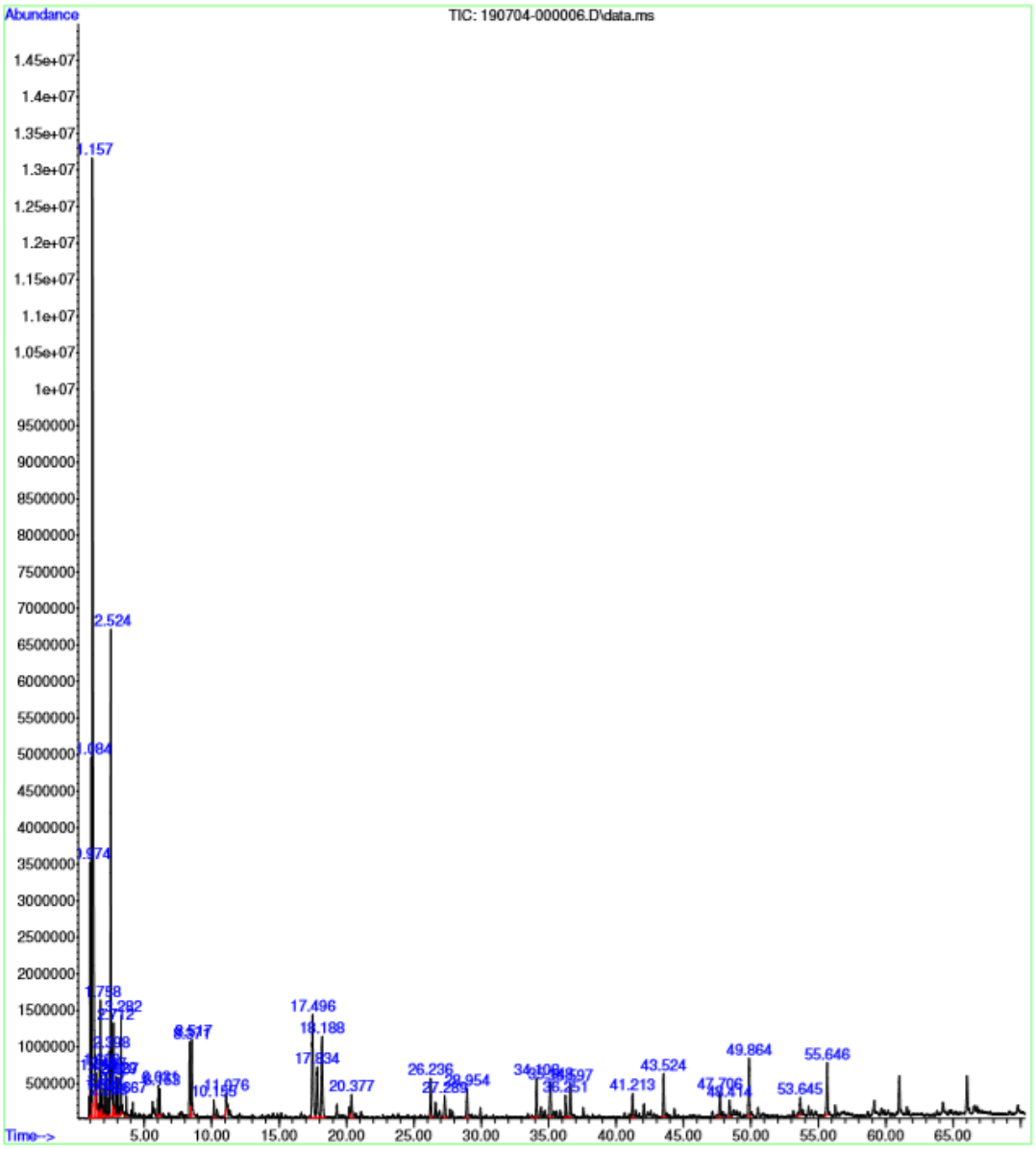


Figura 137. Reporte de cromatografía de la muestra 6 de la condición de cinética 3.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000006.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 16:19
Operator : AdeM
Sample : C6
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.974	2.92	C:\Database\NIST05a.L			
			Pentane	695	000109-66-0	91
			Pentane	691	000109-66-0	91
			Pentane	692	000109-66-0	91
2	1.083	3.14	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	91
			1-Pentene, 2-methyl-	1462	000763-29-1	91
3	1.156	33.47	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	91
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	53
			Trichloromethane	8712	000067-66-3	53
4	1.411	1.42	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	89
			Trichloromethane	8712	000067-66-3	46
			Ethane, 1,2,2-trichloro-1,1-difluoro-	35125	000354-21-2	38
5	1.697	0.70	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	87
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	80
			3-Hexene, 2,5-dimethyl-	6534	015910-22-2	58
6	1.757	1.14	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	96
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7430	000589-53-7	94
7	1.825	0.51	C:\Database\NIST05a.L			
			trans-3,5-Dimethylcyclohexene	5844	056021-63-7	47
			Cyclohexene, 3,5-dimethyl-	5814	000823-17-6	47
			1,4-Hexadiene, 2,5-dimethyl-	5832	000927-97-9	47
8	2.016	0.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentene, 1,2,3-trimethyl-	5846	000473-91-6	76
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5821	001515-79-3	76
			5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene	5820	001515-79-3	70
9	2.148	0.52	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	53
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	47
			1,1,4-Trimethylcyclohexane	11216	007094-27-1	38
10	2.257	0.21	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12289	002213-23-2	87
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12302	002213-23-2	83
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12300	002213-23-2	83
11	2.398	1.09	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	90

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000006.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 16:19
Operator : AdeM
Sample : C6
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
22	10.153	0.49	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	47
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	41
			2-Pentene, 2-methyl-	1448	000625-27-4	25
23	11.077	0.36	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	53
			Cyclopropanecarboxaldehyde, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-, trans-(.+-.)-	33479	097231-35-1	45
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
24	17.495	5.08	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	30
25	17.832	2.47	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
26	18.186	3.88	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
27	20.379	1.06	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
			Bicyclo[3.1.1]heptan-3-one, 2,6,6-trimethyl-, (1.alpha.,2.beta.,5.alpha.)-	24333	015358-88-0	38
			Bicyclo[3.1.1]heptan-2-one, 6,6-dimethyl-, (1R)-	17047	038651-65-9	27
28	26.237	1.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
29	27.288	0.93	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, cis-	17451	062238-31-7	35
30	28.953	1.16	C:\Database\NIST05a.L			
			3,7-Nonadien-2-one, 4,8-dimethyl-	33405	000817-88-9	42
			2-(2-Methyl-acryloyl)-cyclohexanon	33220	1000185-67-7	38
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-1-methyl-	25976	061141-79-5	38
31	34.107	1.64	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000006.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 16:19
Operator : AdeM
Sample : C6
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
32	35.148	1.70	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
33	36.253	0.80	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	35
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
34	36.599	1.32	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
35	41.212	0.98	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Carbonic acid, heptadecyl isobutyl ester	155468	1000314-61-4	38
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
36	43.522	1.68	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1-one	24154	025183-82-8	64
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
37	47.707	1.16	C:\Database\NIST05a.L			
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	53
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			3-Isopropyl-5-methyl-hex-4-en-2-on	25664	077142-85-9	35
38	48.412	0.68	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	38
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	35
39	49.863	2.21	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	64
			(+-)-3-(2-Carboxy-trans-propenyl)-2,2-dimethylcyclopropane-trans-1-carboxylic acid,[1.alpha., 3.beta.(E)]-	55435	040253-03-0	53
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	43
40	53.643	0.91	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyanamide, dibutyl-	26626	002050-54-6	38

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000006.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 16:19
Operator : AdeM
Sample : C6
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
41	55.644	2.13	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47
			8-(2-Nitrophenoxy)octan-1-ol	103198	167685-26-9	38

Figura 138. Cromatograma de la muestra 7 de la condición de cinética 3.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190704-000007.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  4 Jul 2019  17:36     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C7
Misc Info  : Cinetica 3
Vial Number: 7
```

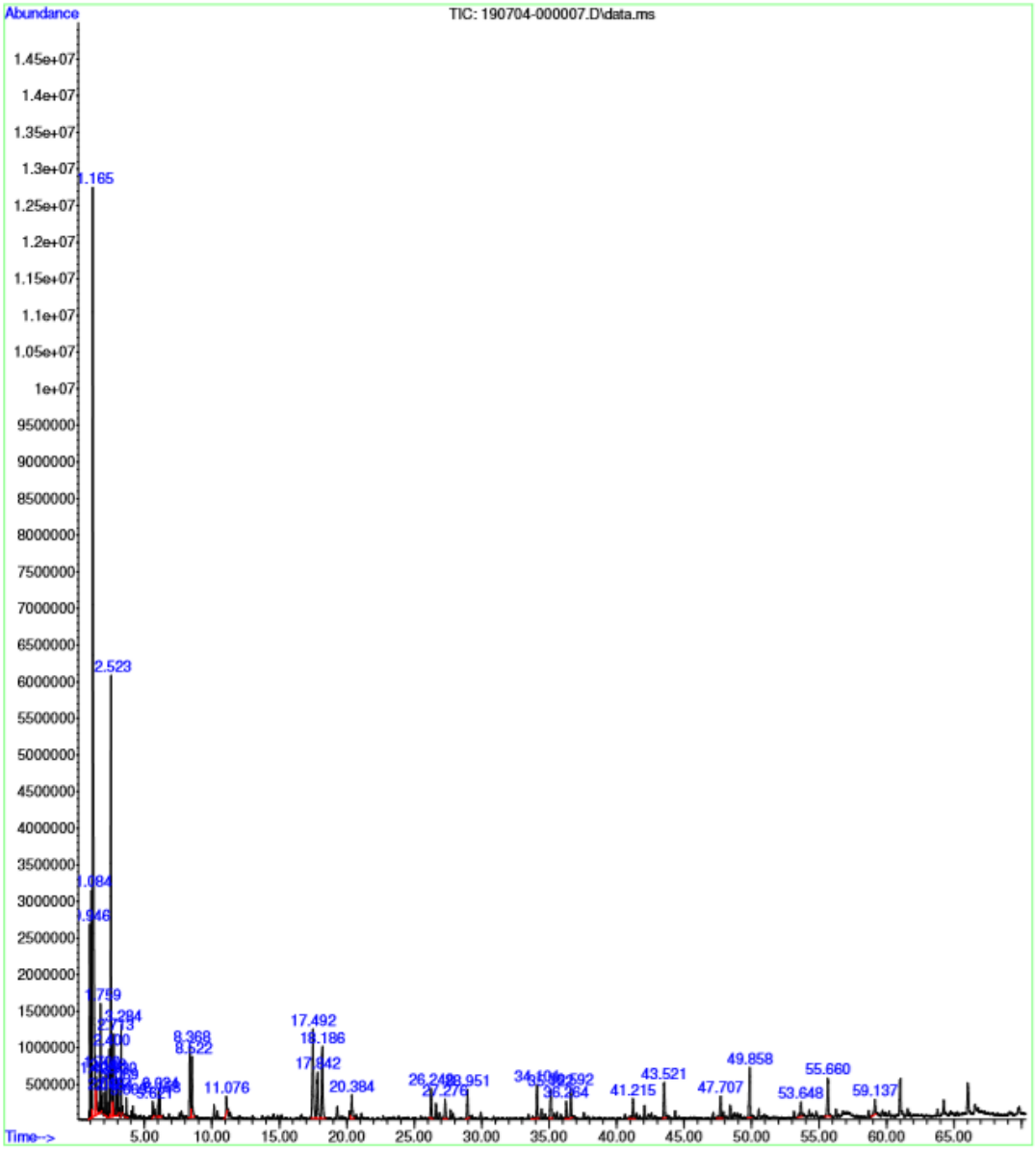
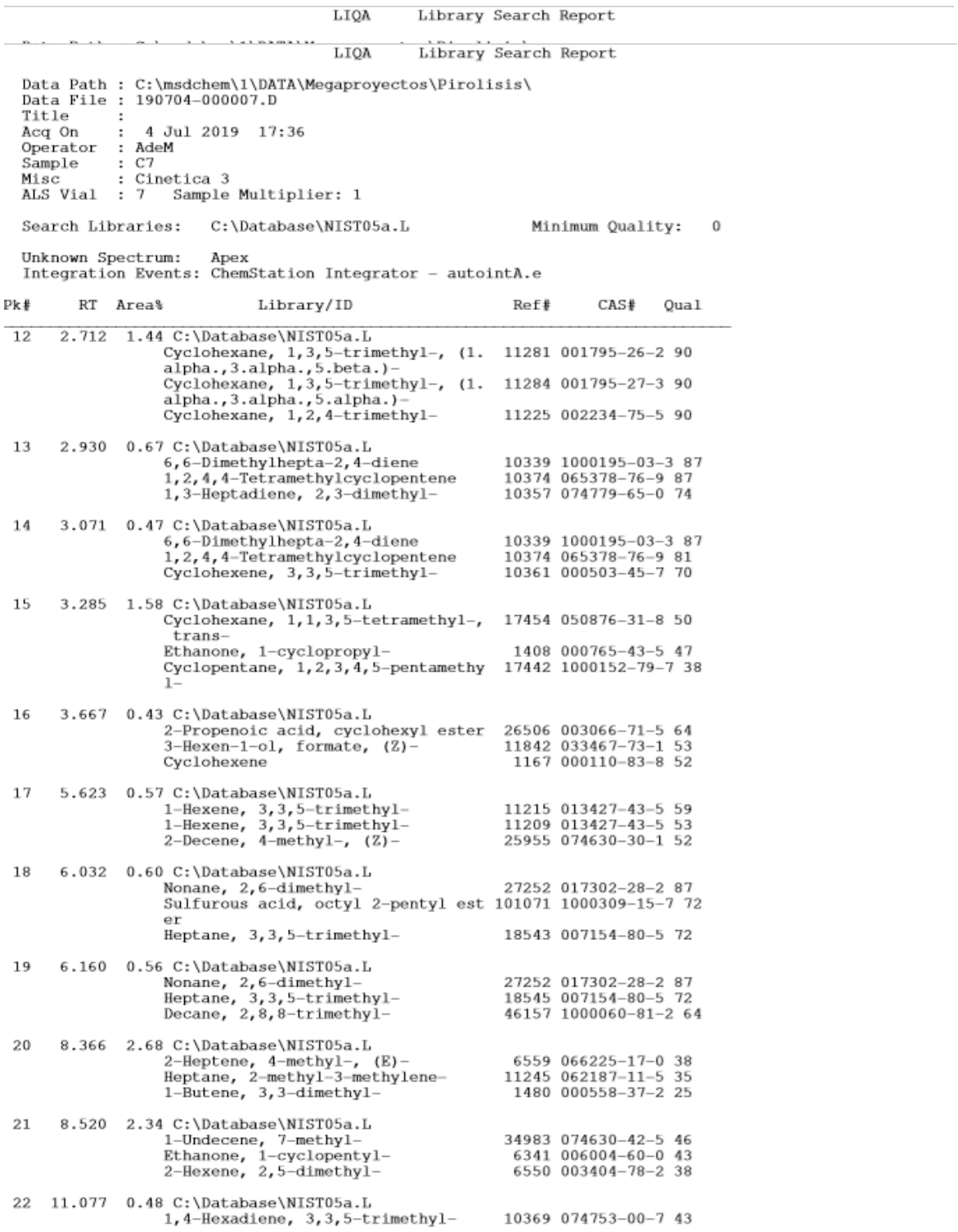


Figura 139. Reporte de cromatografía de la muestra 7 de la condición de cinética 3.



LIQA Library Search Report

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000007.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 17:36
Operator : AdeM
Sample : C7
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 7 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	2.712	1.44	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11281	001795-26-2	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	90
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	90
13	2.930	0.67	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	87
			1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	10357	074779-65-0	74
14	3.071	0.47	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	81
			Cyclohexene, 3,3,5-trimethyl-	10361	000503-45-7	70
15	3.285	1.58	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	50
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	47
			Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	17442	1000152-79-7	38
16	3.667	0.43	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Propenoic acid, cyclohexyl ester	26506	003066-71-5	64
			3-Hexen-1-ol, formate, (Z)-	11842	033467-73-1	53
			Cyclohexene	1167	000110-83-8	52
17	5.623	0.57	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	59
			1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11209	013427-43-5	53
			2-Decene, 4-methyl-, (Z)-	25955	074630-30-1	52
18	6.032	0.60	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Sulfurous acid, octyl 2-pentyl ester	101071	1000309-15-7	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18543	007154-80-5	72
19	6.160	0.56	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18545	007154-80-5	72
			Decane, 2,8,8-trimethyl-	46157	1000060-81-2	64
20	8.366	2.68	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	35
			1-Butene, 3,3-dimethyl-	1480	000558-37-2	25
21	8.520	2.34	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6550	003404-78-2	38
22	11.077	0.48	C:\Database\NIST05a.L			
			1,4-Hexadiene, 3,3,5-trimethyl-	10369	074753-00-7	43

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Fri Jul 05 07:44:06 2019 Page: 2

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000007.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 17:36
Operator : AdeM
Sample : C7
Misc : Cinetica 3
ALS Vial : 7 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
33	36.590	1.30	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	38
34	41.216	1.05	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
35	43.522	1.74	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1-one	24154	025183-82-8	64
			Bicyclo[2.2.1]heptane-2,5-dione, 1,7,7-trimethyl-	33284	004230-32-4	59
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
36	47.707	1.12	C:\Database\NIST05a.L			
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	38
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
37	49.858	2.32	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	64
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	50
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	43
38	53.647	0.87	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	38
39	55.658	2.06	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	38
40	59.138	0.83	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	49
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,4-dimethyl-, cis-	17452	062238-30-6	38

Figura 140. Cromatograma de la muestra 1 de la condición de cinética 4.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190705-000001.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  5 Jul 2019  10:14     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C1
Misc Info  : Cinetica 5
Vial Number: 1
```

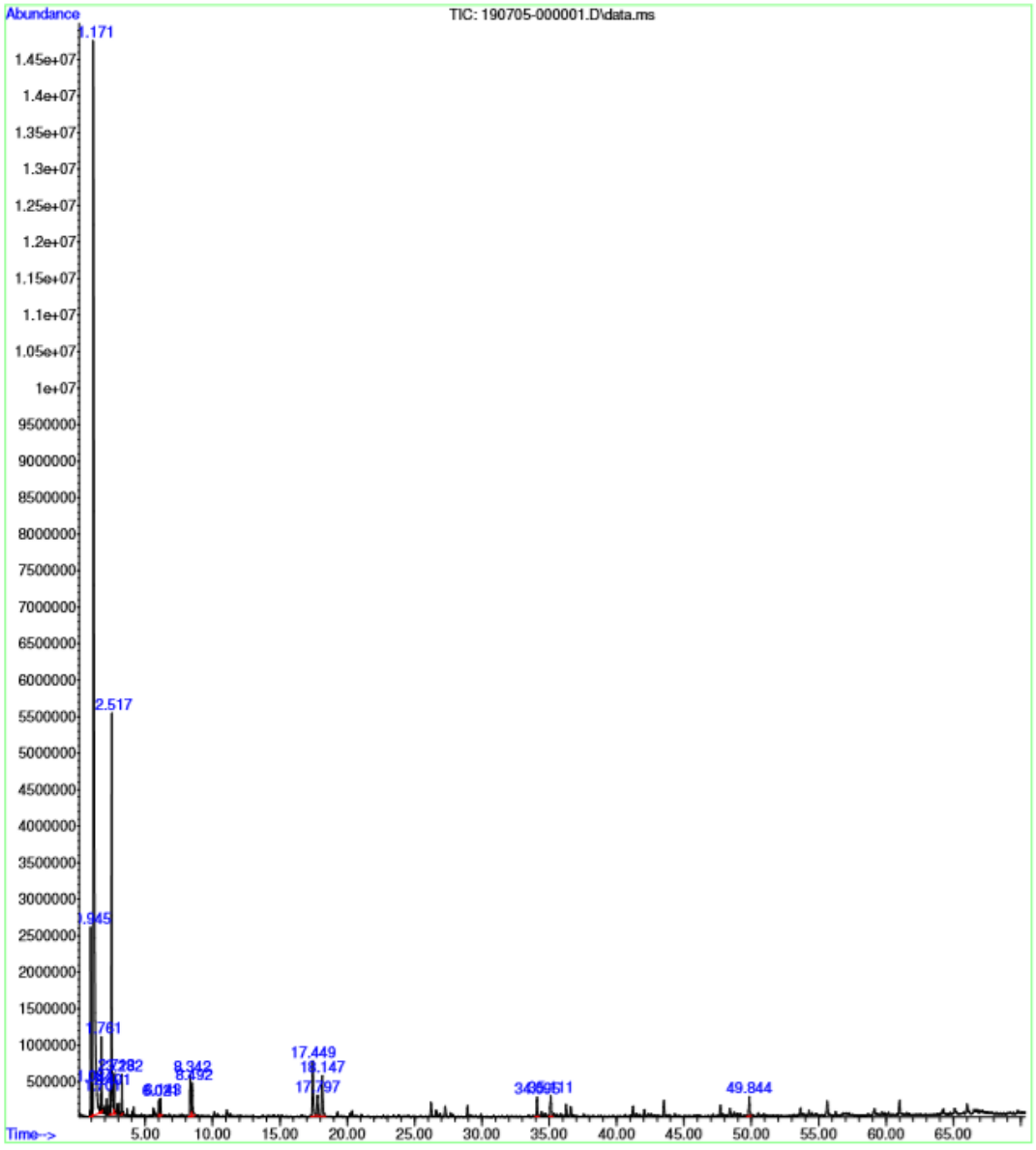


Figura 141. Reporte de cromatografía de la muestra 1 de la condición de cinética 4.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190705-000001.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 10:14
Operator : AdeM
Sample : C1
Misc : Cinetica 5
ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Decane, 3,3,5-trimethyl-	46158	062338-13-0	72
12	8.343	2.12	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Pentene, 2-methyl-	1448	000625-27-4	30
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	30
13	8.493	1.97	C:\Database\NIST05a.L			
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
14	17.449	3.91	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	35
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	35
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
15	17.795	1.74	C:\Database\NIST05a.L			
			2,3-Dimethyl-3-heptene, (Z)-	11220	059643-73-1	47
			4-Decene, 3-methyl-, (E)-	25944	062338-47-0	35
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
16	18.145	3.12	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
17	34.093	1.29	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
18	35.112	1.59	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	35
19	49.845	1.37	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	47

Figura 142. Cromatograma de la muestra 2 de la condición de cinética 4.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190705-000002.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  5 Jul 2019  11:32     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C2
Misc Info  : Cinetica 5
Vial Number: 2
```

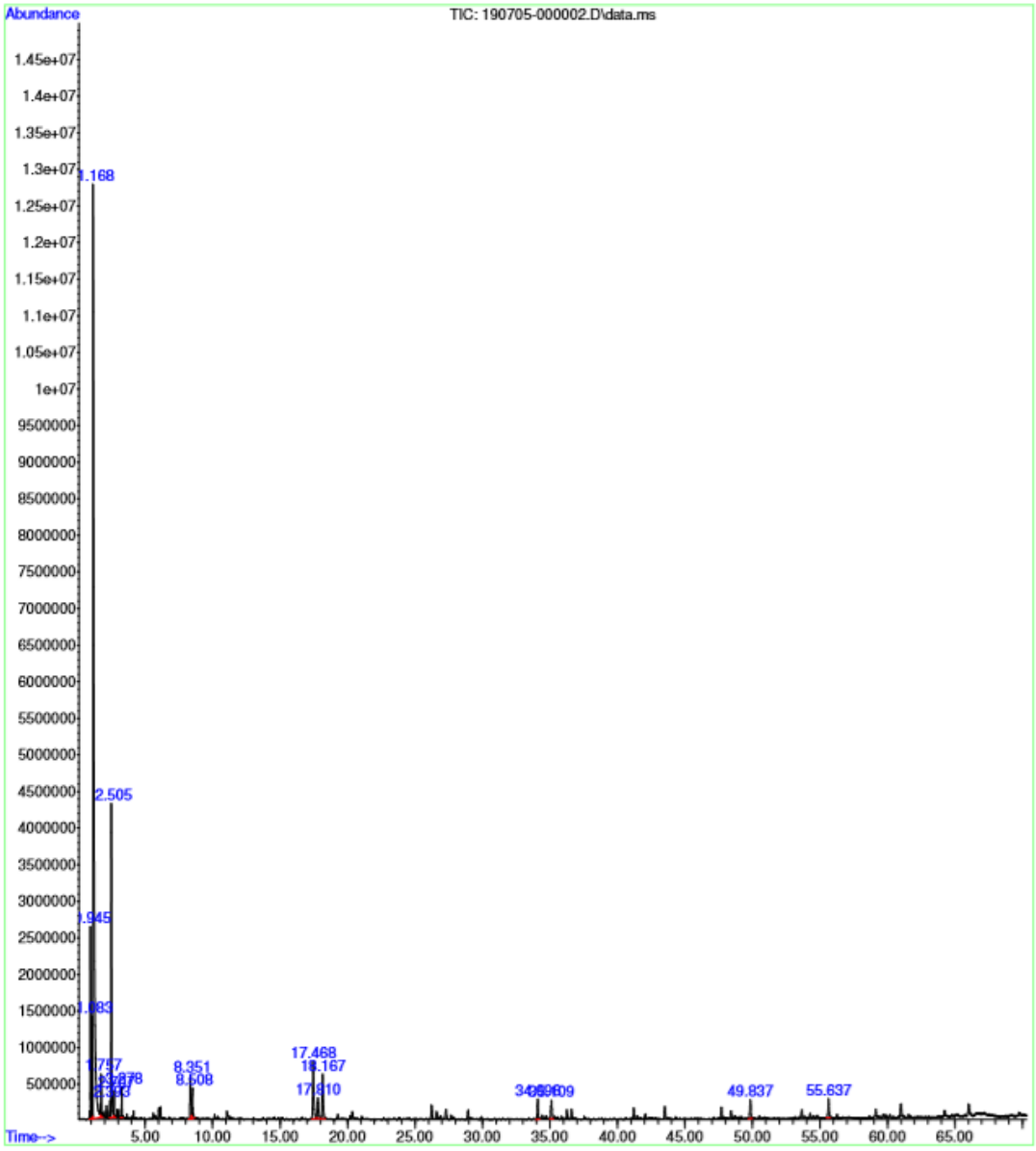


Figura 143. Reporte de cromatografía de la muestra 2 de la condición de cinética 4.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190705-000002.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 11:32
Operator : AdeM
Sample : C2
Misc : Cinetica 5
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	3.06	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	64
2	1.084	1.27	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	87
3	1.170	63.20	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	90
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	53
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	50
4	1.757	0.91	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	87
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	87
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	81
5	2.394	0.40	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	93
6	2.503	9.62	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	91
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	90
			1-Heptene, 5-methyl-	6498	013151-04-7	50
7	2.707	0.71	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
8	3.276	0.79	C:\Database\NIST05a.L			
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	40
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38
			3-Penten-2-one	1370	000625-33-2	38
9	8.352	2.42	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	35
10	8.507	1.97	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6548	003404-78-2	38
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
11	17.468	4.48	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	35

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Mon Jul 08 09:18:59 2019 Page: 1

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190705-000002.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 11:32
Operator : AdeM
Sample : C2
Misc : Cinetica 5
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

k#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	17.809	1.85	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	30
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	27
13	18.168	3.52	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	43
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	43
14	34.098	1.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
15	35.107	1.54	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	35
16	49.836	1.49	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	47
17	55.635	1.42	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Hepten-4-one, 6-hydroxy-2-methyl -6-(4-methyl-3-cyclohexen-1-yl)-	82514	038043-98-0	56
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			8-(2-Nitrophenoxy)octan-1-ol	103198	167685-26-9	38

Figura 144. Cromatograma de la muestra 3 de la condición de cinética 4.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190705-000003.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  5 Jul 2019  12:49     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C3
Misc Info  : Cinetica 5
Vial Number: 3
```

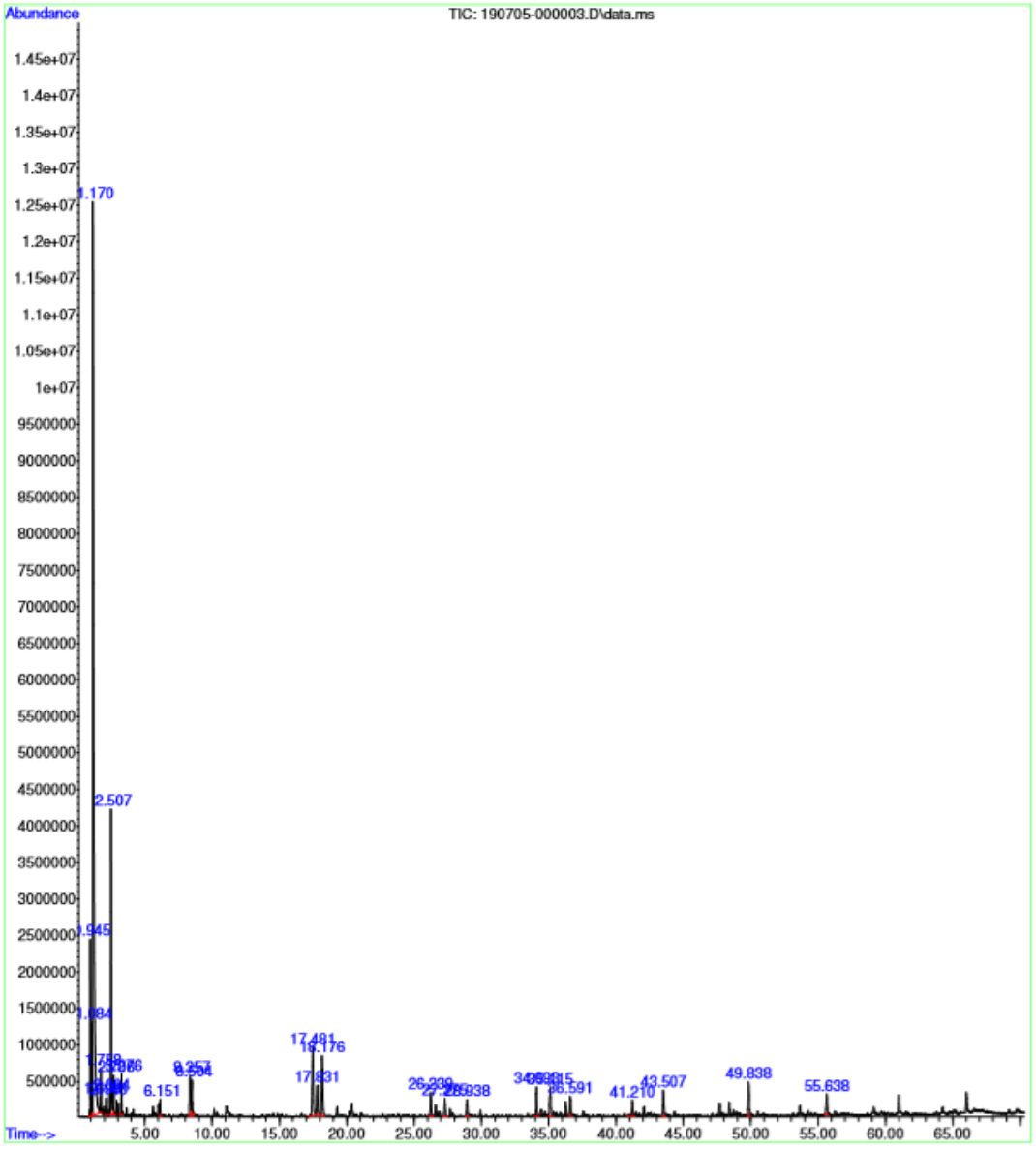


Figura 145. Reporte de la muestra 3 de la condición de cinética 4.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190705-000003.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 12:49
Operator : AdeM
Sample : C3
Misc : Cinetica 5
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	8.357	1.97	C:\Database\NIST05a.L			
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
			3-Ethyl-4-methyl-2-pentene	6562	019780-68-8	25
13	8.502	2.02	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	41
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	27
14	17.481	5.00	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
15	17.831	2.17	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
16	18.177	4.25	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	38
			Cyanamide, dibutyl-	26626	002050-54-6	35
17	26.237	1.50	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1,1'-(1,2-dimethyl-1,2-ethanediyl)bis-	73084	074663-71-1	47
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
18	27.274	1.13	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
			Cyclooctane, (1-methylpropyl)-	35058	016538-89-9	35
19	28.939	1.12	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
20	34.093	1.81	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
21	35.116	2.22	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
22	36.590	1.17	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-,	17447	050876-32-9	43

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190705-000003.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 12:49
Operator : AdeM
Sample : C3
Misc : Cinetica 5
ALS Vial : 3 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			cis-			
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	38
23	41.212	1.06	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	38
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl met hyl	25685	017983-26-5	38
24	43.509	1.55	C:\Database\NIST05a.L			
			n-Nonenylsuccinic anhydride	74169	028928-97-4	64
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
25	49.840	1.93	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	59
			Cyclopentane, 1-butyl-2-ethyl-	25966	072993-32-9	43
26	55.640	1.47	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	58
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohe xane	35080	219783-06-9	47

Figura 146. Cromatograma de la muestra 4 de la condición de cinética 4.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190705-000004.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  5 Jul 2019  14:06     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C4
Misc Info  : Cinetica 5
Vial Number: 4
```

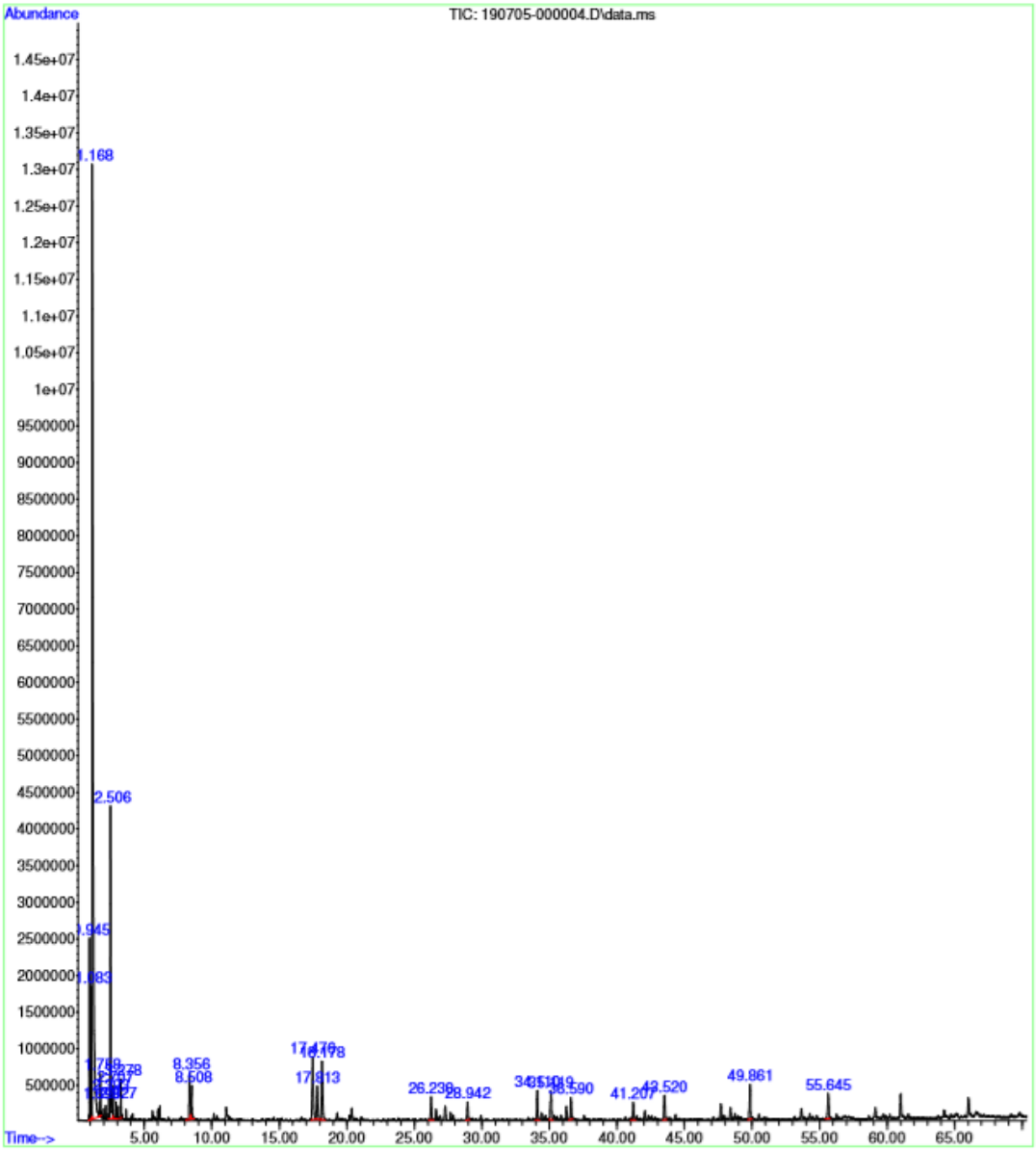


Figura 147. Reporte de cromatografía de la muestra 4 de la condición de cinética 4

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190705-000004.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 14:06
Operator : AdeM
Sample : C4
Misc : Cinetica 5
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	3.12	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	87
2	1.084	1.51	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.170	53.32	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	90
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	53
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	50
4	1.698	0.20	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Hexene, 3,4-dimethyl-	6526	030951-95-2	64
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	55
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	49
5	1.757	0.57	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	87
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	81
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7444	000584-94-1	81
6	2.394	0.48	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	95
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	91
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11236	001839-63-0	80
7	2.507	8.36	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	96
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			Cyclopentane, 1,2,3-trimethyl-, (1 .alpha.,2.alpha.,3.alpha.)-	6657	002613-69-6	59
8	2.707	0.76	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
9	2.926	0.39	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	81
			2,4-Heptadiene, 2,4-dimethyl-	10355	074421-05-9	72
10	3.276	0.85	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethy 1-	17442	1000152-79-7	47
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	43
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38
11	8.357	2.27	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	35

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190705-000004.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 14:06
Operator : AdeM
Sample : C4
Misc : Cinetica 5
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	30
12	8.507	1.79	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6547	003404-78-2	38
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6548	003404-78-2	38
13	17.477	4.67	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	38
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	35
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	35
14	17.813	2.42	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	30
15	18.177	4.08	C:\Database\NIST05a.L			
			4-Decene, 3-methyl-, (E)-	25944	062338-47-0	43
			3-Ethyl-6-heptafluorobutyryloxyoctane	154207	1000215-97-4	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	38
16	26.228	1.48	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	43
			1-Undecene, 8-methyl-	34980	074630-40-3	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
17	28.939	1.23	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
18	34.111	1.93	C:\Database\NIST05a.L			
			Bacchotricuneatin c	148777	066563-30-2	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
19	35.121	2.13	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11233	002234-75-5	38
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
20	36.590	1.36	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
			Bicyclo[3.1.1]heptan-3-one, 2,6,6-trimethyl-, (1.alpha.,2.beta.,5.alpha.)-	24334	015358-88-0	40
21	41.207	1.11	C:\Database\NIST05a.L			
			Isotridecanol-	57271	027458-92-0	59

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190705-000004.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 14:06
Operator : AdeM
Sample : C4
Misc : Cinetica 5
ALS Vial : 4 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl met hyl	25685	017983-26-5	38
22	43.518	1.80	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	38
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	38
23	49.863	2.28	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	64
			(+-)-3-(2-Carboxy-trans-propenyl)- 2,2-dimethylcyclopropane-trans-1-c arboxylic acid,[1.alpha., 3.beta.(E)]-	55435	040253-03-0	53
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
24	55.645	1.87	C:\Database\NIST05a.L			
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47

Figura 148. Cromatograma de la muestra 5 de la condición de cinética 4.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190705-000005.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  5 Jul 2019  15:23     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C5
Misc Info  : Cinetica 5
Vial Number: 5
```

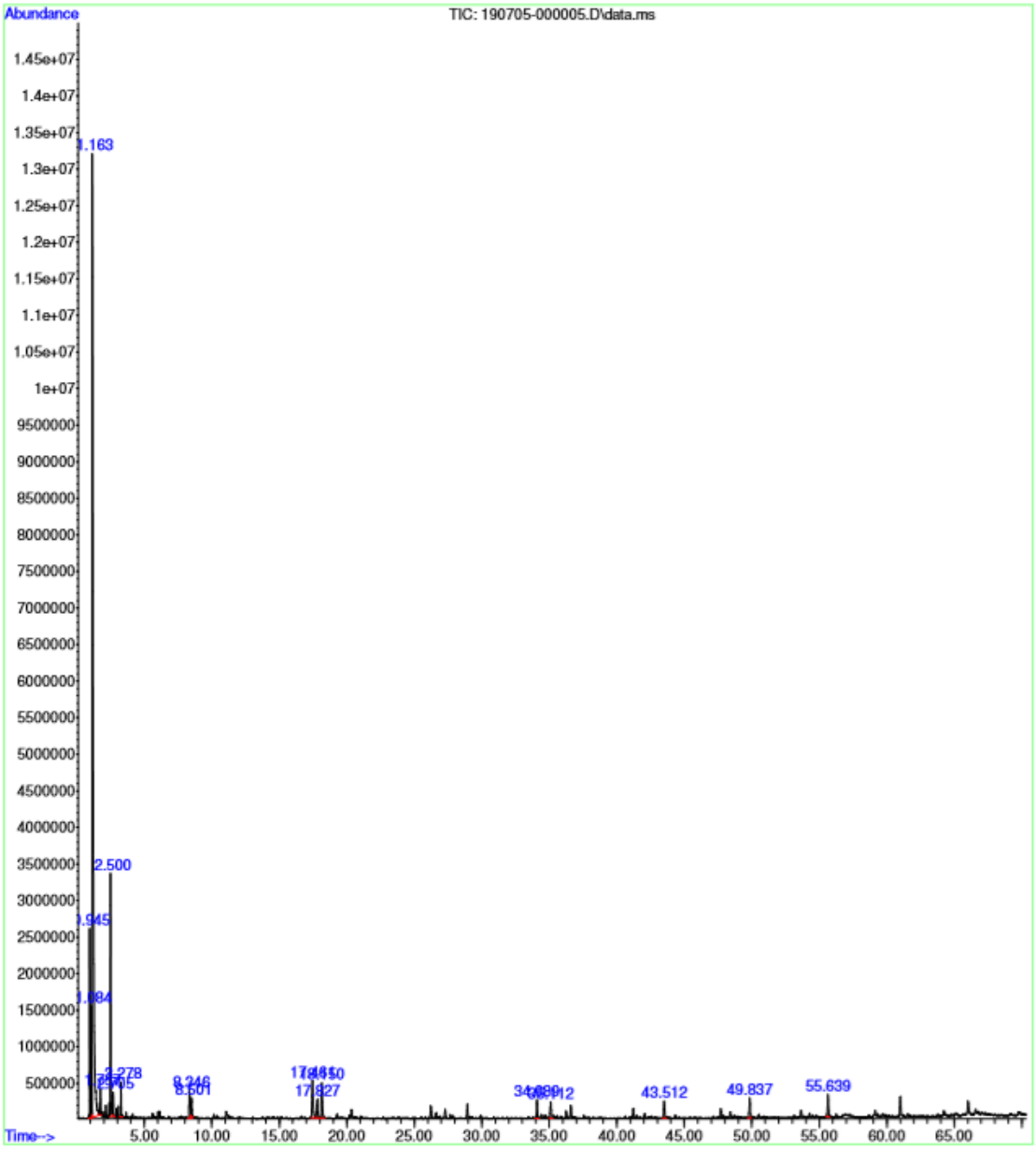


Figura 149. Reporte de cromatografía de la muestra 5 de la condición de cinética 4.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190705-000005.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 15:23
Operator : AdeM
Sample : C5
Misc : Cinetica 5
ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	3.86	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	86
2	1.084	1.59	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.161	67.29	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	90
			Methane, dichloronitro-	12675	007119-89-3	64
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	53
4	1.757	0.44	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7432	000589-53-7	87
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7444	000584-94-1	74
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	74
5	2.498	7.14	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	97
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	90
			Cyclopentane, 1,2,3-trimethyl-, (1 .alpha.,2.alpha.,3.alpha.)-	6657	002613-69-6	59
6	2.707	0.65	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	91
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	87
7	3.281	0.92	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	17442	1000152-79-7	49
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	47
			1H-Pyrazole, 4,5-dihydro-3-methyl-	1341	001911-30-4	43
8	8.348	1.63	C:\Database\NIST05a.L			
			6-Dodecene, (E)-	34971	007206-17-9	50
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	43
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	38
9	8.502	1.32	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	45
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6550	003404-78-2	38
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6547	003404-78-2	38
10	17.463	3.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
11	17.827	1.59	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	35

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Mon Jul 08 09:23:37 2019 Page: 1

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190705-000005.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 15:23
Operator : AdeM
Sample : C5
Misc : Cinetica 5
ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
12	18.150	2.95	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			4-Decene, 3-methyl-, (E)-	25944	062338-47-0	30
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	30
13	34.089	1.33	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Bacchotricuneatin c	148777	066563-30-2	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
14	35.112	1.28	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
15	43.513	1.37	C:\Database\NIST05a.L			
			Bicyclo[2.2.1]heptane-2,5-dione, 1,7,7-trimethyl-	33284	004230-32-4	59
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	58
			Cyclohexane, 3-ethyl-5-methyl-1-propyl-	35085	1000151-39-5	47
16	49.836	1.72	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	58
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	25975	061142-70-9	43
17	55.640	1.58	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17453	050876-31-8	43

Figura 150. Cromatograma de la muestra 6 de la condición de cinética 4.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190705-000006.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  5 Jul 2019  16:40     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C6
Misc Info  : Cinetica 5
Vial Number: 6
```

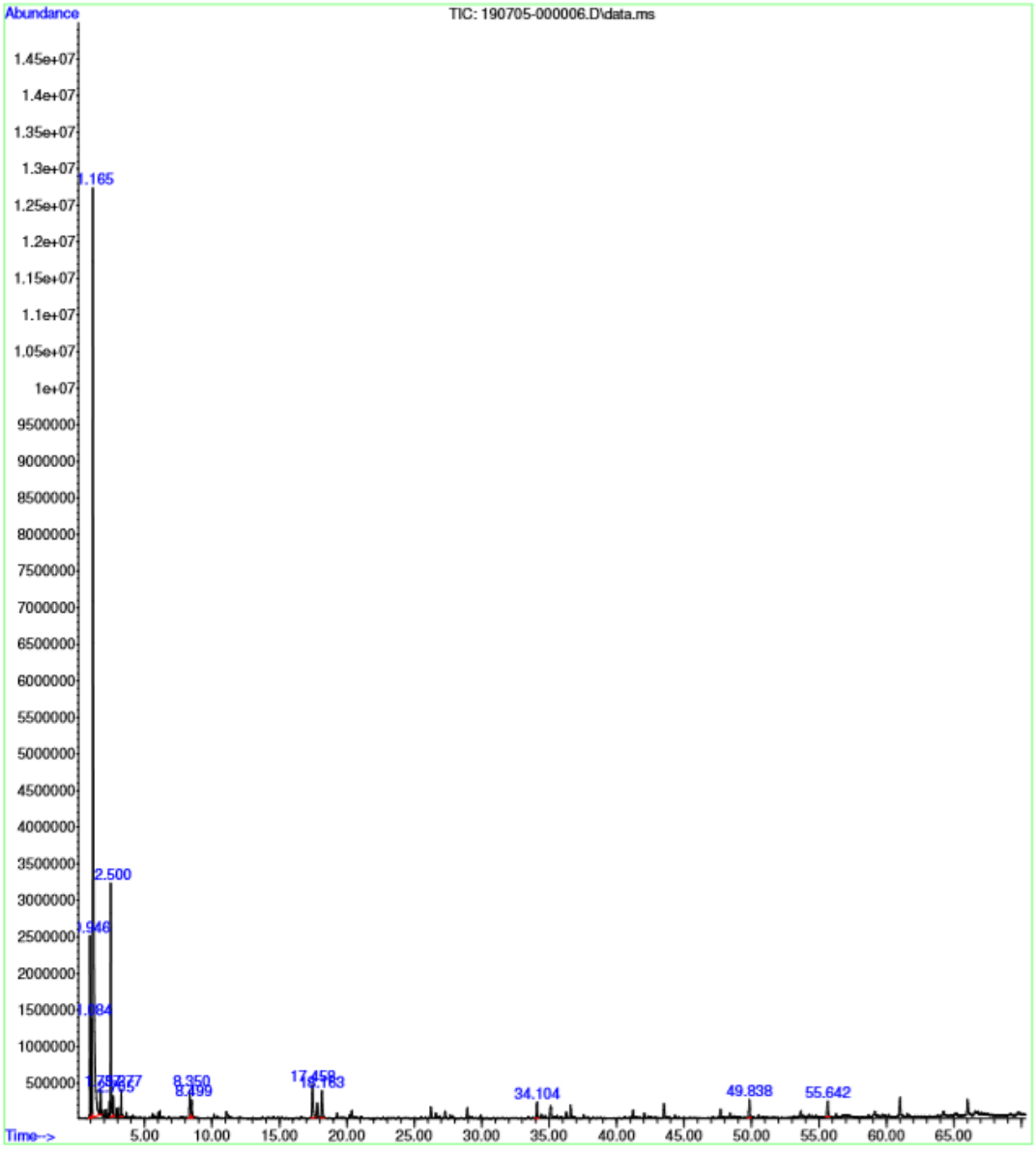


Figura 151. Reporte de cromatografía de la muestra 6 de la condición de cinética 4.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190705-000006.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 16:40
Operator : AdeM
Sample : C6
Misc : Cinetica 5
ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	4.15	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	83
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	64
2	1.083	1.67	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.165	71.97	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	90
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	53
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	50
4	1.757	0.46	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	87
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	87
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7444	000584-94-1	81
5	2.498	7.55	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	96
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	90
			1-Heptene, 5-methyl-	6498	013151-04-7	50
6	2.707	0.56	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	90
7	3.276	0.86	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	47
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38
			Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	17442	1000152-79-7	38
8	8.348	1.68	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	30
9	8.498	1.16	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
10	17.458	3.19	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
11	18.163	2.46	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	38

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Mon Jul 08 09:25:24 2019 Page: 1

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190705-000007.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 17:57
Operator : AdeM
Sample : C7
Misc : Cinetica 5
ALS Vial : 7 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	18.150	2.37	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloroacetic acid, 6-ethyl-3-oc	125632	1000282-57-4	47
			tyl ester			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38

Figura 152. Cromatograma de la muestra 7 de la condición de cinética 4.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190705-000007.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  5 Jul 2019  17:57     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C7
Misc Info  : Cinetica 5
Vial Number: 7
```

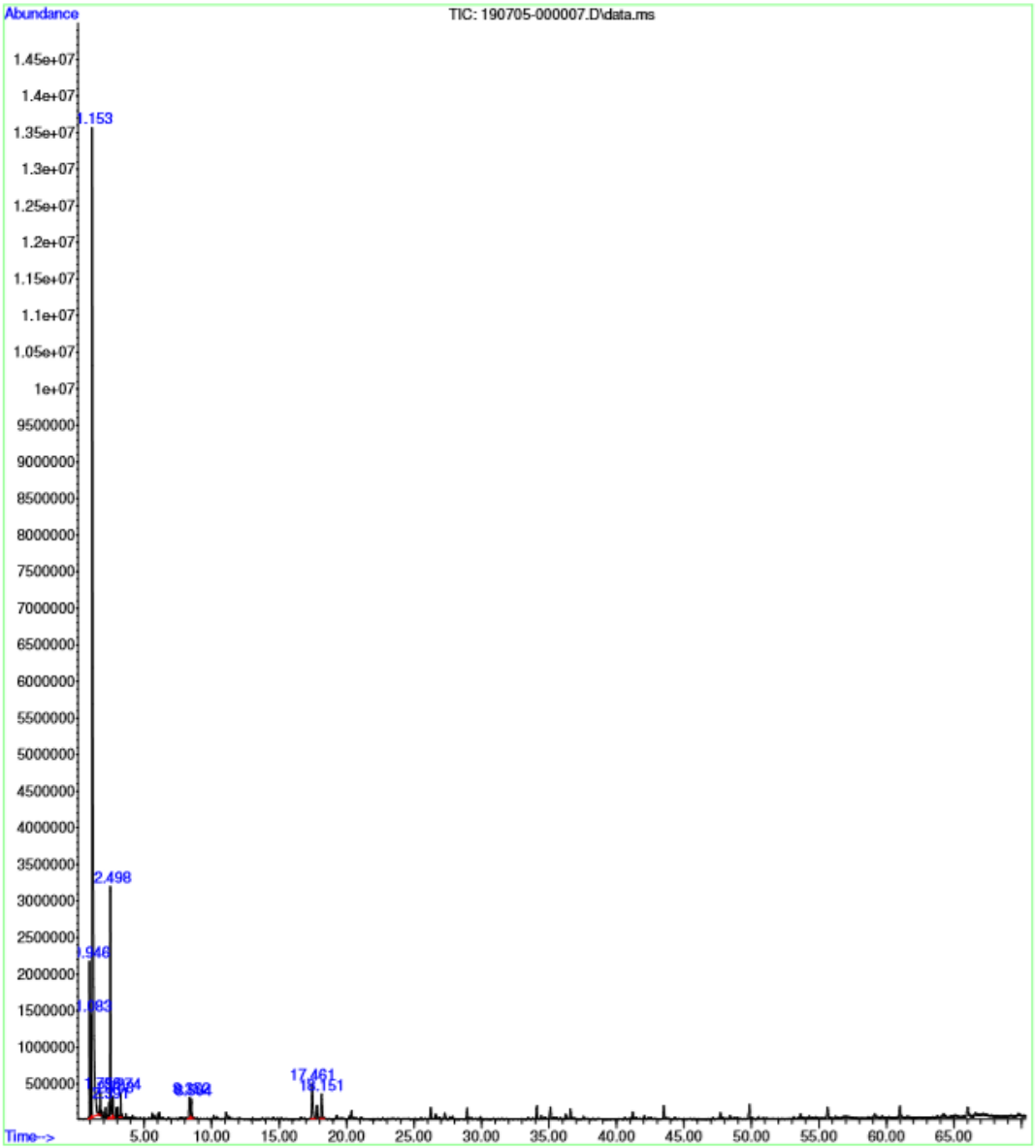


Figura 153. Reporte de cromatografía de la muestra 7 de la condición de cinética 4.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190705-000007.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 17:57
Operator : AdeM
Sample : C7
Misc : Cinetica 5
ALS Vial : 7 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	3.88	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	59
2	1.084	1.64	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.152	74.57	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	91
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	58
			Trichloromethane	8712	000067-66-3	53
4	1.757	0.59	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	87
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7444	000584-94-1	81
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	81
5	2.389	0.59	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11236	001839-63-0	91
6	2.498	8.36	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	96
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	90
			1-Heptene, 5-methyl-	6498	013151-04-7	50
7	2.703	0.79	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-, (1. alpha.,2.beta.,4.beta.)-	11276	007667-60-9	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
8	3.276	0.76	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	43
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	40
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17453	050876-31-8	40
9	8.352	1.62	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
			Cyanamide, dimethyl-	490	001467-79-4	35
			1-Butene, 3,3-dimethyl-	1480	000558-37-2	30
10	8.502	1.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	43
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
			Cyanamide, dimethyl-	490	001467-79-4	35
11	17.459	3.45	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190705-000006.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 16:40
Operator : AdeM
Sample : C6
Misc : Cinetica 5
ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	34.102	1.28	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 2-propyl-1,1,3-trimethyl-	35081	081983-70-2	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,3-dimethyl-, trans-	17459	062238-29-3	35
13	49.836	1.54	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	64
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17453	050876-31-8	43
			2-Methyl-Z-7,8-epoxyhexadecane	94910	1000130-86-3	38
14	55.644	1.48	C:\Database\NIST05a.L			
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47
			8-(2-Nitrophenoxy)octan-1-ol	103198	167685-26-9	38

Figura 154. Cromatograma de la muestra 1 de la condición de cinética 5.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190704-000008.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  4 Jul 2019  18:53     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: Ci1
Misc Info  : Cinetica 4
Vial Number: 8
```

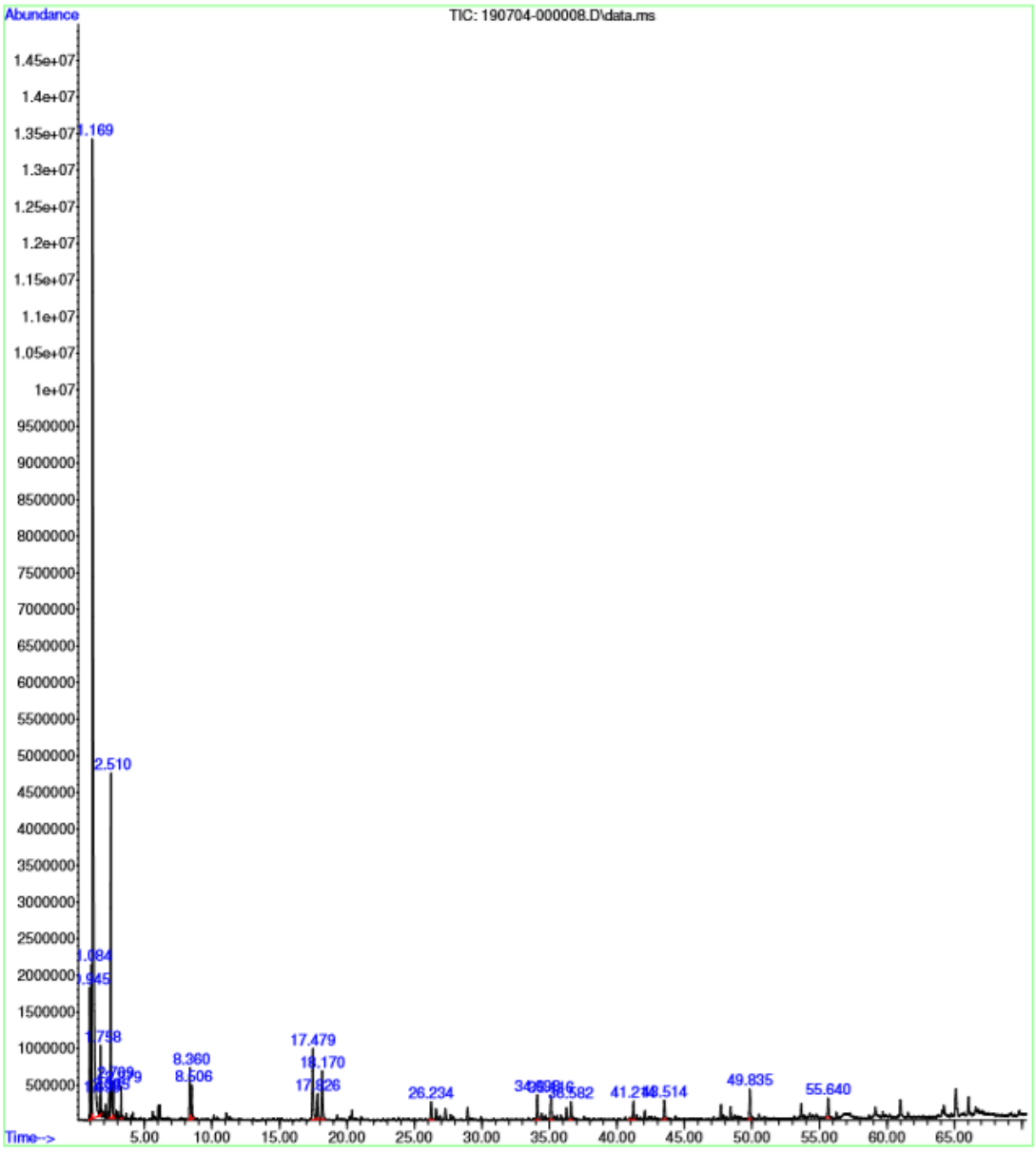


Figura 155. Reporte de cromatografía de la muestra 1 de la condición de cinética 5.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000008.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 18:53
Operator : AdeM
Sample : Ci1
Misc : Cinetica 4
ALS Vial : 8 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	2.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	64
2	1.083	1.83	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.170	56.80	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	90
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	53
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	50
4	1.698	0.35	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	87
			3-Hexene, 3,4-dimethyl-	6526	030951-95-2	64
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	55
5	1.757	0.93	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	94
			Heptane, 4-methyl-	7430	000589-53-7	91
			Heptane, 4-methyl-	7432	000589-53-7	91
6	2.393	0.51	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	83
7	2.512	10.07	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	96
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			Cyclopentane, 1,2,3-trimethyl-, (1 .alpha.,2.alpha.,3.alpha.)-	6657	002613-69-6	59
8	2.707	0.91	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11281	001795-26-2	91
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
9	3.280	0.79	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	50
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	40
			3-Penten-2-one	1370	000625-33-2	38
10	8.361	2.23	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
			3-Ethyl-4-methyl-2-pentene	6562	019780-68-8	35
			2-Hexene, 2,5-dimethyl-	6533	003404-78-2	30
11	8.507	1.85	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000008.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 18:53
Operator : AdeM
Sample : Ci1
Misc : Cinetica 4
ALS Vial : 8 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
12	17.477	4.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
13	17.827	1.85	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	30
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	30
14	18.168	3.42	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	38
			Cyanamide, dibutyl-	26626	002050-54-6	35
15	26.233	1.26	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	43
16	34.097	1.61	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Bacchotricuneatin c	148777	066563-30-2	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
17	35.116	1.81	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
18	36.581	1.12	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	38
			4-Octene, 2,3,6,7-tetramethyl-	35055	063830-66-0	38
19	41.216	1.17	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	38
			Ketone, 2,2-dimethylcyclohexyl methyl	25685	017983-26-5	38
20	43.513	1.38	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
			Cyclohexane, 1,1'-(1,2-dimethyl-1,2-ethanediyl)bis-	73084	074663-71-1	40
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17453	050876-31-8	38
21	49.836	1.92	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	59
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000008.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 18:53
Operator : AdeM
Sample : Ci1
Misc : Cinetica 4
ALS Vial : 8 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
22	55.640	1.50	C:\Database\NIST05a.L			
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohe xane	35080	219783-06-9	38

Figura 156. Cromatograma de la muestra 2 de la condición de cinética 5.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190704-000009.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  4 Jul 2019  20:10     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: Ci2
Misc Info  : Cinetica 4
Vial Number: 9
```

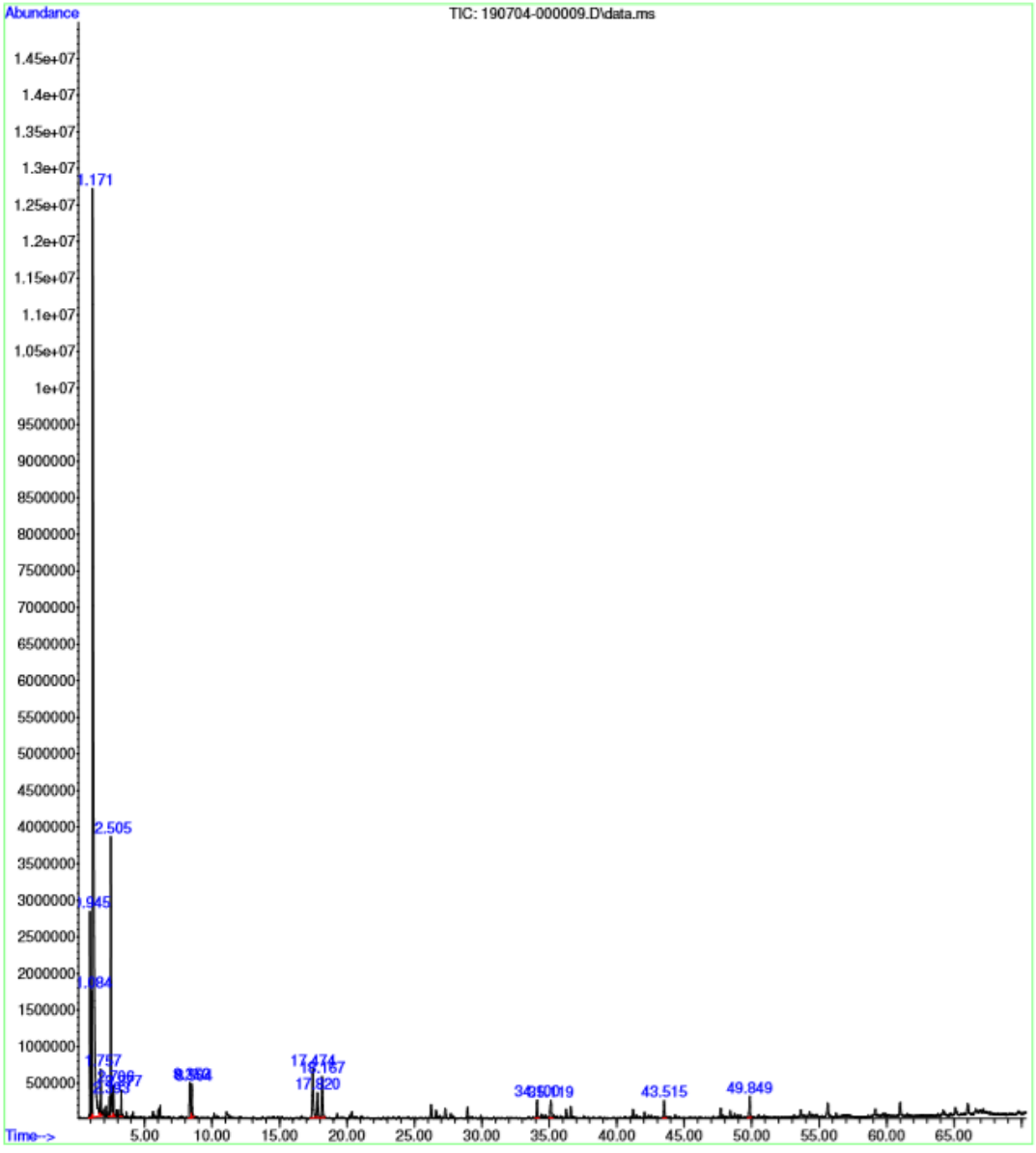
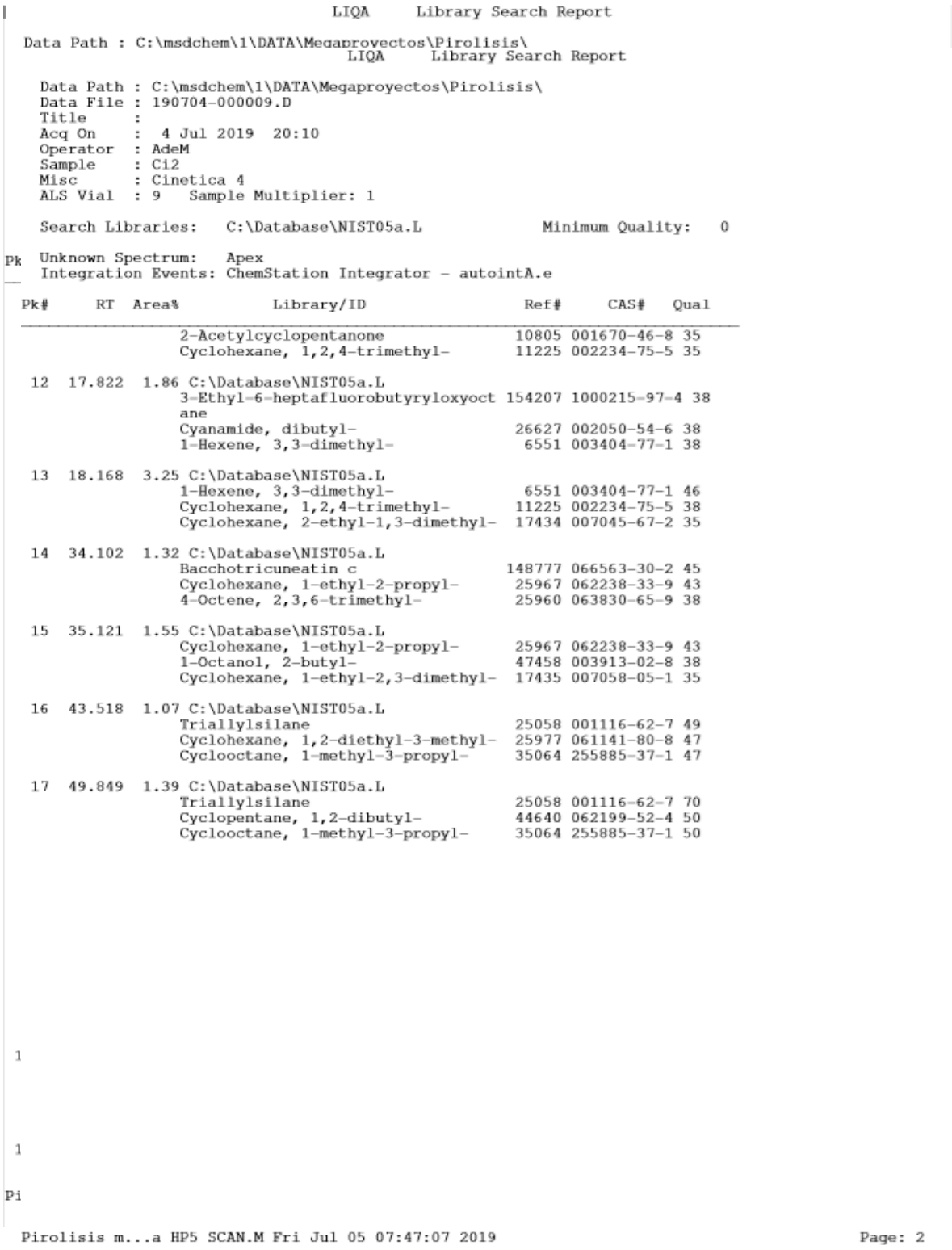


Figura 157. Reporte de cromatografía de la muestra 2 de la condición de cinética 5.



LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000009.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 20:10
Operator : AdeM
Sample : Ci2
Misc : Cinetica 4
ALS Vial : 9 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Pk Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
12	17.822	1.86	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Ethyl-6-heptafluorobutyryloxyoctane	154207	1000215-97-4	38
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
13	18.168	3.25	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
14	34.102	1.32	C:\Database\NIST05a.L			
			Bacchotricuneatin c	148777	066563-30-2	45
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	38
15	35.121	1.55	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			1-Octanol, 2-butyl-	47458	003913-02-8	38
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
16	43.518	1.07	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	47
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
17	49.849	1.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	70
			Cyclopentane, 1,2-dibutyl-	44640	062199-52-4	50
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50

1

1

Pi

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Fri Jul 05 07:47:07 2019 Page: 2

Figura 158. Cromatograma de la muestra 3 de la condición de cinética 5.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190704-000010.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  4 Jul 2019  21:27     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: Ci3
Misc Info  : Cinetica 4
Vial Number: 10
```

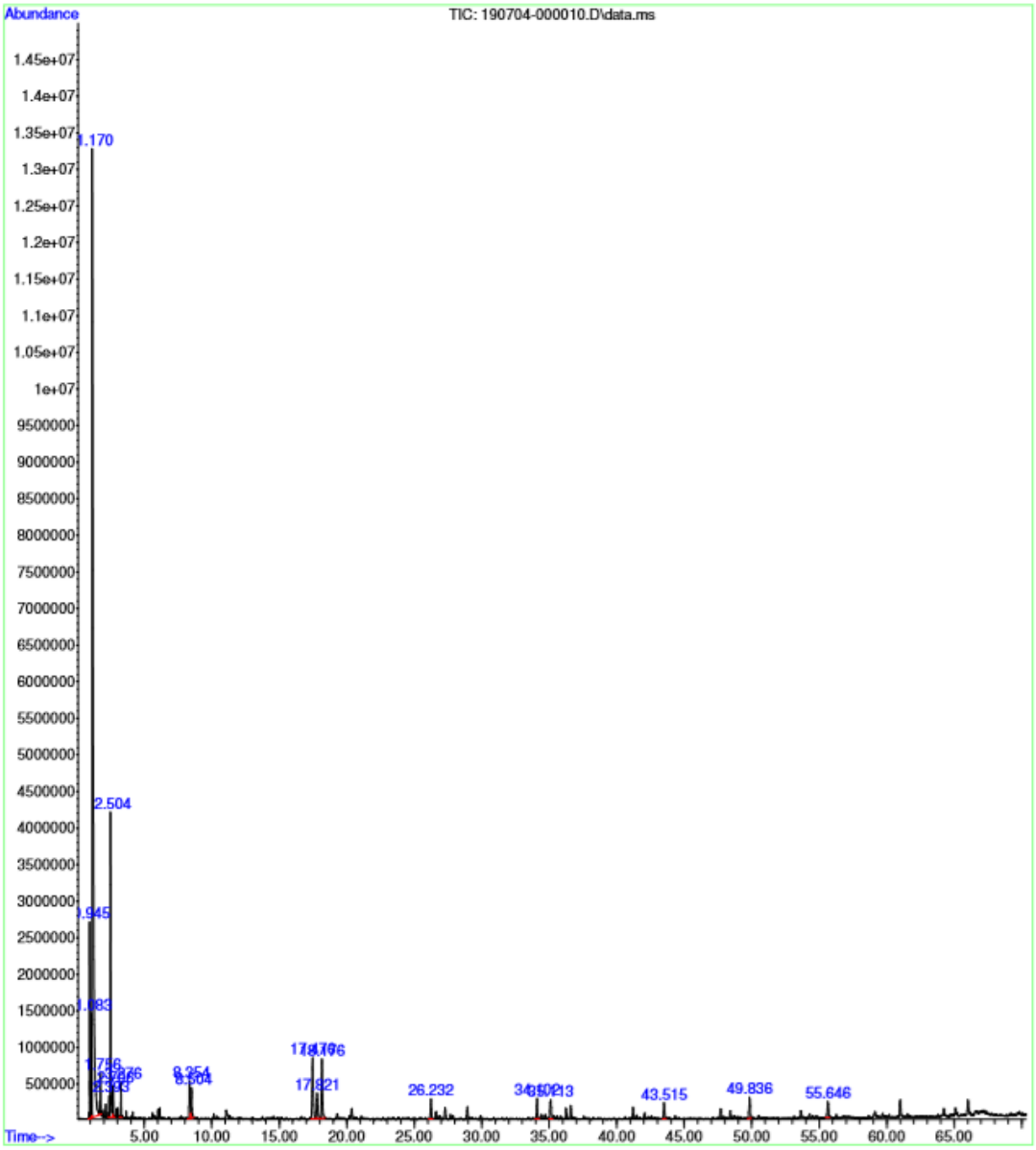
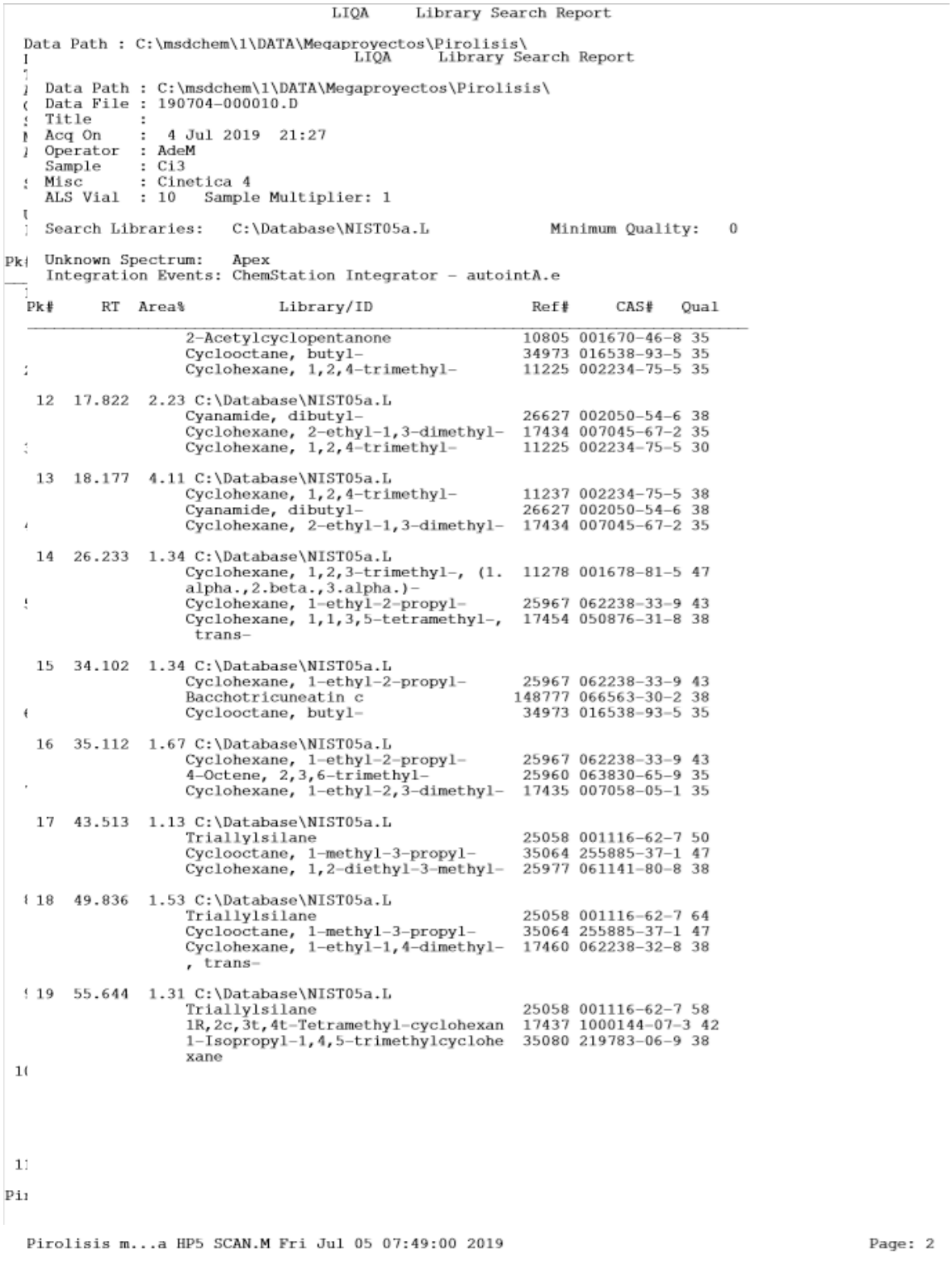


Figura 159. Reporte de cromatografía de la muestra 3 de la condición de cinética 5.



LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000010.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 21:27
Operator : AdeM
Sample : Ci3
Misc : Cinetica 4
ALS Vial : 10 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
12	17.822	2.23	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	30
13	18.177	4.11	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	38
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
14	26.233	1.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,3-trimethyl-, (1. alpha.,2.beta.,3.alpha.)-	11278	001678-81-5	47
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
15	34.102	1.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Bacchotricuneatin c	148777	066563-30-2	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
16	35.112	1.67	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
17	43.513	1.13	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	38
18	49.836	1.53	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	64
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
			Cyclohexane, 1-ethyl-1,4-dimethyl-, trans-	17460	062238-32-8	38
19	55.644	1.31	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	58
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	42
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	38

Figura 160. Cromatograma de la muestra 4 de la condición de cinética 5.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190704-000011.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  4 Jul 2019  22:44     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C14
Misc Info  : Cinetica 4
Vial Number: 11
```

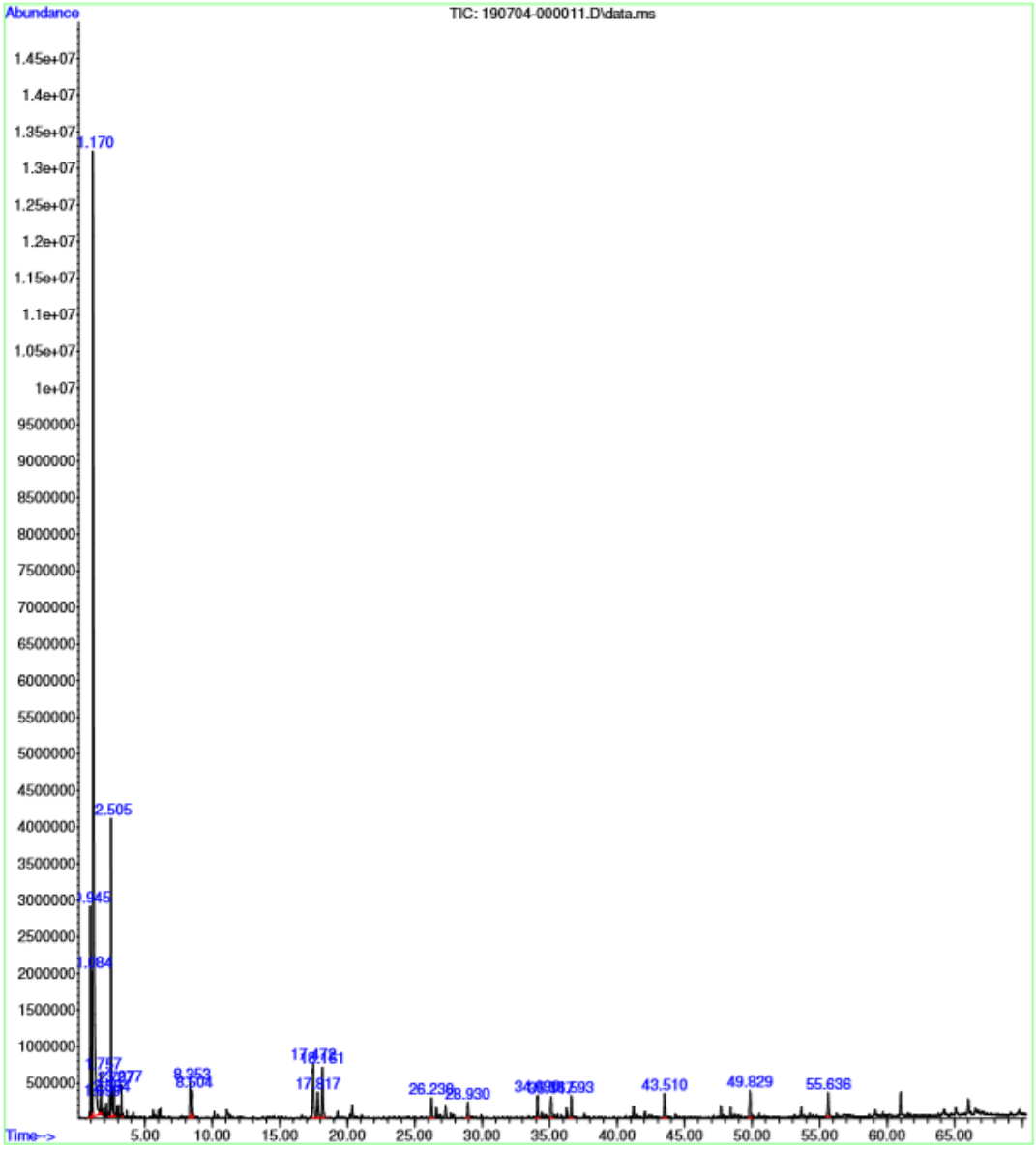


Figura 161. Reporte de cromatografía de la muestra 4 de la condición de cinética 5.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000011.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 22:44
Operator : AdeM
Sample : Ci4
Misc : Cinetica 4
ALS Vial : 11 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	3.73	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	83
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	49
2	1.083	1.80	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1462	000763-29-1	91
3	1.170	58.66	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	90
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	53
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	50
4	1.697	0.39	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Hexene, 3,4-dimethyl-	6526	030951-95-2	64
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	55
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	55
5	1.757	0.58	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7431	000589-53-7	87
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7444	000584-94-1	81
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	81
6	2.393	0.47	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	90
7	2.507	8.43	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	91
			Cyclopentane, 1,1,3,3-tetramethyl-	11258	050876-33-0	53
8	2.707	0.77	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	91
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	90
9	3.276	0.77	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	1484	000691-38-3	38
			3-Penten-2-one	1370	000625-33-2	38
			1.alpha.,2.beta.,3.alpha.,4.beta.-Tetramethylcyclopentane	11274	002532-67-4	37
10	8.352	1.85	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	43
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			cis-1-Butyl-2-methylcyclopropane	6621	038851-69-3	30
11	8.502	1.44	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	45
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Fri Jul 05 07:50:34 2019 Page: 1

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000011.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 22:44
Operator : AdeM
Sample : Ci4
Misc : Cinetica 4
ALS Vial : 11 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
12	17.472	4.17	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	35
13	17.818	1.95	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	27
14	18.159	3.37	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	41
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
			Cyanamide, dibutyl-	26626	002050-54-6	35
15	26.228	1.31	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	49
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	38
16	28.930	1.09	C:\Database\NIST05a.L			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
			3,7-Nonadien-2-one, 4,8-dimethyl-	33405	000817-88-9	40
17	34.088	1.49	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	38
18	35.116	1.73	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
19	36.595	1.26	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			n-Nonenylsuccinic anhydride	74169	028928-97-4	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	43
20	43.509	1.49	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1-one	24154	025183-82-8	64
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50
21	49.831	1.72	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	64
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	38

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000011.D
Title :
Acq On : 4 Jul 2019 22:44
Operator : AdeM
Sample : Ci4
Misc : Cinetica 4
ALS Vial : 11 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
22	55.635	1.51	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47

Figura 162. Cromatograma de la muestra 5 de la condición de cinética 5.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190704-000012.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  5 Jul 2019  00:02     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: Ci5
Misc Info  : Cinetica 4
Vial Number: 12
```

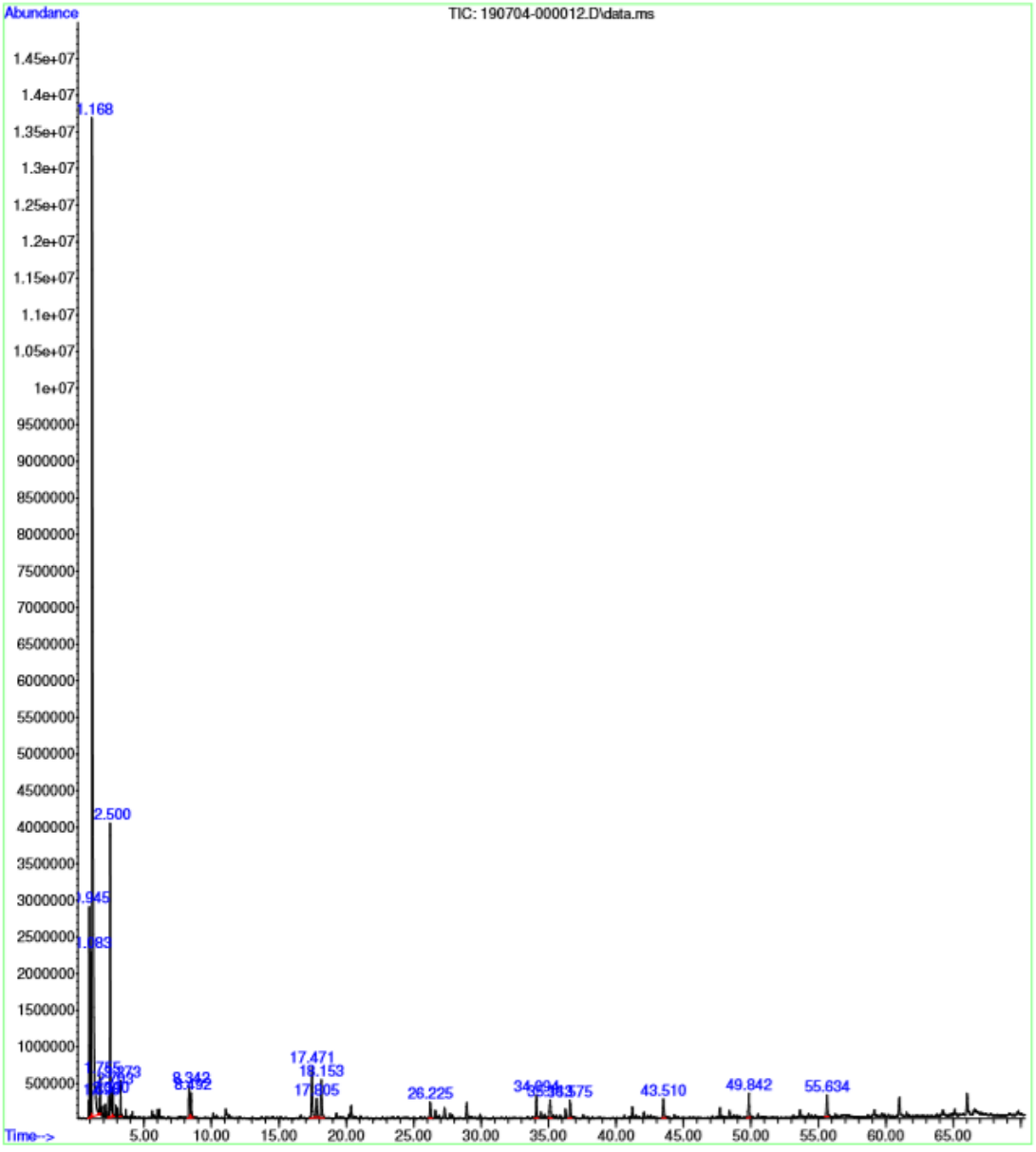


Figura 163. Reporte de cromatografía de la muestra 5 de la condición de cinética 5.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000012.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 00:02
Operator : AdeM
Sample : Ci5
Misc : Cinetica 4
ALS Vial : 12 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.947	4.03	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	87
2	1.084	2.03	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.165	60.83	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	90
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	50
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	50
4	1.698	0.33	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Hexene, 3,4-dimethyl-	6526	030951-95-2	64
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	55
			2-Hexene, 2,3-dimethyl-	6540	007145-20-2	35
5	1.757	0.53	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	87
			Heptane, 4-methyl-	7432	000589-53-7	83
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	81
6	2.389	0.52	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11283	001795-27-3	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	80
7	2.503	8.46	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	96
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	90
			1-Heptene, 5-methyl-	6498	013151-04-7	50
8	2.703	0.74	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	90
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	90
9	3.271	0.86	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	43
			3-Penten-2-one	1370	000625-33-2	43
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	40
10	8.343	1.83	C:\Database\NIST05a.L			
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	38
			Cyanamide, dimethyl-	490	001467-79-4	35
11	8.493	1.38	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	46
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000012.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 00:02
Operator : AdeM
Sample : Ci5
Misc : Cinetica 4
ALS Vial : 12 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	17.472	3.84	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	35
13	17.804	1.63	C:\Database\NIST05a.L			
			2,3-Dimethyl-3-heptene, (Z)-	11220	059643-73-1	43
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	35
14	18.155	2.87	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	38
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	30
15	26.224	1.16	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	47
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
16	34.093	1.46	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
17	35.112	1.54	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	30
18	36.577	1.29	C:\Database\NIST05a.L			
			n-Nonenylsuccinic anhydride	74169	028928-97-4	50
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	77416	006750-34-1	47
19	43.509	1.43	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1-one	24154	025183-82-8	64
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			8-(2-Nitrophenoxy)octan-1-ol	103198	167685-26-9	47
20	49.840	1.63	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	64
			2-Isopropenyl-5-methylhex-4-enal	24118	075697-98-2	50
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
21	55.635	1.61	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Hepten-4-one, 6-hydroxy-2-methyl-6-(4-methyl-3-cyclohexen-1-yl)-	82514	038043-98-0	56
			1R,2c,3t,4t-Tetramethyl-cyclohexan	17437	1000144-07-3	53
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	49

Figura 164. Cromatograma de la muestra 6 de la condición de cinética 5.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190704-000013.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  5 Jul 2019    1:19      using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: C16
Misc Info  : Cinetica 4
Vial Number: 13
```

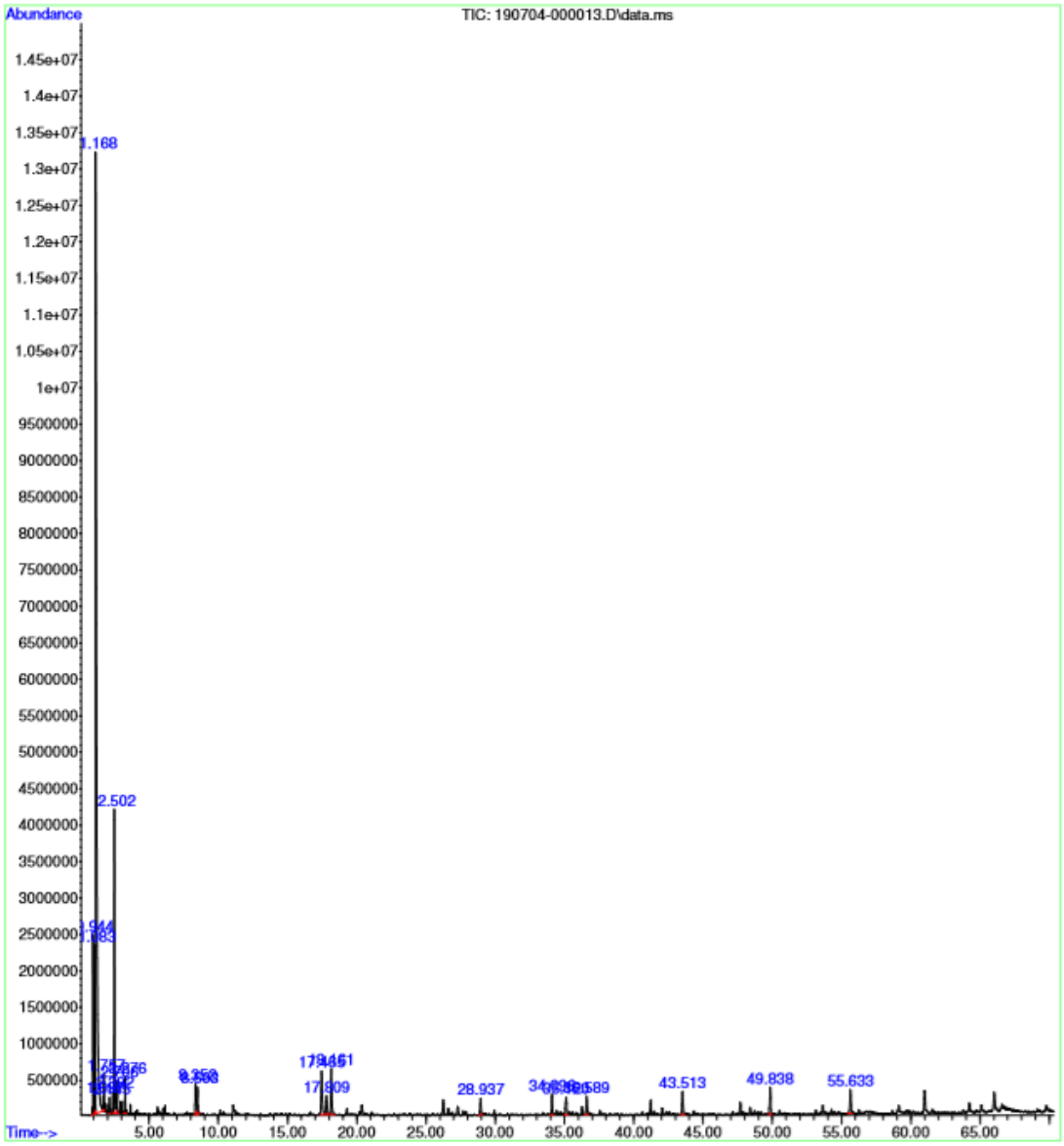
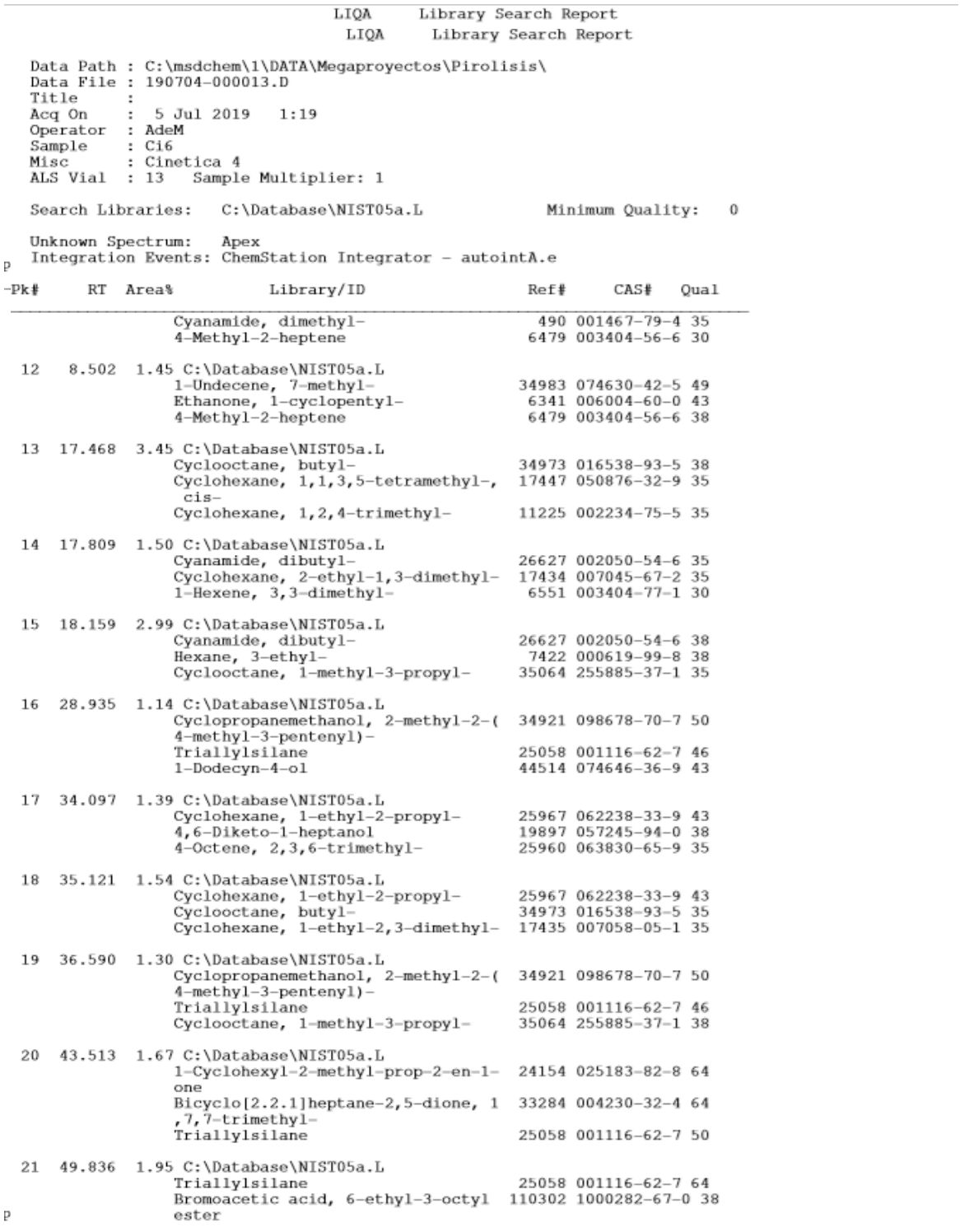


Figura 165. Reporte de cromatografía de la muestra 6 de la condición de cinética 5.



LIQA Library Search Report

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000013.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 1:19
Operator : AdeM
Sample : Ci6
Misc : Cinetica 4
ALS Vial : 13 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e
p

-Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyanamide, dimethyl-	490	001467-79-4	35
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	30
12	8.502	1.45	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Undecene, 7-methyl-	34983	074630-42-5	49
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
13	17.468	3.45	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	38
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	35
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	35
14	17.809	1.50	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	35
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	30
15	18.159	2.99	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Hexane, 3-ethyl-	7422	000619-99-8	38
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	35
16	28.935	1.14	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
17	34.097	1.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			4,6-Diketo-1-heptanol	19897	057245-94-0	38
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
18	35.121	1.54	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
19	36.590	1.30	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	38
20	43.513	1.67	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1-one	24154	025183-82-8	64
			Bicyclo[2.2.1]heptane-2,5-dione, 1,7,7-trimethyl-	33284	004230-32-4	64
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
21	49.836	1.95	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	64
			Bromoacetic acid, 6-ethyl-3-octyl ester	110302	1000282-67-0	38

p

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Fri Jul 05 07:53:18 2019 Page: 2

Figura 166. Cromatograma de la muestra 7 de la condición de cinética 5.

```
File       :C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\190704-000014.D
Operator   : AdeM
Acquired   :  5 Jul 2019   2:36     using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
Instrument :   GC-MSD
Sample Name: Ci7
Misc Info  : Cinetica 4
Vial Number: 14
```

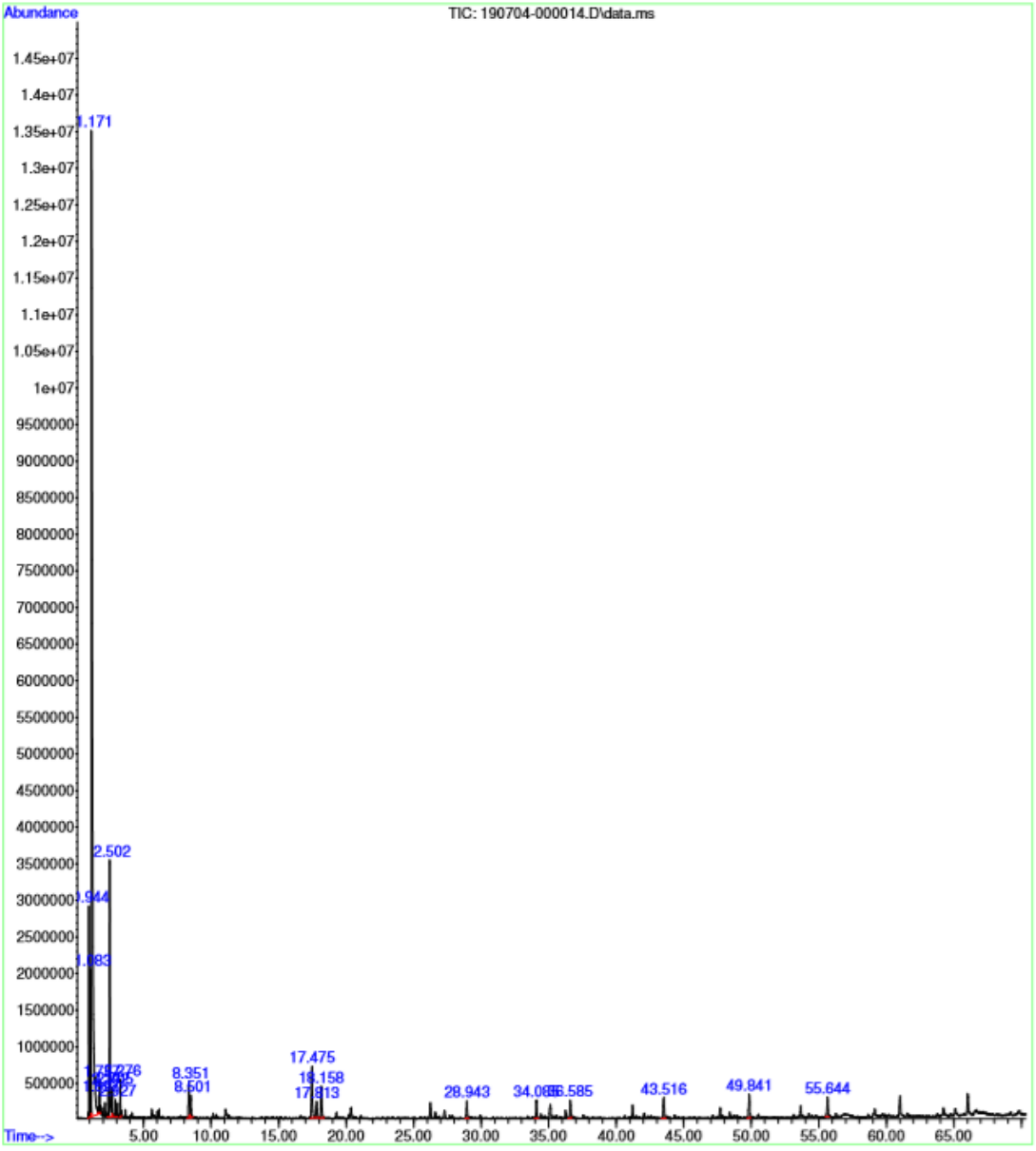


Figura 167. Reporte de cromatografía de la muestra 7 de la condición de cinética 5.

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000014.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 2:36
Operator : AdeM
Sample : Ci7
Misc : Cinetica 4
ALS Vial : 14 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	0.942	3.83	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	64
2	1.083	1.93	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Pentene, 2-methyl-	1461	000763-29-1	94
			1-Pentene, 2-methyl-	1452	000763-29-1	94
			Cyclohexane	1433	000110-82-7	91
3	1.170	63.13	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	90
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	53
			Methane, oxybis[dichloro-	44703	020524-86-1	50
4	1.698	0.42	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Hexene, 3,4-dimethyl-	6526	030951-95-2	64
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	55
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	46
5	1.757	0.50	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 4-methyl-	7427	000589-53-7	87
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7436	000584-94-1	81
			Hexane, 2,3-dimethyl-	7444	000584-94-1	81
6	2.393	0.79	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	93
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11236	001839-63-0	90
7	2.503	7.98	C:\Database\NIST05a.L			
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	95
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	91
			1-Heptene, 5-methyl-	6498	013151-04-7	50
8	2.703	0.77	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11279	001795-26-2	94
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11240	001839-63-0	90
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11281	001795-26-2	90
9	2.926	0.46	C:\Database\NIST05a.L			
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	87
			2,4-Heptadiene, 2,6-dimethyl-	10358	004634-87-1	87
			Cyclohexene, 3,5,5-trimethyl-	10364	000933-12-0	87
10	3.276	1.01	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	17442	1000152-79-7	47
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	43
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	38
11	8.352	1.87	C:\Database\NIST05a.L			
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	38
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	30
			Cyclooctane	6448	000292-64-8	25

Pirolisis m...a HP5 SCAN.M Fri Jul 05 07:55:07 2019 Page: 1

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Megaproyectos\Pirolisis\
Data File : 190704-000014.D
Title :
Acq On : 5 Jul 2019 2:36
Operator : AdeM
Sample : Ci7
Misc : Cinetica 4
ALS Vial : 14 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - autointA.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
12	8.502	1.39	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	43
			4-Methyl-2-heptene	6479	003404-56-6	41
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
13	17.477	3.49	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
14	17.813	1.27	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	43
			2-Acetylcyclopentanone	10805	001670-46-8	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
15	18.159	2.55	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	38
16	28.944	1.12	C:\Database\NIST05a.L			
			(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	27143	013702-56-2	50
			Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	34921	098678-70-7	47
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
17	34.084	1.35	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			4-Octene, 2,3,6-trimethyl-	25960	063830-65-9	35
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
18	36.586	1.20	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	46
			1-Dodecyn-4-ol	44514	074646-36-9	43
			3-Heptene, 2,2,3,5,6-pentamethyl-	35074	116164-06-8	38
19	43.518	1.56	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1-one	24154	025183-82-8	53
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	50
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	50
20	49.840	1.82	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	64
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
21	55.644	1.54	C:\Database\NIST05a.L			
			Triallylsilane	25058	001116-62-7	52
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	47
			1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	35080	219783-06-9	47

2. Mediciones en producto líquido

Realizadas a partir de la primera muestra de líquido que salía del condensador hasta la última que indicaba la finalización de la reacción. Las áreas y tiempos de retención del compuesto 2,4-dimetil-1-hepteno fueron extraídas de los resultados de los cromatograma del inciso anterior.

Cuadro 92. Mediciones experimentales en muestras líquidas de la reacción de pirólisis de la cinética.

Muestra No.	Tiempo (min)	Masa de la muestra (±0.0002g)	Temperatura (°C)	Área del pico de 2,4-dimetil-1-hepteno	Tiempo de retención
1	63	2.9911	416	10.9680	2.5209
2	67	4.7522	416	8.1953	2.5436
3	73	3.3467	416	8.7617	2.5071
4	76	3.062	415	7.8407	2.4935
5	81	3.1415	415	8.9092	2.4981
6	85	4.6617	415	8.5099	2.5026
7	91	3.8010	415	8.9832	2.5165
8	95	6.0295	415	8.4579	2.5118

Cuadro 93. Mediciones experimentales en muestras líquidas de la reacción de pirólisis de la cinética.

Muestra No.	Tiempo (min)	Masa de la muestra (±0.0002g)	Temperatura (± 0.5 °C)	Área del pico de 2,4-dimetil-1-hepteno	Tiempo de retención
1	61	3.0742	430	22.4616	2.5210
2	65	5.2730	431	20.3879	2.5163
3	69	6.0459	431	18.5916	2.5162
4	73	5.8254	430	17.6699	2.5116
5	77	4.5001	430	17.3066	2.5072
6	81	5.0120	430	13.0465	2.5071
7	88	4.2929	430	14.3712	2.5118
8	91	1.7393	430	14.4618	2.5118

Cuadro 94. Mediciones experimentales en muestras líquidas de la reacción de pirólisis de la cinética 3.

Muestra No.	Tiempo (min)	Masa de la muestra (±0.0002g)	Temperatura (± 0.5 °C)	Área del pico de 2,4-dimetil-1-hepteno	Tiempo de retención
1	63	5.2413	439	11.8102	2.5253
2	65	5.0724	448	10.1284	2.5164
3	68	6.2102	450	10.4840	2.5209
4	71	4.4101	451	10.4731	2.5164
5	73	4.0390	451	11.4802	2.5164
6	77	4.1765	451	11.7374	2.5164
7	82	4.3067	451	10.4996	2.5254

Cuadro 95. Mediciones experimentales en muestras líquidas de la reacción de pirólisis de la cinética 4.

Muestra No.	Tiempo (min)	Masa de la muestra (±0.0002g)	Temperatura (± 0.5 °C)	Área del pico de 2,4-dimetil-1-hepteno	Tiempo de retención
1	58	3.2835	450	13.0542	2.5163
2	60	3.2342	455	9.6157	2.5027
3	63	5.5815	459	8.2676	2.5071
4	65	5.9737	460	8.3648	2.5073
5	68	6.6487	461	7.1372	2.4982
6	70	4.4733	461	7.5495	2.498
7	75	4.9724	461	8.3612	2.4982

Cuadro 96. Mediciones experimentales en muestras líquidas de la reacción de pirólisis de la cinética 5.

Muestra No.	Tiempo (min)	Masa de la muestra (±0.0002g)	Temperatura (± 0.5 °C)	Área del pico de 2,4-dimetil-1-hepteno	Tiempo de retención
1	55	5.1995	446	10.0739	2.5117
2	57	5.1833	459	8.6896	2.5027
3	59	6.3565	464	9.0633	2.5025
4	61	4.4276	469	8.4319	2.5071
5	63	4.6408	471	8.4623	2.5027
6	65	4.1108	474	8.7769	2.5026
7	69	4.8449	475	7.9763	2.5026

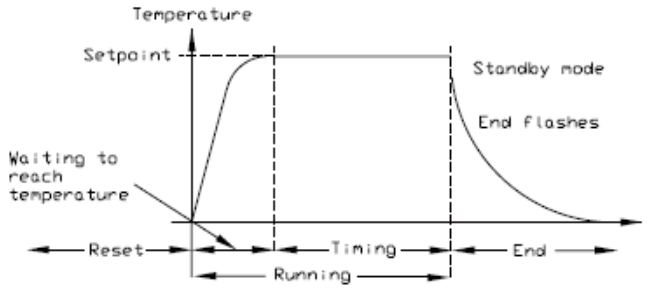
3. Modelado de las curvas de calentamiento

a. Curvas de calentamiento experimentales.

Todas las reacciones fueron realizadas utilizando el modo 1(opt. 1) de la mufla. Esta opción configura una rampa de calentamiento hasta alcanzar la temperatura programada y mantenerla constante.

Luego inicia un enfriamiento, que no fue realizado porque se apagaba antes el equipo. La Figura 168 muestra el comportamiento de la temperatura con el tiempo esperado según el modo seleccionado para la experimentación.

Figura 168. Funcionamiento del modo 1 en mufla utilizada para la experimentación.



Tomado de: (Thermo Fisher Scientific, 2010)

Figura 169. Incremento de la temperatura con el tiempo para la cinética 1.

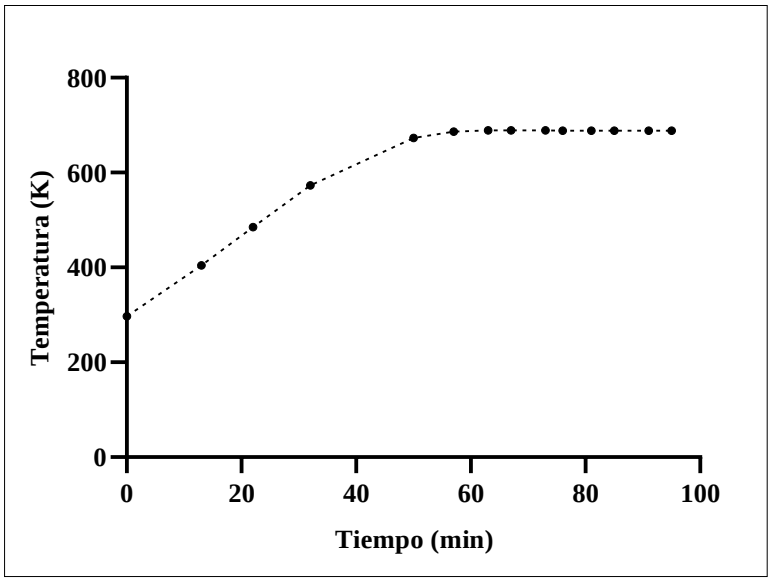


Figura 170. Incremento de la temperatura con el tiempo para la cinética 2.

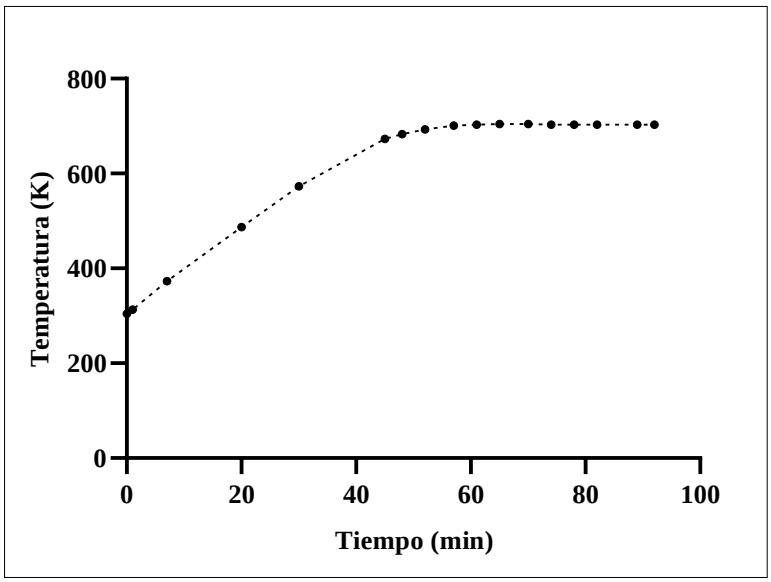


Figura 171. Incremento de la temperatura con el tiempo para la cinética 3.

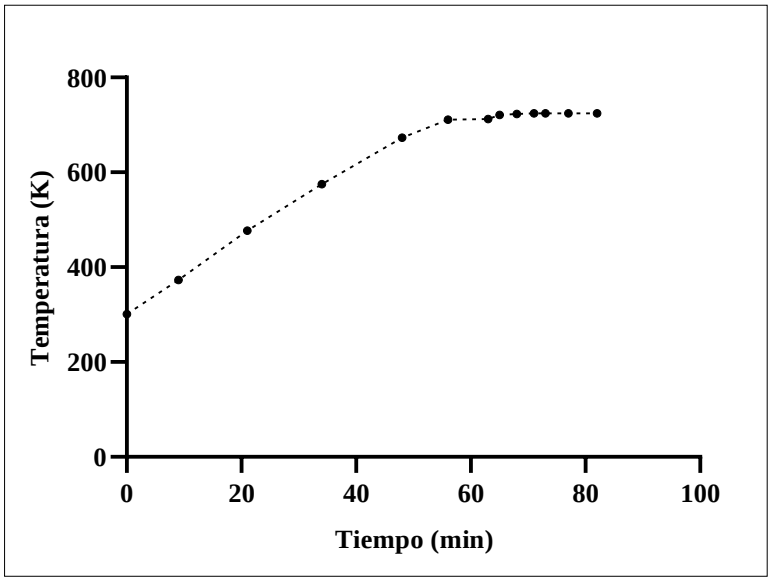


Figura 172. Incremento de la temperatura con el tiempo para la cinética 4.

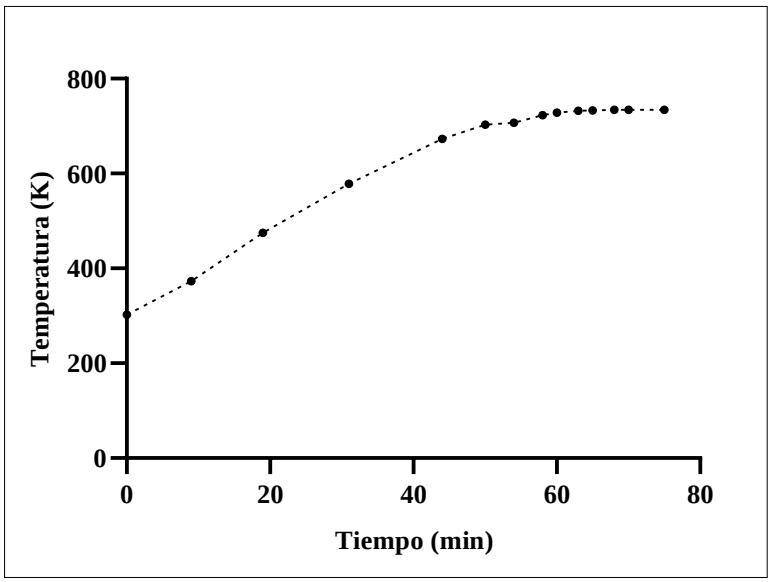
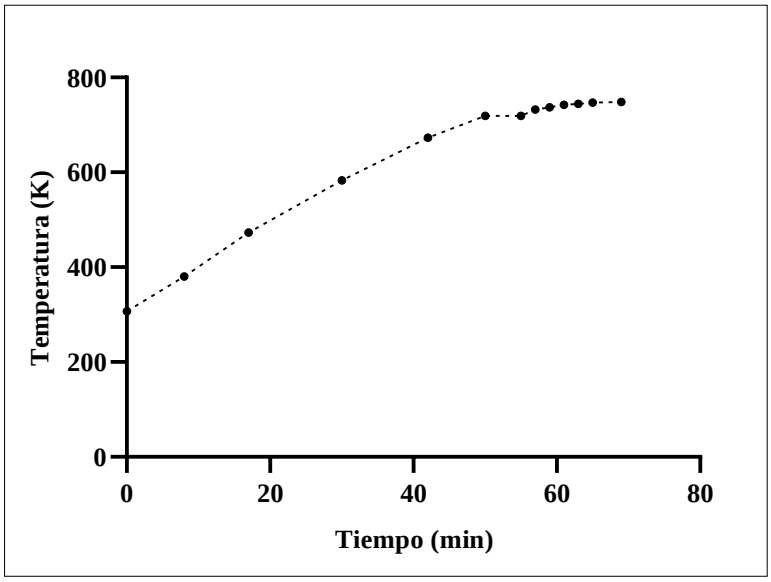


Figura 173. Incremento de la temperatura con el tiempo para la cinética 5.



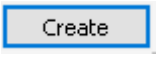
b. Pérdidas de calor en el sistema

La figura del reactor dentro de la mufla de la sección de Metodología muestra la ubicación del reactor y la termocupla dentro de la mufla. Esto permite realizar el siguiente análisis teórico de las pérdidas de calor en el sistema que afectarían en la medición de temperatura realizada por la termocupla de la mufla:

- Convección natural de calor por el aire que separa la termocupla y la superficie del reactor.
- Conducción de calor en la capa cilíndrica del reactor
- Conducción de calor entre el reactor y el material refractario de soporte
- Convercción natural por el aire estancado dentro del reactor que está en contacto con el material de empaque.

c. Guía rápida para software GraphPad Prism®.

A continuación, se presenta una guía del desarrollo del ajuste no lineal para las curvas de calentamiento en el software GraphPad Prism versión 8.2.1.

1. Al iniciar el programa, en el cuadro de inicio se debe seleccionar la opción de tabla nueva y gráfico "XY". Aquí se selecciona la primera opción en "Data table" y las opciones para los datos de X y Y. Una vez definido ya se puede dar clic en 

2. Se despliega una hoja con columnas y celdas en donde se ingresan manualmente los datos de tiempo en el eje X ylas temperaturas en el eje Y.

3. En la columna derecha se selecciona la opción *New Analysis* que despliega un cuadro para crear un nuevo análisis.

4. Se selecciona de *XY Analyses* la opción de "Nonlinear regression (curve fit)". Se despligan más opciones para este de regresión, en donde se selecciona la regresión *Boltzmann sigmoidal* de "Classic equationsfrom prior versions of Prism".

5. Para ver los resultados del ajuste no lineal se crear en la sección de resultados el análisis con todos los datos. También en la sección de gráficos, se crea automáticamente un gráfico donde se expresan los datos experimentales y los modelados.

6. Se modifica el estilo del gráfico al hacer doble clic en el mismo, esto despliega una ventana en donde se pueden cambiar el formato de los datos.

d. Modelado de las curvas de calentamiento

El modelado de las curvas de temperaturas fue realizado utilizando el software GraphPad Prism® versión 8.2.1 con un ajuste de curva no lineal de tipo Boltzmann sigmoidal. Se adaptó la ecuación definida por el software para el sistema de pirólisis basado en temperatura y tiempo (Ecuación 22).

$$T(t) = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1 + e^{\frac{t_{1/2} - t}{m}}} \quad \text{(Ecuación 22)}$$

Donde:

$T_1 =$ Límite inferior de temperatura (K)

$T_2 =$ Límite superior de temperatura (K)

$t_{1/2} =$ Tiempo intermedio entre límites (min)

$m =$ Pendiente que describe la curva (K/min)

Cuadro 97. Resultados de los parámetros para el ajuste de curva no linear de tipo Boltzmann sigmoidal de las curvas de calentamiento.

Cinética No.	T1(K)	T2 (K)	t1/2(min)	m(K/min)	R2
1	236.0	692.7	19.72	10.91	0.9984
2	236.8	708.7	18.58	11.02	0.9982
3	209.4	738.3	21.02	14.00	0.9980
4	196.2	749.6	19.25	13.51	0.9992
5	133.6	774.3	15.51	15.84	0.9991

Figura 174. Comparación de los datos experimentales y el modelo tipo Boltzmann sigmoidal propuesto de la cinética 1.

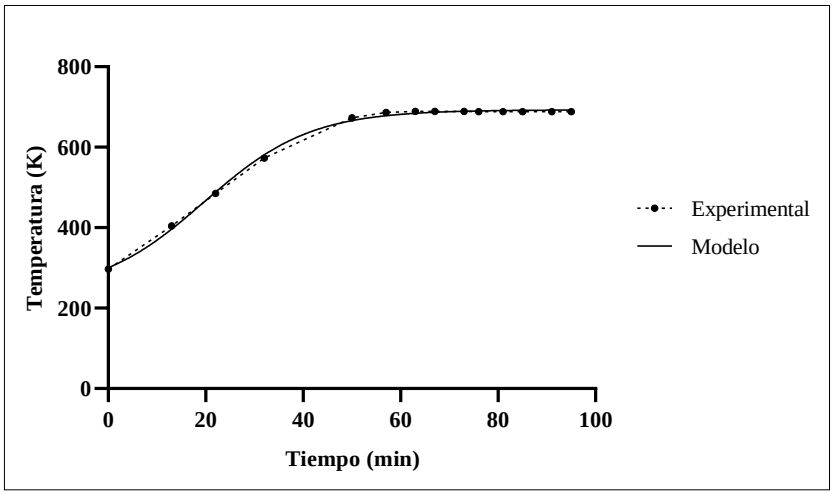


Figura 175. Comparación de los datos experimentales y el modelo tipo Boltzmann sigmoidal propuesto de la cinética 2.

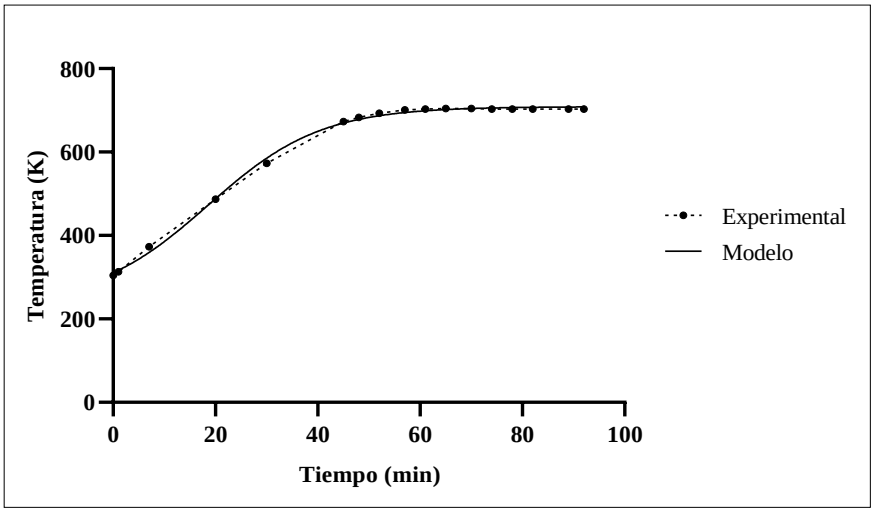


Figura 176. Comparación de los datos experimentales y el modelo tipo Boltzmann sigmoidal propuesto de la cinética 3.

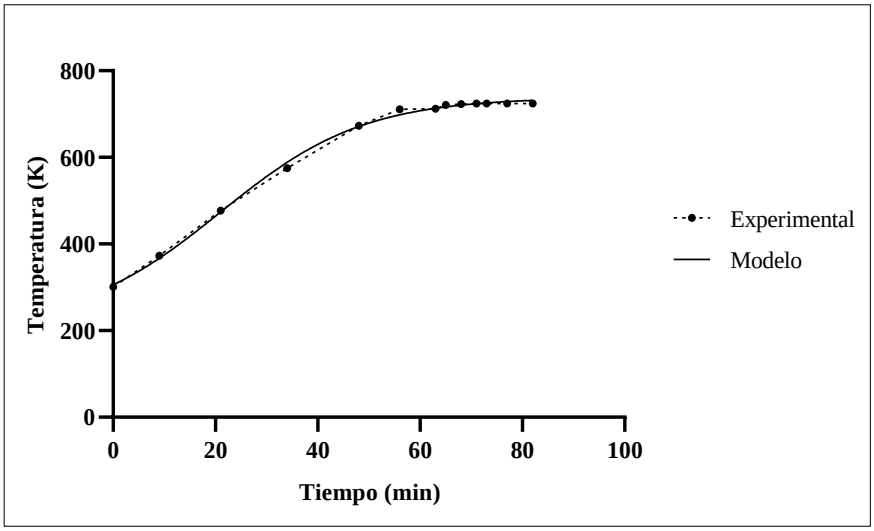


Figura 177. Comparación de los datos experimentales y el modelo tipo Boltzmann sigmoidal propuesto de la cinética 4.

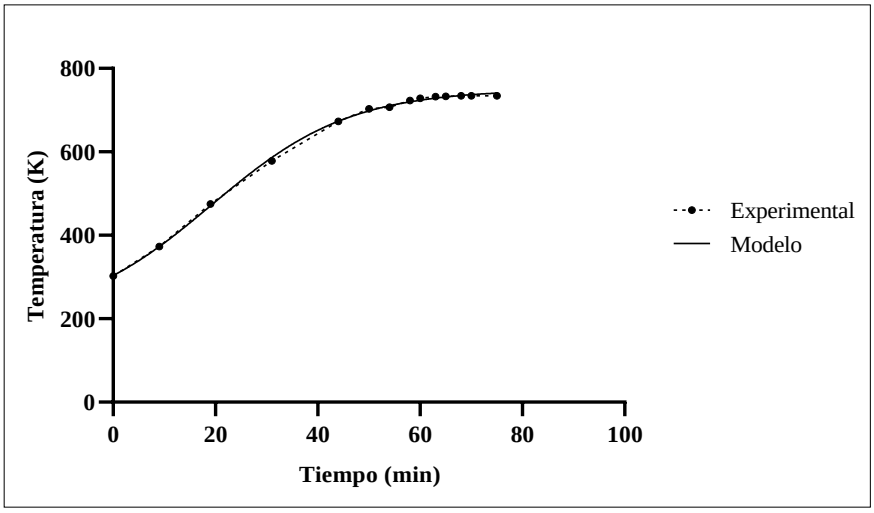
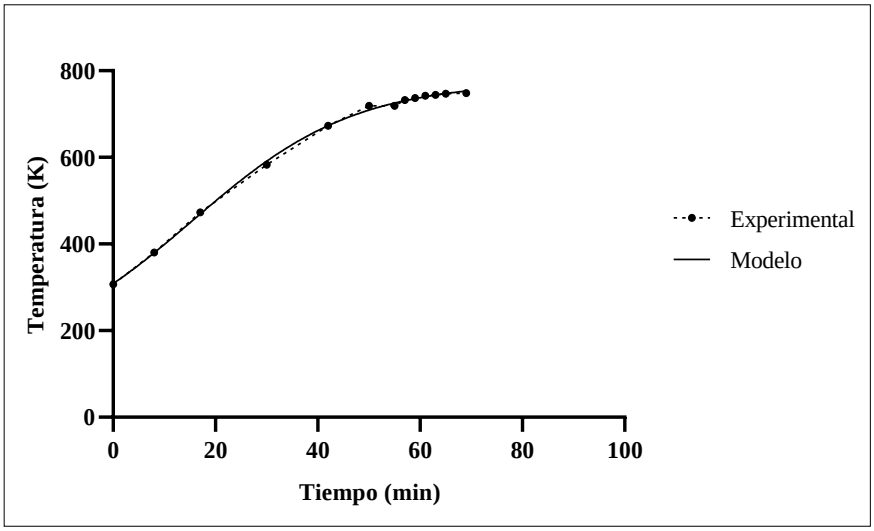


Figura 178. Comparación de los datos experimentales y el modelo tipo Boltzmann sigmoidal propuesto de la cinética 5.



4. Desarrollo de modelo cinético

a. Modelo cinético desarrollado para la pirólisis de BOPP.

Se considera una reacción en donde el reactivo (A) es el material de empaque de polipropileno biorientado (BOPP) del cual surge un producto (B) compuesto distribuido en tres fases: gas, líquido y sólido.

$$\mathrm{A\ (BOPP)} \rightarrow \mathrm{B(Productos)}$$

Modificando la ecuación 10 con la ecuación 5 se obtiene para el reactivo A:

$$-\frac{\mathrm{dW_A}}{\mathrm{d\,t}} = \mathrm{A}\exp\left(-\frac{\mathrm{E_a}}{\mathrm{RT}}\right)(\mathrm{W_A} - \mathrm{W_f})^{\mathrm{n}} \text{ (Ecuación 25)}$$

El sistema utilizado es no isotérmico por lo que la temperatura puede expresarse como una función en el tiempo y se obtiene la ecuación 23 de la sección de resultados.

$$-\frac{\mathrm{dW_A}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{A}\exp\left[-\frac{\mathrm{E_a}}{\mathrm{R} * \mathrm{T}(t)}\right](\mathrm{W_A} - \mathrm{W_f})^{\mathrm{n}} \quad \text{(Ecuación 23)}$$

Para las diferentes cinéticas se modeló la curva de calentamiento con el modelo sigmoidal tipo Boltzmann determinadas en la sección anterior obteniendo la ecuación 26.

$$-\frac{\mathrm{dW_A}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{A}\exp\left[-\frac{\mathrm{E_a}}{\mathrm{R} * \left(\mathrm{T_1} + \frac{\mathrm{T_2} - \mathrm{T_1}}{1 + \mathrm{e}^{\frac{\mathrm{t_{1/2}} - \mathrm{t}}{\mathrm{m}}}}\right)}\right](\mathrm{W_A} - \mathrm{W_f})^{\mathrm{n}} \quad \text{(Ecuación 26)}$$

Wf puede expresarse en función de la conversión deseada de la cantidad de reactivo inicial Wo (Ecuación 27).

$$\mathrm{W_f} = \alpha \mathrm{W_o} \text{ (Ecuación 27)}$$

Para esta experimentación fue utilizada como condición final Wf la masa de reactivo en la última muestra de líquido tomada para análisis cinético.

b. Cálculo de pérdida de masa del reactivo.

Para determinar la masa de reactivo en el reactor conforme transcurría la reacción primero se restó la masa del gas (

Cuadro 98) a la masa inicial de reactivo BOPP. Luego se fueron restando las masas de líquido de cada muestra en el tiempo correspondiente.

Cuadro 98. Pérdida de masa del reactivo (BOPP) durante la reacción de cinética 1.

Tiempo (min)	Masa de reactivo BOPP en reactor (±0.01g)
63	56.48
67	51.73
73	48.38
76	45.32
81	42.18
85	37.52
91	33.72
95	27.69

Cuadro 99. Pérdida de masa del reactivo (BOPP) durante la reacción de cinética 2.

Tiempo (min)	Masa de reactivo BOPP en reactor (±0.01g)
61	56.74
65	51.46
69	45.42
73	39.59
77	35.09
81	30.08
88	25.79
91	24.05

Cuadro 100. Pérdida de masa del reactivo (BOPP) durante la reacción de cinética 3.

Tiempo (min)	Masa de reactivo BOPP en reactor (±0.01g)
63	54.45
65	49.38
68	43.17
71	38.76
73	34.72
77	30.55
82	26.24

Cuadro 101. Pérdida de masa del reactivo (BOPP) durante la reacción de cinética 4.

Tiempo (min)	Masa de reactivo BOPP en reactor (±0.01g)
58	56.28
60	53.05
63	47.47
65	41.49
68	34.85
70	30.37
75	25.40

Cuadro 102. Pérdida de masa del reactivo (BOPP) durante la reacción de cinética 5.

Tiempo (min)	Masa de reactivo BOPP en reactor (±0.01g)
55	54.21
57	49.03
59	42.67
61	38.24
63	33.60
65	29.49
69	24.65

c. Guía rápida de uso de software Berkeley Madonna®.

A continuación, se presenta una guía del desarrollo del modelo cinético en el software Berkeley Madonna versión 9.1.19.

Inicio: Debe crearse un nuevo documento seleccionando la opción en la pestaña de “File”. Esto despliega un cuadro de texto en donde se debe escribir el código de programación para la ecuación a modelar.

Programación: Se escribe el código de programación con la ecuación diferencial en términos de variables y condiciones iniciales. El tiempo debe ingresarse en la ecuación con la variable “TIME” para que

el software lo interprete. También al inicio se establece el tiempo de inicio y finalización para evaluar la ecuación.

Ejecución de la ecuación. Se ejecuta el programa dando clic en el ícono 

Si hay algún error el software desplegará una ventana indicando una revisión del código. De lo contrario se despliega en pantalla el gráfico modelado.

Ingreso de datos experimentales: Debe seleccionarse en la pestaña "Parameters" la opción de "Curve fit". En el cuadro desplegado debe darse clic a la opción de "Import Dataset" para poder seleccionar el archivo (guardado como un archivo .txt o .csv) e importar los datos a los cuales se les puede asignar un nombre y el eje (x o y) correspondiente. Al finalizar se debe cerrar el cuadro dando clic en "Cancel".

Selección de variables graficadas: Para visualizar los datos experimentales en la misma gráfica del modelo se debe seleccionar en la pestaña "Graph" la opción "Choose Variables". Con esto se puede seleccionar los datos a graficar.

Ajuste de parámetros: Una vez graficados los datos experimentales con el modelo, se procede a realizar el ajuste de curva con el método de integración RK4. Para esto se selecciona "Curve fit" en donde el cuadro desplegado indica las variables disponibles para realizar el ajuste. Se selecciona la variable(s) y se agrega haciendo clic en "Add". El programa permite el ajuste de múltiples variables. Para la reacción de pirólisis se ajustaron las variables de energía de activación (Ea), factor de frecuencia (A) y orden de reacción (n). Al finalizar dar clic en "OK".

Interpretación de resultados: El gráfico modelado se ajustará automáticamente a los datos experimentales y al lado derecho se desplegará un cuadro resumiendo el valor de las variables e identificando con asterisco el nuevo valor de las variables seleccionadas para el ajuste. El código inicial permanece igual, por lo que debe cambiarse el valor de las variables ajustadas.

Para obtener la tabla de datos calculados por el modelo se debe seleccionar en la barra del gráfico la siguiente opción:



Al seleccionarlo se desplegará una tabla con tres columnas: la primera es el tiempo, la segunda son los datos experimentales y la tercera son los datos calculados con el modelo. De esta tabla se pueden extraer los datos necesarios para comparar el ajuste de curvas.

d. Códigos de programación utilizados en Berkeley Madonna

A continuación, se presentan los códigos de programación utilizados para realizar el ajuste del modelo en el software en cada condición.

Código utilizado para condición de cinética 1:

```
METHOD RK4
STARTTIME = 0
STOPTIME = 95
DT = 0.02
```

RXN1=A*exp(-E/(R*T))*(W-Wf)^n

A=1.503*10^18

E=59489.10

R=1.987

Wf=27.69

n=0.54

T=T1+((T2-T1)/(1+exp((V-TIME)/m)))

T1=236

T2=692.7

V=19.72

m=10.91

INIT W=60

INIT P=0

d/dt(P)=+RXN1

d/dt(W)=-RXN1

Código utilizado para condición de cinética 2:

METHOD RK4

STARTTIME = 0

STOPTIME = 91

DT = 0.02

RXN1=A*exp(-E/(R*T))*(W-Wf)^n

A=4.3972*10^17

E=58714.17

R=1.987

Wf=24.05

n=0.52

T=T1+((T2-T1)/(1+exp((V-TIME)/m)))

T1=236.8

T2=708.7

V=18.58

m=11.02

INIT W=60

INIT P=0

d/dt(P)=+RXN1

d/dt(W)=-RXN1:

Código utilizado para condición de cinética 3:

METHOD RK4

STARTTIME = 0

STOPTIME = 82

DT = 0.02

RXN1=A*exp(-E/(R*T))*(W-Wf)^n

A=9.477*10^16

E=57494.74

R=1.987

Wf=26.24

n=0.55

T=T1+((T2-T1)/(1+exp((V-TIME)/m)))

T1=209.4

T2=738.3

V=21.02

m=14.00

INIT W=60

INIT P=0

d/dt(P)=+RXN1

d/dt(W)=-RXN1

Código utilizado para condición de cinética 4:

METHOD RK4

STARTTIME = 0

STOPTIME = 75

DT = 0.02

RXN1=A*exp(-E/(R*T))*(W-Wf)^n

A=3.3038*10^16

E=56411.16

R=1.987

Wf=25.4

n=0.52

T=T1+((T2-T1)/(1+exp((V-TIME)/m)))

T1=196.1

T2=749.6

V=19.25

m=13.51

INIT W=60

INIT P=0

d/dt(P)=+RXN1

d/dt(W)=-RXN1

INIT W=60

INIT P=0

Código utilizado para condición de cinética 5:

METHOD RK4

STARTTIME = 0

STOPTIME = 69

DT = 0.02

RXN1=A*exp(-E/(R*T))*(W-Wf)^n

A=5.783*10^16

E=57664.13

R=1.987

Wf=24.7

n=0.54

T=T1+((T2-T1)/(1+exp((V-TIME)/m)))

T1=133.6

T2=774.3

V=15.51

m=15.84

INIT W=60

INIT P=0

d/dt(P)=+RXN1

d/dt(W)=-RXN1

e. Ajuste de curva para datos experimentales en software

Utilizando el software Berkeley Madonna versión 1.9.19. se integró la ecuación para generar el modelo cinético y ajustarlo a los datos experimentales obteniendo las constantes cinéticas del Cuadro 103 .

Cuadro 103. Parámetros cinéticos calculados para las cinco condiciones de cinética evaluadas.

		Parámetros cinéticos				
Cinética No.	Temperatura (°C)	A(min-1)	Ea (Cal/mol)	Ea* (kJ/mol)	n	R2
1	415	1.5030 * 1018	59489.10	248.90	0.54	0.9562
2	430	4.3972 * 1017	58714.17	245.66	0.52	0.9673
3	450	9.4770 * 1016	57494.74	240.56	0.55	0.9904
4	460	3.3038 * 1016	56411.16	236.02	0.52	0.9753
5	475	5.7830 * 1016	57664.13	241.27	0.54	0.9943
	Promedio	4.2567 * 1017	57954.66	57954.66	0.53	
	Desviación estándar	6.2446 * 1017	1184.24	1184.23898	0.01	

*Nota 1: El valor de la energía de activación Ea en unidades kJ/mol fue calculado realizando la conversión de calorías a kJ (1Cal=0.004184 kJ).

A continuación, se presentan los gráficos generados por el software para las cinco condiciones evaluadas.

Figura 179. Resultado de ajuste de curva para datos experimentales de cinética 1.

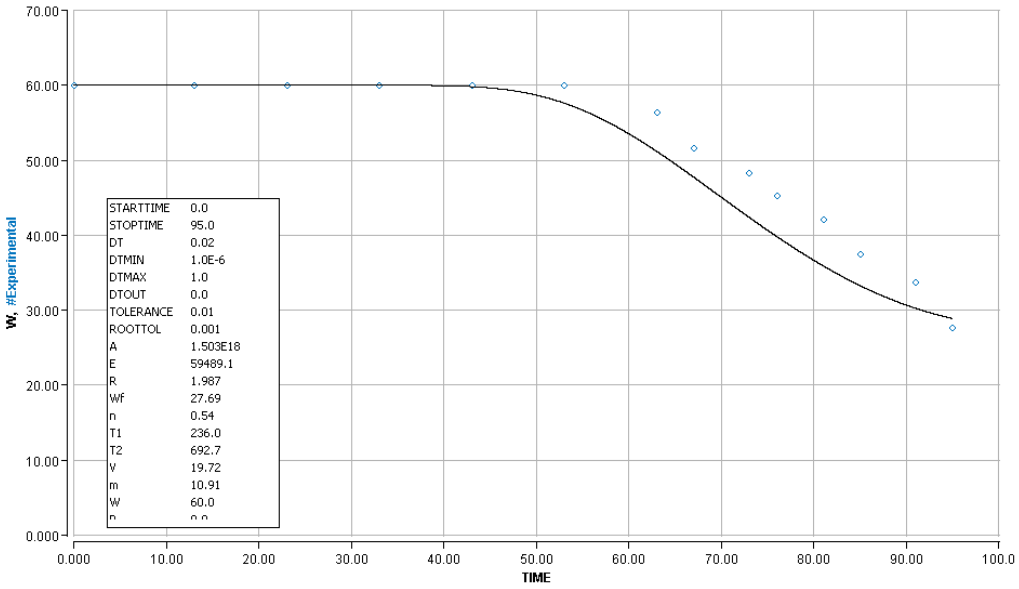


Figura 180. Resultado de ajuste de curva para datos experimentales de cinética 2.

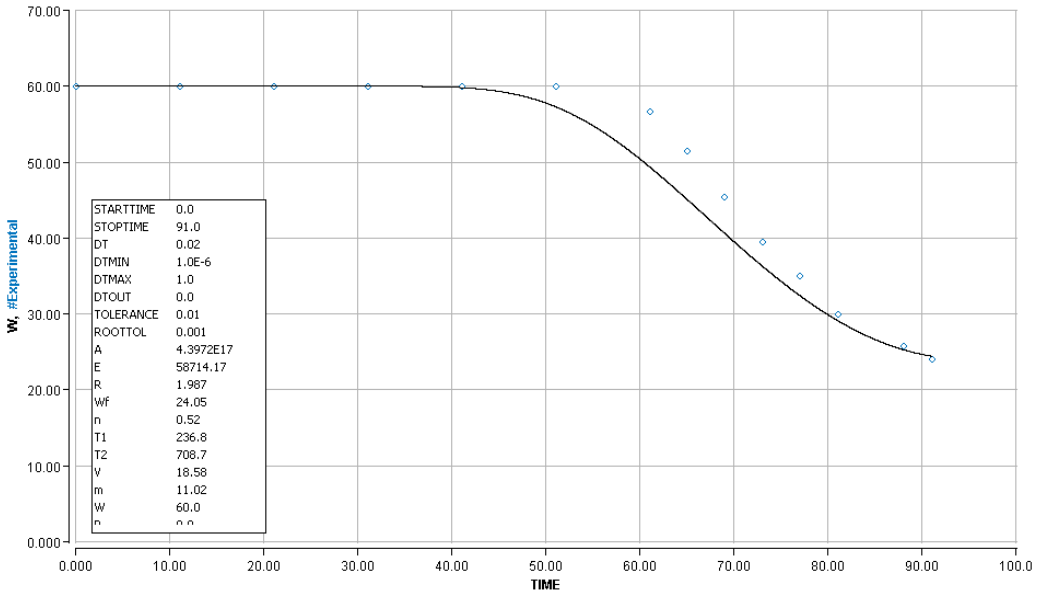


Figura 181. Resultado de ajuste de curva para datos experimentales de cinética 3.

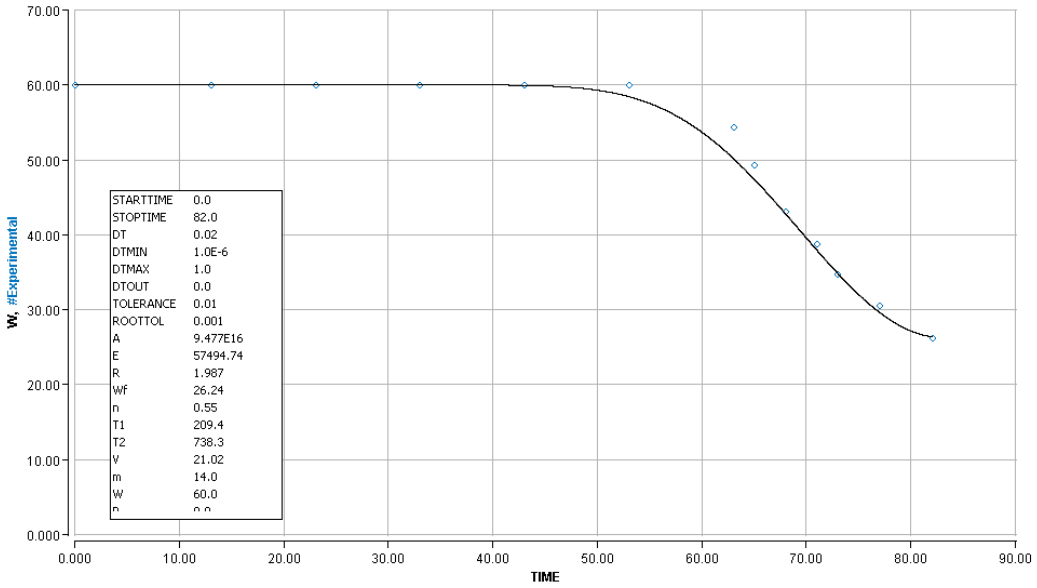


Figura 182. Resultado de ajuste de curva para datos experimentales de cinética 4.

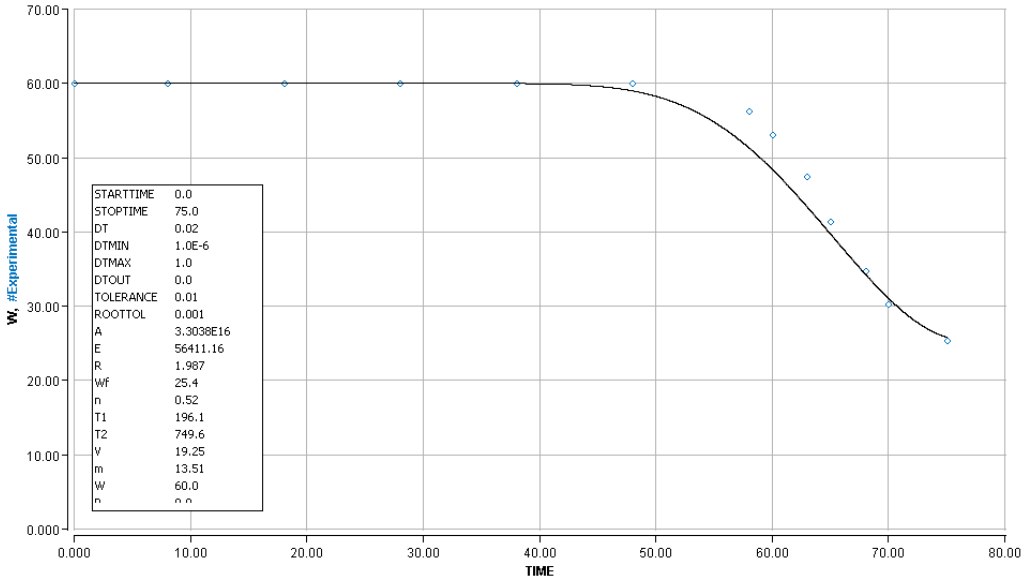
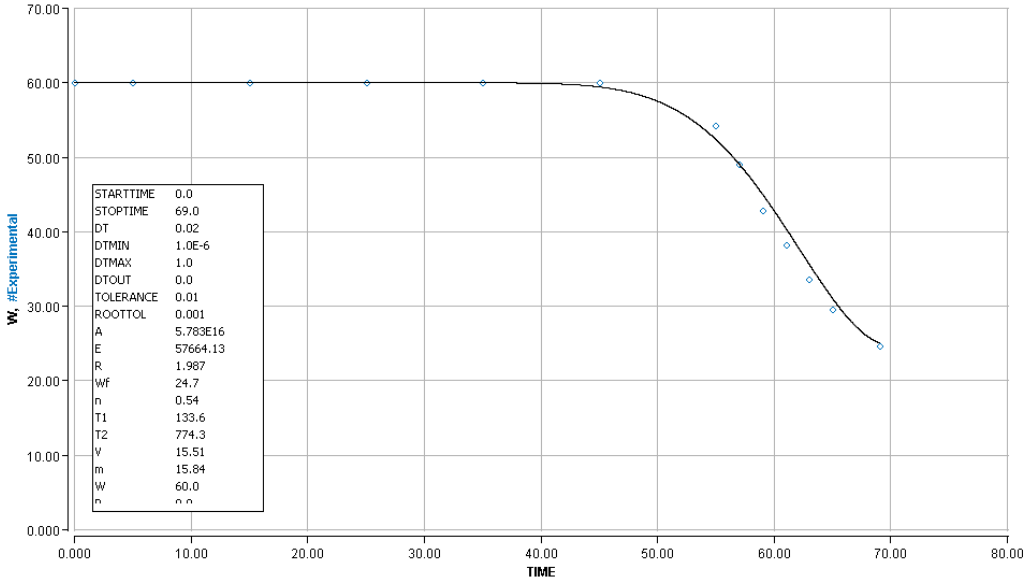


Figura 183. Resultado de ajuste de curva para datos experimentales de cinética 5.



f. Comparación de datos experimentales

Los datos del modelo fueron obtenidos con el programa Berkeley Madonna para los tiempos analizados y así obtener el R^2.

Cuadro 104. Pérdida de masa reactiva de durante la reacción de cinética 1.

Tiempo (min)	Masa experimental de reactivo en reactor (g)	Masa de reactivo en reactor según modelo (g)
0	60.00	60.00
13	60.00	60.00
23	60.00	59.99
33	60.00	59.99
43	60.00	59.82
53	60.00	57.63
63	56.48	51.21
67	51.73	47.77
73	48.38	42.41
76	45.32	39.84
81	42.18	35.94
85	37.52	33.3
91	33.72	30.26
95	27.69	28.9

Cuadro 105. Pérdida de masa reactiva durante la reacción de cinética 2.

Tiempo (min)	Masa experimental de reactivo en reactor (g)	Masa de reactivo en reactor según modelo (g)
0	60.00	60.00
11	60.00	60.00
21	60.00	59.99
31	60.00	59.99
41	60.00	59.81
51	60.00	57.31
61	56.74	49.43
65	51.46	45.13
69	45.42	40.65
73	39.59	36.33
77	35.09	32.44
81	30.08	29.16
88	25.79	25.3
91	24.05	24.45

Cuadro 106. Pérdida de masa reactiva durante la reacción de cinética 3.

Tiempo (min)	Masa experimental de reactivo en reactor (g)	Masa de reactivo en reactor según modelo (g)
0	60.00	60.00
13	60.00	60.00
23	60.00	59.99
33	60.00	59.99
43	60.00	59.94
53	60.00	58.44
63	54.45	50.20
65	49.38	47.44
68	43.17	42.8
71	38.76	37.96
73	34.72	34.86
77	30.55	29.64
82	26.24	26.38

Cuadro 107. Pérdida de masa reactiva durante la reacción de cinética 4.

Tiempo (min)	Masa experimental de reactivo en reactor (g)	Masa de reactivo en reactor según modelo (g)
0	60.00	60.00
8	60.00	60.00
18	60.00	60.00
28	60.00	59.99
38	60.00	59.98
48	60.00	58.98
58	56.28	51.33
60	53.05	48.43
63	47.47	43.38
65	41.49	39.74
68	34.85	34.32
70	30.37	31.06
75	25.40	25.81

Cuadro 108. Pérdida de masa reactiva durante la reacción de cinética 5.

Tiempo (min)	Masa experimental de reactivo en reactor (g)	Masa de reactivo en reactor según modelo (g)
0	60.00	60.00
5	60.00	60.00
15	60.00	60.00
25	60.00	59.99
35	60.00	59.99
45	60.00	59.44
55	54.21	52.38
57	49.03	49.08
59	42.67	45.06
61	38.24	40.48
63	33.6	35.65
65	29.49	31.06
69	24.65	25.08

5. Desarrollo de la ecuación de velocidad de producción del compuesto representativo

a. Cinética de reacción desarrollada para 2,4-Dimetil-1-hepteno.

La variación de formación de producto (B) y consumo de reactivo (A) se puede re expresar uniendo las siguientes ecuaciones:

$$-\frac{d[A]}{dt} = \frac{d[B]}{d\,t}$$

$$-\frac{d[A]}{dt} = -\frac{dW_A}{d\,t}$$

$$\frac{d[B]}{dt} = \frac{dN_B}{dt}$$

Para cumplir esta igualdad debe encontrarse una constante de proporcionalidad k que relacione ambos términos y obtener la ecuación de la sección de resultados:

$$-\frac{dW_A}{dt} = k\frac{dN_B}{dt}$$

b. Cálculos para la cinética de reacción de compuesto representativo

Factor de corrección para áreas de cromatograma. Para determinar los moles del compuesto representativo seleccionado como el 2,4-Dimetil-1-hepteno debe emplearse un factor de corrección para poder utilizar el área de los cromatogramas como un %(m/m) relativo al cloroformo utilizado como disolvente. Para el análisis se preparó una solución con 0.25 g de líquido de pirólisis y 5 mL de cloroformo como disolvente, luego se inyectaba 1 µL de esta solución en el equipo.

Con los datos de densidad y pureza del reactivo pueden calcularse los gramos de cloroformo en la muestra preparada para el análisis por cromatografía:

$$5\text{ mL Cloroformo} * \left(\frac{1\text{ L}}{1000\text{ mL}}\right) * \left(\frac{1.48\text{ kg}}{1\text{ L}}\right) * \left(\frac{1000\text{ g}}{1\text{ kg}}\right) * \left(\frac{99}{100}\right) = 7.32\text{ g Cloroformo}$$

Con este dato puede calcularse la concentración (%m/m) de cloroformo en la muestra:

$$\frac{7.32\text{ g Cloroformo}}{7.32\text{ g Cloroformo} + 0.25\text{ g Líquido de pirólisis}} * 100 = 96.70\ \%\text{ m/m}$$

Este dato permite calcular los gramos de cloroformo inyectado en el equpo:

$$1\ \mu\text{L solución} * \left(\frac{1\text{ mL}}{1000\ \mu\text{L}}\right) * \left(\frac{1.2551\text{ g}}{1\text{ mL}}\right)\left(\frac{96.70\text{ g Cloroformo}}{100\text{ g Solución}}\right) = 1.2137 \times 10^{-3}\text{ g Cloroformo}$$

Con la densidad de la solución se calculan los gramos de solución inyectados en el equipo:

$$1\ \mu\text{L solución} * \left(\frac{1\text{ mL}}{1000\ \mu\text{L}}\right) * \left(\frac{1.2551\text{ g}}{1\text{ mL}}\right) = 1.2551 \times 10^{-3}\text{ g Solución}$$

La diferencia de masa de solución y de cloroformo establece los gramos que deben distribuirse en el área de los picos de los demás compuestos:

$$1.2551 \times 10^{-3}\text{ g Solución} - 1.2137 \times 10^{-3}\text{ g Cloroformo} = 4.14 \times 10^{-5}\text{g Otros compuestos}$$

Para calcular los gramos de los otros compuestos en la muestra inicial de producto líquido se necesita conocer el volumen de solución inicial:

$$0.25\text{ g Líquido de pirólisis} * \left(\frac{1\text{ mL}}{0.7709\text{ mL}}\right) = 0.32\text{ mL Líquido de pirólisis}$$

$$0.32\text{ mL líquido de pirólisis} + 5\text{ mL de cloroformo} = 5.32\text{ mL de solución}$$

Para obtener la masa de los compuestos en la muestra de 0.25 g se realiza la siguiente conversión para calcular el factor a aplicar a las áreas:

$$\left(\frac{4.14 \times 10^{-5}\text{g Otros compuestos}}{1\ \mu\text{L}}\right) * \left(\frac{1000\ \mu\text{L}}{1\text{ mL}}\right)\left(\frac{5.32\text{ mL solución}}{0.25\text{ g muestra}}\right) = 0.88\frac{\text{g Otros compuestos}}{\text{g muestra}}$$

Para los moles del compuesto seleccionado en este trabajo como 2,4-Dimetil-1-hepteno (Compuesto P) el factor anterior ya puede utilizarse con el área del compuesto previamente corregida al eliminar el solvente (cloroformo):

$$\text{Área del compuesto}\left(\frac{\text{g Compuesto P}}{\text{g Otros compuestos}}\right) * 0.88\frac{\text{g Otros compuestos}}{\text{g muestra}} * \text{Masa de la muestra de cinética (g)} = \text{Masa del compuesto P (g)}$$

Con el peso molecular del compuesto se calculan los moles del compuesto:

$$\text{Masa del compuesto P (g)} * \left(\frac{1\text{ mol de compuesto P}}{126.24\text{ g Compuesto P}}\right) = \text{Moles del compuesto P}$$

c. Corrección de áreas de los cromatogramas.

A continuación, se presentan los resultados de áreas corregidas y moles del compuesto representativo calculados para cada cinética.

Cuadro 109. Resultado de la composición de 2,4-Dimetil-1-hepteno en las muestras líquidas de la cinética 1.

Muestra No.	Tiempo (min)	Área sin solvente	Masa del compuesto en muestra de producto líquido (g)	Moles del compuesto	Moles acumulados del compuesto
1	63	20.7423	0.5460	0.0043	0.0043
2	67	9.6614	0.2022	0.0016	0.0059
3	73	13.9734	0.4115	0.0033	0.0092
4	76	12.9424	0.3487	0.0028	0.0119
5	81	16.0310	0.4432	0.0035	0.0155
6	85	13.3509	0.5477	0.0043	0.0198
7	91	13.2620	0.4436	0.0035	0.0233
8	95	15.9084	0.8441	0.0067	0.0300

Cuadro 110. Resultado de la composición de 2,4-Dimetil-1-hepteno en las muestras líquidas de la cinética 2.

Muestra No.	Tiempo (min)	Área sin solvente	Masa del compuesto en muestra de producto líquido (g)	Moles del compuesto	Moles acumulados del compuesto
1	61	22.4416	0.5460	0.0043	0.0043
2	65	20.3879	0.2022	0.0016	0.0059
3	69	18.5916	0.4115	0.0033	0.0092
4	73	17.6699	0.3487	0.0028	0.0119
5	77	17.3066	0.4432	0.0035	0.0155
6	81	13.0465	0.5477	0.0043	0.0198
7	88	14.3712	0.4436	0.0035	0.0233
8	91	14.4618	0.8441	0.0067	0.0300

*Nota 1: El área sin solvente es igual al área de solvente debido a que estos análisis ya tenían eliminado el cloroformo en las áreas.

Cuadro 111. Resultado de la composición de 2,4-Dimetil-1-hepteno en las muestras líquidas de la cinética 3.

Muestra No.	Tiempo (min)	Área sin solvente	Masa del compuesto en muestra de producto líquido (g)	Moles del compuesto	Moles acumulados del compuesto
1	63	17.5459	0.9426	0.0075	0.0075
2	65	17.4464	0.7832	0.0062	0.0137
3	68	19.4190	0.9534	0.0076	0.0212
4	71	20.8392	0.7536	0.0060	0.0272
5	73	20.8392	0.7407	0.0059	0.0331
6	77	18.0768	0.6644	0.0053	0.0383
7	82	17.0033	0.3226	0.0026	0.0409

Cuadro 112. Resultado de la composición de 2,4-Dimetil-1-hepteno en las muestras líquidas de la cinética 4.

Muestra No.	Tiempo (min)	Área sin solvente	Masa del compuesto en muestra de producto líquido (g)	Moles del compuesto	Moles acumulados del compuesto
1	61	38.1746	1.1030	0.0087	0.0087
2	65	31.0141	0.8827	0.0070	0.0157
3	69	26.1490	1.2844	0.0102	0.0259
4	73	26.2402	1.3794	0.0109	0.0368
5	77	28.0627	1.6419	0.0130	0.0498
6	81	31.8066	1.2521	0.0099	0.0598
7	88	32.8728	1.4384	0.0114	0.0711

Cuadro 113. Resultado de la composición de 2,4-Dimetil-1-hepteno en las muestras líquidas de la cinética 5.

Muestra No.	Tiempo (min)	Área sin solvente	Masa del compuesto en muestra de producto líquido (g)	Moles del compuesto	Moles acumulados del compuesto
1	55	23.6679	1.0829	0.0086	0.0086
2	57	24.5877	1.1215	0.0089	0.0175
3	59	22.8533	1.2784	0.0101	0.0276
4	61	20.3976	0.7948	0.0063	0.0339
5	63	21.6055	0.8823	0.0070	0.0409
6	65	22.2977	0.8066	0.0064	0.0473
7	69	21.6350	0.9224	0.0073	0.0546

Cuadro 114.Resultados del tiempo de retención del compuesto 2,4-Dimetil-1-hepteno de las muestras de producto líquido de cada cinética.

Cinética No.	Tiempo de retención promedio (min)	Desviación estándar (min)
1	2.5118	0.0158
2	2.5129	0.0048
3	2.5203	0.0044
4	2.5040	0.0068
5	2.5046	0.0036

d. Cálculo de constante de proporcionalidad.

A continuación, el cálculo de diferenciales de moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno y de masa de reactivo BOPP en función del tiempo.

Cuadro 115.Diferencial de masa de reactivo y moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno en muestras de cinética.

Tiempo (min)	Masa de reactivo BOPP en reactor (g)	Moles acumulados de 2,4-Dimetil-1-hepteno	dNB/dt (mol/min)	dWA/dt (g/min)
63	56.48	0.0043	0.00040	1.188
67	51.73	0.0059	0.00054	0.558
73	48.38	0.0092	0.00092	1.021
76	45.32	0.0119	0.00070	0.628
81	42.18	0.0155	0.00108	1.165
85	37.52	0.0198	0.00059	0.634
91	33.72	0.0233	0.00167	1.507
95	27.69	0.0300	-	-

Cuadro 116. Diferencial de masa de reactivo y moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno en muestras de cinética

Tiempo (min)	Masa de reactivo BOPP en reactor (g)	Moles acumulados de 2,4-Dimetil-1-hepteno	dNB/dt (mol/min)	dWA/dt (g/min)
61	56.74	0.0048	0.00187	1.318
65	51.46	0.0123	0.00196	1.511
69	45.42	0.0201	0.00179	1.456
73	39.59	0.0273	0.00136	1.125
77	35.09	0.0327	0.00114	1.253
81	30.08	0.0373	0.00061	0.613
88	25.79	0.0416	0.00058	0.580
91	24.05	0.0434	-	-

Cuadro 117. Diferencial de masa de reactivo y moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno en muestras de cinética 3.

Tiempo (min)	Masa de reactivo BOPP en reactor (g)	Moles acumulados de 2,4-Dimetil-1-hepteno	dNB/dt (mol/min)	dWA/dt (g/min)
63	54.45	0.0075	0.0031	2.536
65	49.38	0.0137	0.0025	2.070
68	43.17	0.0212	0.0020	1.470
71	38.76	0.0272	0.0029	2.020
73	34.72	0.0331	0.0013	1.044
77	30.55	0.0383	0.0005	0.861
82	26.24	0.0409	-	-

Cuadro 118. Diferencial de masa de reactivo y moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno en muestras de cinética 4.

Tiempo (min)	Masa de reactivo BOPP en reactor (g)	Moles acumulados de 2,4-Dimetil-1-hepteno	dNB/dt (mol/min)	dWA/dt (g/min)
61	56.28	0.0087	0.00350	1.617
65	53.05	0.0157	0.00339	1.861
69	47.47	0.0259	0.00546	2.987
73	41.49	0.0368	0.00434	2.216
77	34.85	0.0498	0.00496	2.237
81	30.37	0.0598	0.00228	0.994
88	25.40	0.0711	-	-

Cuadro 119. Diferencial de masa de reactivo y moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno en muestras de cinética 5.

Tiempo (min)	Masa de reactivo BOPP en reactor (g)	Moles acumulados de 2,4-Dimetil-1-hepteno	dNB/dt (mol/min)	dWA/dt (g/min)
55	54.21	0.0086	0.0044	2.592
57	49.03	0.0175	0.0051	3.178
59	42.67	0.0276	0.0031	2.214
61	38.24	0.0339	0.0035	2.320
63	33.60	0.0409	0.0032	2.055
65	29.49	0.0473	0.0018	1.211
69	24.65	0.0546	-	-

e. Resultados de la constante de proporcionalidad

Realizando un ajuste lineal al diferencial de reactivo y producto para determinar la pendiente que los relaciona como una constante de proporcionalidad.

Cuadro 120. Parámetros de ajuste lineal para la relación de moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno y masa reactiva en función del tiempo.

Parámetros de ajuste lineal			
Cinética No.	Pendiente (mol/g)	Intercepto (mol/min)	R2
1	0.0011	0.00008	0.9489
2	0.0014	-0.0003	0.8925
3	0.0015	0.0004	0.9182
4	0.0017	0.0007	0.9241
5	0.0017	-0.0003	0.9622

Las siguientes figuras ilustran el ajuste lineal a los datos de diferencial de masa de reactivo y moles del producto 2,4-Dimetil-1-hepteno.

Figura 184. Ajuste lineal de la relación entre los moles producidos de 2,4-Dimetil-1-hepteno y la masa reactiva en el tiempo para la cinética 1.

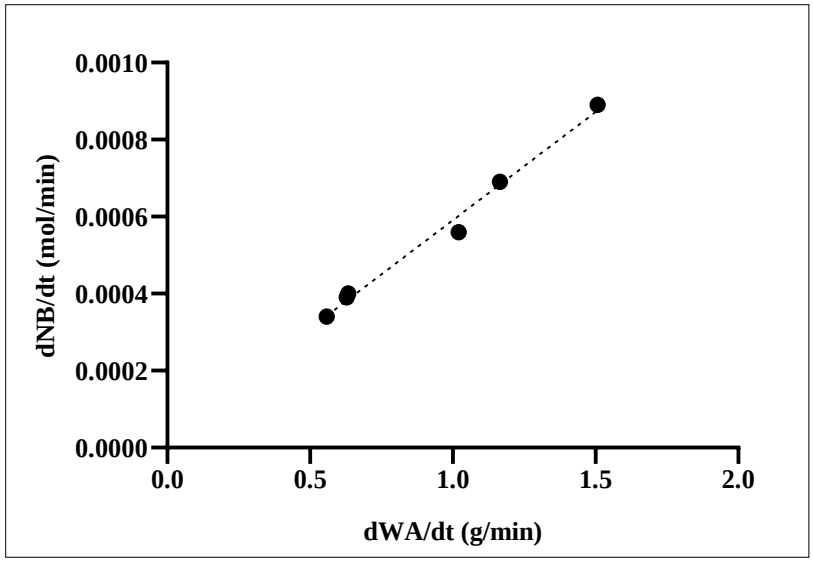


Figura 185. Ajuste lineal de la relación entre los moles producidos de 2,4-Dimetil-1-hepteno y la masa reactiva en el tiempo para la cinética 2.

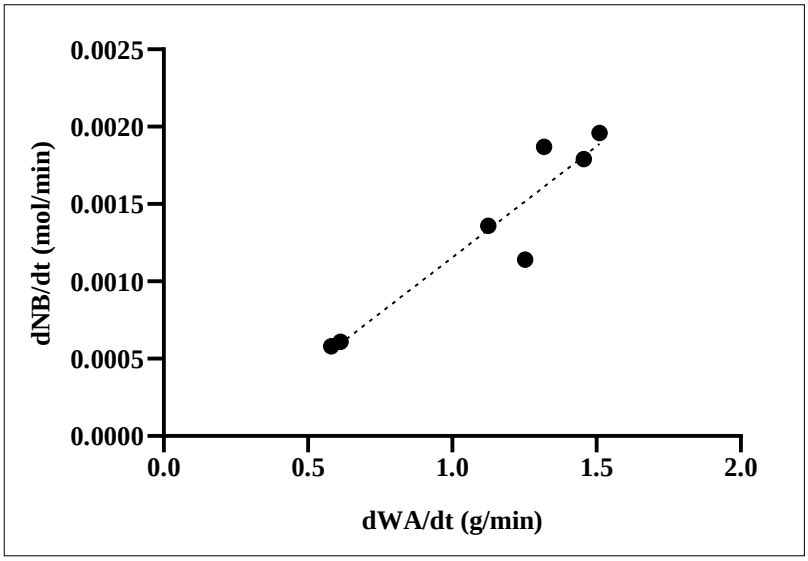


Figura 186. Ajuste lineal de la relación entre los moles producidos de 2,4-Dimetil-1-hepteno y la masa reactiva en el tiempo para la cinética 3.

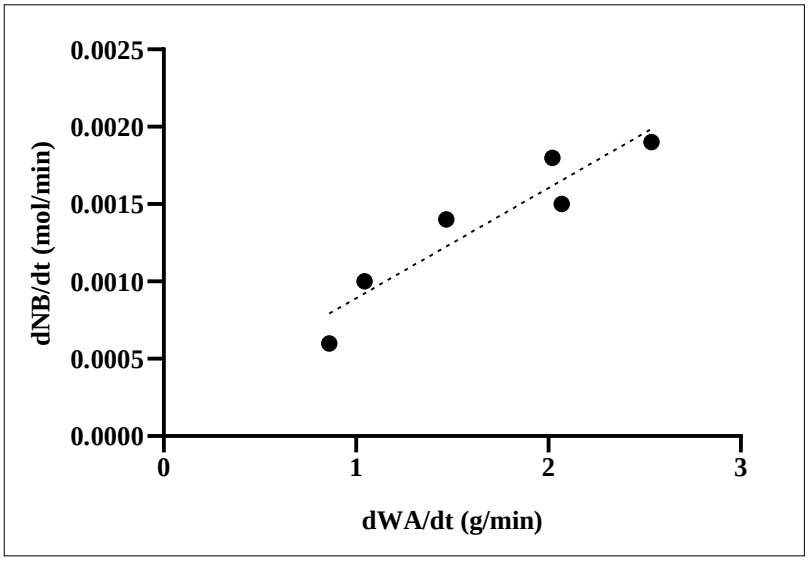


Figura 187. Ajuste lineal de la relación entre los moles producidos de 2,4-Dimetil-1-hepteno y la masa reactiva en el tiempo para la cinética 4.

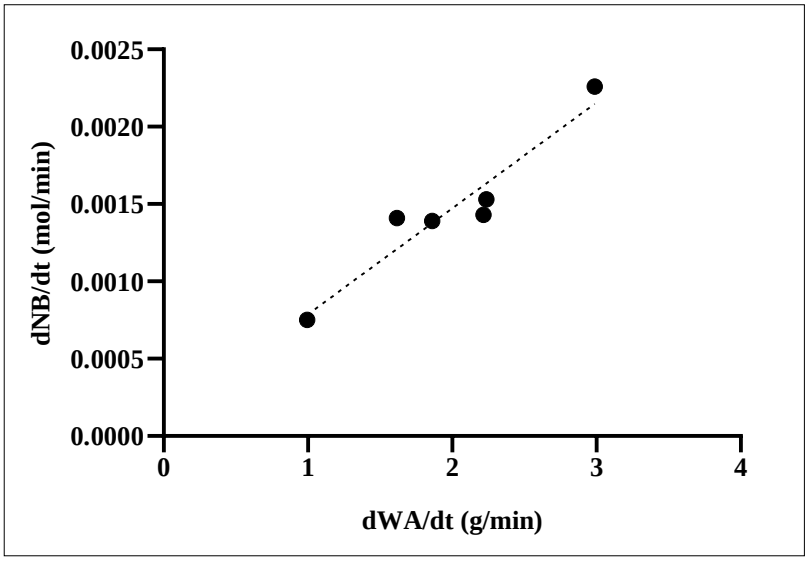
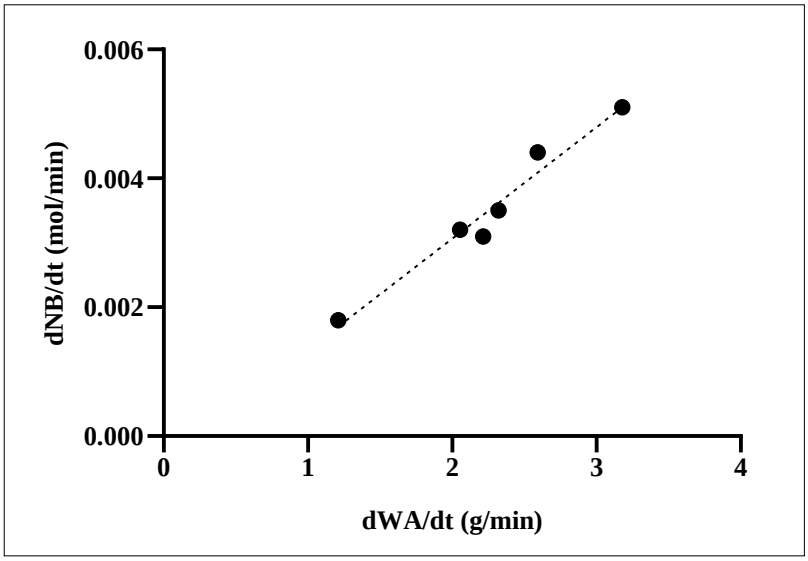


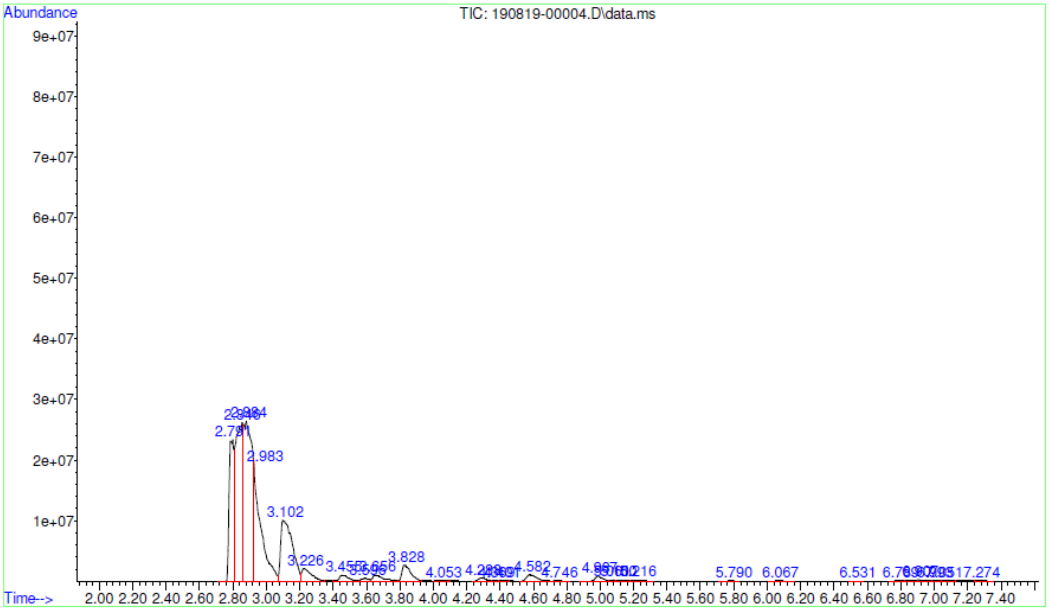
Figura 188. Ajuste lineal de la relación entre los moles producidos de 2,4-Dimetil-1-hepteno y la masa reactiva en el tiempo para la cinética 5.



C. CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS

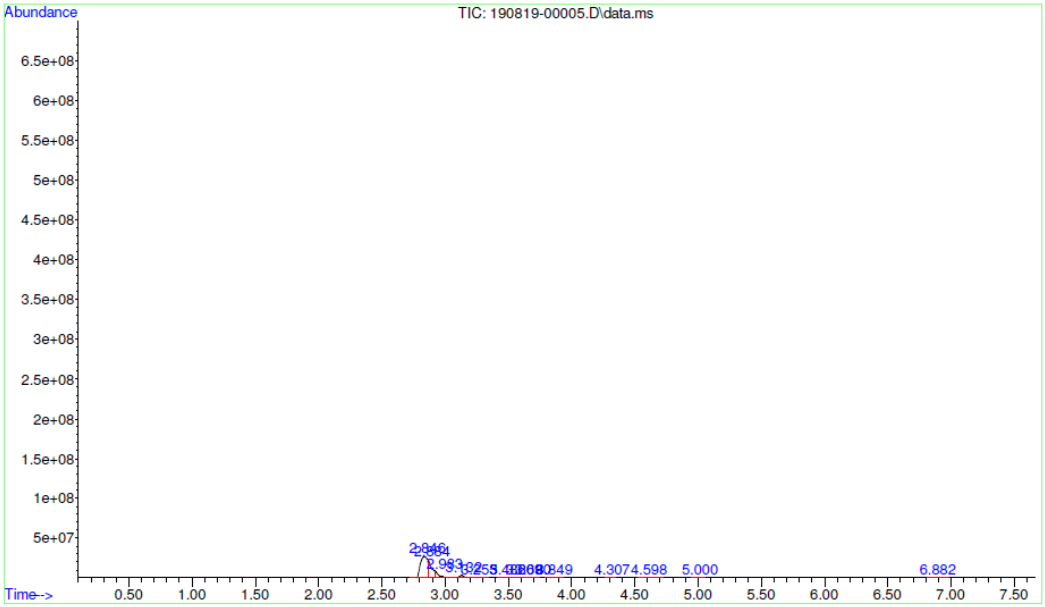
1. Resultados de la cromatografía de gases del producto gaseoso: Cromatogramas.

Figura 189. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 1 - Muestra 1



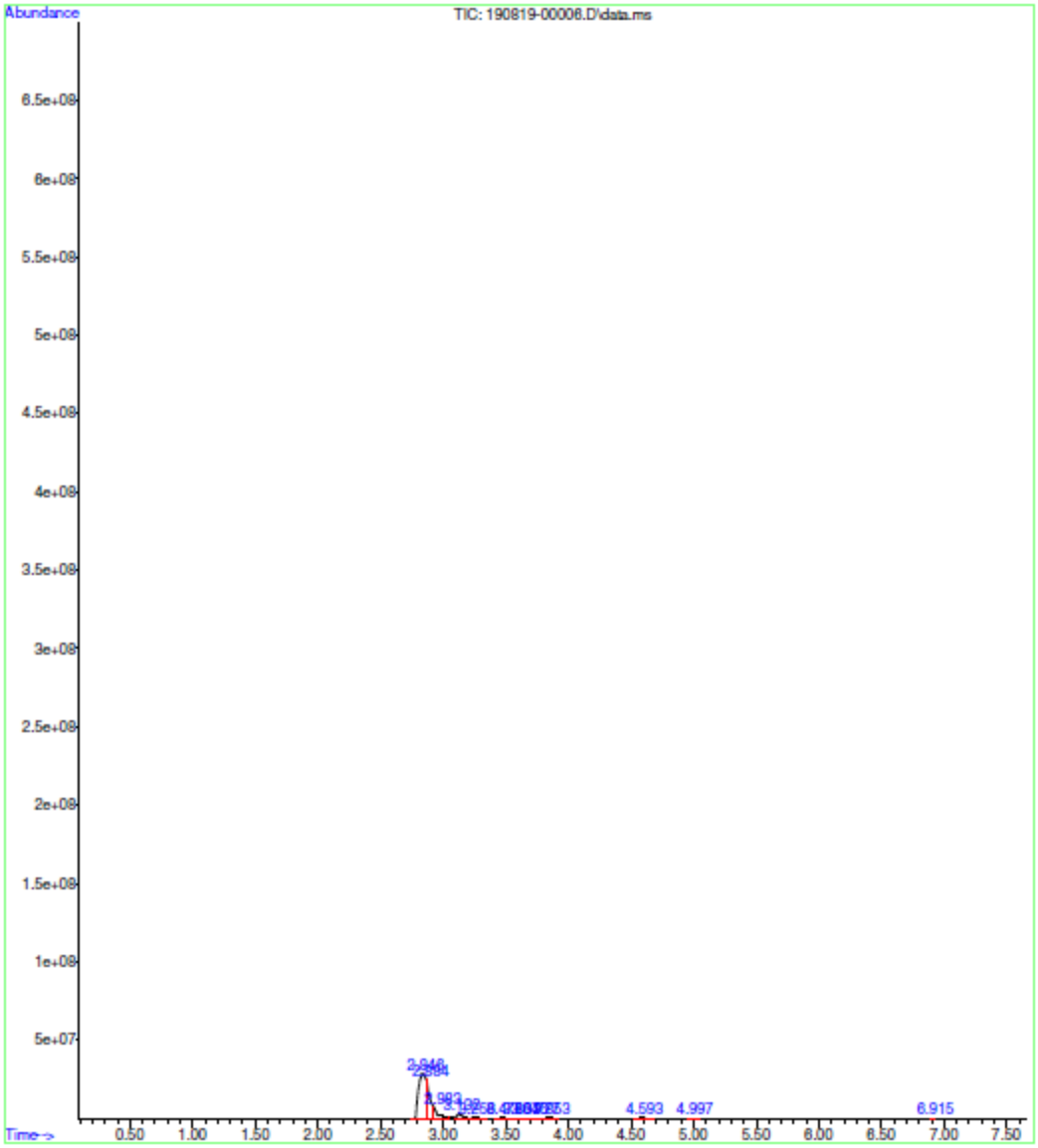
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 190. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 1 - Muestra 2



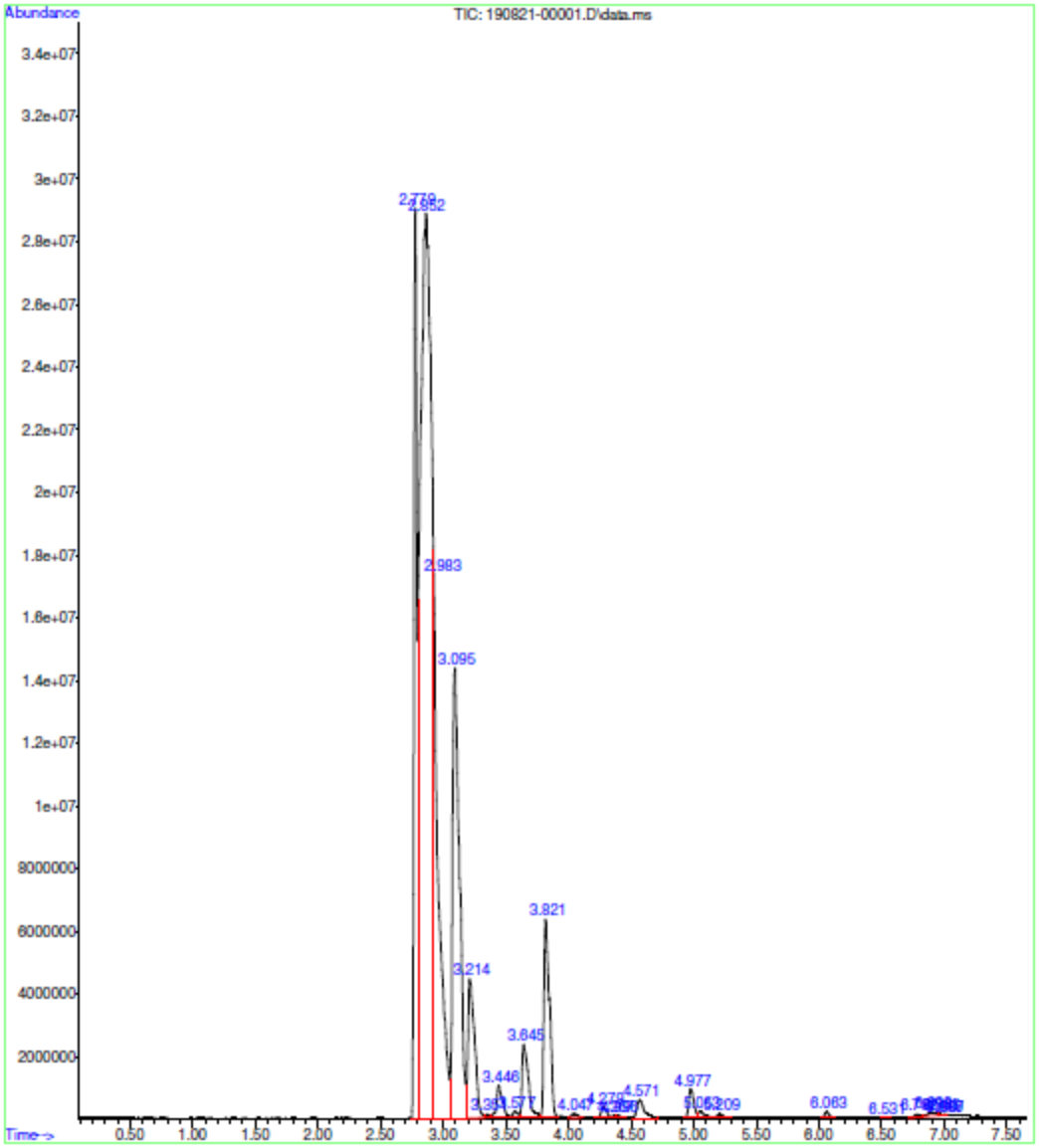
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 191. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 1 – Muestra 3



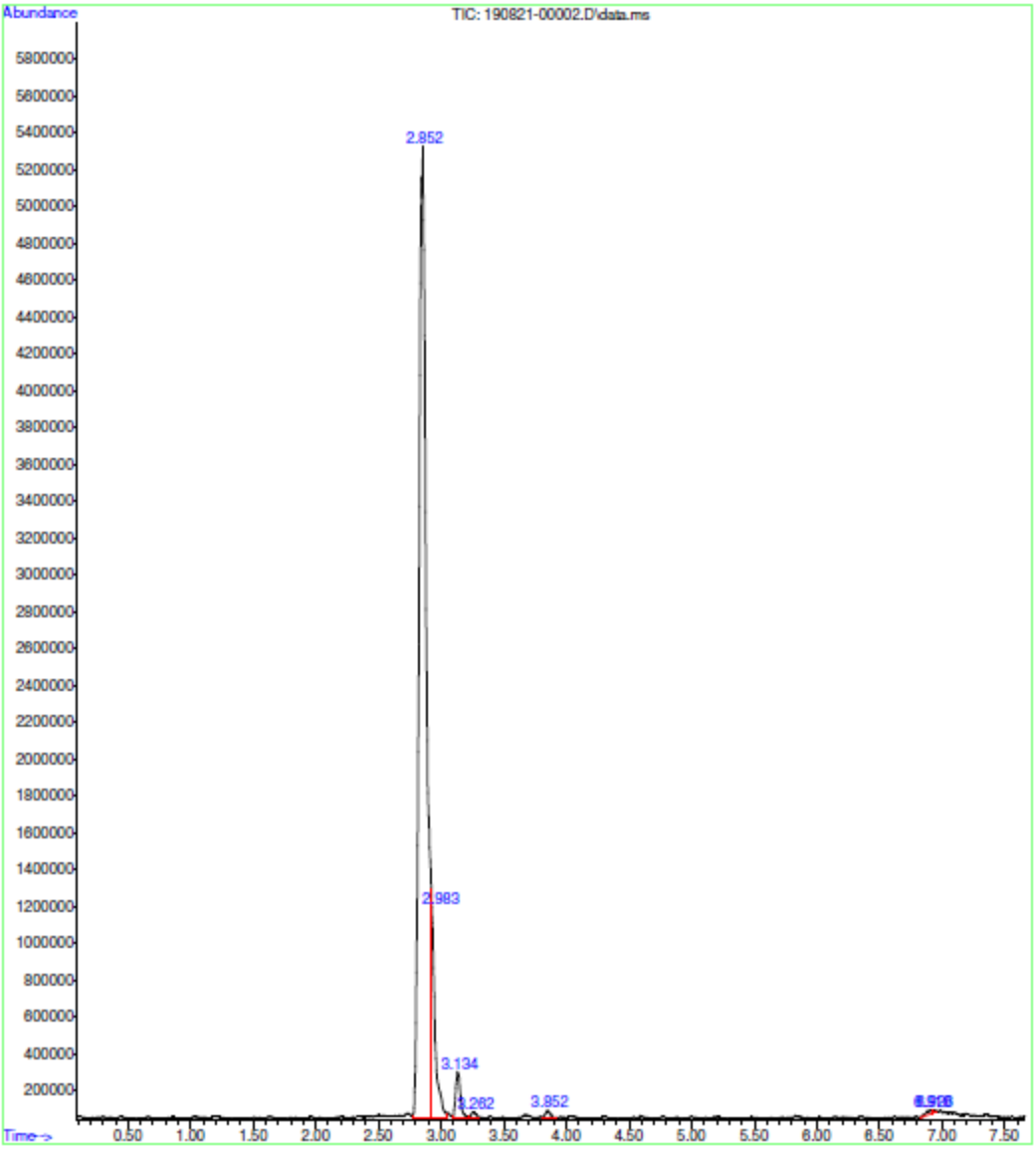
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 192. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 1.1



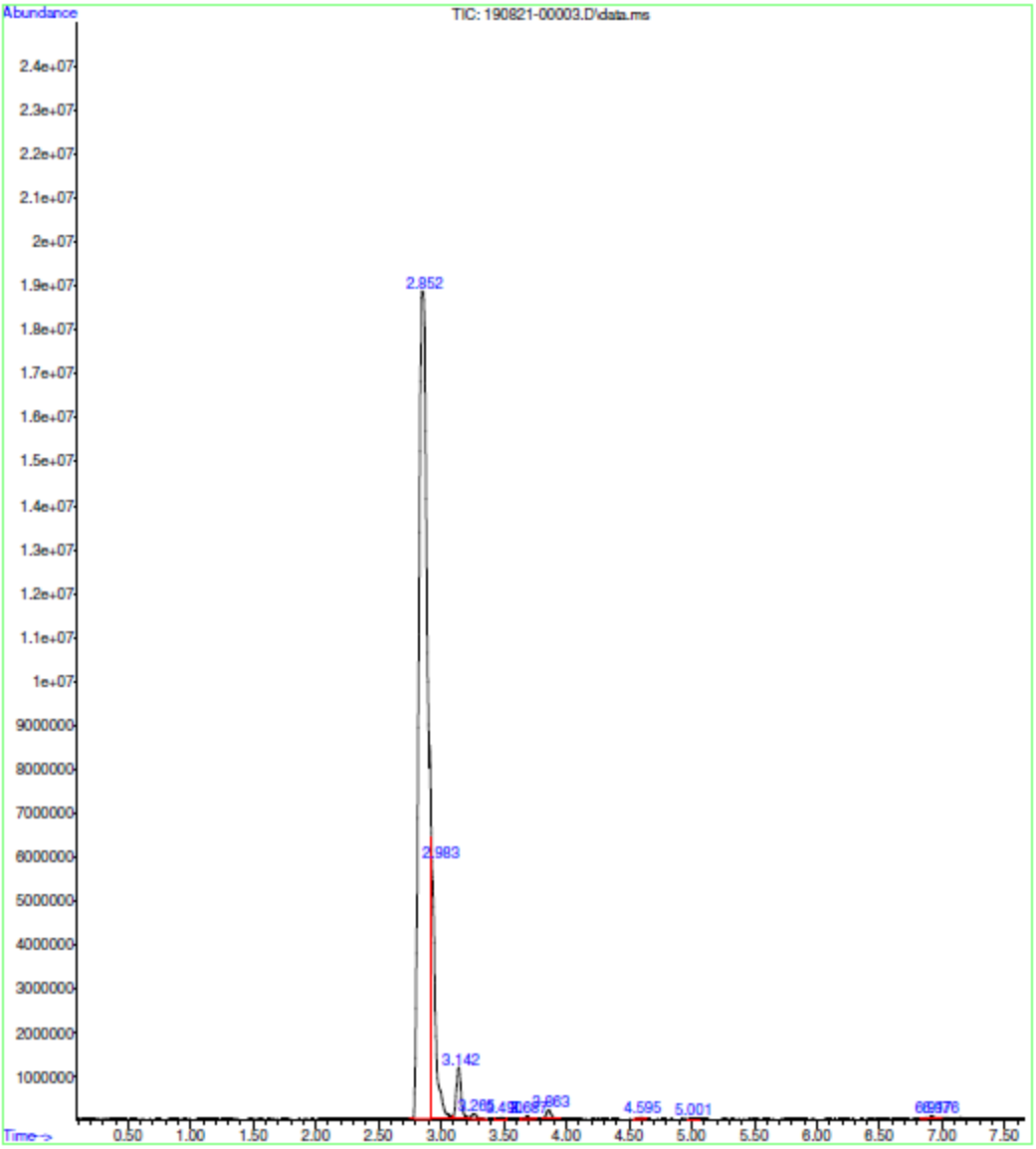
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 193. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 1.2



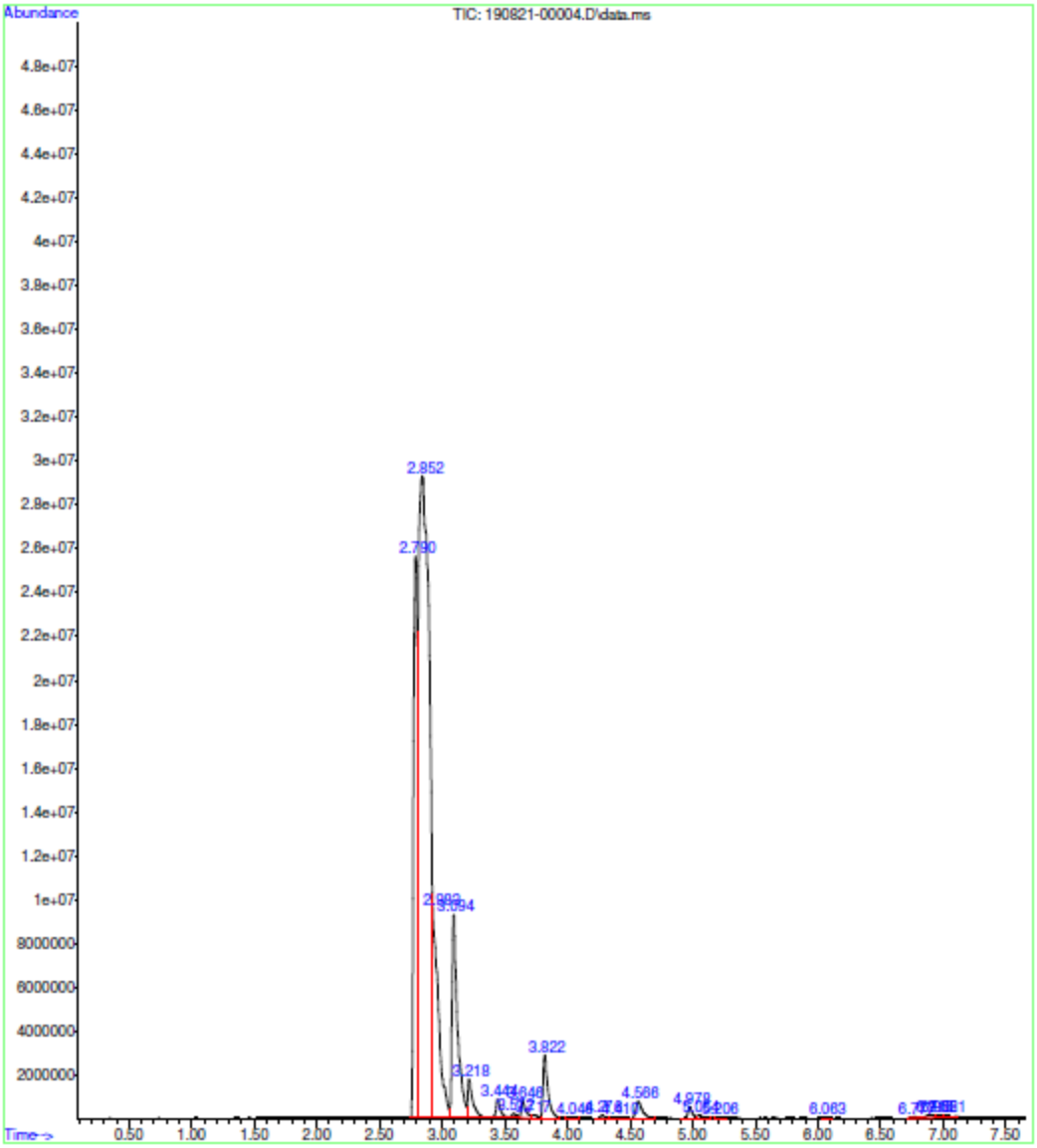
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 194. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 2.1



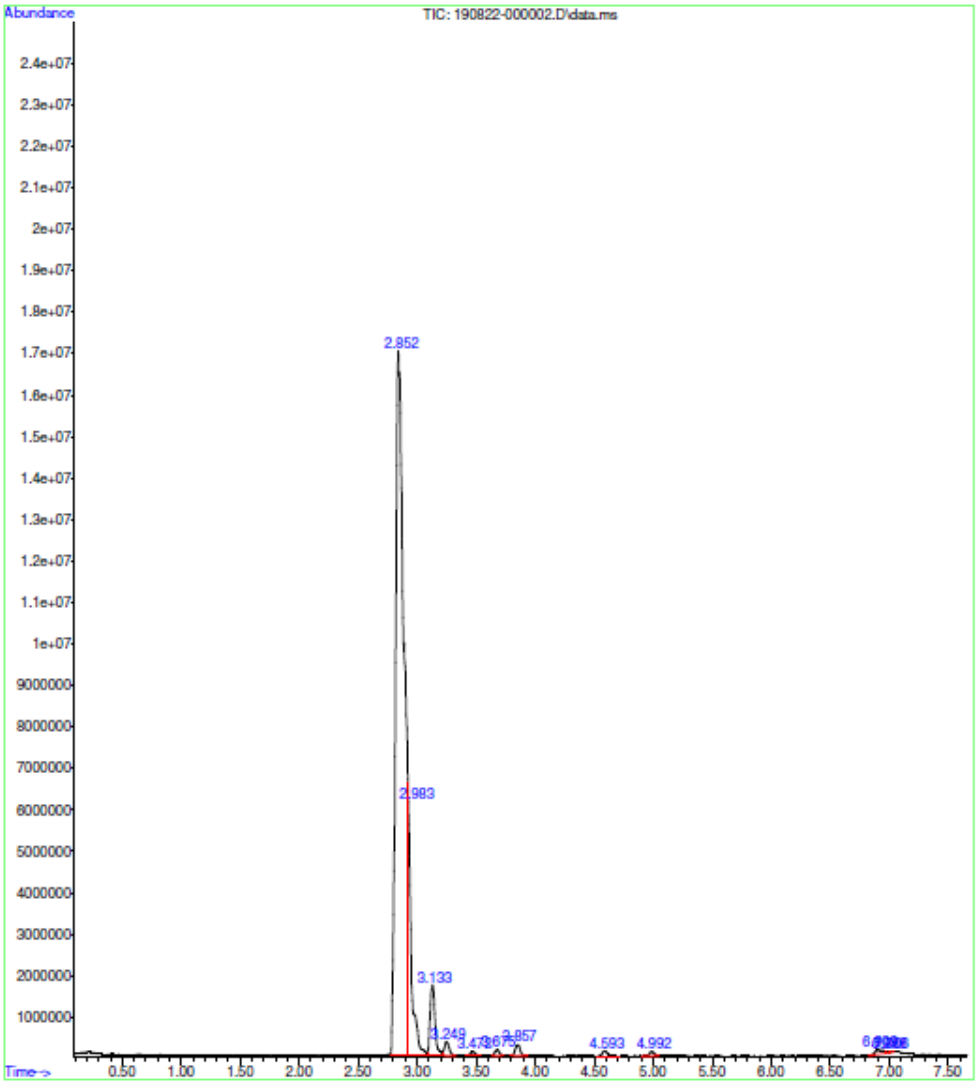
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 195. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 2.2



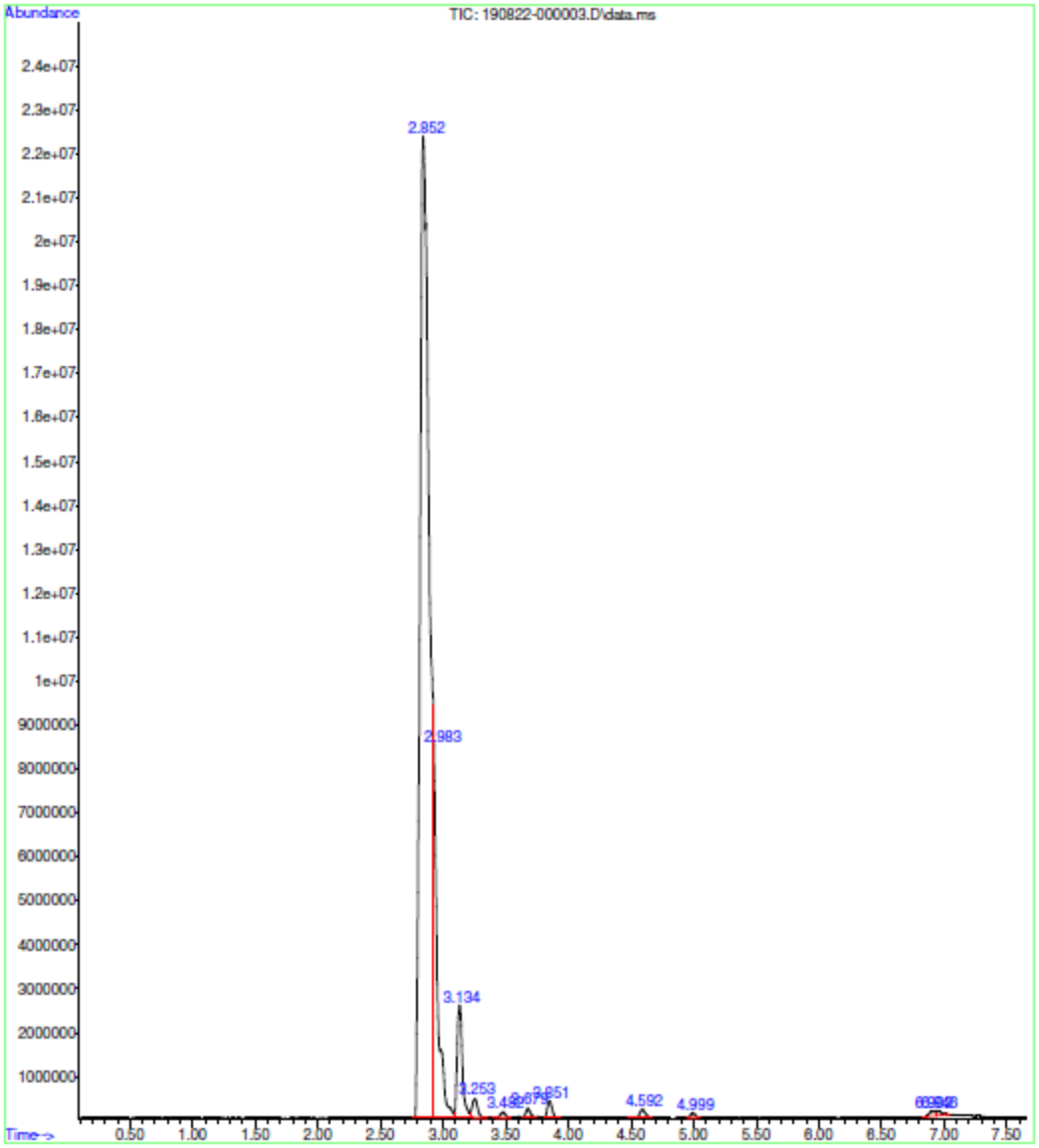
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 196. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 1.



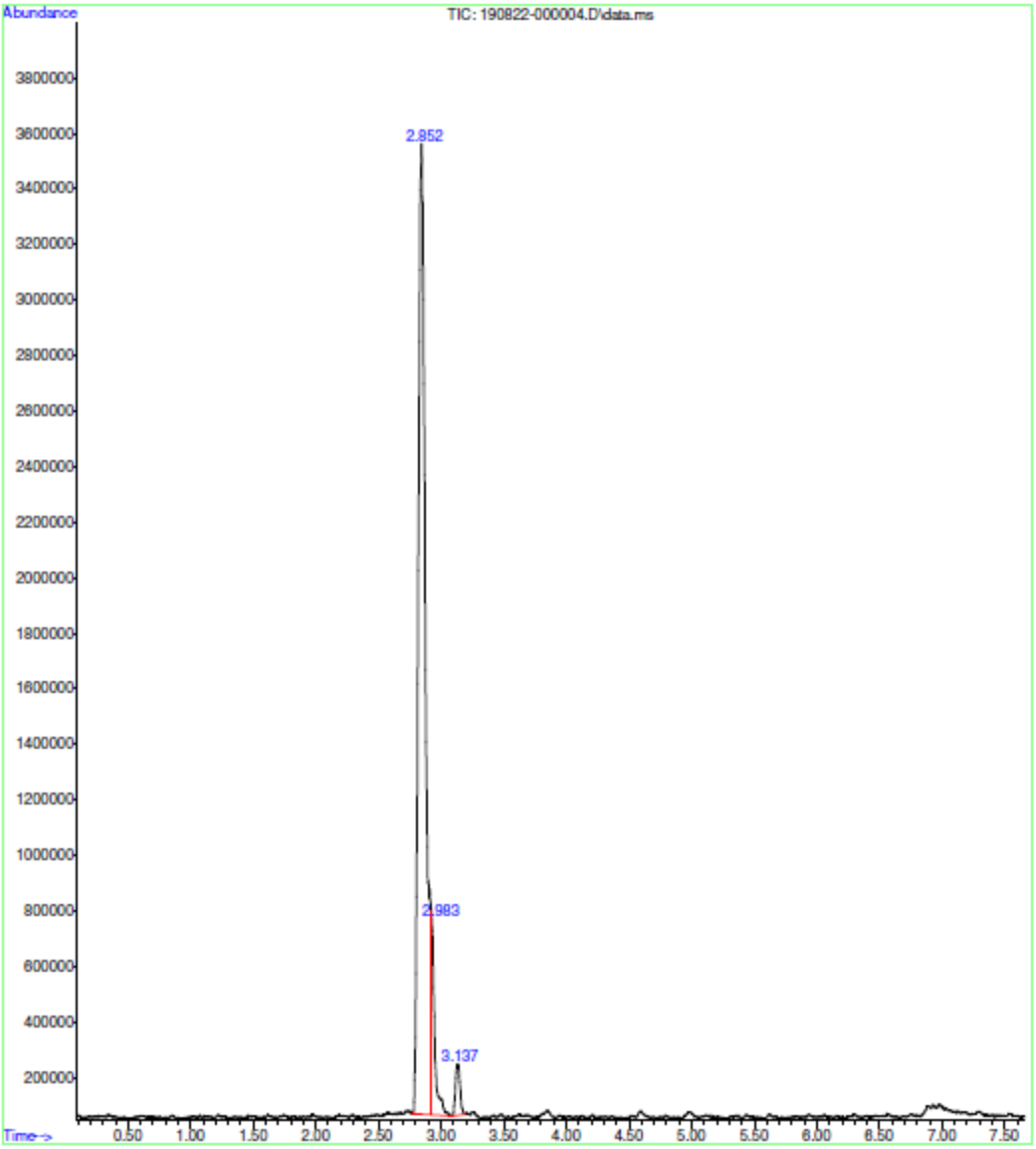
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 197. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 1.2



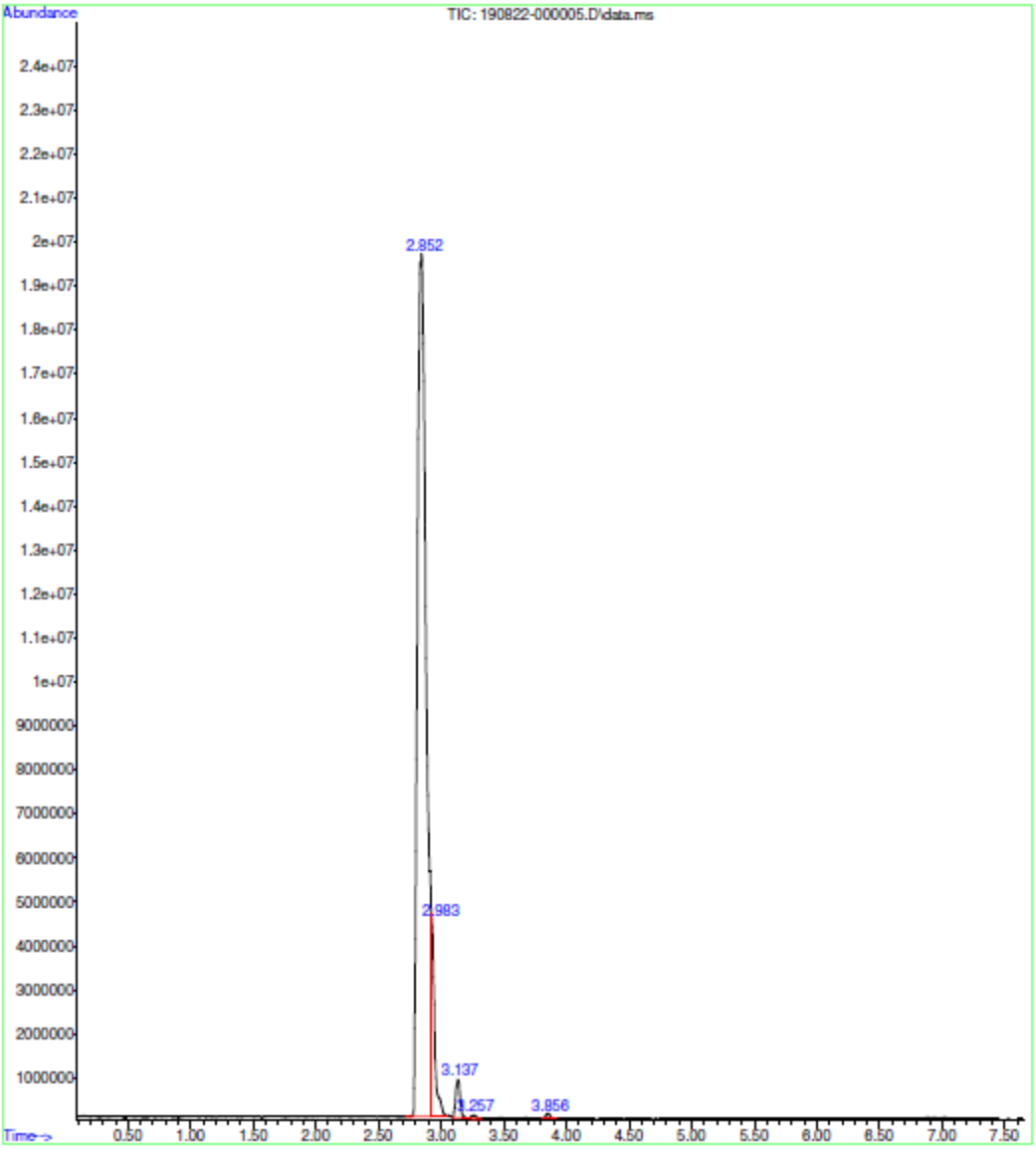
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 198. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 2.1



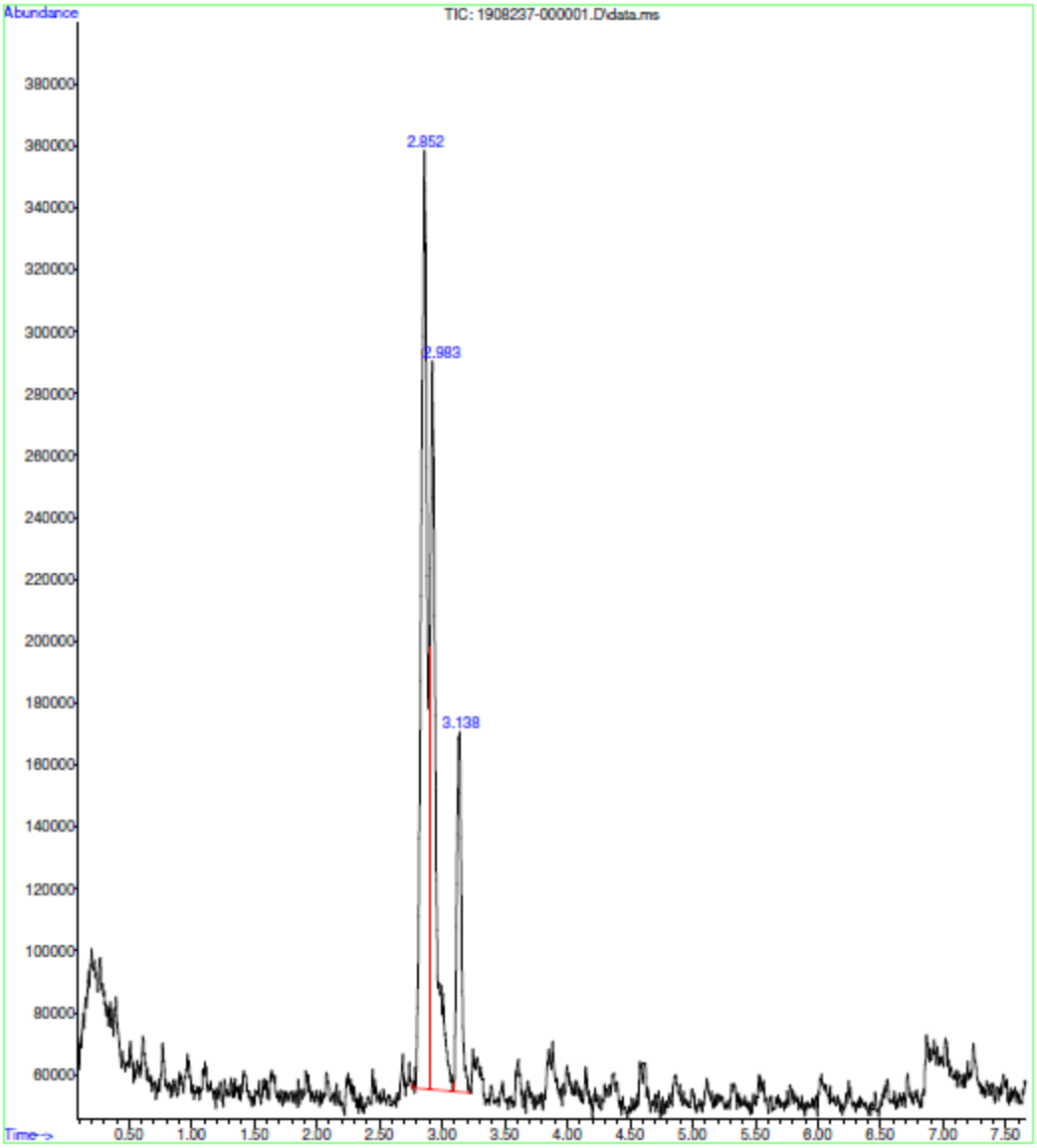
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 199. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 2.2



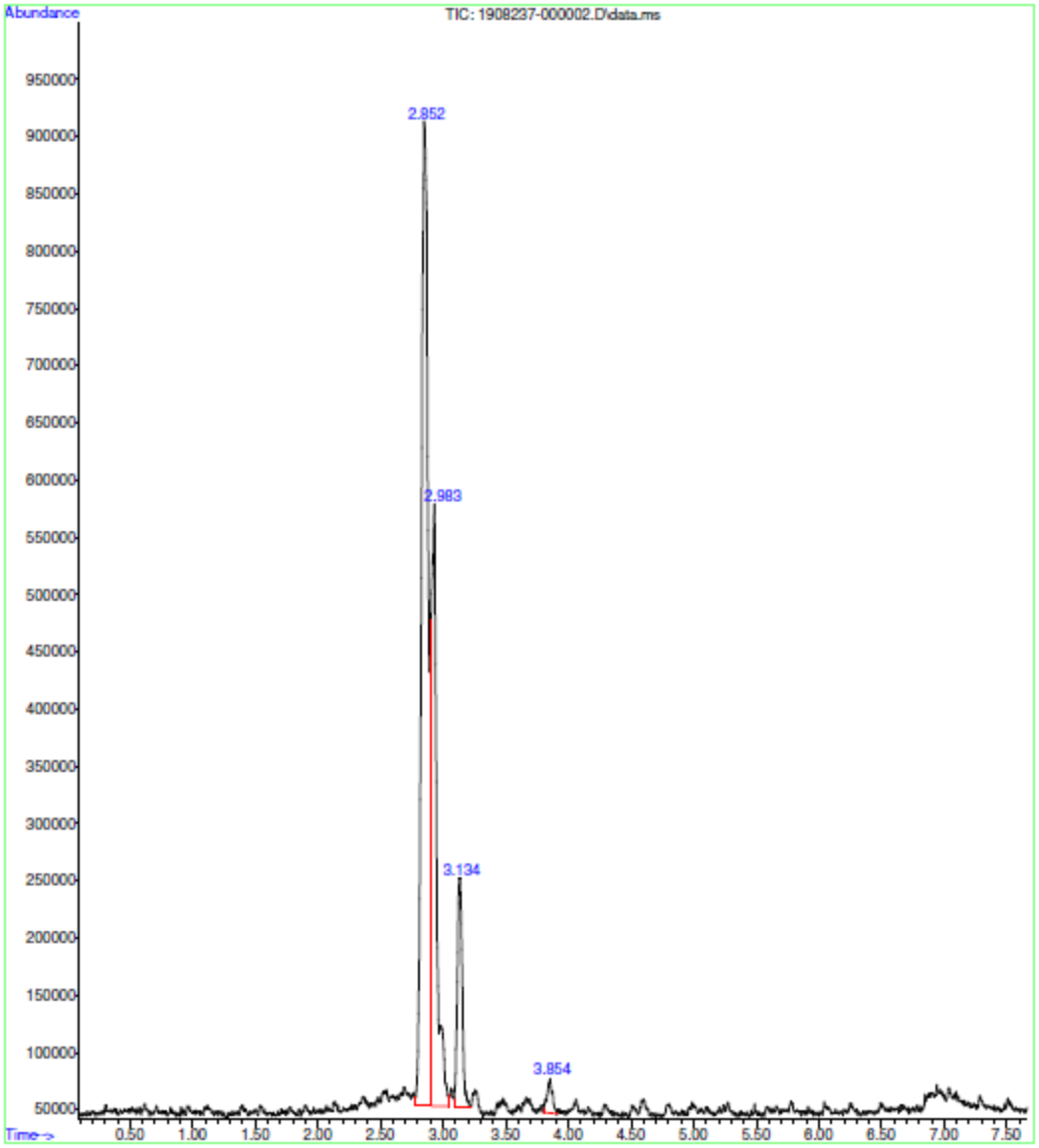
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 200. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 4 – Muestra 1.1



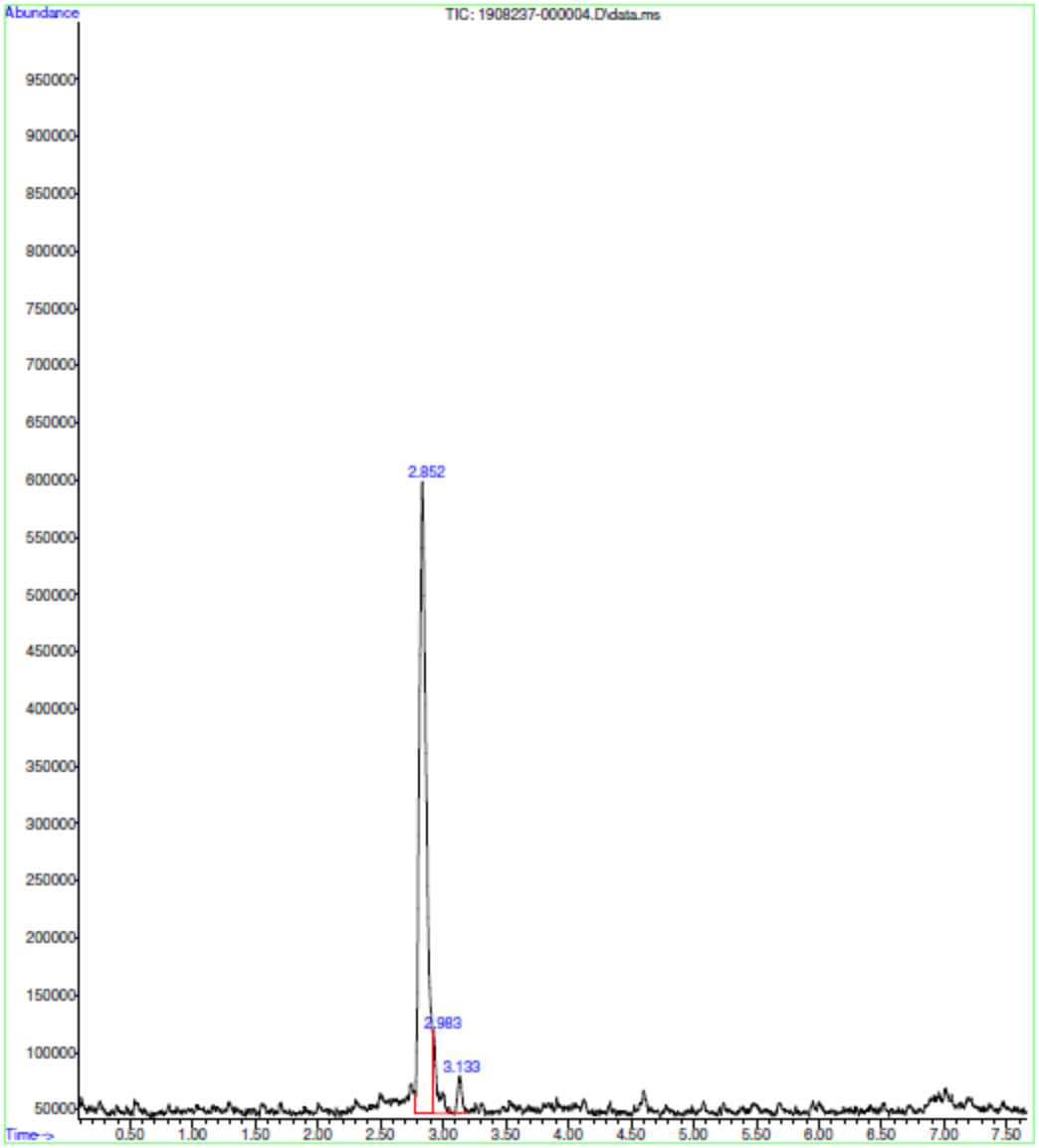
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 201. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 4 – Muestra 1.2



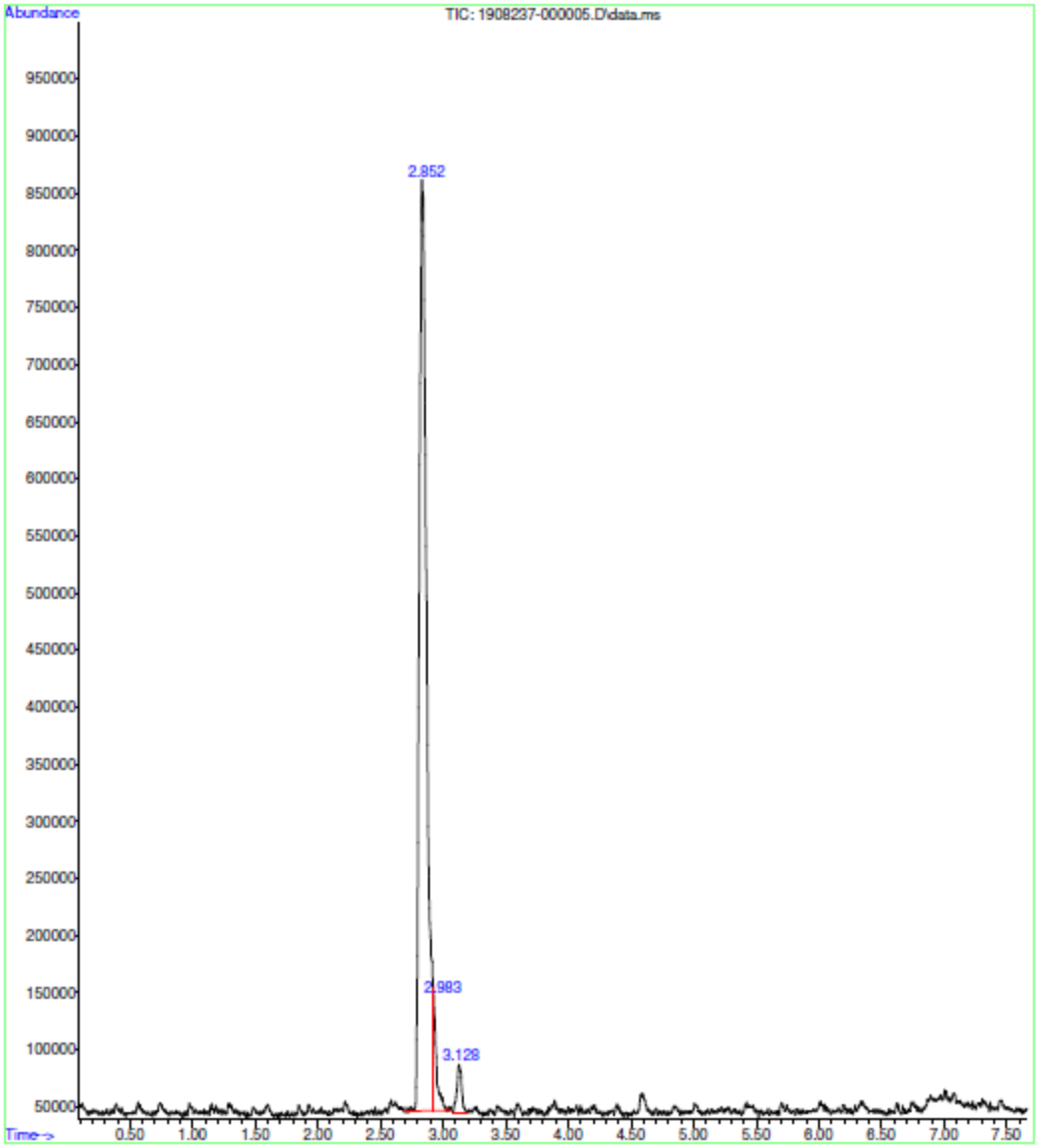
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 202. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 4 – Muestra 2.1



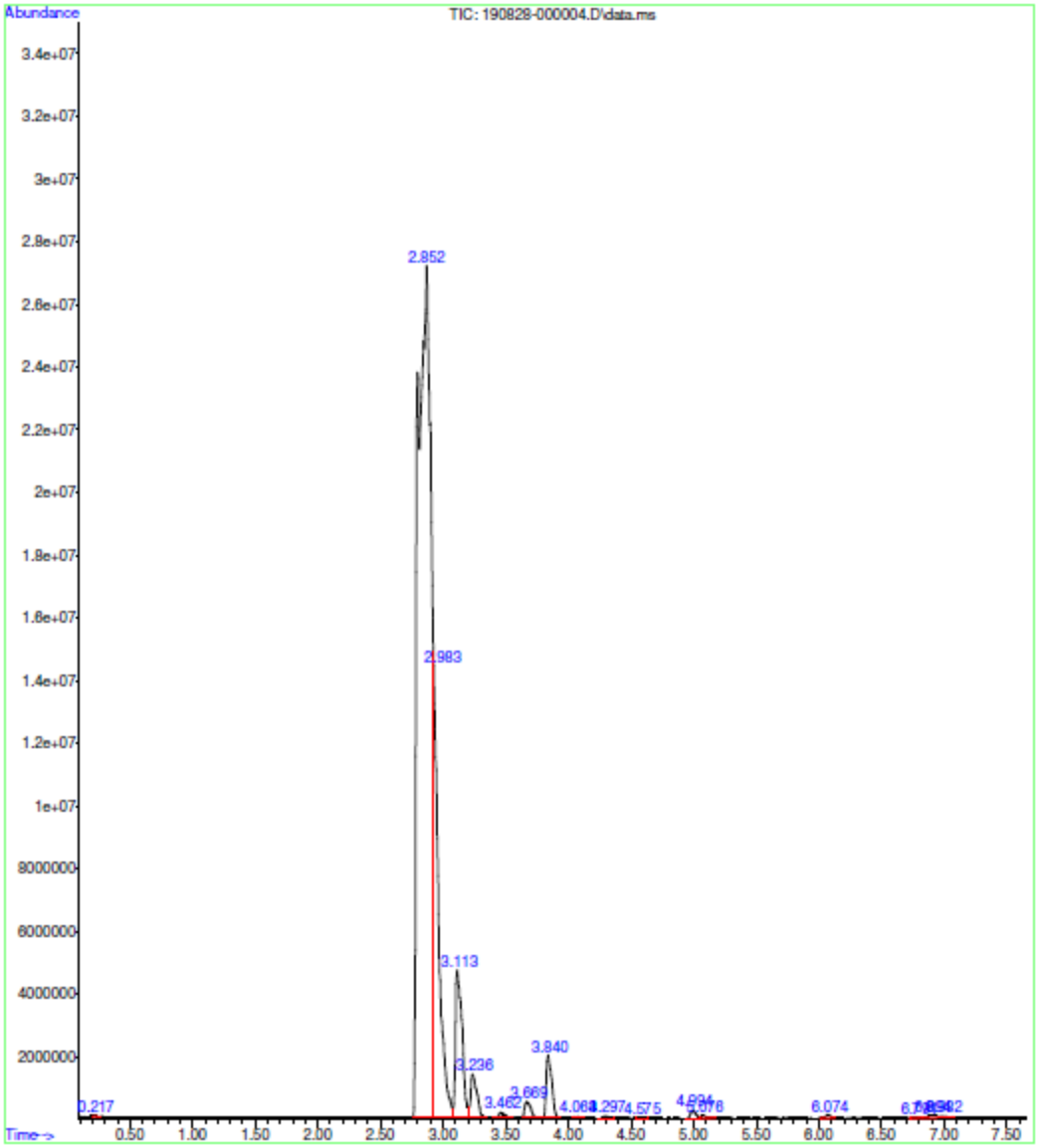
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 203. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 4 - Muestra 2.2



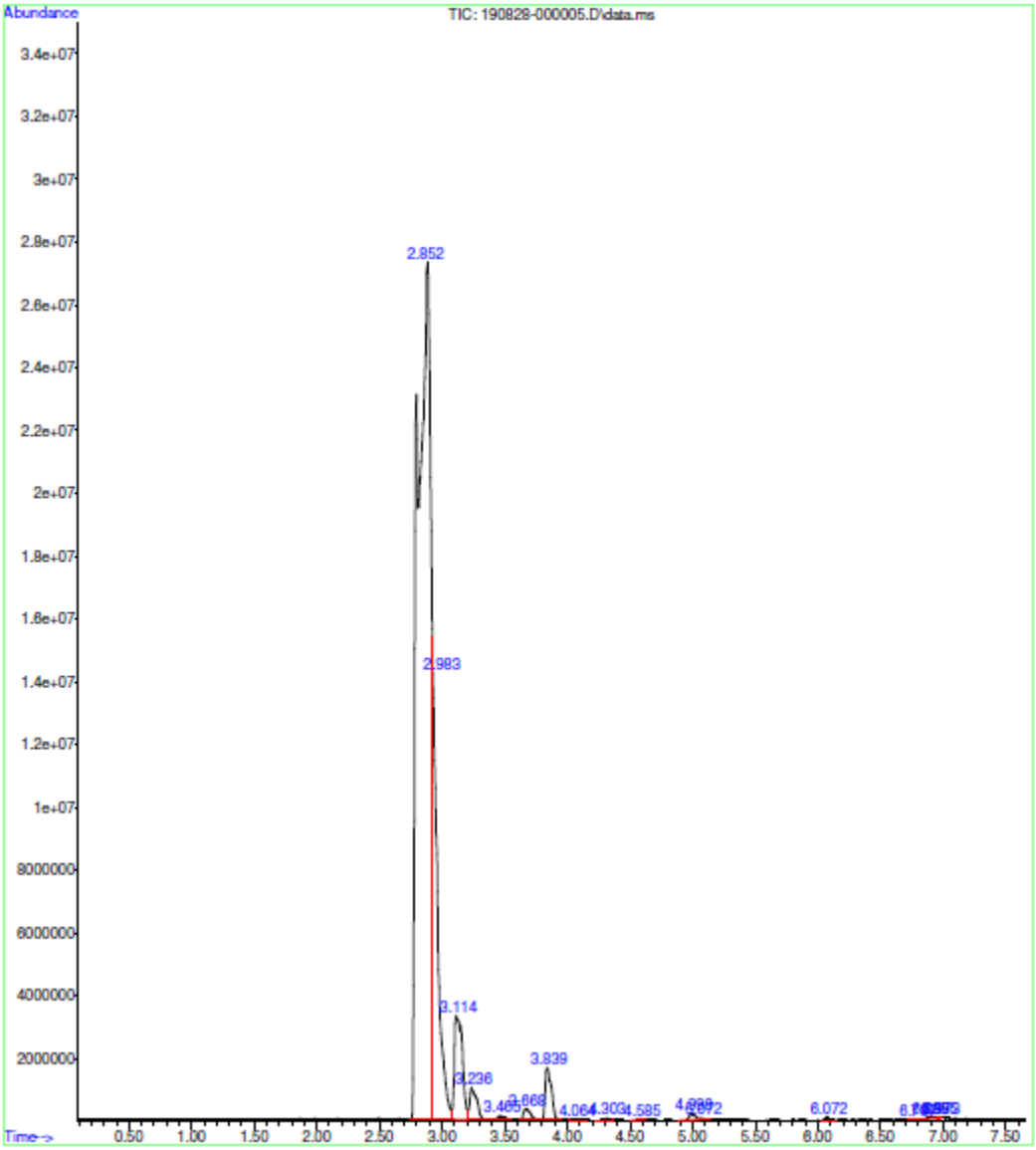
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 204. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 1.1



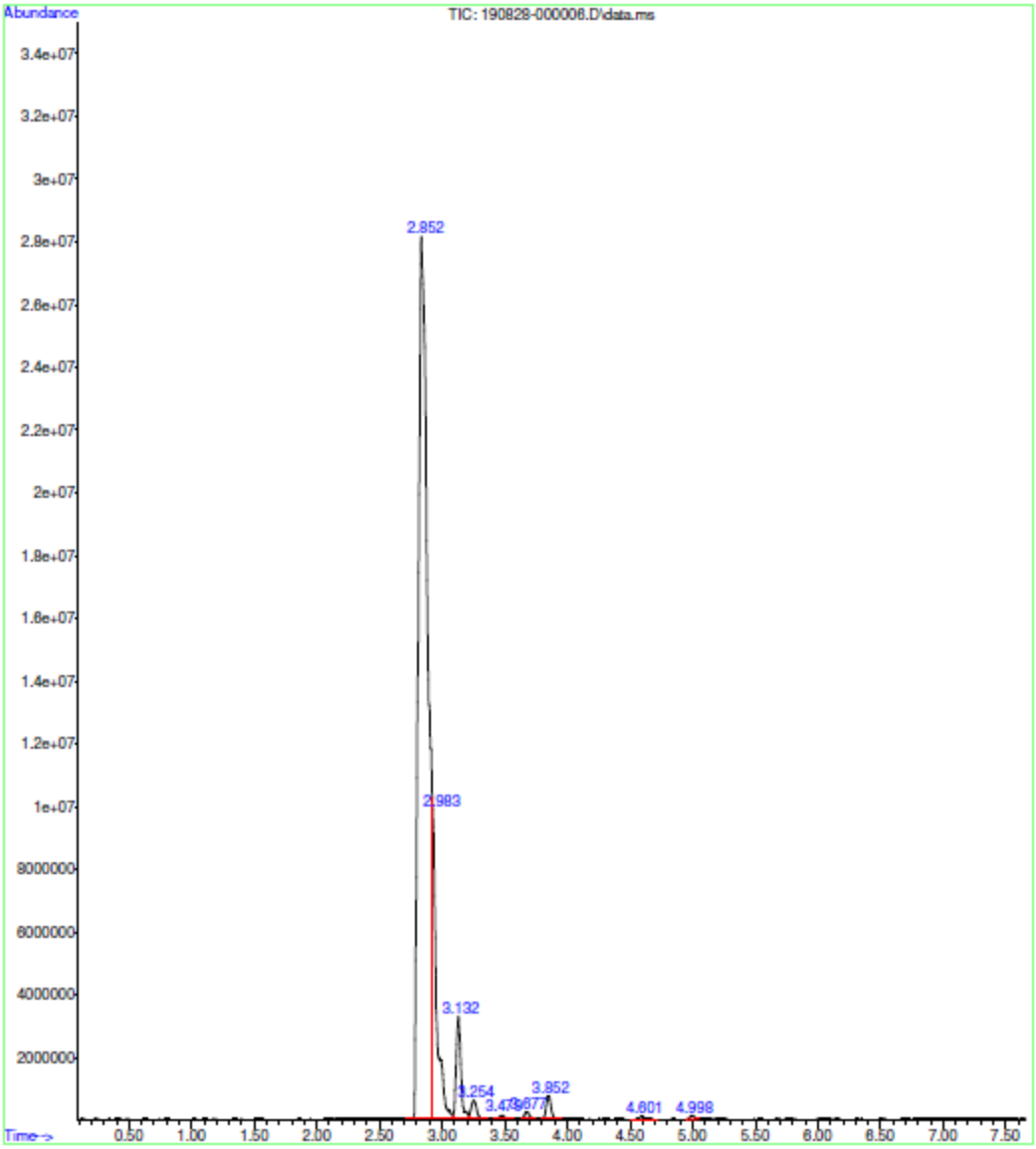
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 205. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 1.2



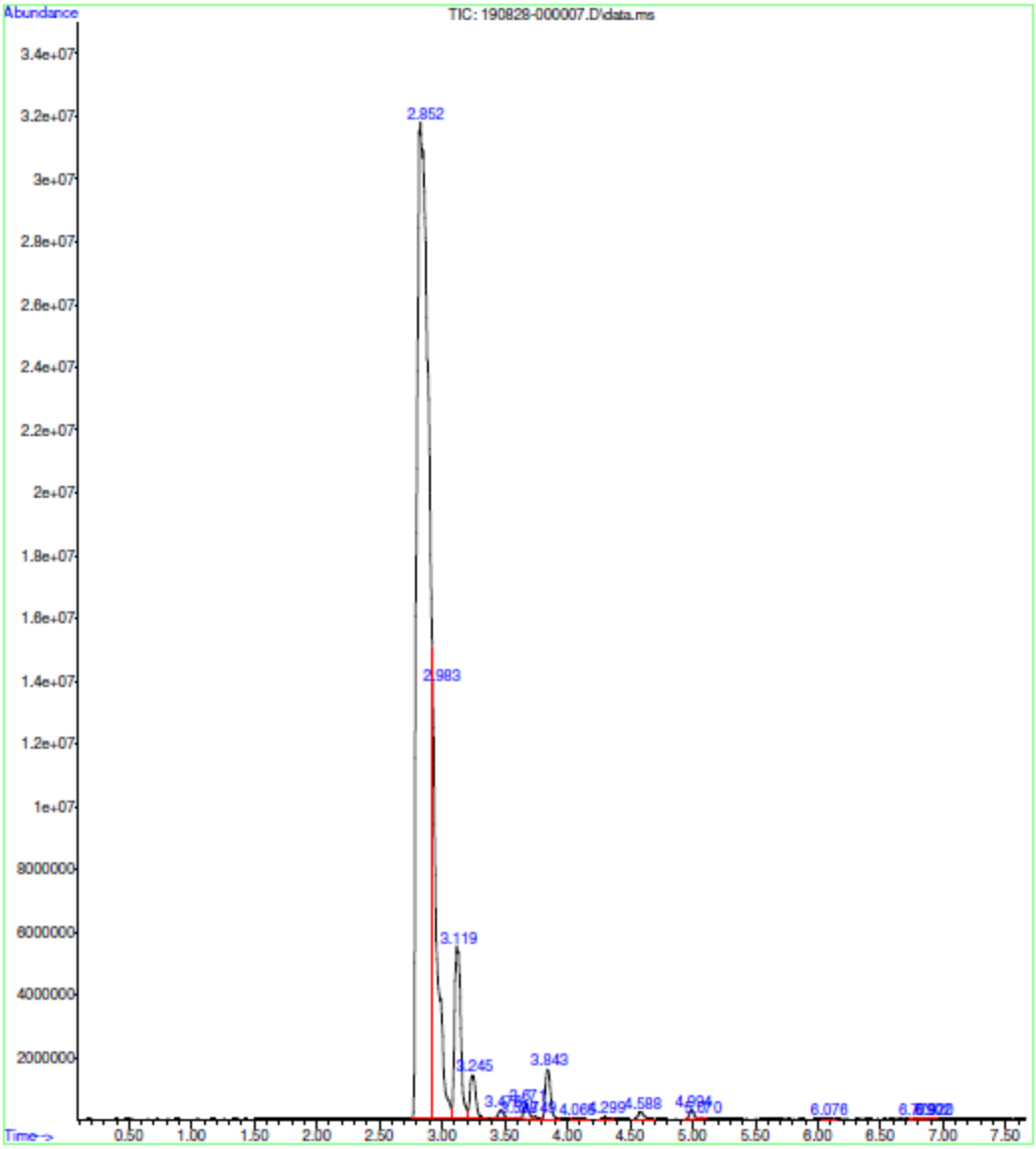
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 206. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 2.1



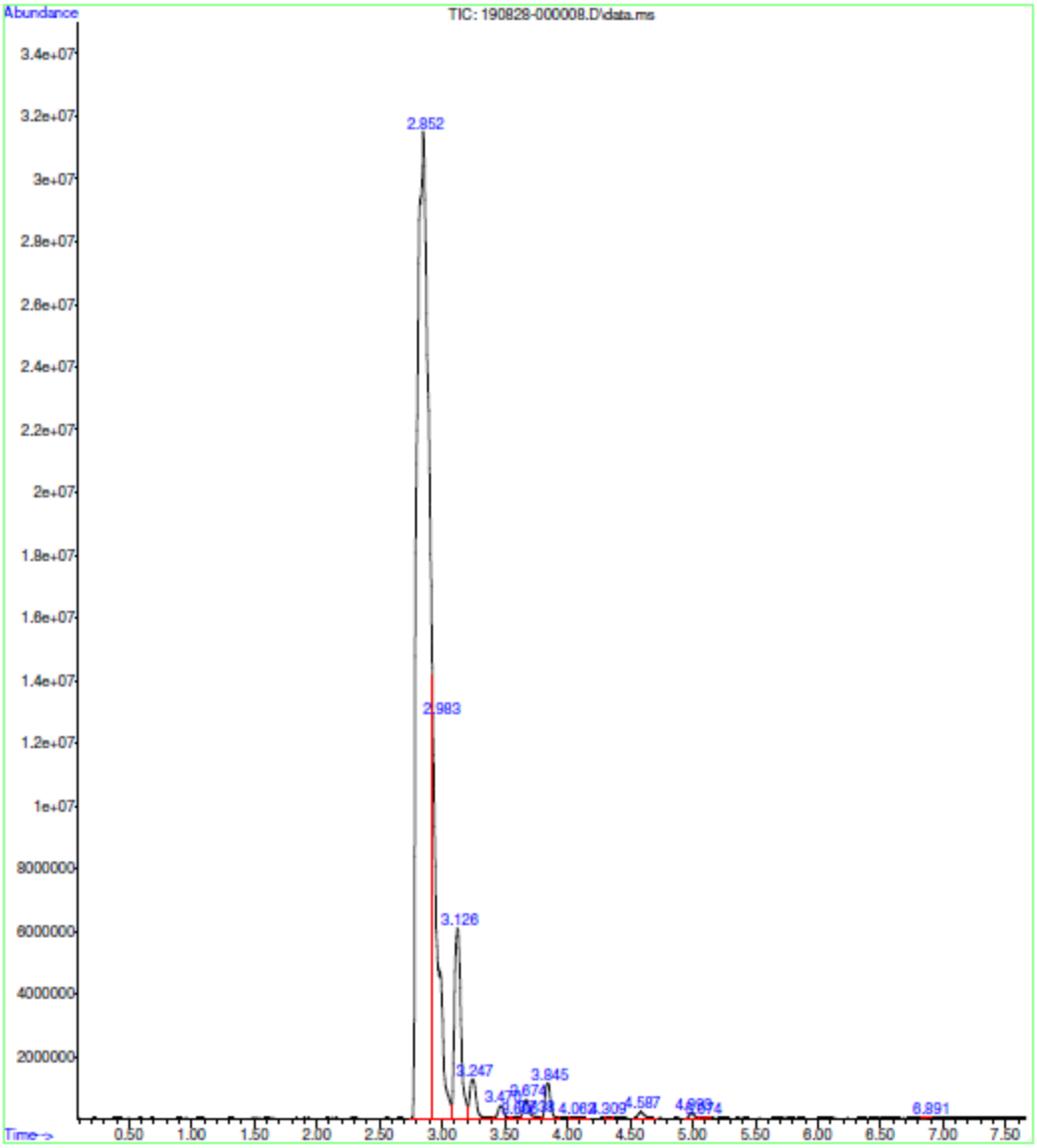
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 207. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 2.2



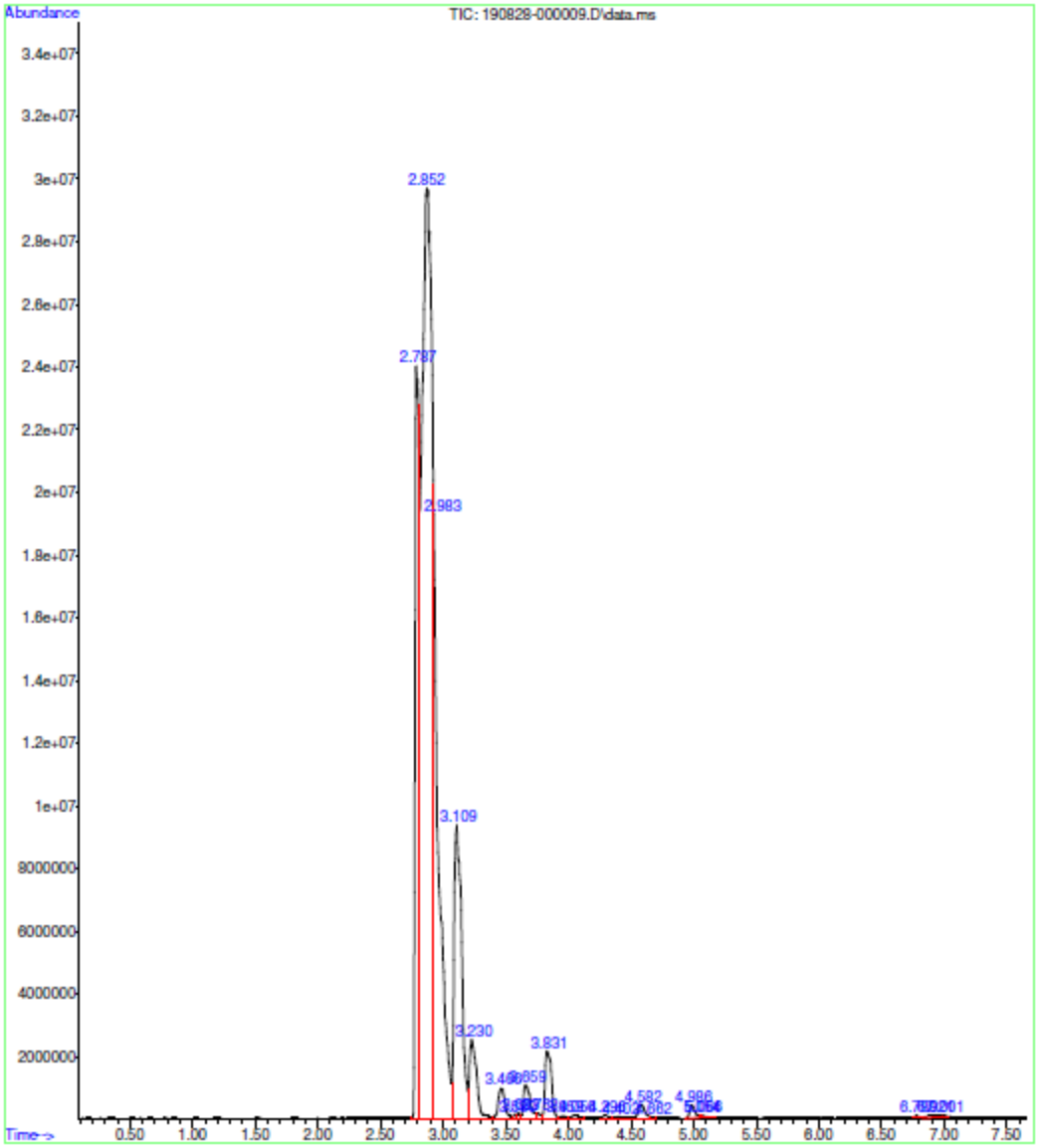
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 208. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 3.1



Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 209. Cromatograma del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 3.2



Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

2. Resultados de la cromatografía de gases del producto gaseoso: Composiciones

Cuadro 121. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 1 – Muestra 1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.7895	12.1575	Etano	84
2	2.8487	22.1662	2-metil-1-propeno	89
3	2.8850	24.4874	Propeno	80
4	2.9806	16.1507	2-penteno	87
5	3.1034	13.5087	2-metil-1-penteno	91
6	3.2262	2.3446	Acetaldehído	80
7	3.4536	1.0590	2,4-dimetil, 1,4-pentadieno	94
8	3.5946	0.3509	4-metil-heptano-	94
9	3.6538	1.2559	Propanal	87
10	3.8266	2.6658	Acetona	86
11	4.0540	0.0971	1-hepteno	81
12	4.2860	0.4508	Tetrahidrofurano	94
13	4.3679	0.0793	Butanal	76
14	4.3997	0.0799	Butanal	79
15	4.5817	1.2141	2,4-dimetil-1-hepteno	81
16	4.7454	0.0443	2-metil-2-hepteno	81
17	4.9865	0.6983	Alcohol isopropílico	86
18	5.0593	0.1337	Alcohol etílico	78
19	5.1002	0.1029	Alcohol etílico	74
20	5.2139	0.1817	Benceno	76
21	5.7916	0.0297	Butanal, 3-methyl-	72
22	6.0691	0.0583	Acetonitrilo	64
23	6.5331	0.0142	Propanonitrilo	58
24	6.7878	0.1035	1-Propanol	87
25	6.9060	0.3109	Agua	2
26	6.9924	0.0952	Agua	3
27	7.0516	0.0966	Agua	3
28	7.2745	0.0628	1,4-Dioxane	90

Cuadro 122. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 1 – Muestra 2

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8486	58.4764	2-metil-1-propeno	89
2	2.8850	25.8206	Propeno	80
3	2.9805	9.1210	2-penteno	90
4	3.1306	4.4998	2-metil-1-penteno	94
5	3.2534	0.5141	Acetaldehído	77
6	3.4809	0.2560	2,4-dimetil-1,4-pentadieno	87
7	3.6082	0.0693	4-metil-heptano-	90
8	3.6810	0.1762	Propanal	70
9	3.8493	0.5495	Acetona	80
10	4.3087	0.0410	Tetrahidrofurano	72
11	4.5998	0.3066	2,4-dimetil-1-hepteno	91
12	5.0001	0.0662	Alcohol isopropílico	90
13	6.8833	0.1034	Agua	2

Cuadro 123. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 1 – Muestra 3

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8485	60.0538	2-metil-1-propeno	89
2	2.8849	25.9913	Propeno	80
3	2.9804	7.8680	2-penteno	90
4	3.1305	4.1540	2-metil-1-penteno	94
5	3.2579	0.5155	Propano	79
6	3.4762	0.3188	2,4-dimetil-1,4-pentadieno	90
7	3.6036	0.0855	4-metil-heptano-	93
8	3.6764	0.1438	Propanal	87
9	3.7765	0.0415	4-metil-2-heptene	50
10	3.8538	0.3767	Acetona	86
11	4.5952	0.3796	2,4-dimetil-1-hepteno	95
12	4.9955	0.0662	Alcohol isopropílico	86
13	6.9150	0.0052	Agua	2

Cuadro 124. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 1.1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.7803	12.8486	Etano	89
2	2.8531	45.4505	Propeno	94
3	2.9805	12.5713	2-penteno	90
4	3.0942	14.1524	1-Pentene, 2-methyl	94
5	3.2125	4.2203	1-Pentene, 2-methyl	81
6	3.3535	0.0731	2-pentanol, formate	81
7	3.4444	0.9045	2,4-dimetil, 1,4-pentadieno	94
8	3.5763	0.1478	4-metil-heptano	91
9	3.6446	2.0903	Propanal	93
10	3.8220	5.1486	Acetona	90
11	4.0449	0.0959	Isopropilciclobutano	71
12	4.2768	0.2624	Tetrahidrofurano	91
13	4.3678	0.0903	Butanal	94
14	4.5725	0.5935	2,4-dimetil-1-hepteno	87
15	4.9773	0.6711	Alcohol isopropílico	86
16	5.0546	0.2000	Alcohol etílico	50
17	5.2093	0.1009	Benceno	92
18	6.0644	0.1218	Acetonitrilo	80
19	6.5284	0.0236	Propanonitrilo	58
20	6.7831	0.0659	1-Propanol	87
21	6.8968	0.1671	Agua	2

Cuadro 125. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 1.2

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8533	86.9748	Propeno	91
2	2.9806	9.1629	2-penteno	87
3	3.1353	2.6997	2-metil-1-penteno	94
4	3.2627	0.3952	Propano	72
5	3.8540	0.4574	Acetona	86
6	6.9107	0.3100	Agua	2

Cuadro 126. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 2.1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8531	84.4290	Propeno	94
2	2.9804	11.4422	2-penteno	90
3	3.1397	2.8339	2-metil-1-penteno	94
4	3.2670	0.3191	Propano	81
5	3.4899	0.1007	2,4-dimetil-1,4-pentadieno	81
6	3.6855	0.1059	Propanal	81
7	3.8629	0.5069	Acetona	86
8	4.5952	0.0794	2,4-dimetil-1-hepteno	95
9	5.0000	0.0677	Alcohol isopropílico	86
10	6.9150	0.1153	Agua	2

Cuadro 127. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 2 – Muestra 2.1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.7895	15.5402	Etano	84
2	2.8531	57.3093	Propeno	94
3	2.9805	10.1524	2-penteno	90
4	3.0942	9.1720	2-metil-1-penteno	94
5	3.2170	1.6547	Acetaldehído	80
6	3.4444	0.7061	2,4-dimetil, 1,4-pentadieno	94
7	3.5718	0.1649	4-metil-heptano-	91
8	3.6446	0.6009	Propanal	93
9	3.7174	0.1232	2,4-hexadieno	84
10	3.8220	2.4940	Acetona	90
11	4.0449	0.0551	Isopropylcyclobutane	71
12	4.2768	0.0905	Tetrahidrofurano	91
13	4.4088	0.0734	3-metil-4-noneno	83
14	4.5634	0.8759	2,4-dimetil-1-hepteno	93
15	4.9773	0.3921	Alcohol isopropílico	86
16	5.0547	0.1436	Alcohol etílico	64
17	5.2048	0.0475	Benceno	92
18	6.0645	0.0280	Acetonitrilo	58
19	6.7786	0.0444	1-Propanol	90
20	6.9151	0.3320	Agua	2

Cuadro 128. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 1.1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8531	80.7896	Propeno	94
2	2.9804	11.1489	2-penteno	90
3	3.1305	4.7169	2-metil-1-penteno	94
4	3.2488	0.8872	Acetaldehído	74
5	3.4717	0.2582	2,4-dimetil-1,4-pentadieno	87
6	3.6764	0.3327	Propanal	87
7	3.8583	0.6830	Acetona	86
8	4.5952	0.3600	2,4-dimetil-1-hepteno	95
9	4.9909	0.2606	Alcohol isopropílico	90
10	6.9105	0.5629	Agua	3

Cuadro 129. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 1.2

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8533	79.2430	Propeno	91
2	2.9807	12.4180	2-penteno	90
3	3.1353	5.1284	2-metil-1-penteno	94
4	3.2536	0.8958	Acetaldehído	74
5	3.4810	0.2299	2,4-dimetil-1,4-pentadieno	87
6	3.6766	0.3832	Propanal	87
7	3.8495	0.7055	Acetona	80
8	4.5909	0.3837	2,4-dimetil-1-hepteno	95
9	5.0003	0.1804	Alcohol isopropílico	86
10	6.9016	0.4320	Agua	3

Cuadro 130. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 2.1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8532	89.0953	Propeno	94
2	2.9806	7.9496	2-penteno	87
3	3.1352	2.9550	2-metil-1-penteno	94

Cuadro 131. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 3 – Muestra 2.2

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8532	90.1173	Propeno	94
2	2.9806	7.4014	2-penteno	87
3	3.1352	2.0145	2-metil-1-penteno	94
4	3.2580	0.1870	Propano	79
5	3.8539	0.2797	Acetona	80

Cuadro 132. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 4 – Muestra 1.1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8531	51.5304	Propeno	94
2	2.9804	33.7966	2-penteno	90
3	3.1397	14.6731	2-metil-1-penteno	94

Cuadro 133. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 4 – Muestra 1.2

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8531	60.7186	Propeno	94
2	2.9804	27.5690	2-penteno	90
3	3.1351	10.0522	2-metil-1-penteno	94
4	3.8538	1.6602	Acetona	86

Cuadro 134. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 4 – Muestra 2.1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8533	90.6842	Propeno	91
2	2.9806	6.1464	2-penteno	87
3	3.1353	3.1694	2-metil-1-penteno	94

Cuadro 135. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 4 – Muestra 2.2

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8532	92.3297	Propeno	94
2	2.9806	4.6421	2-penteno	87
3	3.1262	3.0283	2-metil-1-penteno	94

Cuadro 136. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 1.1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	0.2149	0.0144	4-(2-Metilamino) etil) piridina	35
2	2.8531	72.6469	Propeno	94
3	2.9804	15.0911	2-penteno	90
4	3.1124	6.5166	2-metil-1-penteno	91
5	3.2352	1.7885	Acetaldehído	87
6	3.4626	0.2113	2,4-dimetil-1,4-pentadieno	90
7	3.6673	0.6599	Propanal	94
8	3.8402	2.2759	Acetona	86
9	4.0630	0.0528	1-hepteno	79
10	4.2950	0.0726	Tetrahidrofurano	93
11	4.5770	0.0676	2,4-dimetil-1-hepteno	87
12	4.9955	0.2607	Alcohol isopropílico	86
13	5.0774	0.0909	Alcohol etílico	58
14	6.0735	0.0923	Acetonitrilo	98
15	6.7922	0.0174	1-Propanol	91
16	6.8923	0.1077	Agua	4
17	6.9833	0.0335	Agua	3

Cuadro 137. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 1.2

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8531	73.9496	Propeno	94
2	2.9805	15.3808	2-penteno	90
3	3.1124	5.6879	2-metil-1-penteno	91
4	3.2352	1.5161	Acetaldehído	87
5	3.4672	0.1708	2,4-dimetil-1,4-pentadieno	90
6	3.6674	0.4975	Propanal	94
7	3.8402	2.1523	Acetona	86
8	4.0631	0.0378	1-hepteno	79
9	4.3042	0.0796	Tetrahidrofurano	81
10	4.5862	0.0259	2,4-dimetil-1-hepteno	91
11	4.9956	0.2466	Alcohol isopropílico	90
12	5.0729	0.0683	Alcohol etílico	52
13	6.0736	0.0659	Acetonitrilo	49
14	6.7877	0.0118	1-Propanol	87
15	6.8878	0.0958	Agua	3
16	6.9560	0.0093	Agua	9
17	6.9742	0.0040	Agua	2

Cuadro 138. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 2.1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8533	80.4670	Propeno	94
2	2.9807	12.0358	2-penteno	90
3	3.1308	4.7034	2-metil-1-penteno	94
4	3.2536	0.9856	Acetaldehído	74
5	3.4810	0.1696	2,4-dimetil-1,4-pentadieno	87
6	3.6766	0.3248	Propanal	87
7	3.8540	1.0443	Acetona	86
8	4.6000	0.1481	2,4-dimetil-1-hepteno	90
9	5.0003	0.1214	Alcohol isopropílico	86

Cuadro 139. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 2.2

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8532	75.5926	Propeno	94
2	2.9805	12.6139	2-penteno	90
3	3.1215	6.8129	2-metil-1-penteno	91
4	3.2443	1.6355	Acetaldehído	74
5	3.4763	0.3229	2,4-dimetil-1,4-pentadieno	90
6	3.5991	0.0559	4-metil-heptano-	76
7	3.6719	0.5063	Propanal	93
8	3.7493	0.0542	1,3-Hexadieno	70
9	3.8448	1.6432	Acetona	86
10	4.0677	0.0563	1-hepteno	79
11	4.2996	0.0667	Tetrahidrofurano	87
12	4.5862	0.2661	2,4-dimetil-1-hepteno	91
13	4.9956	0.2537	Alcohol isopropílico	90
14	5.0683	0.0309	Alcohol etílico	50
15	6.0736	0.0297	Acetonitrilo	98
16	6.7786	0.0256	1-Propanol	90
17	6.9014	0.0227	Agua	2
18	6.9196	0.0107	Agua	2

Cuadro 140. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 3.1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.8531	74.6704	Propeno	94
2	2.9805	13.1330	2-penteno	90
3	3.1261	7.7202	2-metil-1-penteno	91
4	3.2489	1.5684	Acetaldehído	74
5	3.4717	0.4487	2,4-dimetil-1,4-pentadieno	87
6	3.6037	0.0576	4-metil-heptano-	90
7	3.6764	0.6165	Propanal	87
8	3.7401	0.0667	4-metil-1,3-pentadieno	93
9	3.8447	1.1966	Acetona	86
10	4.0631	0.0613	1-hepteno	79

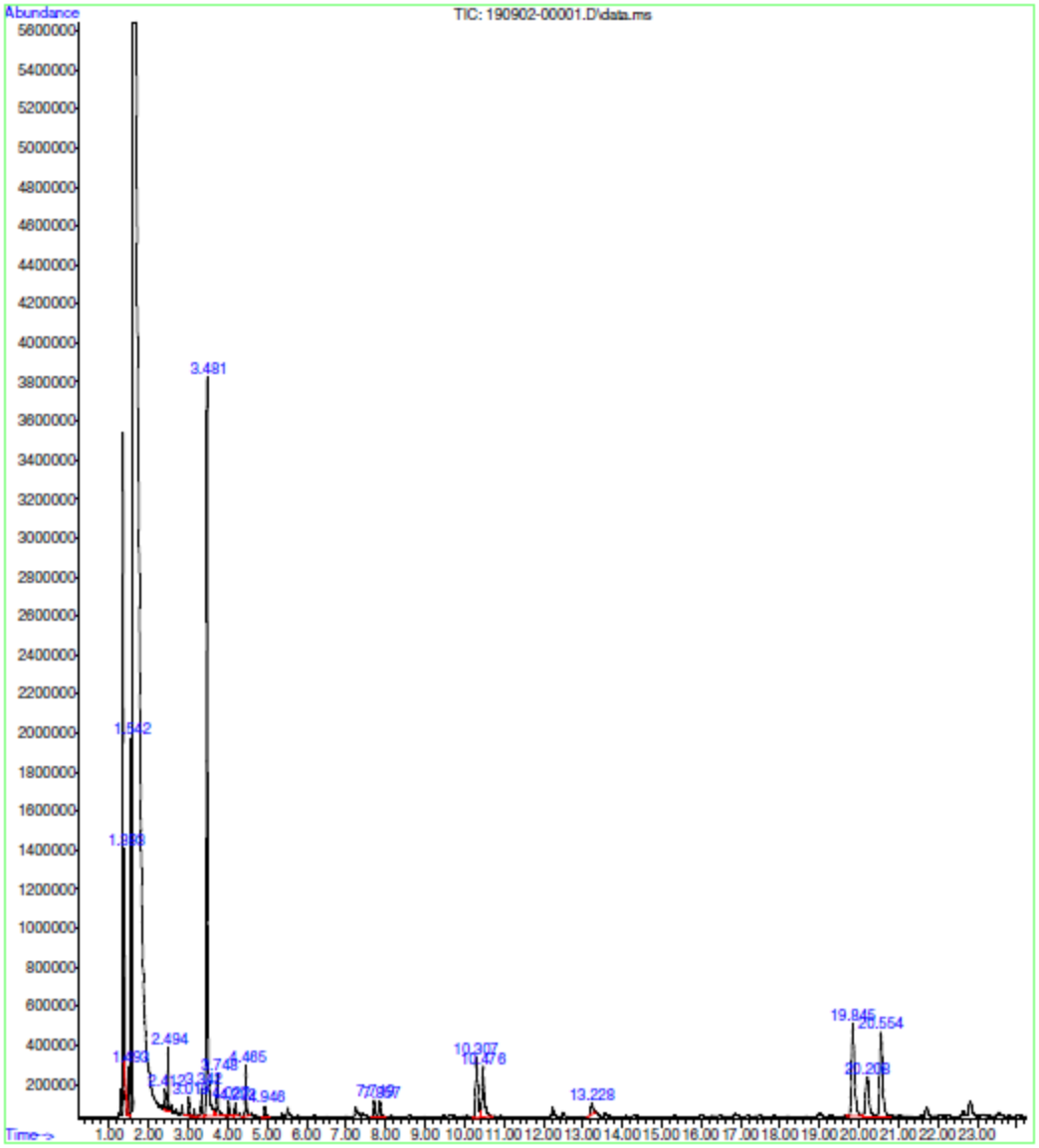
No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
11	4.3087	0.0305	Tetrahidrofurano	72
12	4.5861	0.2393	2,4-dimetil-1-hepteno	93
13	4.9910	0.1559	Alcohol isopropílico	90
14	5.0729	0.0308	Alcohol etílico	52
15	6.8923	0.0041	Agua	4

Cuadro 141. Composiciones porcentuales del producto gaseoso: Corrida 5 – Muestra 3.2

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	2.7894	11.1455	Etano	84
2	2.8531	52.4465	Propeno	94
3	2.9805	16.4595	2-penteno	90
4	3.1078	11.2983	2-metil-1-penteno	91
5	3.2306	2.8115	Acetaldehído	86
6	3.4672	0.9998	2,4-dimetil-1,4-pentadieno	90
7	3.5809	0.0526	4-metil-heptano-	91
8	3.6036	0.0743	4-metil-heptano-	93
9	3.6582	1.1241	Propanal	87
10	3.7583	0.0816	2,4-hexadieno	92
11	3.8311	2.1720	Acetona	86
12	3.9584	0.0589	3-Hexyne, 2-methyl-	90
13	4.0540	0.0911	1-hepteno	81
14	4.2950	0.0653	Tetrahidrofurano	93
15	4.4042	0.0815	3-metil-4-noneno	83
16	4.5816	0.4468	2,4-dimetil-1-hepteno	91
17	4.6635	0.0234	2,4-dimetil-1-hepteno	90
18	4.9864	0.3303	Alcohol isopropílico	86
19	5.0546	0.0188	Alcohol etílico	64
20	5.0683	0.0601	Alcohol etílico	50
21	6.7786	0.0419	1-Propanol	90
22	6.9196	0.0976	Agua	2
23	7.0015	0.0188	Agua	2

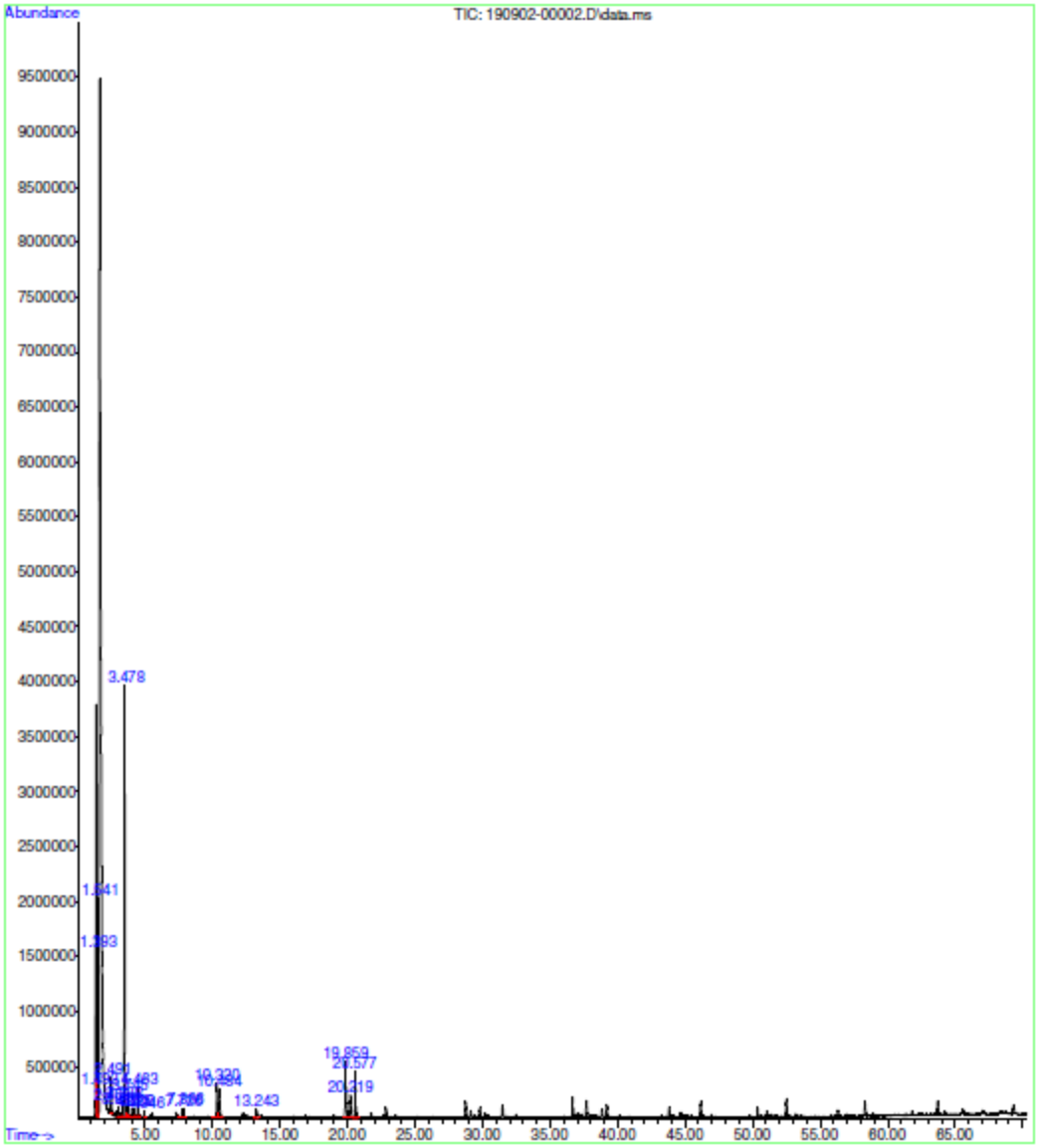
3. Resultados de la cromatografía de gases del producto líquido libre de solvente: Cromatogramas

Figura 210. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestra 1



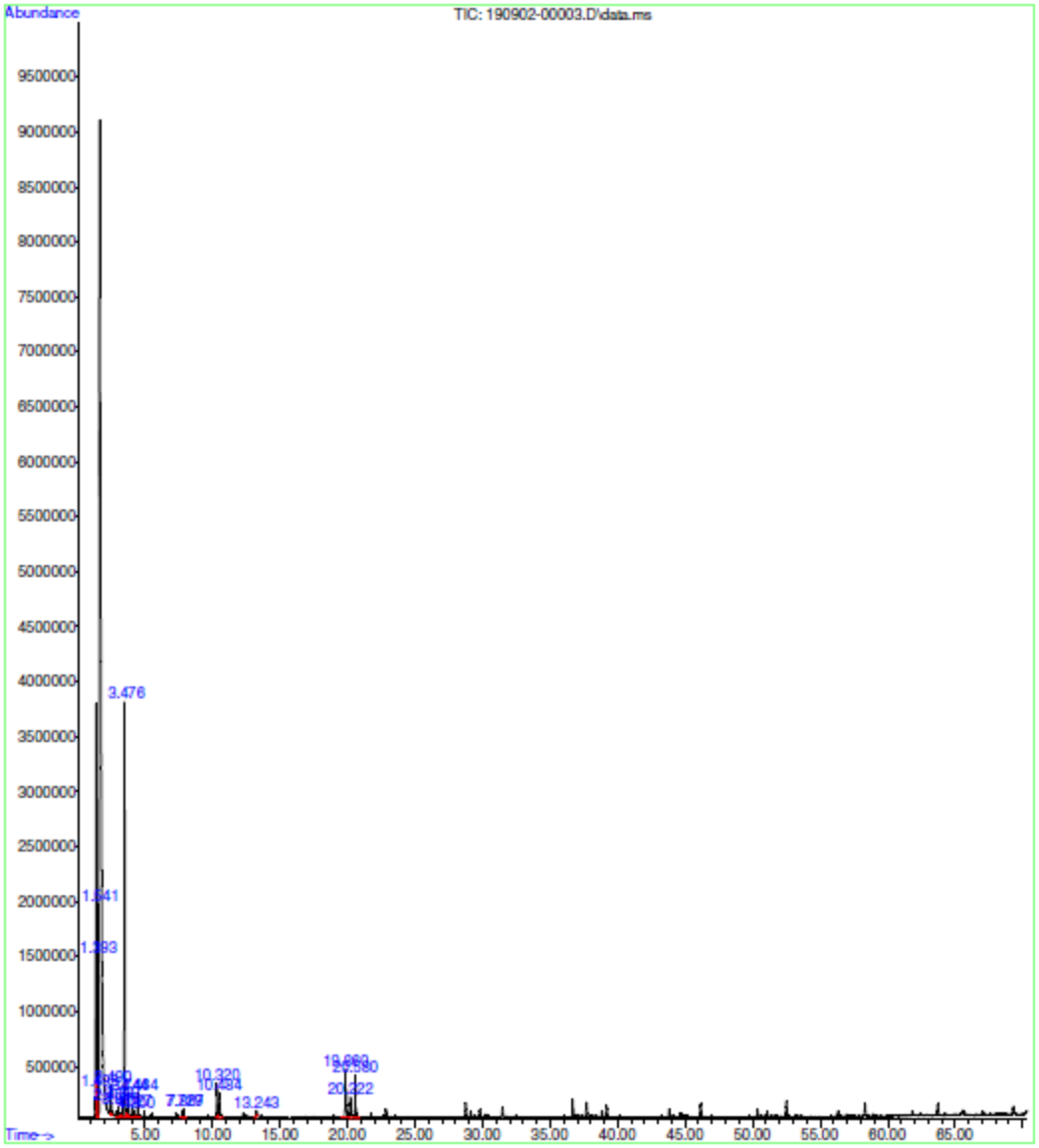
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 211. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestra 2



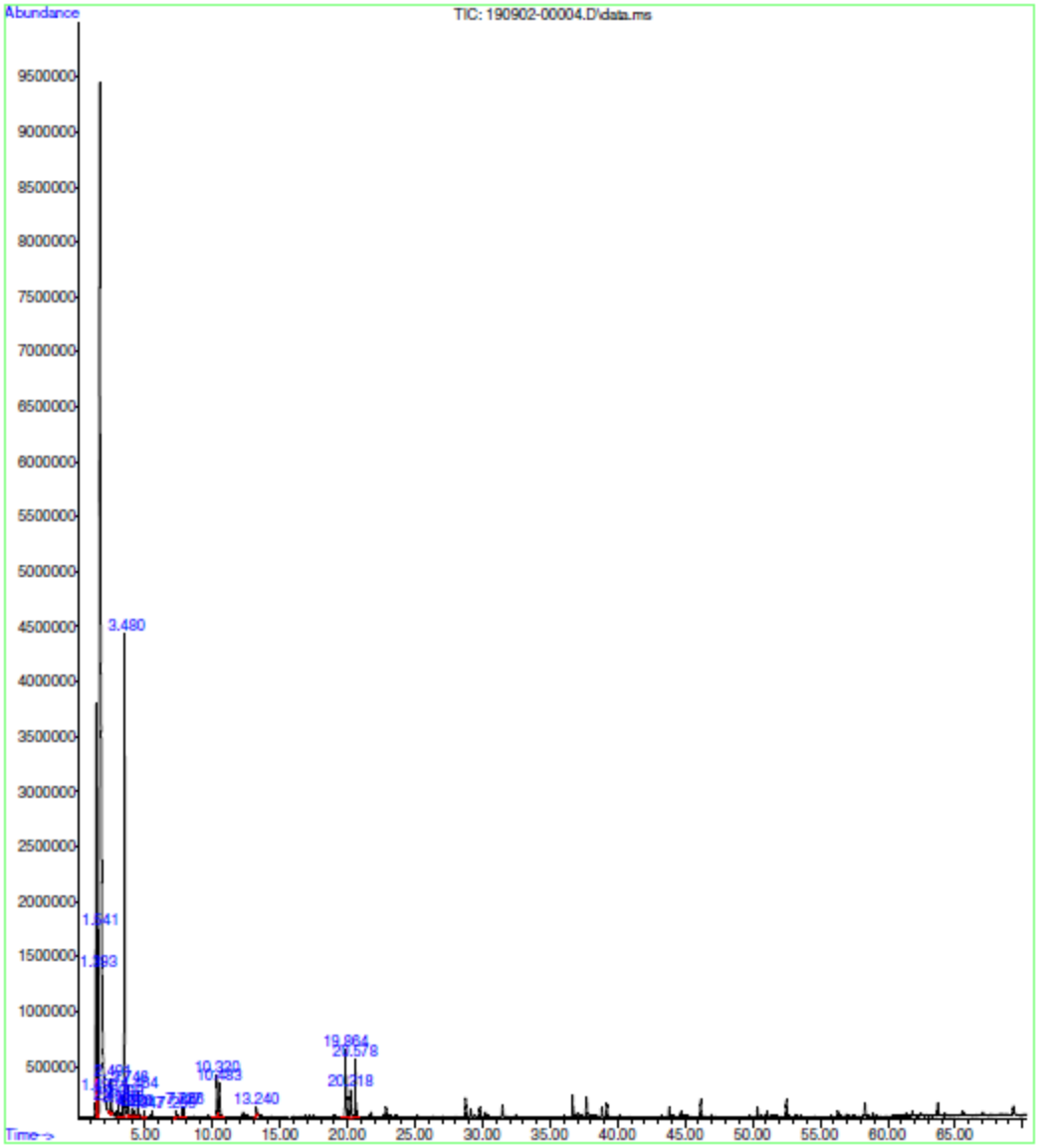
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 212. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestra 3



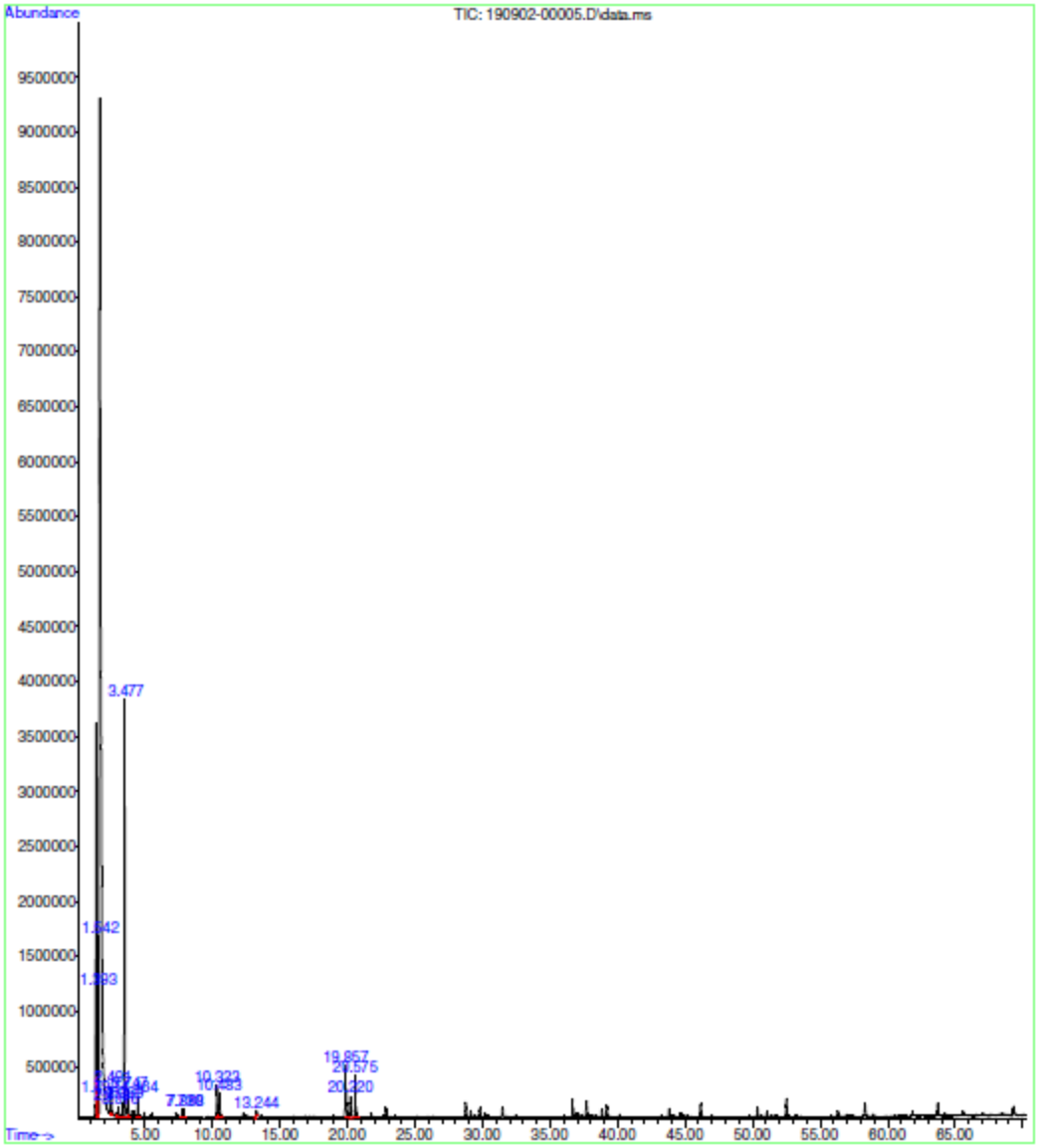
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 213. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestra 1



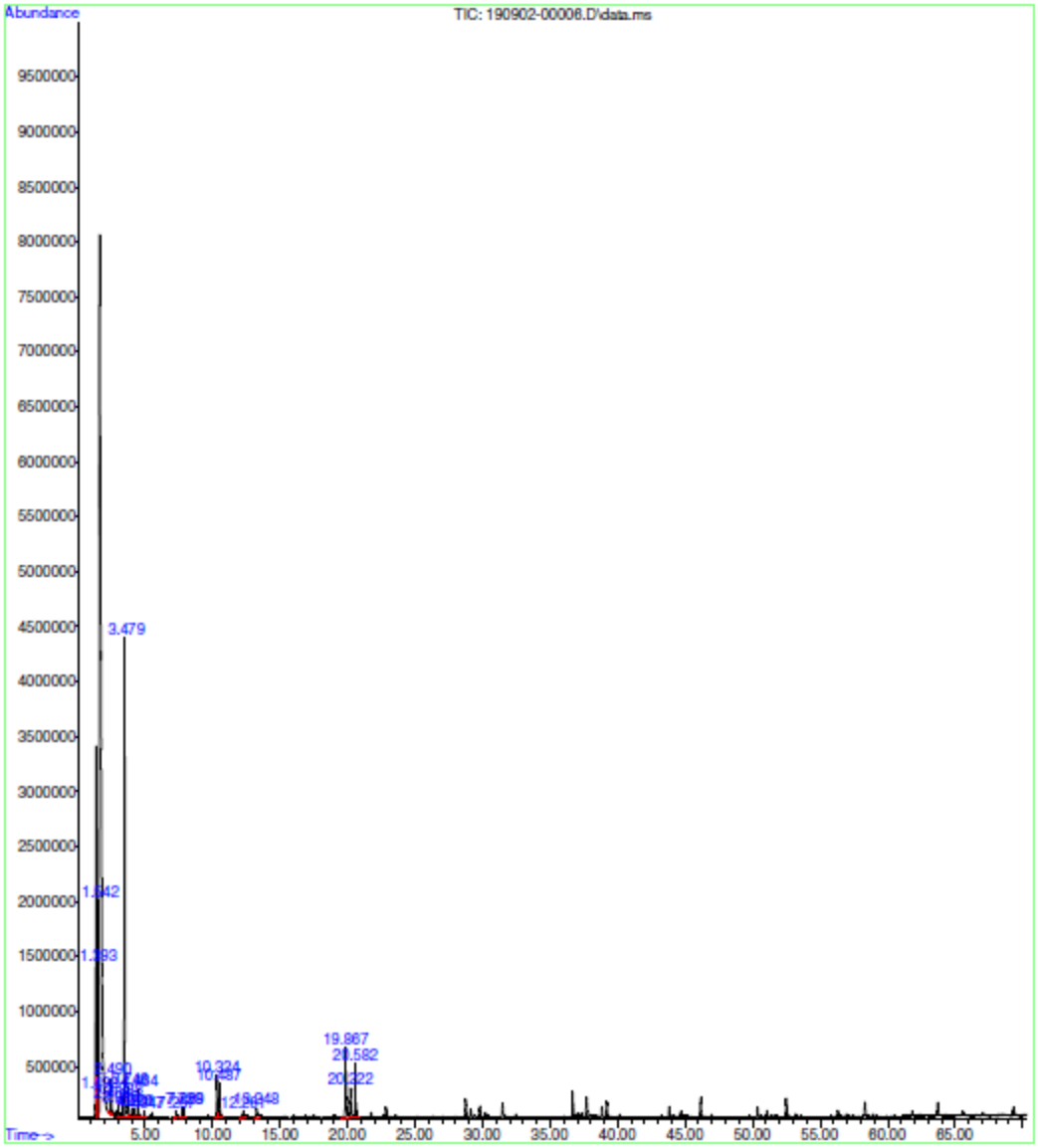
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 214. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestra 2



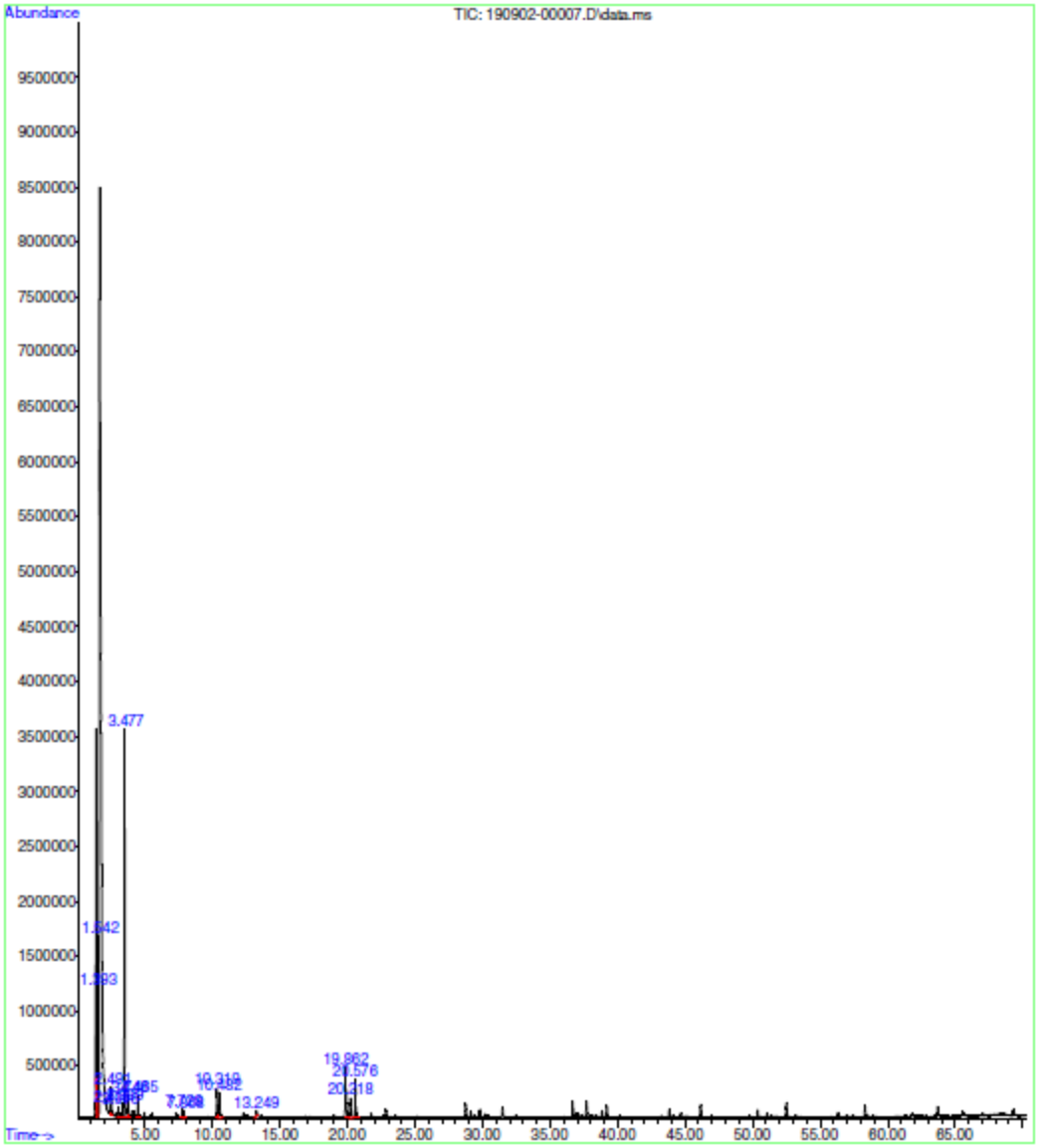
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 215. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestra 3



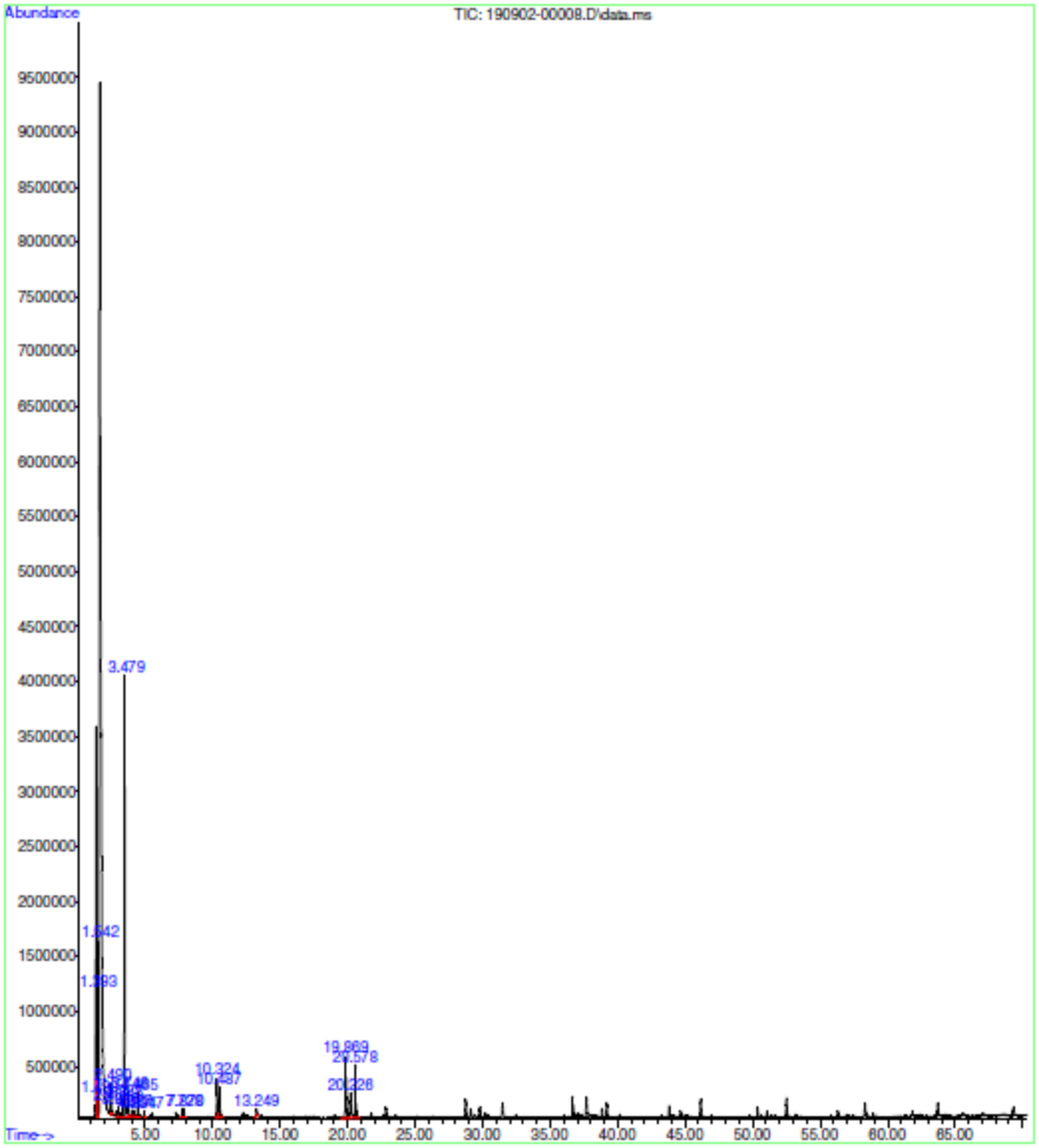
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 216. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestra 1



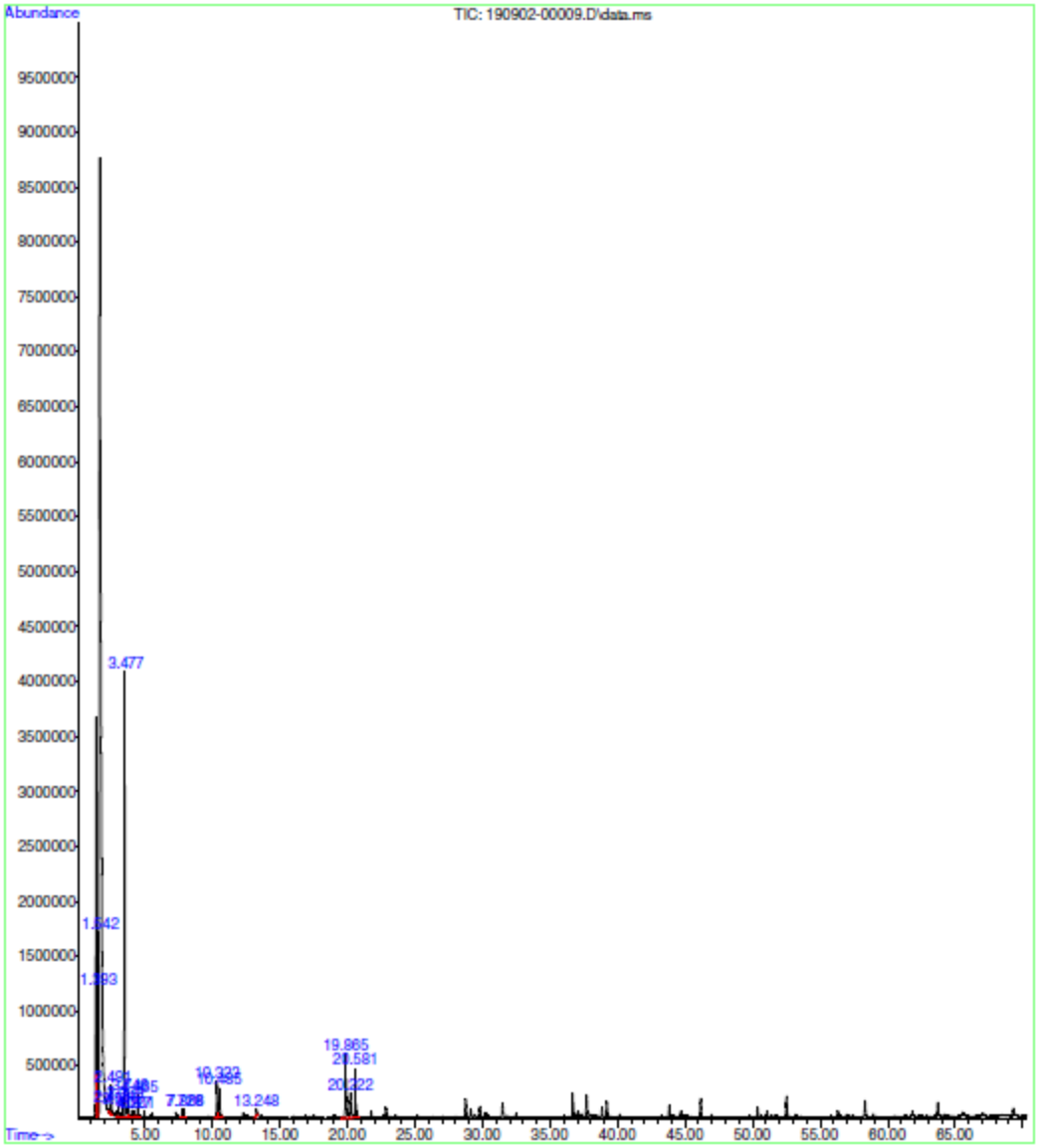
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 217. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestra 2



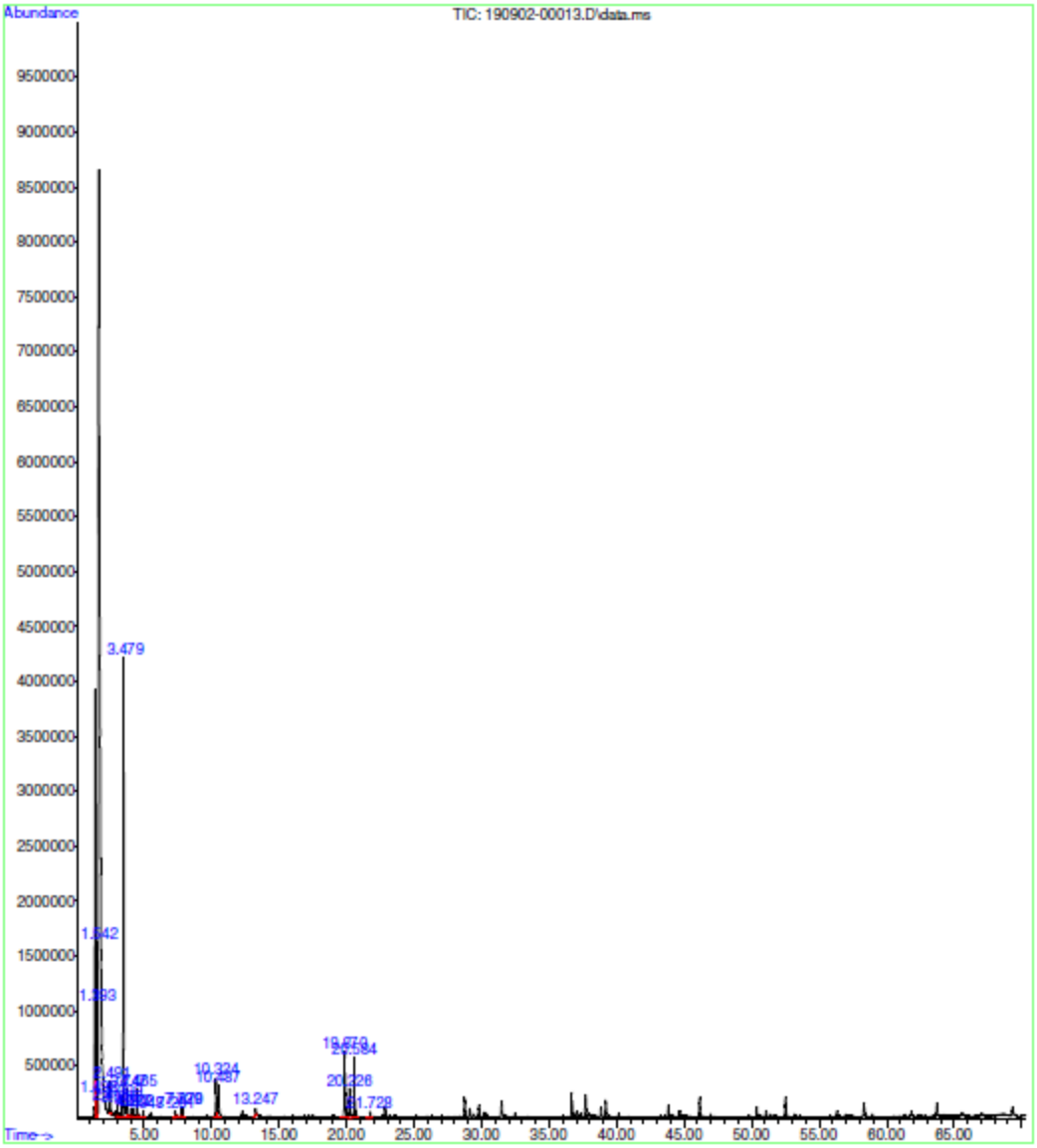
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 218. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestra 3



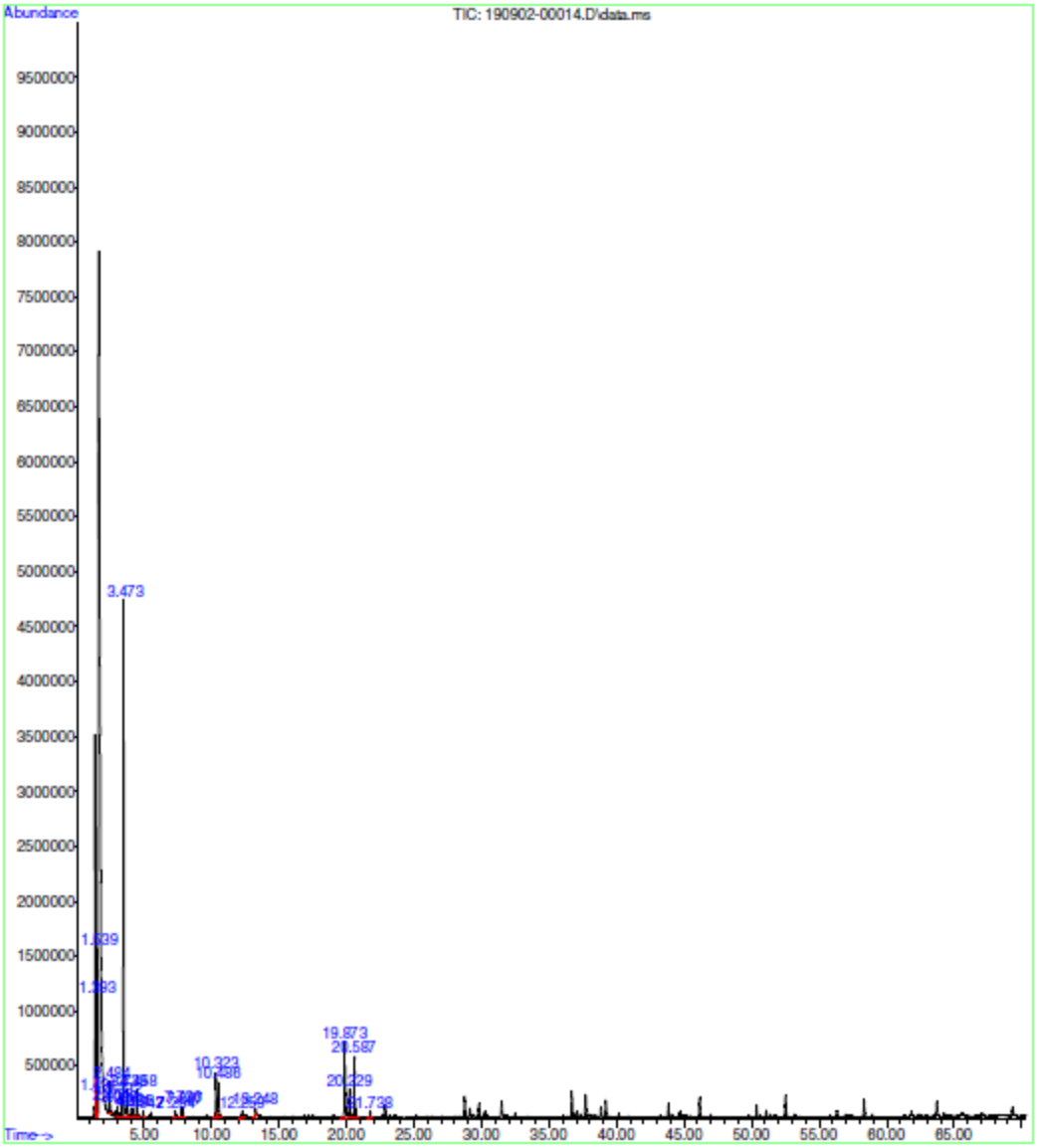
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 219. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestra 1



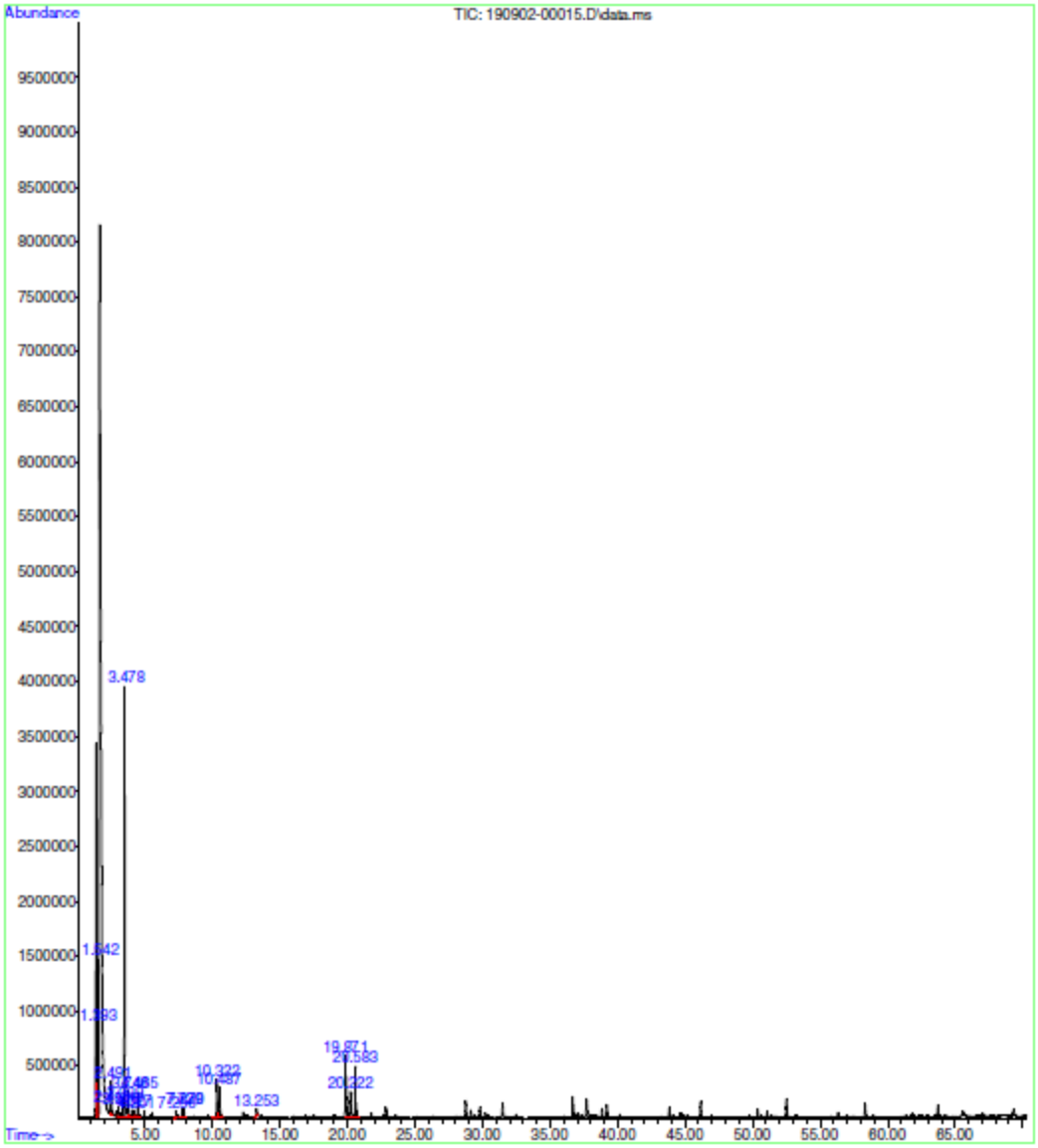
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 220. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestra 2



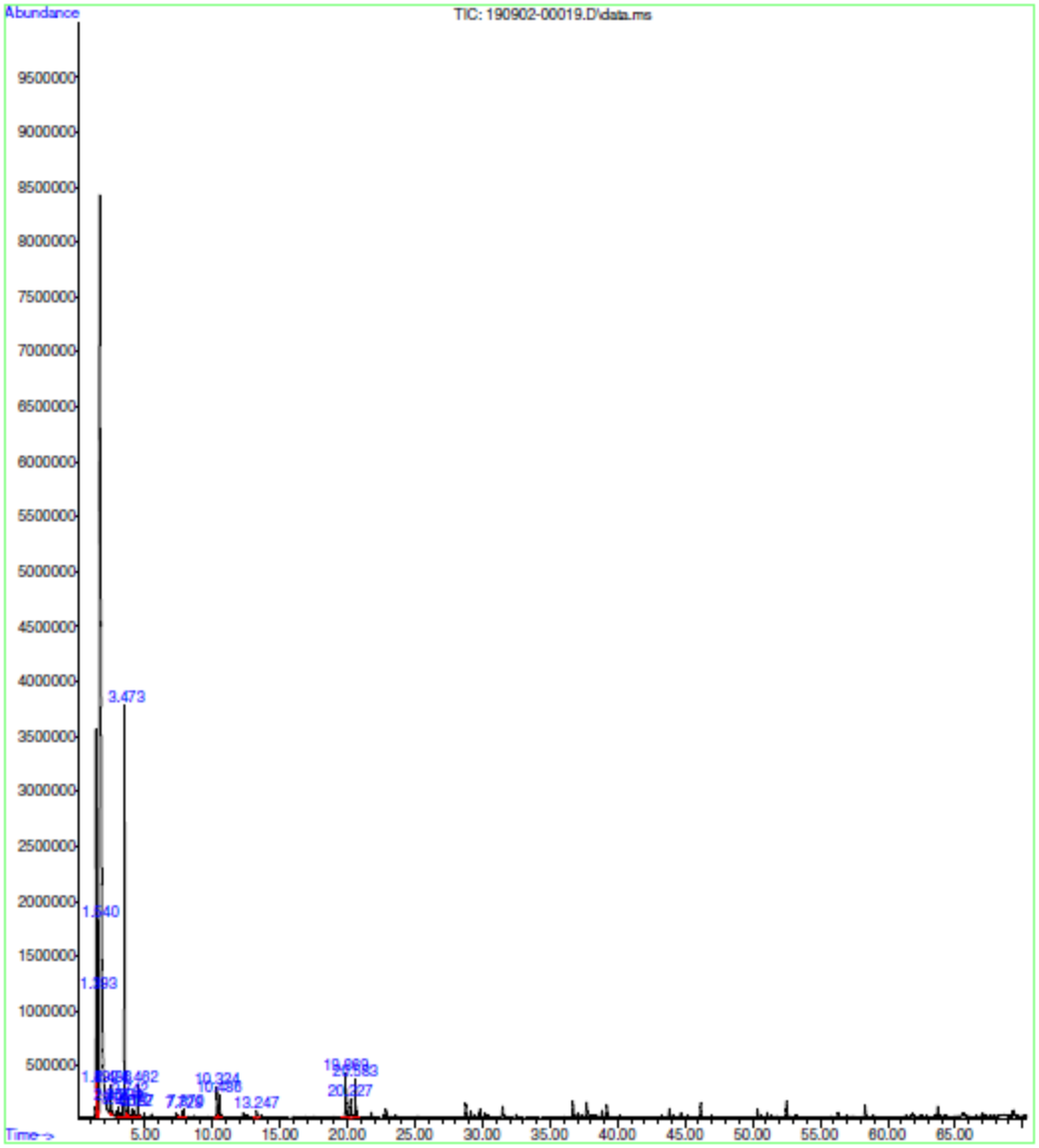
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 221. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestra 3



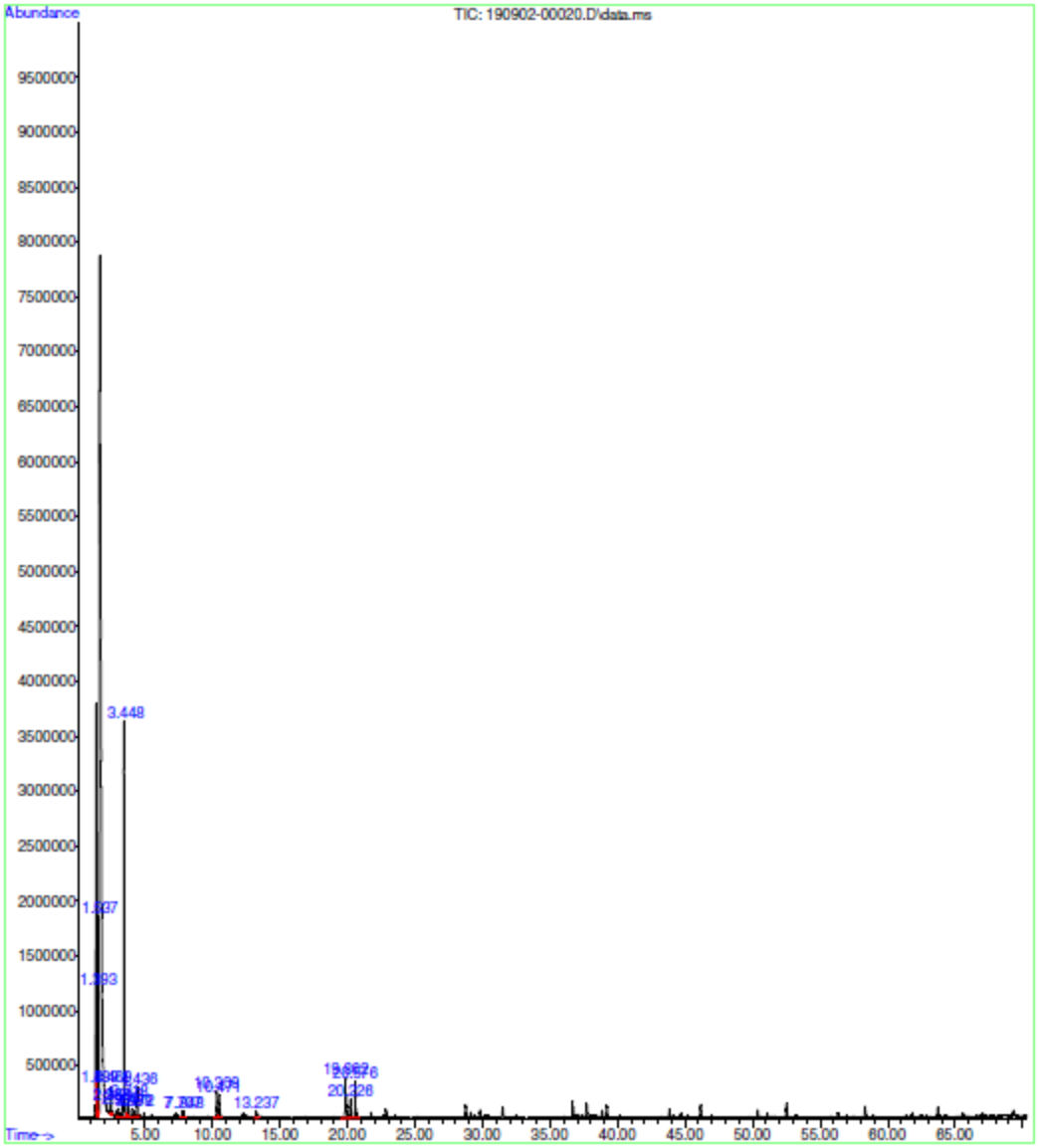
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 222. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestra 1



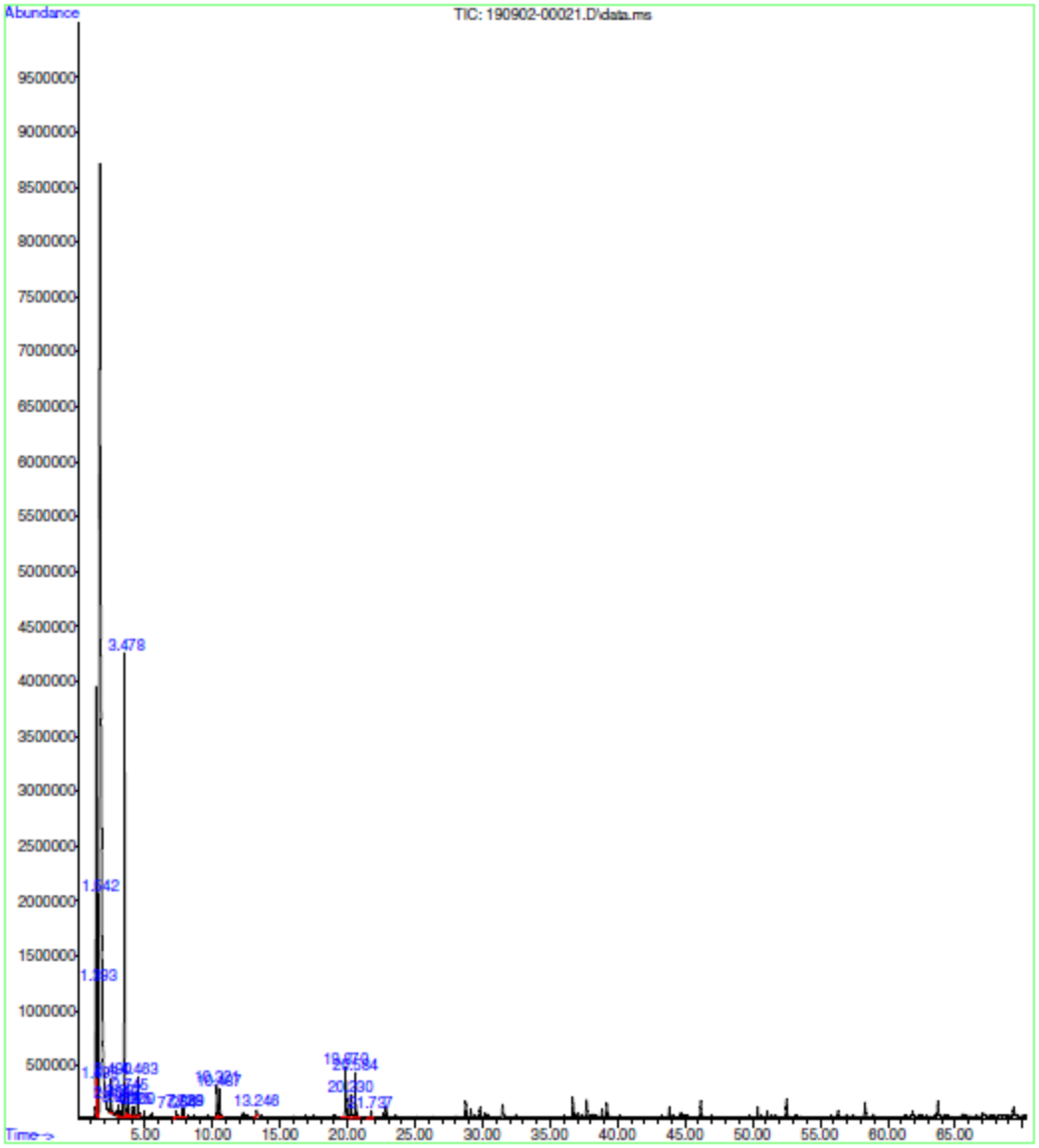
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 223. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestra 2



Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

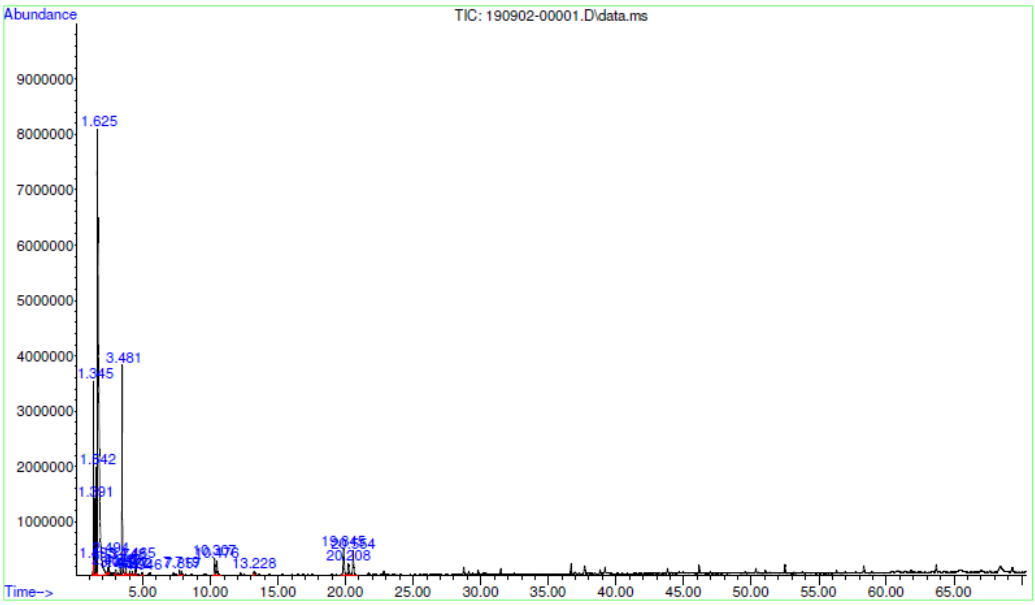
Figura 224. Cromatograma del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestra 3



Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

a. Resultados de la cromatografía de gases del producto líquido con solvente: Cromatogramas.

Figura 225. Cromatograma del producto líquido con solvente: Corrida 1 - Muestra 1

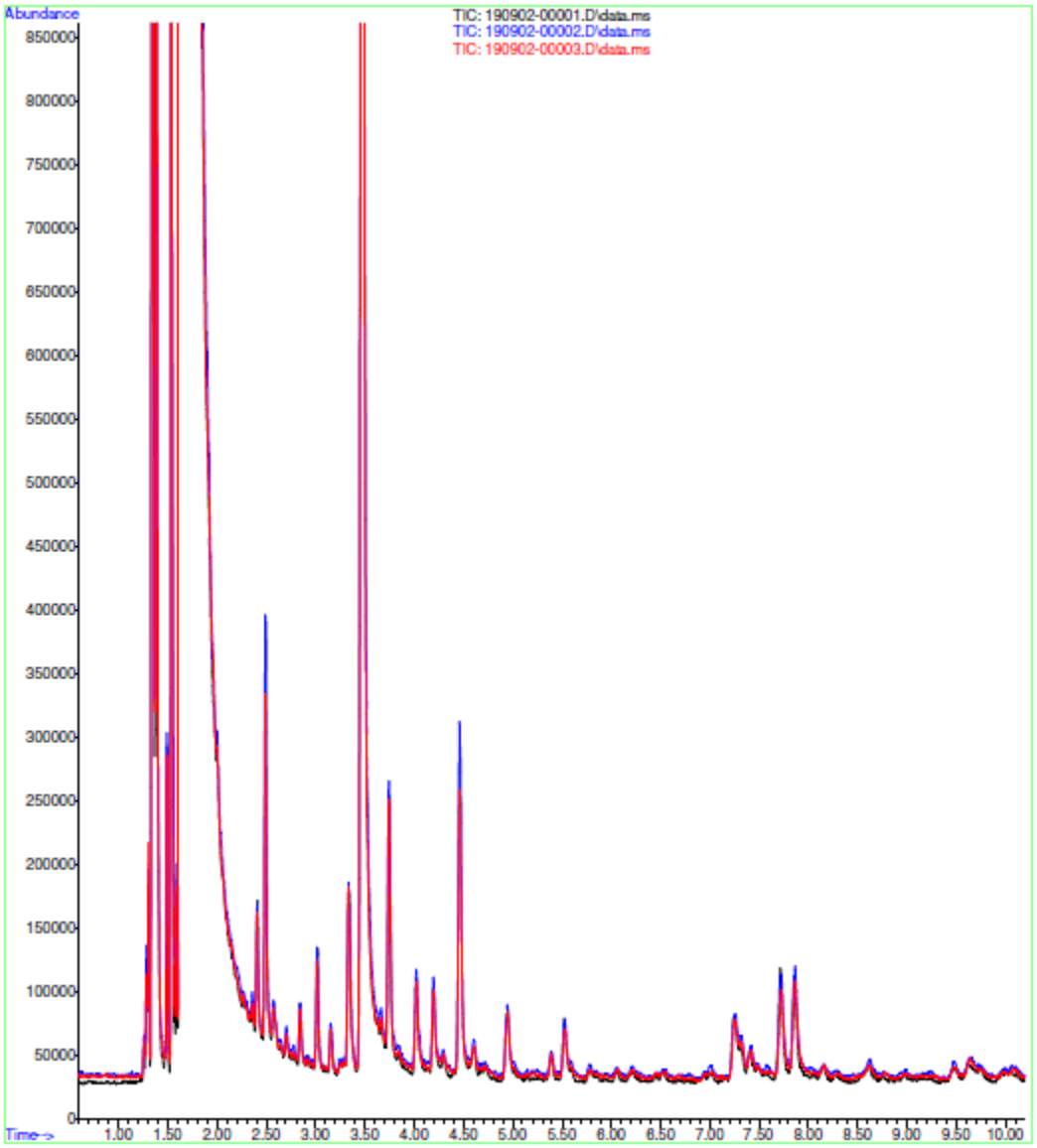


Notas: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Se incluye la figura 53 como ejemplo del cromatograma original del producto líquido incluyendo el pico del triclorometano utilizando como solvente para la preparación de la muestra (tiempo de retención 1.625).

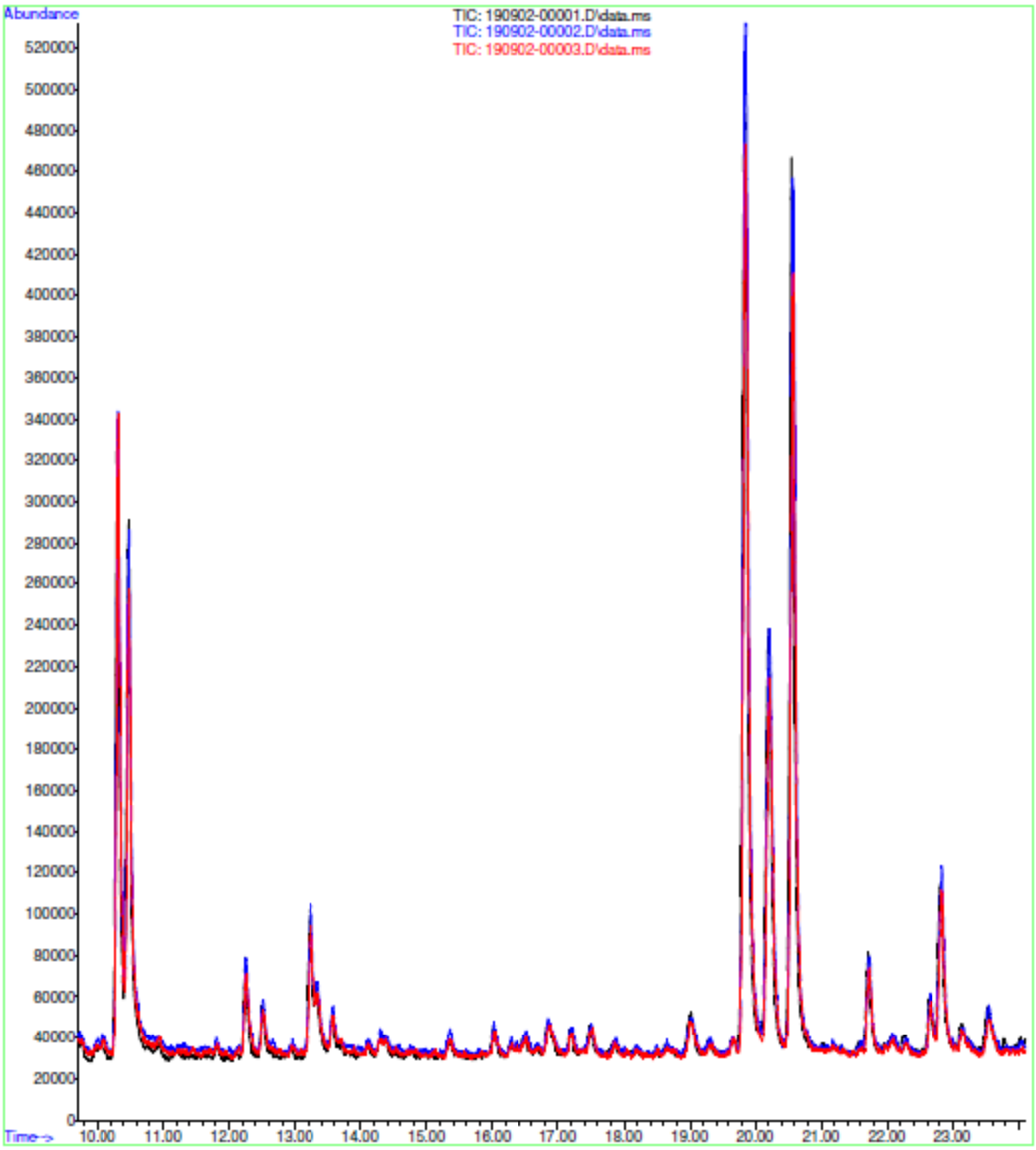
b. Cromatogramas sobrepuestos de las muestras en triplicado del producto líquido libre de solvente

Figura 226. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestras 1, 2 y 3 de 0 a 10 minutos



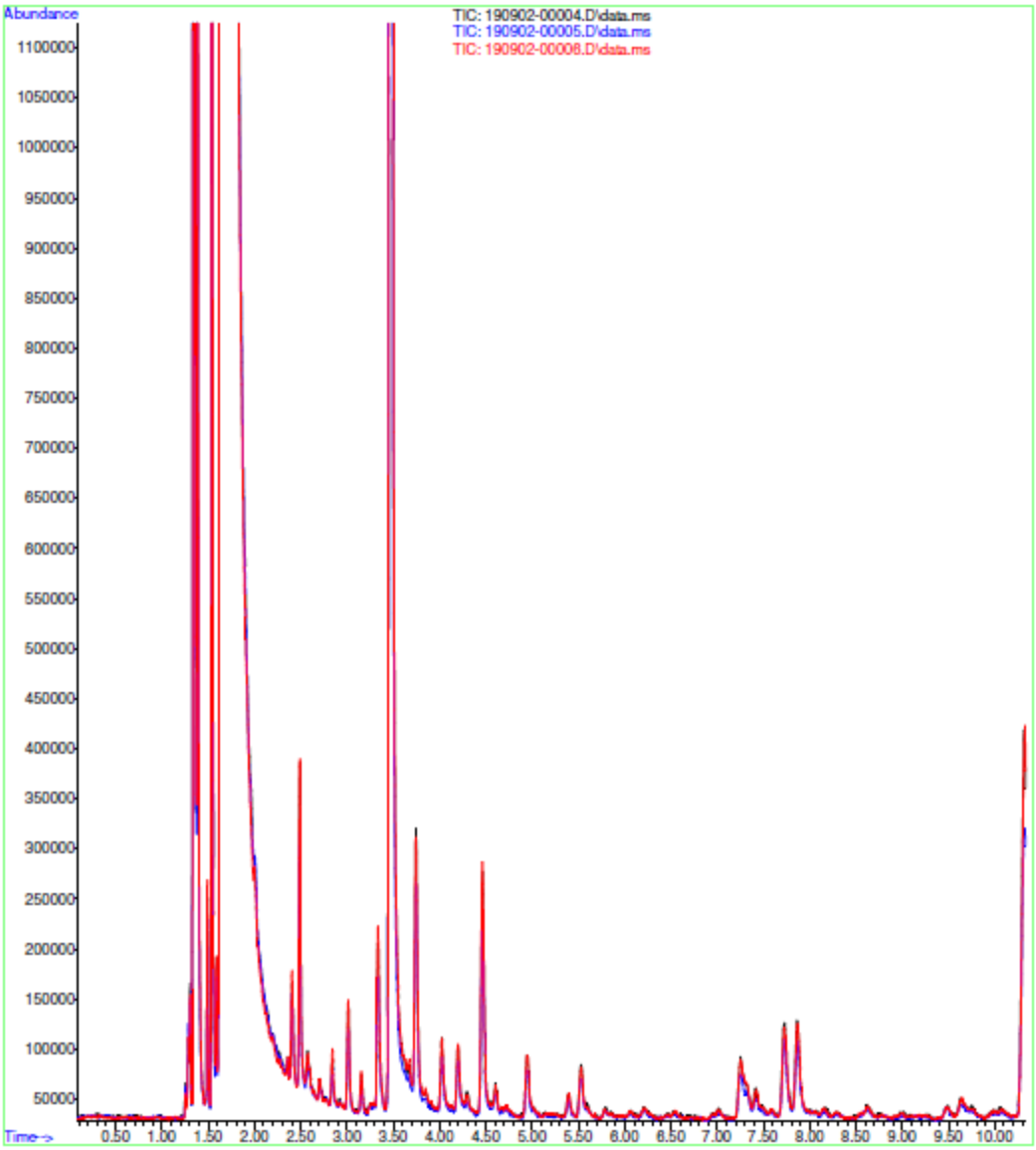
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 227. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestras 1, 2 y 3 de 10 a 23 minutos



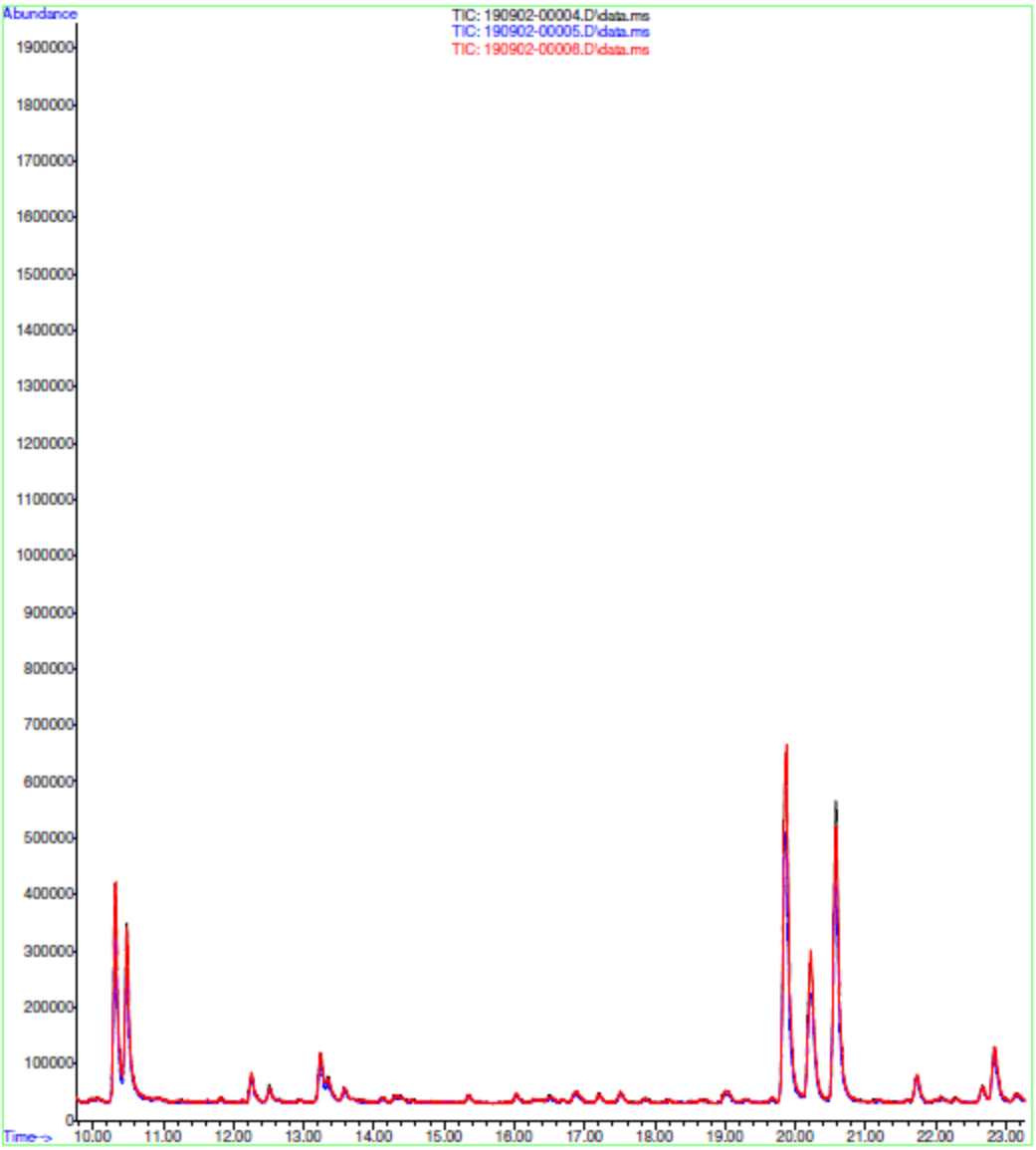
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 228. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestras 1, 2 y 3 de 0 a 10 minutos



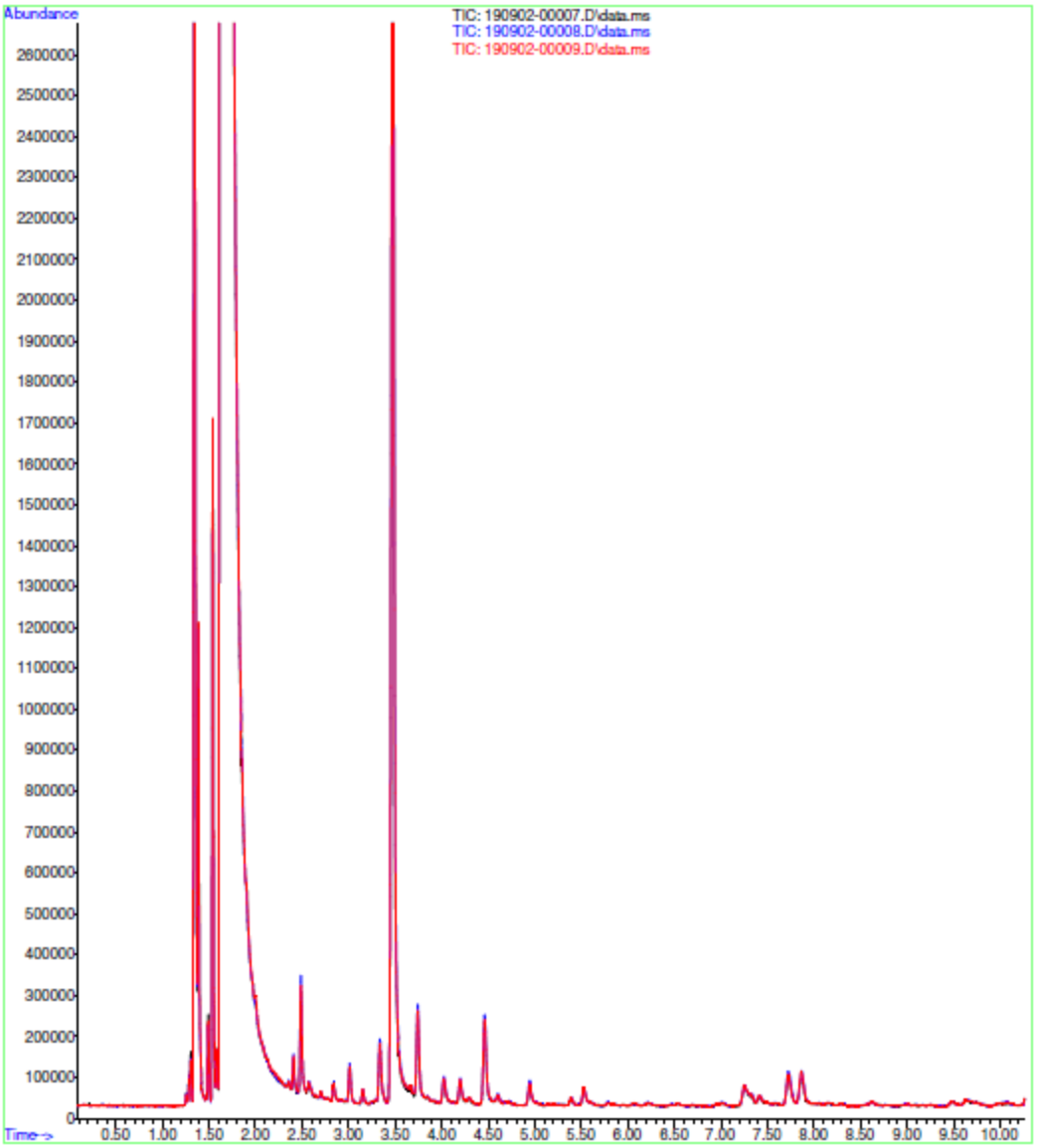
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 229. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestras 1, 2 y 3 de 10 a 23 minutos



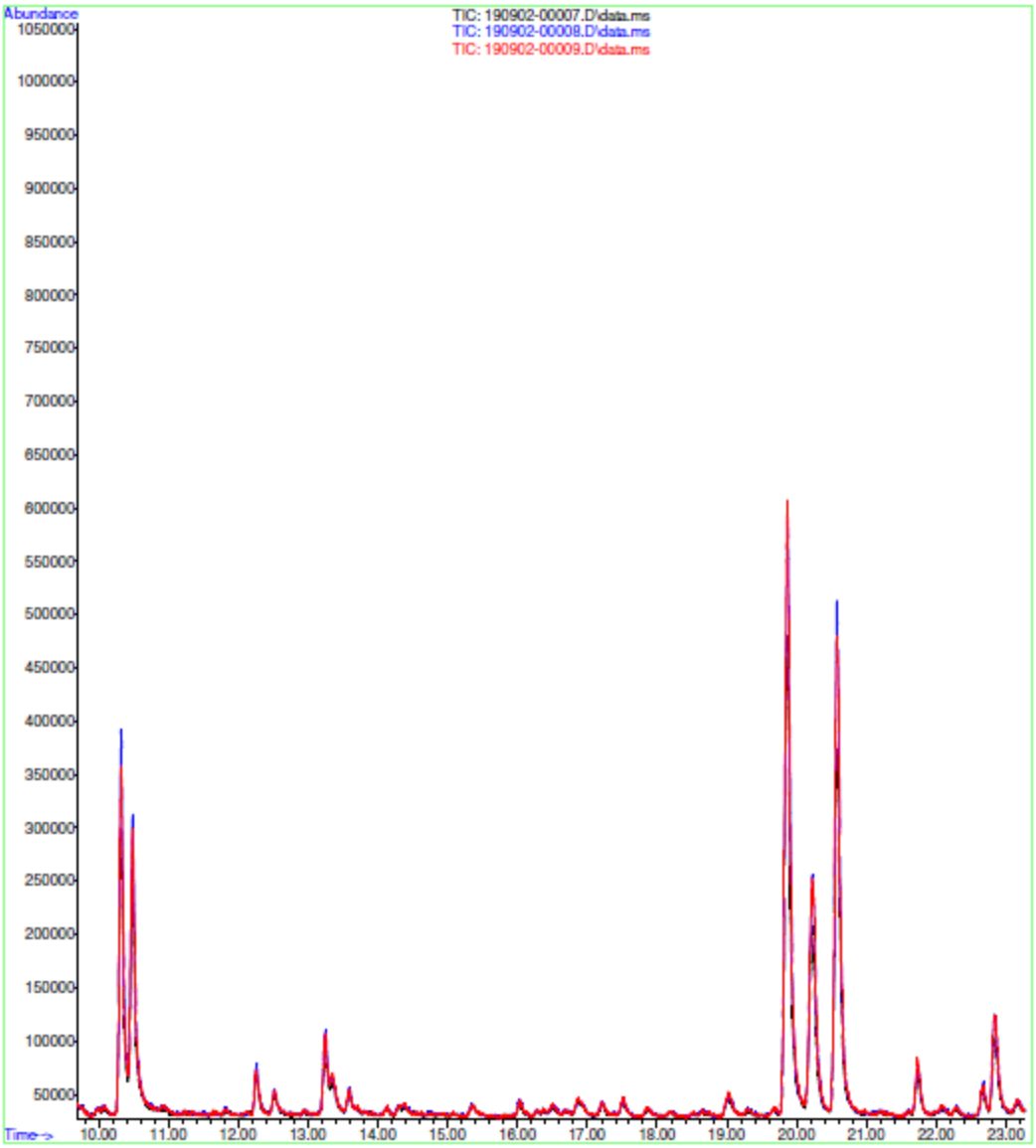
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 230. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestras 1, 2 y 3 de 0 a 10 minutos



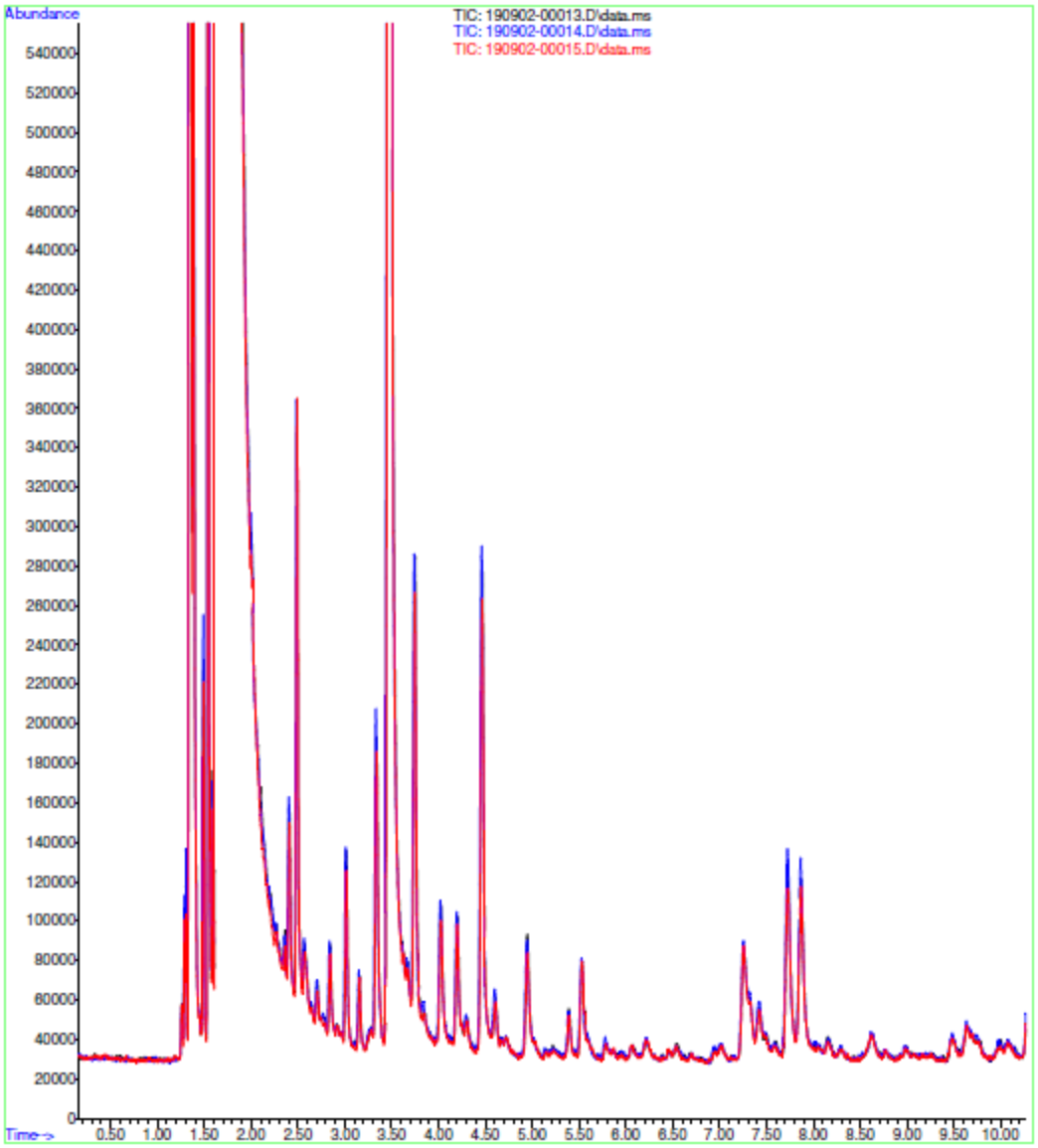
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 231. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestras 1, 2 y 3 de 10 a 23 minutos



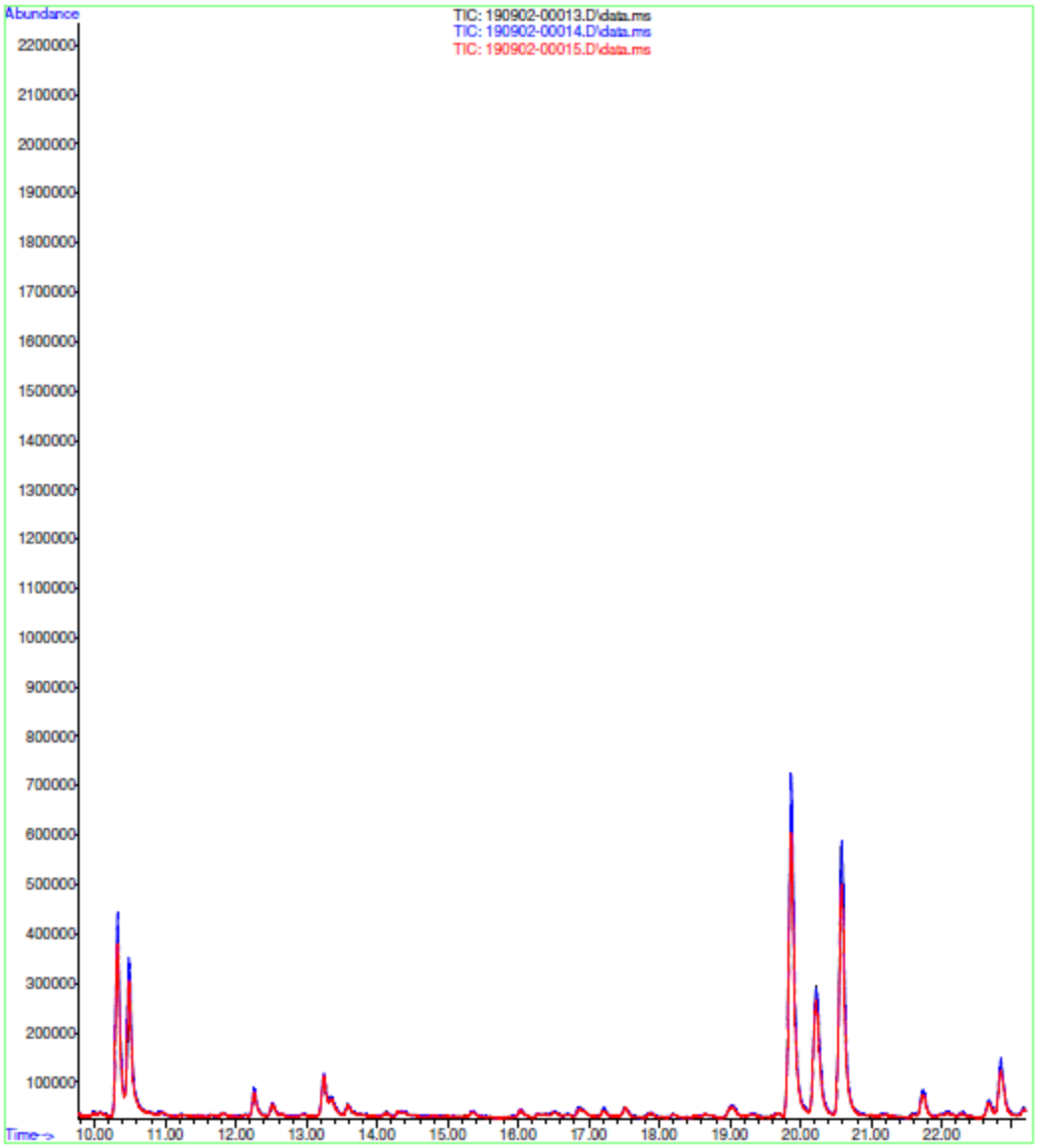
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 232. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestras 1, 2 y 3 de 0 a 10 minutos



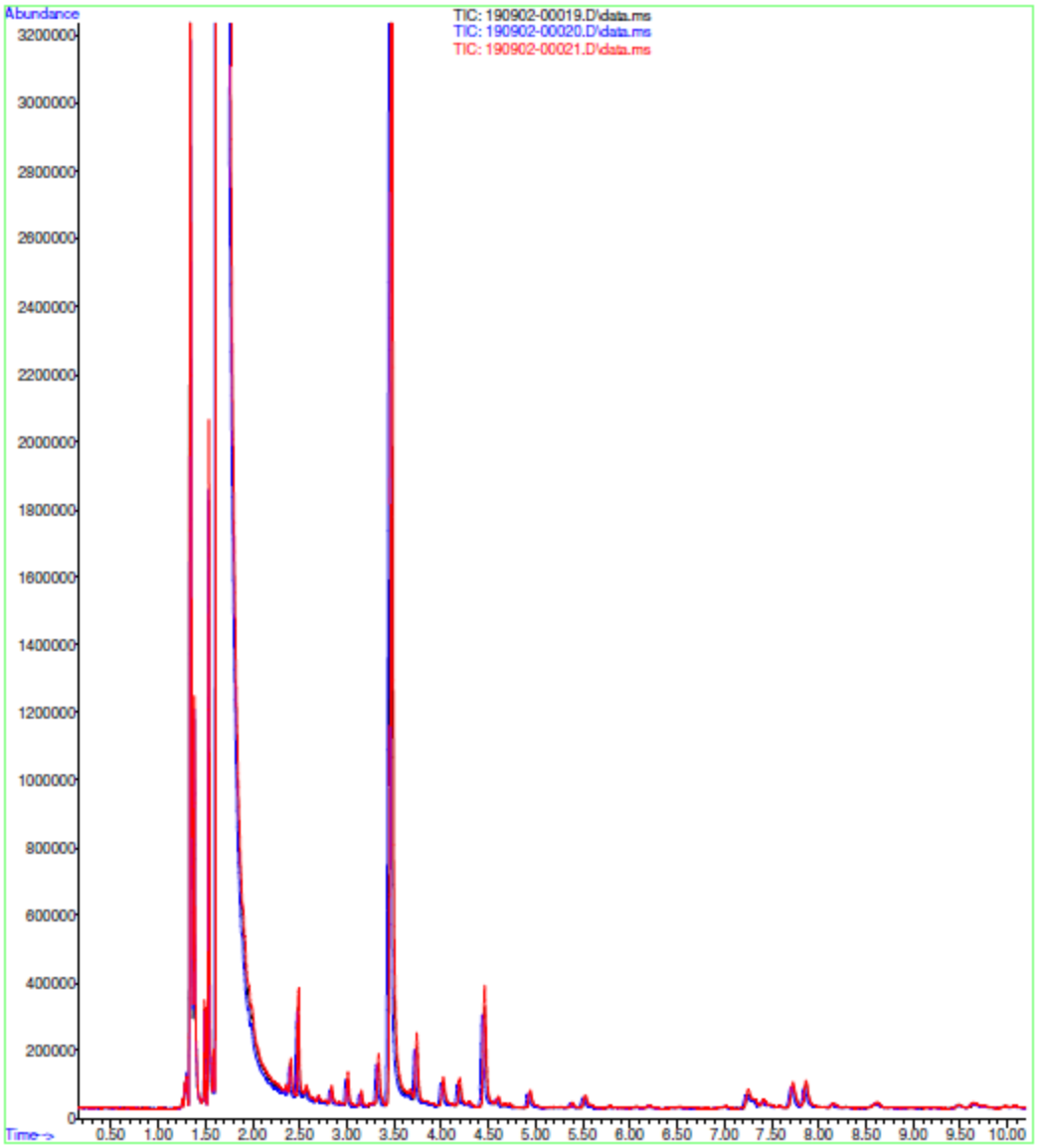
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 233. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestras 1, 2 y 3 de 10 a 23 minutos



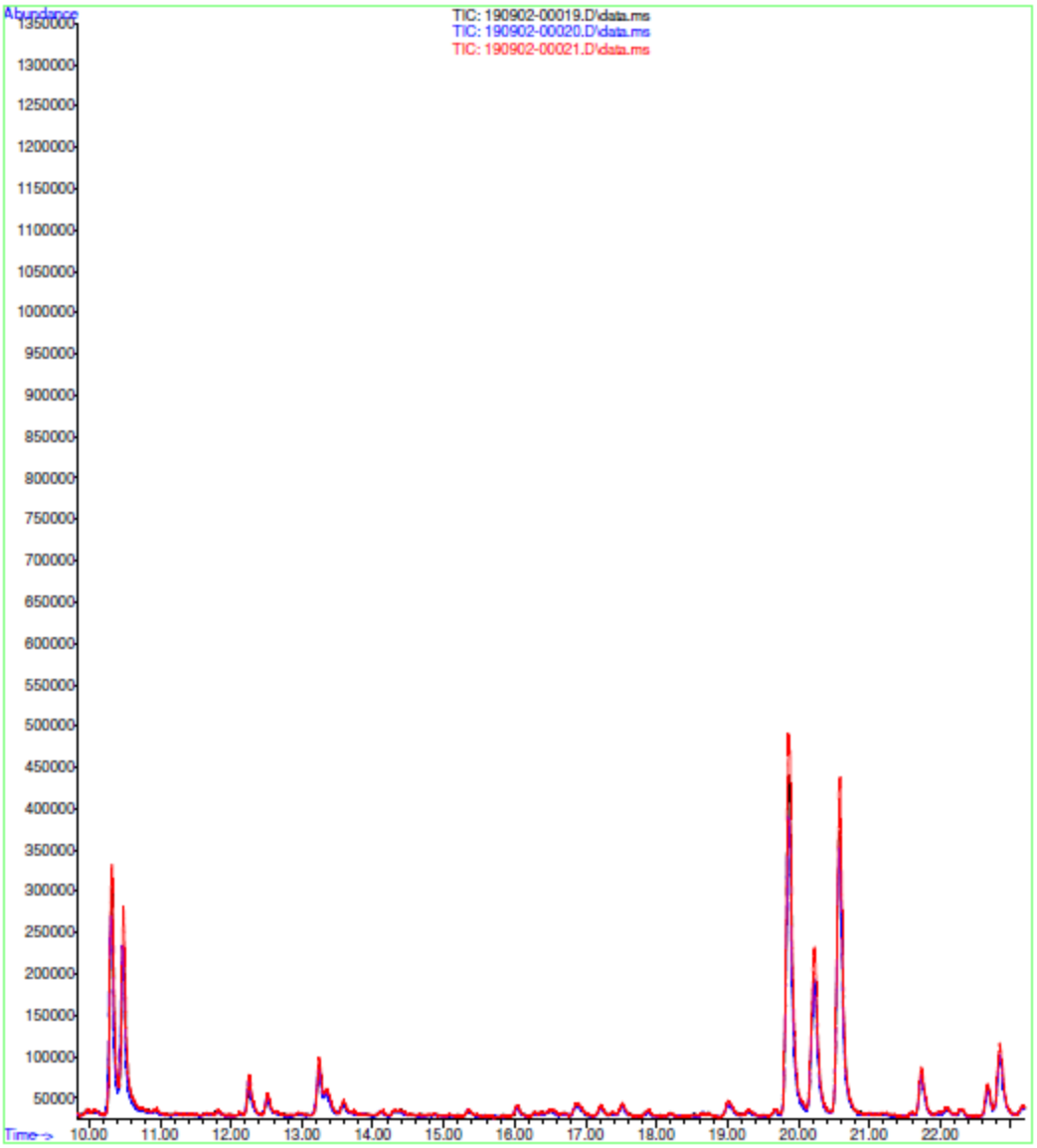
Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 234. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestras 1, 2 y 3 de 0 a 10 minutos



Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

Figura 235. Cromatogramas sobrepuestos del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestras 1, 2 y 3 de 10 a 23 minutos



Nota: Cromatograma obtenido con un cromatógrafo de gases con detector de masas de la Universidad del Valle de Guatemala. Las especificaciones del equipo, detector, columna, gas y método se encuentran en las secciones L y M de anexos.

6. Resultados de la cromatografía de gases del producto líquido libre de solvente: Composiciones.

Cuadro 142. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestra 1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3927	2.4260	Pentano	88.5
2	1.4928	1.0040	2-metil-pentano	85.4
3	1.5428	7.8721	2-metil-1-penteno	94.0
4	2.4935	1.9058	4-metil-heptano-	81.0
5	3.0211	0.6984	3-metil-4-noneno	82.7
6	3.3395	1.5548	4-metil-3-hepteno	84.9
7	3.4805	37.0060	2,4-dimetil-1-hepteno	91.0
8	3.7489	2.2298	3,3-dimetil-1-hexeno	87.8
9	4.0263	0.6863	2,6-dimetil-2,4-heptadieno	87.0
10	4.2037	0.6000	2,3-dimethyl-1,3-heptadieno	81.0
11	4.4630	2.4870	3-penten-2-ona	84.5
12	4.9452	0.7153	3,4-nonadieno	81.5
13	7.7198	2.3680	2,6-dimetil-nonano	87.0
14	10.3080	10.9687	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.2
15	13.2282	0.9164	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.3
16	19.8465	16.7798	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.4
17	20.5515	9.7813	2,3,5-trimetil-hexano	84.8

Cuadro 143. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestra 2

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3928	2.2372	Pentano	84.5
2	1.4929	0.9356	2-metil-pentano	86.1
3	1.5429	7.9690	2-metil-1-penteno	94.0
4	2.4891	1.8712	4-metil-heptano-	93.0
5	3.0167	0.6536	3-metil-4-noneno	83.4
6	3.3396	1.1894	4-metil-3-hepteno	84.4
7	3.4761	37.1726	2,4-dimetil-1-hepteno	95.0
8	3.7445	2.2470	3,3-dimetil-1-hexeno	87.4
9	4.0265	0.7007	2,6-dimetil-2,4-heptadieno	87.0
10	4.1993	0.5777	2,3-dimethyl-1,3-heptadieno	81.0
11	4.4632	2.3808	3-penten-2-ona	84.2
12	4.9453	0.6793	3,4-nonadieno	81.5
13	7.7245	1.9474	2,6-dimetil-nonano	87.0
14	10.3218	10.2045	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.1
15	13.2420	1.9978	2,3,3-trimetil-4-noneno	89.0
16	19.8603	17.5749	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.5
17	20.5790	9.6613	2,3,5-trimetil-hexano	85.1

Cuadro 144. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 1 – Muestra 3

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3927	2.6297	Pentano	88.5
2	1.4927	0.9805	2-metil-pentano	87.0
3	1.5428	8.4549	2-metil-1-penteno	94.0
4	2.4889	1.7566	4-metil-heptano-	93.0
5	3.0165	0.6217	3-metil-4-noneno	82.4
6	3.3395	1.0555	4-metil-3-hepteno	84.9
7	3.4760	38.2003	2,4-dimetil-1-hepteno	95.0
8	3.7443	2.2539	3,3-dimetil-1-hexeno	88.2
9	4.0263	0.7788	2,6-dimetil-2,4-heptadieno	87.0
10	4.1992	0.5902	2,3-dimethyl-1,3-heptadieno	81.0
11	4.4630	2.2385	3-penten-2-ona	84.5
12	7.7289	2.2737	2,6-dimetil-nonano	87.0
13	10.3217	10.8256	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.5
14	13.2419	0.7984	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.5
15	19.8601	17.0189	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.5
16	20.5788	9.5227	2,3,5-trimetil-hexano	84.4

Cuadro 145. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestra 1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3926	1.3715	Pentano	85.6
2	1.4927	0.7199	2-metil-pentano	87.0
3	1.5428	6.3056	2-metil-1-penteno	94.0
4	2.4889	1.6719	4-metil-heptano-	93.0
5	3.0165	0.6359	3-metil-4-noneno	82.4
6	3.3395	1.4212	4-metil-3-hepteno	84.9
7	3.4805	36.5163	2,4-dimetil-1-hepteno	91.0
8	3.7443	2.3738	3,3-dimetil-1-hexeno	88.2
9	4.0263	0.5650	2,6-dimetil-2,4-heptadieno	87.0
10	4.1992	0.4832	2,3-dimethyl-1,3-heptadieno	81.0
11	4.4630	1.9642	3-penten-2-ona	84.5
12	4.9451	0.6504	3,4-nonadieno	81.4
13	7.7289	2.2653	2,6-dimetil-nonano	87.0
14	10.3216	12.3438	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.1
15	13.2418	0.9018	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.5
16	19.8647	19.1356	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.6
17	20.5788	10.6746	2,3,5-trimetil-hexano	84.4

Cuadro 146. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestra 2

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3927	1.1070	Pentano	88.5
2	1.4927	0.7915	2-metil-pentano	87.0
3	1.5428	7.7189	2-metil-1-penteno	94.0
4	2.4889	1.6897	4-metil-heptano-	93.0
5	3.0165	0.6455	3-metil-4-noneno	82.4
6	3.3395	1.3043	4-metil-3-hepteno	84.9
7	3.4760	39.4366	2,4-dimetil-1-hepteno	95.0
8	3.7489	2.4465	3,3-dimetil-1-hexeno	87.8
9	4.4630	1.9215	3-penten-2-ona	84.5
10	7.7289	2.1642	2,6-dimetil-nonano	87.0
11	10.3217	11.1490	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.5
12	13.2464	0.8530	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.6
13	19.8556	18.5141	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.5
14	20.5743	10.2582	2,3,5-trimetil-hexano	84.9

Cuadro 147. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 2 – Muestra 3

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3928	1.6154	Pentano	84.5
2	1.4929	0.8360	2-metil-pentano	86.1
3	1.5429	7.1027	2-metil-1-penteno	94.0
4	2.4890	1.6695	4-metil-heptano-	81.0
5	3.0167	0.6395	3-metil-4-noneno	83.4
6	3.3396	1.4925	4-metil-3-hepteno	84.4
7	3.4806	36.3682	2,4-dimetil-1-hepteno	91.0
8	3.7445	2.4641	3,3-dimetil-1-hexeno	87.4
9	4.0265	0.6364	2,6-dimetil-2,4-heptadieno	87.0
10	4.1993	0.4581	2,3-dimethyl-1,3-heptadieno	81.0
11	4.4631	1.9296	3-penten-2-ona	84.3
12	4.9453	0.4846	3,4-nonadieno	81.5
13	7.7291	2.1537	2,6-dimetil-nonano	87.0
14	10.3218	12.2286	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.1
15	13.2466	2.1924	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.5
16	19.8648	18.0954	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.5
17	20.5835	9.6333	2,3,5-trimetil-hexano	85.1

Cuadro 148. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestra 1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3928	1.5781	Pentano	84.50
2	1.5429	9.4128	2-metil-1-penteno	94.00
3	2.4935	1.7561	4-metil-heptano-	81.00
4	3.0166	0.6926	3-metil-4-noneno	82.10
5	3.3396	1.2926	4-metil-3-hepteno	84.40
6	3.4760	38.7562	2,4-dimetil-1-hepteno	95.00
7	3.7444	2.4015	3,3-dimetil-1-hexeno	88.20
8	4.4631	2.0975	3-penten-2-ona	84.30
9	7.7290	2.2900	2,6-dimetil-nonano	87.00
10	10.3172	11.0186	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	84.90
11	13.2465	0.8726	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.50
12	19.8603	18.0178	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.50
13	20.5744	9.8136	2,3,5-trimetil-hexano	84.60

Cuadro 149. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestra 2

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3927	0.8692	Pentano	88.5
2	1.4928	0.6963	2-metil-pentano	85.4
3	1.5429	6.5430	2-metil-1-penteno	94.0
4	2.4890	1.6814	4-metil-heptano-	81.0
5	3.0166	0.6627	3-metil-4-noneno	82.1
6	3.3396	1.4511	4-metil-3-hepteno	84.4
7	3.4806	37.3190	2,4-dimetil-1-hepteno	91.0
8	3.7444	2.2551	3,3-dimetil-1-hexeno	88.2
9	4.0264	0.5988	2,6-dimetil-2,4-heptadieno	87.0
10	4.1993	0.5072	2,3-dimethyl-1,3-heptadieno	81.0
11	4.4631	2.0245	3-penten-2-ona	84.3
12	4.9452	0.7274	3,4-nonadieno	81.5
13	7.7290	2.1484	2,6-dimetil-nonano	87.0
14	10.3217	11.5989	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.5
15	13.2510	0.8964	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.5
16	19.8693	19.2711	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.5
17	20.5789	10.7496	2,3,5-trimetil-hexano	84.9

Cuadro 150. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 3 – Muestra 3

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3928	0.7274	Pentano	84.5
2	1.5429	8.2363	2-metil-1-penteno	94.0
3	2.4890	1.5913	4-metil-heptano-	81.0
4	3.0166	0.6154	3-metil-4-noneno	82.1
5	3.3396	1.4421	4-metil-3-hepteno	84.4
6	3.4760	37.5975	2,4-dimetil-1-hepteno	95.0
7	3.7444	2.2727	3,3-dimetil-1-hexeno	88.2
8	4.0264	0.5660	2,6-dimetil-2,4-heptadieno	87.0
9	4.1993	0.5063	2,3-dimethyl-1,3-heptadieno	81.0
10	4.4631	2.0472	3-penten-2-ona	84.3
11	7.7290	2.0749	2,6-dimetil-nonano	87.0
12	10.3218	11.1075	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.1
13	13.2465	0.8204	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.5
14	19.8648	19.7071	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.5
15	20.5789	10.6879	2,3,5-trimetil-hexano	84.9

Cuadro 151. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestra 1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3928	0.7359	Pentano	84.5
2	1.4928	0.6490	2-metil-pentano	85.4
3	1.5429	5.9323	2-metil-1-penteno	94.0
4	2.4890	1.5528	4-metil-heptano-	81.0
5	3.0166	0.5922	3-metil-4-noneno	82.1
6	3.3396	1.4170	4-metil-3-hepteno	84.4
7	3.4806	36.0235	2,4-dimetil-1-hepteno	91.0
8	3.7490	2.3149	3,3-dimetil-1-hexeno	87.8
9	4.0264	0.6387	2,6-dimetil-2,4-heptadieno	87.0
10	4.2038	0.5026	2,3-dimethyl-1,3-heptadieno	81.0
11	4.4631	2.1703	3-penten-2-ona	84.3
12	4.9498	0.6327	3,4-nonadieno	81.5
13	7.7290	1.9767	2,6-dimetil-nonano	87.0
14	10.3218	12.0502	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.1
15	13.2465	0.8179	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.5
16	19.8693	19.7235	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.5
17	20.5835	12.2702	2,3,5-trimetil-hexano	85.1

Cuadro 152. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestra 2

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3927	1.0010	Pentano	88.5
2	1.4927	0.6394	2-metil-pentano	87.0
3	1.5382	5.1307	2-metil-1-penteno	94.0
4	2.4843	1.5125	4-metil-heptano-	93.0
5	3.0074	0.5944	3-metil-4-noneno	82.4
6	3.3304	1.4033	4-metil-3-hepteno	84.9
7	3.4714	36.6116	2,4-dimetil-1-hepteno	95.0
8	3.7398	2.1946	3,3-dimetil-1-hexeno	88.2
9	4.0218	0.6430	2,6-dimetil-2,4-heptadieno	87.0
10	4.1946	0.4901	2,3-dimethyl-1,3-heptadieno	81.0
11	4.4585	2.0156	3-penten-2-ona	84.5
12	4.9406	0.6231	3,4-nonadieno	81.5
13	7.7244	2.2448	2,6-dimetil-nonano	87.0
14	10.3217	13.2131	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.5
15	13.2464	0.7477	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.5
16	19.8738	19.2936	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.5
17	20.5879	11.6415	2,3,5-trimetil-hexano	84.4

Cuadro 153. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 4 – Muestra 3

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3927	0.3578	Pentano	88.5
2	1.5428	6.8698	2-metil-1-penteno	94.0
3	2.4889	1.7534	4-metil-heptano-	93.0
4	3.0166	0.6150	3-metil-4-noneno	82.1
5	3.3395	1.4760	4-metil-3-hepteno	84.9
6	3.4805	37.1520	2,4-dimetil-1-hepteno	91.0
7	3.7443	2.2413	3,3-dimetil-1-hexeno	88.2
8	4.0263	0.5824	2,6-dimetil-2,4-heptadieno	87.0
9	4.1992	0.5389	2,3-dimethyl-1,3-heptadieno	81.0
10	4.4630	2.1929	3-penten-2-ona	84.5
11	7.7289	2.2894	2,6-dimetil-nonano	87.0
12	10.3217	12.6311	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.5
13	13.2510	0.9359	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.5
14	19.8693	19.5319	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.5
15	20.5834	10.8322	2,3,5-trimetil-hexano	85.1

Cuadro 154. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestra 1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3928	1.8749	Pentano	84.5
2	1.4929	1.1193	2-metil-pentano	86.1
3	1.5384	7.6282	2-metil-1-penteno	94.0
4	2.4845	1.7567	4-metil-heptano-	93.0
5	3.0121	0.6729	3-metil-4-noneno	82.4
6	3.3350	1.4522	4-metil-3-hepteno	84.9
7	3.4715	38.8233	2,4-dimetil-1-hepteno	95.0
8	3.7444	2.0646	3,3-dimetil-1-hexeno	88.2
9	4.0219	0.7988	2,6-dimetil-2,4-heptadieno	87.0
10	4.1948	0.9116	2,3-dimethyl-1,3-heptadieno	81.0
11	4.4631	3.1776	3-penten-2-ona	84.3
12	7.7290	1.8353	2,6-dimetil-nonano	87.0
13	10.3218	10.1802	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.1
14	13.2465	1.9316	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.5
15	19.8694	16.4421	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.5
16	20.5835	9.3305	2,3,5-trimetil-hexano	85.1

Cuadro 155. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestra 2

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3927	1.6496	Pentano	88.5
2	1.4882	1.1696	2-metil-pentano	87.0
3	1.5382	8.0075	2-metil-1-penteno	94.0
4	2.4707	1.7580	4-metil-heptano-	81.0
5	2.9893	0.7193	3-metil-4-noneno	82.4
6	3.3122	1.5448	4-metil-3-hepteno	84.9
7	3.4487	38.9977	2,4-dimetil-1-hepteno	95.0
8	3.7170	2.8166	3,3-dimetil-1-hexeno	88.2
9	4.1719	0.9533	2,3-dimethyl-1,3-heptadieno	81.0
10	4.4357	3.0733	3-penten-2-ona	84.5
11	7.7062	1.9643	2,6-dimetil-nonano	87.0
12	10.3080	9.8980	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.2
13	13.2373	1.9339	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.5
14	19.8602	16.2053	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.5
15	20.5743	9.3089	2,3,5-trimetil-hexano	84.9

Cuadro 156. Composiciones porcentuales del producto líquido libre de solvente: Corrida 5 – Muestra 3

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3929	1.3218	Pentano	84.5
2	1.4930	1.1053	2-metil-pentano	86.1
3	1.5430	7.9743	2-metil-1-penteno	94.0
4	2.4891	1.8035	4-metil-heptano-	93.0
5	3.0122	0.6717	3-metil-4-noneno	82.4
6	3.3352	1.4677	4-metil-3-hepteno	84.9
7	3.4762	38.1266	2,4-dimetil-1-hepteno	95.0
8	3.7445	1.9063	3,3-dimetil-1-hexeno	87.4
9	4.0266	0.7490	2,6-dimetil-2,4-heptadieno	87.0
10	4.1994	0.7005	2,3-dimethyl-1,3-heptadieno	81.0
11	4.4632	3.2631	3-penten-2-ona	84.2
12	7.7291	1.9928	2,6-dimetil-nonano	87.0
13	10.3219	10.8777	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.1
14	13.2466	0.7946	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.5
15	19.8695	16.6324	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.5
16	20.5836	10.6126	2,3,5-trimetil-hexano	85.1

5. Resultados de la cromatografía de gases del producto líquido con solvente: Composiciones.

Cuadro 157. Composiciones porcentuales del producto líquido con solvente: Corrida 1 – Muestra 1

No. de pico	Tiempo de retención	Porcentaje de área	Compuesto	Porcentaje de coincidencia (%)
1	1.3472	4.9410	Etanol	91.0
2	1.3927	1.4705	Pentano	88.5
3	1.4928	0.2763	2-metil-pentano	85.4
4	1.5428	1.9494	2-metil-1-penteno	94.0
5	1.6247	69.3350	Triclorometano	90.0
6	2.4935	0.5706	4-metil-heptano-	81.0
7	3.0211	0.1727	3-metil-4-noneno	82.7
8	3.3395	0.3844	4-metil-3-hepteno	84.9
9	3.4805	9.1487	2,4-dimetil-1-hepteno	91.0
10	3.7489	0.5513	3,3-dimetil-1-hexeno	87.8
11	4.0263	0.1697	2,6-dimetil-2,4-heptadieno	87.0
12	4.2037	0.1483	2,3-dimethyl-1,3-heptadieno	81.0
13	4.4630	0.6149	3-penten-2-ona	84.5
14	4.9452	0.1768	3,4-nonadieno	81.5
15	7.7198	0.5855	2,6-dimetil-nonano	87.0
16	10.3080	2.7117	2,3,6,7-tetrametil-4-octeno	85.2
17	13.2282	0.2266	2,3,3-trimetil-4-noneno	88.3
18	19.8465	2.8134	2,3,7-trimetil-4-octeno	85.4
19	20.5515	3.7532	2,3,5-trimetil-hexano	84.8

*Nota: Se utilizó triclorometano (con etanol como preservante) como solvente para el análisis del producto líquido en cromatografía de gases. Se incluye el Cuadro 157 como ejemplo de la composición original del producto líquido la cual incluye la presencia del solvente utilizado para preparación de muestras.

7. Resumen de datos de composición y estadística de los productos gaseoso y líquido

Cuadro 158. Composición porcentual del propeno en las muestras gaseosas analizadas.

No. de pirólisis	No. de muestra	Composición (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	1	24.4874	25.4331	0.8234
	2	25.8206		
	3	25.9913		
2	1	45.4505	68.5409	20.4251
	2	86.9748		
	3	84.4290		
	4	57.3093		
3	1	80.7896	84.8113	5.5883
	2	79.2430		
	3	89.0953		
	4	90.1173		
4	1	51.5304	73.8157	20.7805
	2	60.7186		
	3	90.6842		
	4	92.3297		
5	1	72.6469	71.6288	9.7720
	2	73.9496		
	3	80.4670		
	4	75.5926		
	5	74.6704		
	6	52.4465		
Total de muestras	21	Promedio	64.8460	

Nota: Los valores promedios se presentan gráficamente en la figura 9 en resultados. Las desviaciones estándar se representan gráficamente como barras de error.

Cuadro 159. Composición porcentual del 2-penteno en las muestras gaseosas analizadas

No. de pirólisis	No. de muestra	Composición (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	1	16.1507	11.0466	4.4645
	2	9.1210		
	3	7.8680		
2	1	12.5713	10.8322	1.4883
	2	9.1629		
	3	11.4422		
	4	10.1524		
3	1	11.1489	9.7295	2.4380
	2	12.4180		
	3	7.9496		
	4	7.4014		
4	1	33.7966	18.0385	14.8328
	2	27.5690		
	3	6.1464		
	4	4.6421		
5	1	15.0911	14.1190	1.7659
	2	15.3808		
	3	12.0358		

No. de pirólisis	No. de muestra	Composición (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
	4	12.6139		
	5	13.1330		
	6	16.4595		
Total de muestras	21	Promedio	12.7532	

*Nota: Los valores promedios se presentan gráficamente en resultados. Las desviaciones estándar se representan gráficamente como barras de error.

Cuadro 160. Composición porcentual del 2-metil-1-penteno en las muestras gaseosas analizadas

No. de pirólisis	No. de muestra	Composición (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	1	13.5087	7.3875	5.3039
	2	4.4998		
	3	4.1540		
2	1	18.3727	8.2696	7.3815
	2	2.6997		
	3	2.8339		
	4	9.1720		
3	1	4.7169	3.7037	1.4686
	2	5.1284		
	3	2.9550		
	4	2.0145		
4	1	14.6731	7.7308	5.6717
	2	10.0522		
	3	3.1694		
	4	3.0283		
5	1	6.5166	7.1232	2.2877
	2	5.6879		
	3	4.7034		
	4	6.8129		
	5	7.7202		
	6	11.2983		
Total de muestras	21	Promedio	6.8429	

Nota: Los valores promedios se presentan gráficamente en resultados. Las desviaciones estándar se representan gráficamente como barras de error.

Cuadro 161. Composición porcentual del 2,4-dimetil-1-hepteno en las muestras líquidas analizadas

No. de pirólisis	No. de muestra	Composición (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	1	37.0060	37.4596	0.6468
	2	37.1726		
	3	38.2003		
2	1	36.5163	37.4404	1.7304
	2	39.4366		
	3	36.3682		
3	1	38.7562	37.8909	0.7622
	2	37.3190		
	3	37.5975		
4	1	36.0235	36.5957	0.5644
	2	36.6116		
	3	37.1520		
5	1	38.8233	38.6492	0.4609
	2	38.9977		
	3	38.1266		
Total de muestras	15	Promedio	37.6072	

*Nota: Los valores promedios se presentan gráficamente en la figura 12 en resultados. Las desviaciones estándar se representan gráficamente como barras de error.

Cuadro 162. Composición porcentual del 2,3,7-trimetil-4-octeno en las muestras líquidas analizadas

No. de pirólisis	No. de muestra	Composición (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	1	16.7798	17.1245	0.4079
	2	17.5749		
	3	17.0189		
2	1	19.1356	18.5817	0.5234
	2	18.5141		
	3	18.0954		
3	1	18.0178	18.9987	0.8770
	2	19.2711		
	3	19.7071		
4	1	19.7235	19.5163	0.2154
	2	19.2936		
	3	19.5319		
5	1	16.4421	16.4266	0.2140
	2	16.2053		
	3	16.6324		
Total de muestras	15	Promedio	18.1296	

*Nota: Los valores promedios se presentan gráficamente en resultados. Las desviaciones estándar se representan gráficamente como barras de error.

Cuadro 163. Composición porcentual del 2,3,6,7-tetrametil-4-octeno en las muestras líquidas analizadas

No. de pirólisis	No. de muestra	Composición (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	1	10.9687	10.6663	0.4063
	2	10.2045		
	3	10.8256		
2	1	12.3438	11.9071	0.6591
	2	11.1490		
	3	12.2286		
3	1	11.0186	11.2417	0.3126
	2	11.5989		
	3	11.1075		
4	1	12.0502	12.6315	0.5815
	2	13.2131		
	3	12.6311		
5	1	10.1802	10.3186	0.5043
	2	9.8980		
	3	10.8777		
Total de muestras	15	Promedio	11.3530	

*Nota: Los valores promedios se presentan gráficamente en resultados. Las desviaciones estándar se representan gráficamente como barras de error.

Cuadro 164. Composición porcentual del 2,3,5-trimetil-hexano en las muestras líquidas analizadas

No. de pirólisis	No. de muestra	Composición (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	1	9.7813	9.6551	0.1294
	2	9.6613		
	3	9.5227		
2	1	10.6746	10.1887	0.5241
	2	10.2582		
	3	9.6333		
3	1	9.8136	10.4170	0.5235
	2	10.7496		
	3	10.6879		
4	1	12.2702	11.5813	0.7209
	2	11.6415		
	3	10.8322		
5	1	9.3305	9.7507	0.7465
	2	9.3089		
	3	10.6126		
Total de muestras	15	Promedio	10.3186	

*Nota: Los valores promedios se presentan gráficamente en resultados. Las desviaciones estándar se representan gráficamente como barras de error.

Cuadro 165. Composición porcentual del 2-metil-1-penteno en las muestras líquidas analizadas

No. de pirólisis	No. de muestra	Composición (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	1	7.8721	8.0987	0.3123
	2	7.9690		
	3	8.4549		
2	1	6.3056	7.0424	0.7086
	2	7.7189		
	3	7.1027		
3	1	9.4128	8.0640	1.4426
	2	6.5430		
	3	8.2363		
4	1	5.9323	5.9776	0.8704
	2	5.1307		
	3	6.8698		
5	1	7.6282	7.8700	0.2101
	2	8.0075		
	3	7.9743		
Total de muestras	15	Promedio	7.4105	

*Nota: Los valores promedios se presentan gráficamente en resultados. Las desviaciones estándar se representan gráficamente como barras de error.

Cuadro 166. Estadística descriptiva de las composiciones de propeno en el producto gaseoso

Media	64.8460
Error típico	10.2277
Mediana	71.6288
Desviación estándar	22.8698
Curtosis	3.7921
Coeficiente de asimetría	-1.8176
Rango	59.3782
Mínimo	25.4331
Máximo	84.8113
Cuenta	5
Nivel de confianza (95 %)	28.3966

Cuadro 167. Estadística descriptiva de las composiciones de 2-penteno en el producto gaseoso

Media	12.7532
Error típico	1.5091
Mediana	11.0466
Desviación estándar	3.3744
Curtosis	0.5762
Coeficiente de asimetría	1.1982
Rango	8.3091
Mínimo	9.7295
Máximo	18.0385
Cuenta	5
Nivel de confianza (95 %)	4.1899

Cuadro 168. Estadística descriptiva de las composiciones de 2-metil-1-penteno en el producto gaseoso

Media	6.8429
Error típico	0.8079
Mediana	7.3875
Desviación estándar	1.8065
Curtosis	3.9696
Coeficiente de asimetría	-1.9189
Rango	4.5659
Mínimo	3.7037
Máximo	8.2696
Cuenta	5
Nivel de confianza (95 %)	2.2430

Cuadro 169. Estadística descriptiva de las composiciones de 2,4-dimetil-1-hepteno en el producto líquido

Media	37.6072
Error típico	0.3346
Mediana	37.4596
Desviación estándar	0.7482
Curtosis	0.9104
Coeficiente de asimetría	0.1111
Rango	2.0535
Mínimo	36.5957
Máximo	38.6492
Cuenta	5
Nivel de confianza (95 %)	0.9290

Cuadro 170. Estadística descriptiva de las composiciones de 2,3,7-trimetil-4-octeno en el producto líquido

Media	18.1296
Error típico	0.5828
Mediana	18.5817
Desviación estándar	1.3032
Curtosis	-2.0443
Coeficiente de asimetría	-0.4779
Rango	3.0897
Mínimo	16.4266
Máximo	19.5163
Cuenta	5
Nivel de confianza (95 %)	1.6181

Cuadro 171. Estadística descriptiva de las composiciones de 2,3,6,7-tetrametil-4-octeno en el producto líquido

Media	11.3530
Error típico	0.4181
Mediana	11.2417
Desviación estándar	0.9348
Curtosis	-1.2347
Coeficiente de asimetría	0.4221
Rango	2.3128
Mínimo	10.3186
Máximo	12.6315
Cuenta	5
Nivel de confianza (95 %)	1.1607

Cuadro 172. Estadística descriptiva de las composiciones de 2,3,5-trimetil-hexano en el producto líquido

Media	10.3186
Error típico	0.3452
Mediana	10.1887
Desviación estándar	0.7720
Curtosis	1.9981
Coeficiente de asimetría	1.3921
Rango	1.9262
Mínimo	9.6551
Máximo	11.5813
Cuenta	5
Nivel de confianza (95 %)	0.9585

Cuadro 173. Estadística descriptiva de las composiciones de 2-metil-1-penteno en el producto líquido

Media	7.4105
Error típico	0.4062
Mediana	7.8700
Desviación estándar	0.9084
Curtosis	0.6027
Coeficiente de asimetría	-1.2732
Rango	2.1211
Mínimo	5.9776
Máximo	8.0987
Cuenta	5
Nivel de confianza (95 %)	1.1279

6. Pruebas de densidad del producto líquido.

Cuadro 174. Mediciones de densidad del producto líquido a 24 – 26 °C (g/mL)

Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5
0.78168	0.73518	0.77639	0.76509	0.78157
0.78769	0.73466	0.77656	0.77577	0.78287
0.78247	0.73644	0.77587	0.77811	0.78744
0.78536	0.73267	0.77594	0.77693	0.78786
0.78172	0.73552	0.77778	0.77864	0.78865

Cuadro 175. Valores promedio de la densidad del producto líquido a 24 – 26 °C

No. de pirólisis	Densidad (g/mL)	Incertidumbre (g/mL)
1	0.78378	0.05082
2	0.73489	0.04769
3	0.77651	0.05036
4	0.77491	0.05037
5	0.78568	0.05110
Promedio	0.77115	0.05007

Nota: Los valores indicados son las mediciones utilizadas para determinar el valor promedio presentado en resultados.

Cuadro 176. Estadística descriptiva de la densidad del producto líquido a 24 – 26 °C

Media	0.77115
Error típico	0.00930
Mediana	0.77651
Desviación estándar	0.02078
Curtosis	4.05418
Coeficiente de asimetría	-1.96715
Rango	0.05078
Mínimo	0.73489
Máximo	0.78568
Cuenta	5
Nivel de confianza (95 %)	0.02581

Cuadro 177. Mediciones de densidad del producto líquido a 15 °C

No. de muestra	Densidad (g/mL)	Incertidumbre (g/mL)
1	0.80490	0.05252
2	0.81377	0.05309
3	0.80576	0.05257
4	0.81329	0.05306
5	0.81528	0.05319
Promedio	0.81060	0.05288

Nota: Los valores indicados son las mediciones utilizadas para determinar el valor promedio presentado en resultados.

Cuadro 178. Estadística descriptiva de la densidad del producto líquido a 15 °C

Media	0.81060
Error típico	0.00218
Mediana	0.81329
Desviación estándar	0.00488
Curtosis	-3.05307
Coeficiente de asimetría	-0.52044
Rango	0.01038
Mínimo	0.80490
Máximo	0.81528
Cuenta	5
Nivel de confianza (95 %)	0.00605

7. Poder calorífico de los productos líquido y sólido.

Cuadro 179. Mediciones de poder calorífico del producto líquido (J/g)

No. de corrida	No. de muestra	Poder calorífico (J/g)	Promedio (J/g)	Desviación estándar (J/g)
1	1	44,490	44,931	622.96
	2	45,371		
2	1	44,634	44,779	205.06
	2	44,924		
3	1	45,670	45,550	170.41
	2	45,429		
Total de muestras	6	Promedio	45,086	

Cuadro 180. Estadística descriptiva del poder calorífico del producto líquido

Media	45,086
Error típico	166.65
Mediana	45008.42
Desviación estándar	333.30
Curtosis	1.50
Coeficiente de asimetría	1.20
Rango	770.50
Mínimo	44,779
Máximo	45,550
Cuenta	4
Nivel de confianza (95 %)	530.35

Cuadro 181. Mediciones de poder calorífico del producto sólido (J/g)

No. de corrida	No. de muestra	Poder calorífico (J/g)	Promedio (J/g)	Desviación estándar (J/g)
1	1	19,717	22,295	2,829.35
	2	25,322		
	3	21,846		
2	1	23,742	24,096	445.89
	2	24,597		

No. de corrida	No. de muestra	Poder calorífico (J/g)	Promedio (J/g)	Desviación estándar (J/g)
	3	23,950		
3	1	21,240	21,497	489.39
	2	22,061		
	3	21,189		
4	1	22,342	21,685	591.45
	2	21,195		
	3	21,518		
5	1	19,594	19,704	253.93
	2	19,523		
	3	19,994		
Total de muestras	15	Promedio	21,855	

Cuadro 182. Estadística descriptiva del poder calorífico del producto sólido

Media	21,855
Error típico	707
Mediana	21,685
Desviación estándar	1,581
Curtosis	1.3369
Coeficiente de asimetría	0.1398
Rango	4,393
Mínimo	19,704
Máximo	24,096
Cuenta	5
Nivel de confianza (95 %)	1,964

8. Especificaciones de cristalería

Cuadro 183. Especificaciones de la cristalería utilizada

Instrumento	Material	Capacidad	Precisión	Cantidad
Balón aforado	Pyrex	5 mL	0.2 mL	5
Probeta	Pyrex	10 mL	0.2 mL	1
Pipeta	Pyrex	5 mL	0.05 mL	1

9. Especificaciones de equipo y método de cromatografía

Cuadro 184. Especificaciones del equipo

Equipo	Marca	Modelo	Capacidad	Precisión	Especificaciones
Balanza analítica	OHAUS	Analytical Plus E11140	200 g	± 0.00001 g	No aplica.
Balanza analítica	OHAUS	N/A	110 g	± 0.0001 g	No aplica.
Balanza analítica	BOECO	BBA31	220 g	± 0.0001 g	No aplica.
Cromatógrafo de gases	Agilent	6850	No aplica.	No aplica.	No aplica.

Equipo	Marca	Modelo	Capacidad	Precisión	Especificaciones
Espectrómetro de masas	Agilent	5975C	No aplica.	No aplica.	No aplica.
Bomba calorimétrica	IKA	C 200	No aplica.	± 1 J/g	Su uso es únicamente para muestras sólidas y líquidas.
Baño térmico	PolyScience	G56312	0 – 200 °C	± 0.1 °C	No aplica.

Cuadro 185. Métodos de cromatografía utilizados para la identificación de compuestos en los productos gaseosos y líquidos de la pirólisis.

	Producto gaseoso	Producto líquido
Columna	Polar DB-Wax 60 m largo, 0.25 mm diámetro, 0.25 µm film	Apolar HP-5 60 m largo, 0.25 mm diámetro, 0.25 µm film
Inyección	1 mL	1 mL
Tipo de inyección	Splitless	Splitless
Temperatura de horno	60 °C x 2 min a 12 °C/ min a 235 °C x 20 min	60 °C x 2 min a 3 °C/ min a 2605 °C x 5 min
Flujo de gas de acarreo	0.5 mL/min	1.0 mL/min

10. Especificaciones de los reactivos

Cuadro 186. Especificaciones de los reactivos utilizados para el análisis químico de los productos gaseosos y líquidos

Reactivo	Marca	Pureza	Uso
Cloroformo	MERCK	99.0 – 99.4 %	Solvente apolar para la dilución de muestras de líquido de pirólisis para su análisis en cromatografía de gases
Helio	Distribuido por Productos del Aire Guatemala	Analítico UHO Grado 5	Gas acarreador de las muestras analizadas por cromatografía de gases.

11. Prueba t de student

Cuadro 187. Tabla de distribución t para 1 a 20 grados de libertad

Grados de libertad	Área en la cola superior					
	0.20	0.10	0.05	0.025	0.010	0.005
1	1.376	3.078	6.314	12.706	31.821	63.656
2	1.061	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	0.978	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	0.941	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	0.920	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	0.906	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	0.896	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	0.889	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	0.883	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250

Grados de libertad	Área en la cola superior					
	0.20	0.10	0.05	0.025	0.010	0.005
10	0.879	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	0.876	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	0.873	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	0.870	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	0.868	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	0.866	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	0.865	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	0.863	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	0.862	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	0.861	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	0.860	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845

Tomado de: (Anderson, 2012).

12. Cálculos de muestra

Cálculo de muestra 11. Determinación de la densidad del producto líquido

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{\text{masa de balón con muestra} - \text{masa balón vacío}}{\text{volumen del balón a partir de agua destilada}}$$

$$= \frac{(27.08933 - 23.20530)\ \text{g}}{4.96953\ \text{mL}} = \frac{3.88403\ \text{g}}{4.96953\ \text{mL}} = 0.78157\ \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

Se realizó el mismo cálculo de muestra para todas las mediciones del producto líquido.

13. Representación gráfica de la lógica de formación de compuestos obtenidos de la pirólisis

Las siguientes figuras se presentan con la finalidad de dar una explicación gráfica de la lógica de formación de compuestos. Se indican los tres compuestos principales del producto gaseoso como ejemplos. Las líneas punteadas indican la ruptura de enlaces químicos.

Figura 236. Formación de propeno a partir de una sección de la molécula de polipropileno

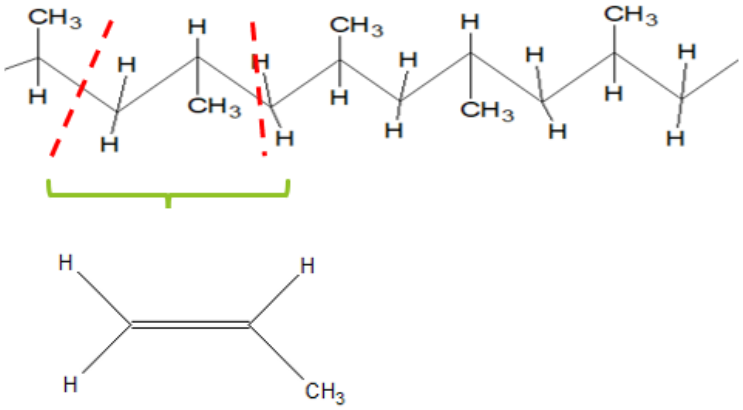


Figura 237. Formación de 2-penteno a partir de una sección de la molécula de polipropileno

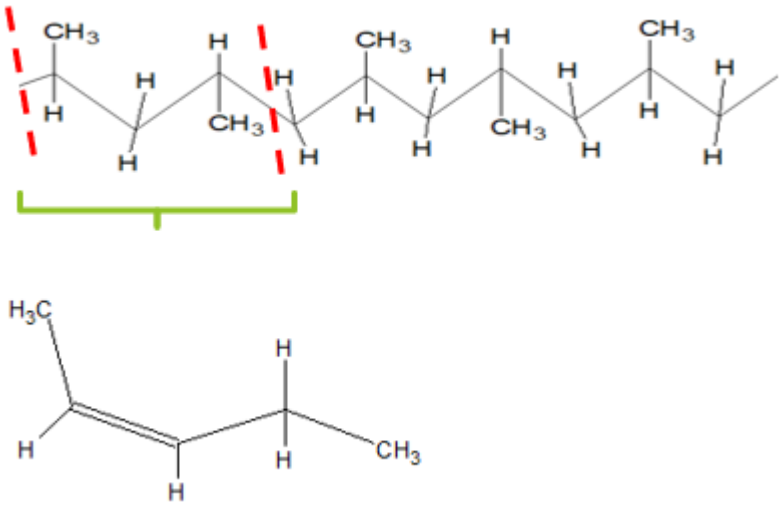
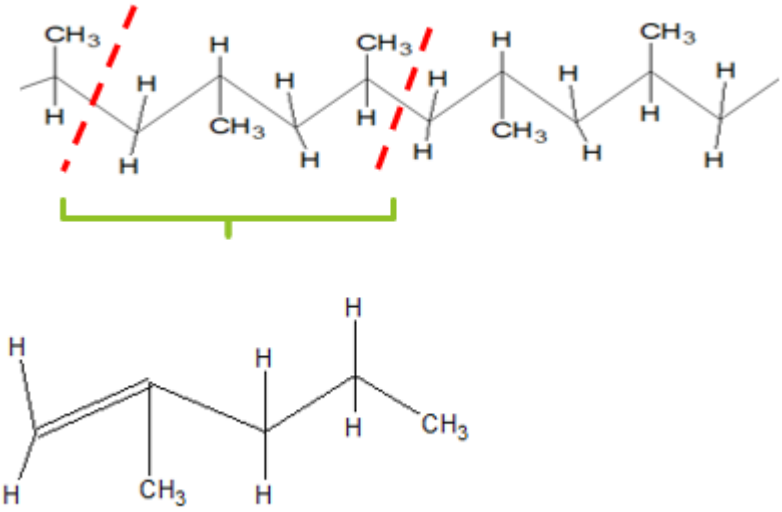


Figura 238. Formación de 2-metil-1-penteno a partir de una sección de la molécula de polipropileno



D. ESCALAMIENTO INDUSTRIAL DE LA REACCIÓN DE PIRÓLISIS

1. Datos utilizados de los productos, temperatura y cinética de la pirólisis escala laboratorio

Cuadro 188. Masa y rendimientos de productos a escala laboratorio de la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado a diferentes set points de temperatura en la mufla.

Pirólisis No.	Fecha	Masa (± 0.01 g)			Rendimiento (%)*			Set point (°C)
		Líquido	Sólido	Gas*	Líquido	Sólido	Gas	
1	04/06/2019	36.96	5.70	17.34	61.60	9.50	28.90	510
2	04/06/2019	34.91	9.80	15.29	58.18	16.33	25.48	510
3	06/06/2019	45.29	5.20	9.51	75.48	8.67	15.85	507
4	07/06/2019	45.70	5.80	8.50	76.17	9.67	14.17	509
5	11/06/2019	45.98	7.60	6.42	76.63	12.67	10.70	476
6	11/06/2019	41.99	4.30	13.71	69.98	7.17	22.85	475
7	12/06/2019	43.79	7.80	8.41	72.98	13.00	14.02	477

* El rendimiento se obtuvo sobre la cantidad inicial de 60g de material de empaque tipo polipropileno metalizado.

* La masa del gas se obtuvo por diferencia de masas entre lo obtenido de líquido y sólido para cada corrida.

Cuadro 189. Masa y rendimientos de productos sólidos, líquidos y gaseosos de la cinética a escala laboratorio de la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado a diferentes set points de temperatura en la mufla.

Pirólisis No.	Fecha	Masa (± 0.01 g)			Rendimiento (%)			Set point (°C)
		Líquido	Sólido	Gas	Líquido	Sólido	Gas	
8	02/07/2019	45.65	8.00	6.35	76.08	13.33	10.58	430
9	03/07/2019	41.03	8.80	10.17	68.38	14.67	16.95	450
10	04/07/2019	34.76	8.80	16.44	57.93	14.67	27.40	475
11	05/07/2019	41.26	4.30	14.44	68.77	7.17	24.07	460
12	09/07/2019	37.12	5.30	17.58	61.87	8.83	29.30	415
13	11/07/2019	45.83	5.30	8.87	76.38	8.83	14.78	440

Cuadro 190. Masa y rendimientos de productos de las corridas a escala laboratorio de la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado.

Pirólisis No.	Masa (± 0.01 g)					Rendimiento (% m/m)*				
	Líquido	Sólido	Gas*	Residuo líquido	Residuo sólido	Líquido	Sólido	Gas	Residuo líquido	Residuo sólido
14	37.12	5.30	0.53	12.44	4.61	61.8687	8.8333	0.8833	20.7333	7.6833
15	45.65	8.00	0.19	4.86	1.60	76.0837	13.3333	0.3167	8.1	2.667
16	41.63	8.80	0.31	8.77	1.09	69.3848	14.6667	0.5167	14.6167	1.8167
17	41.26	4.30	0.43	10.05	3.96	68.7613	7.1667	0.7167	16.75	6.6
18	46.56	5.60	0.59	5.71	1.53	77.607	9.3333	0.9833	9.5167	2.55

* La masa del gas se obtuvo por diferencia de masas entre lo obtenido de líquido y sólido para cada corrida.

* Corrida a set point de 475°C para validar los datos obtenidos por el procedimiento de cinética.

Cuadro 191. Mediciones de temperatura de la mufla con diferencia de un minuto para calcular las rampas de calentamiento en las corridas escala laboratorio para la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado

Pirólisis No.	Fecha	Cambio de temperatura		Rampa (±1°C/min)
		T1 (±1 °C)	T2 (±1 °C)	
1	04/06/2019	145	175	30
		186	215	29
		220	245	25
		252	274	22
		280	300	20
		400	413	13
		415	426	11
		430	441	11
		450	461	11
		475	485	10
2	04/06/2019	218	244	26
		256	279	23
		312	331	19
		350	365	15
		400	413	13
		415	427	12
		430	441	11
		450	461	11
		475	486	11
		490	499	9
3	06/06/2019	81	90	9
		120	130	10
		208	217	9
		222	231	9
		244	253	9
		259	268	9
		280	288	8
		343	351	8
		379	387	8
		468	475	7
4	07/06/2019	100	109	9
		122	132	10
		142	152	10
		204	213	9
		232	241	9

Pirólisis No.	Fecha	Cambio de temperatura		Rampa (±1°C/min)
		T1 (±1 °C)	T2 (±1 °C)	
		280	289	9
		321	329	8
		350	357	7
		435	442	7
		445	452	7
5	11/06/2019	113	122	9
		130	140	10
		212	221	9
		250	259	9
		345	353	8
		361	368	7
		391	398	7
		404	412	8
		419	426	7
		435	442	7
6	11/06/2019	116	126	10
		142	152	10
		201	210	9
		227	236	9
		305	315	10
		361	369	8
		381	388	7
		396	403	7
		413	420	7
		444	449	5
7	12/06/2019	72	82	10
		117	127	10
		157	166	9
		220	229	9
		267	276	9
		332	340	8
		350	358	8
		417	423	6
		436	440	4
		441	444	3

* Tiempo transcurrido durante la reacción cuando se extrajo la muestra que fue analizada.

Cuadro 192. Composición, masa y moles de 2,4-dimtetil-1-hepteno en muestras obtenidas a distintos tiempos de corrida a escala laboratorio de pirólisis de material de empaque analizado.

Set point (°C):	Tiempo * (min)	Muestra	Composición 2,4-Dimethyl-1-heptene (% p/p)	Masa muestra (±0.001g)	Masa 2,4-Dimetil-1-hepteno en muestra (±0.001g)*	Moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno (±0.00001)	Moles totales de 2,4-Dimetil-1-hepteno (±0.00001)
430	0	0	0	0	0	0	0
	61	1	23.15	3.074	0.712	0.00564	0.00564
	65	2	20.84	5.273	1.099	0.00871	0.01434
	69	3	19.06	6.046	1.153	0.00913	0.02347
	73	4	18.34	5.825	1.068	0.00846	0.03193
	77	5	18.02	4.500	0.811	0.00642	0.03836
	81	6	13.39	5.012	0.671	0.00532	0.04368
	88	7	15.04	4.293	0.646	0.00511	0.04879
	91	8	14.94	1.739	0.260	0.00206	0.05085
450	0	0	0	0	0	0.00000	0.00000
	63	1	21.23	3.074	0.653	0.00517	0.00517
	65	2	18.61	5.273	0.981	0.00777	0.01294
	68	3	17.45	6.046	1.055	0.00836	0.02130
	71	4	19.42	5.825	1.131	0.00896	0.03026
	73	5	20.84	4.500	0.938	0.00743	0.03769
	77	6	18.08	5.012	0.906	0.00718	0.04487
	82	7	17.79	4.293	0.764	0.00605	0.05092
475	0	0	0	0	0	0.00000	0.00000
	55	1	25.06	5.200	1.303	0.01032	0.01032
	57	2	27.69	5.183	1.435	0.01137	0.02169
	59	3	24.89	6.357	1.582	0.01253	0.03422
	61	4	22.42	4.428	0.993	0.00786	0.04209
	63	5	24.08	4.641	1.118	0.00885	0.05094
	65	6	24.40	4.111	1.003	0.00795	0.05888
	69	7	24.14	4.845	1.170	0.00926	0.06815
460	0	0	0	0	0	0.00000	0.00000
	61	1	36.50	4.259	1.554	0.01231	0.01231
	65	2	28.50	4.195	1.196	0.00947	0.02179
	69	3	19.21	7.240	1.391	0.01102	0.03280
	73	4	19.52	7.749	1.512	0.01198	0.04478
	77	5	24.74	8.624	2.133	0.01690	0.06168
	81	6	31.61	5.803	1.834	0.01453	0.07622
	88	7	38.78	6.450	2.501	0.01981	0.09603
415	0	0	0	0	0	0.00000	0.00000
	63	1	22.09	2.991	0.661	0.00523	0.00523
	67	2	9.66	4.752	0.459	0.00364	0.00887
	73	3	14.55	3.347	0.487	0.00386	0.01273
	76	4	13.63	3.062	0.418	0.00331	0.01604
	81	5	17.12	3.142	0.538	0.00426	0.02030

Set point (°C):	Tiempo * (min)	Muestra	Composición 2,4-Dimethyl-1-heptene (% p/p)	Masa muestra (±0.001g)	Masa 2,4-Dimetil-1-hepteno en muestra (±0.001g)*	Moles de 2,4-Dimetil-1-hepteno (±0.00001)	Moles totales de 2,4-Dimetil-1-hepteno (±0.00001)
	85	6	14.00	4.662	0.653	0.00517	0.02547
	91	7	13.92	3.801	0.529	0.00419	0.02966
	91	7	13.92	3.801	0.529	0.00419	0.02966
	95	8	17.32	6.030	1.045	0.00827	0.03793

Cuadro 193. Propiedades del producto líquido, plastic oil, obtenido en las corridas escala laboratorio de la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado y del bunker utilizado en la empresa alimenticia

Parámetro	Bunker	Plastic oil
Densidad (kg/m^3)	960 - 975	779.1
Viscosidad (cSt)	1.5 – 6.0	1.9
API (60 ºF)	11.90	25
Flash point (°C)	>260	12
Poder calorífico (MJ/kg)	60	43.74

Cuadro 194. Propiedades del material de empaque tipo polipropileno metalizado utilizado en las corridas escala laboratorio y simulaciones escala planta piloto de pirólisis.

Parámetro	Material de empaque
Humedad (%)	1.04
Masa molecular promedio (g/mol)	700
Densidad de bulto (kg/L)	0.03
Densidad compactada (kg/L)	0.03
Densidad de fundido (kg/L)	0.45
Compresibilidad (%)	26
Punto de fusión* (°C)	120-170
Conductividad térmica* (W/m*°C)	0.22
Poder calorífico (J/g°C)	42667
Capacidad calorífica * (J/K*kg)	1700

*Datos obtenidos de Ding, F; Xion, L. y Luo. (2012). Kinetic study of low-temperature conversion of plastic mixtures to value added products.

Cuadro 195. Datos de consumo de bunker, recolectados en diferentes días y horas de operación de la caldera de una empresa de industria alimenticia.

Flujo de bunker (±0.001 gal/h)		
52.89	20.75	32.10
53.16	20.65	30.30
52.68	43.20	26.40
52.92	47.70	30.70
53.00	48.30	30.00
53.90	51.90	26.40
52.80	52.40	30.80
51.70	51.50	28.80
52.20	51.60	26.40
50.70	48.90	30.90
46.70	46.30	34.40
49.10	45.90	36.30
48.90	38.80	36.30
50.60	43.40	36.30
50.40	39.40	35.50
49.10	39.50	24.80
49.00	39.40	58.84
20.64	45.40	60.10
20.78	45.30	25.00
20.62	52.10	24.80
26.43	52.10	24.70
20.40	49.40	24.60
20.27	47.30	24.40
20.23	49.10	24.30
20.20	47.80	24.30
20.76	28.70	62.80

Cuadro 196. Medidas del reactor utilizado para las corridas de la reacción de pirólisis escala laboratorio de material de empaque tipo polipropileno metalizado.

Diámetro externo (m)	0.0508
Radio externo (m)	0.0254
Espesor (m)	0.0012
Diámetro interno (m)	0.0496
Radio interno (m)	0.0248
Longitud (m)	0.2100
Material	Acero inoxidable 304
Conductividad térmica (W/m*K)	21.46*

*Conductividad térmica obtenida de Cuadro de conductiviades térmicas (Perry, Green, & Maloney, 1997)

2. Análisis estadístico de los datos a utilizar para el sistema de simuladores

Cuadro 197. Promedio, desviación estándar y rango de 95% de confianza respecto a los rendimientos de los productos obtenidos para las corridas escala laboratorio de pirólisis a 475°C

Pirólisis No.	Rendimiento (% m/m)*		
	Líquido	Sólido*	Gas*
1	82.6020	16.5166	0.8833
2	84.1837	16.0003	0.3167
3	84.0015	16.4834	0.5167
4	85.5113	13.7667	0.7167
5	87.1237	11.8833	0.9833
Promedio	84.6844	14.9301	0.6833
Desv. Est.	1.7093	2.0440	0.2708
Rango 95% confianza*	3.3503	4.0062	0.5307

*Procedimiento para el cálculo del rango de 95% de confianza según Skoog, *et.al*., 2007.

*Se tomó en cuenta el residuo de producto líquido y sólido contenido en chimenea y condensador y demás equipos utilizados en las corridas de pirólisis escala laboratorio.

Cuadro 198. Prueba Q para la eliminación de datos atípicos realizada a los rendimientos del producto líquido de las corridas de pirólisis a 475 °C

	Plastic Oil	
83.54%	n =	11
81.65%	Q critc =	0.57
81.43%		
79.23%	Valor sospechoso: 45.06%	
77.87%	r21, Qexp =	0.35
76.63%		No es atípico.
72.98%		
69.98%	Valor sospechoso: 83.54%	
57.93%	r21, Qexp=	0.082
57.73%		No es atípico
45.06%		

Cuadro 199. Prueba Q para la eliminación de datos atípicos realizada a los rendimientos del producto sólido de las corridas de pirólisis a 475 °C

	Char	
14.67%	n=	11
13.67%	Q critc =	0.57
13.00%		
12.67%	Valor sospechoso:	6.00%
9.90%	r21, Qexp =	0.26
9.50%		No es atípico.
8.83%		
8.83%	Valor sospechoso:	14.67%
8.00%	r21, Qexp=	0.222
7.17%		No es atípico
6.00%		

Cuadro 200. Prueba Q para la eliminación de datos atípicos realizada a los rendimientos del producto gaseoso de las corridas de pirólisis a 475 °C

	Syngas	
46.11%	n=	11
32.77%	Q critc =	0.57
27.40%		
22.85%	Valor sospechoso:	8.47%
14.02%	r21, Qexp =	0.08
10.87%		No es atípico.
10.70%		
10.46%	Valor sospechoso:	46.11%
10.35%	r21, Qexp=	0.514
9.73%		No es atípico
8.47%		

Cuadro 201. Promedio, desviación estándar y rango de 95% de confianza para el porcentaje m/m del 2,4-dimetil-1-hepteno obtenido en las pruebas escala planta piloto.

Tiempol (min)	Composición 2,4-dimetil-1-hepteno (% m/m)
0	0
55	25.06
57	27.69
59	24.89
61	22.42
63	24.08
65	24.40
69	24.14
Promedio	24.67
Desv. Est.	1.58
Rango 95% confianza	3.10

Cuadro 202. Análisis estadístico de consumo de bunker recolectados en caldera de una empresa alimenticia.

Promedio (±0.001 gal/h)	39.19
Desviación estándar (±0.001 gal/h)	12.59
Consumo seguro (±0.001 gal/h)	51.78
Densidad (kg/L)	0.9766
Flujo másico (±0.01 kg/h)	191.15
Flujo másico (±0.01 kg/día)	4594.14

3. Modelo de simulación

Ecuación 32. Cálculo de la cantidad de masa de material de empaque a utilizar para cada lote de reacción de pirólisis según la base de diseño de la empresa.

$$Q_{bunker} = PC_{bunker} * m_{bunker}$$

$$m_{me} = \frac{\frac{Q_{bunker}}{PC_{me}}}{ef.}$$

$$Q_{bunker} = 60 * (30\% * 4587.57) = 82,576.18\ MJ/día$$

$$m_{me} = \frac{\frac{82,576.18}{43.74}}{84.68\%} = 2{,}229.44 \frac{kg}{lote} \rightarrow 2,300\ kg/lote$$

Donde,

Q_{bunker}= Calor cedido por el bunker, MJ/día

PC_{bunker}= Poder calorífico del bunker utilizado por la empresa alimenticia, MJ/kg

PC_{me} = Poder calorífico del plastic oil producto de la pirólisis de material de empaque, MJ/kg

$ef.$ = Porcentaje de obtención de plastic oil en las reacciones escala laboratorio

m_{me} = Masa de material de empaque por lote para la simulación de la pirólisis escala planta piloto.

Texto 1. Guion para la simulación de la reacción escala laboratorio de la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado

```
METHOD RK4
STARTTIME = 0
STOPTIME = 942
DT = 0.02
{Type Equations Here.}
RXN1=A*exp(-E/(R*T))*(W-Wf)^n
A=5.783*10^16
E=57664.13
R=1.987
Wf=0.1188*2300000
n=0.54

T=T1+((T2-T1)/(1+exp((V-TIME)/m)))
T1=133.6
T2=774.3
V=15.51
m=15.84
INIT W=2300000
INIT P=0
d/dt(P)=+RXN1
d/dt(W)=-RXN1
```

Ecuación 33. Ecuación de cinética y temperatura de reacción escala planta piloto de pirólisis de empaque tipo polipropileno metalizado

Set point (°C)	Función de T(t)				Parámetros cinéticos			
	T1 (K)	T2 (K)	t1/2 (min)	m (K/min)	A (1/min)	Ea (Cal/mol)	n	Wf(g)
415	236	692.7	19.7	10.91	1.5030E+18	59489.10	0.54	27.69
430	236.8	708.7	18.6	11.02	4.3972E+17	58714.17	0.52	24.05
450	209.4	738.3	21	14.00	9.4770E+16	57494.74	0.55	26.24
460	196.2	749.6	19.3	13.51	3.3038E+16	56411.16	0.52	25.40
475	133.6	774.3	15.5	15.84	5.7830E+16	57664.13	0.50	24.70

$$A(BOPP) \rightarrow B(Productos)$$

$$-\frac{dW_A}{dt} = A\, exp\left(-\frac{E_a}{RT(t)}\right)\left(W_A - W_f\right)^n, W_f = \alpha W_o$$

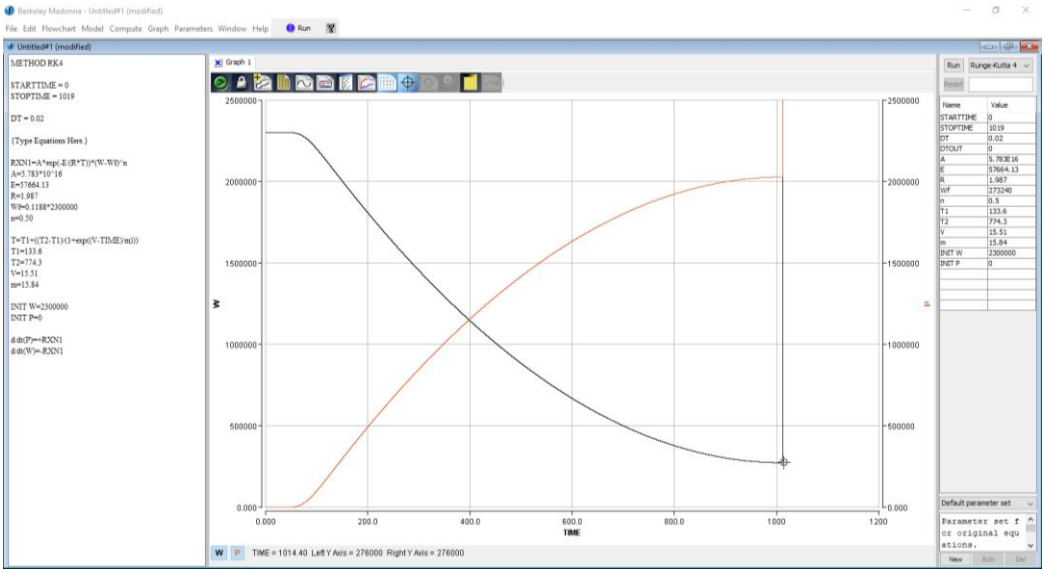
$$T(t) = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1 + e^{\frac{t_{1/2} - t}{m}}}$$

Parámetro	Valor/descripción
$\frac{dWa}{dt}$ (g/min)	Pérdida de masa de reactivo A respecto al tiempo
A (1/min)	Factor de frecuencia
Ea (cal/mol)	Energía de activación
R (cal/mol *K)	1.987
T (min)	Función de temperatura del reactor respecto al tiempo
$Q_{reactor}$ (W)	Calor trasnferido al reactor
W_a (g)	Masa de A en un tiempo determinado
α	Conversión del reactivo
W_o (g)	Masa inicial del reactivo A en el reactor
T1 (K)	Límite inferior de temperatura
T2 (K)	Límite superior de temepratura
$t_{1/2}$ (min)	Tiempo intermedio entre límites
m (k/min)	Pendiente de la curva de calentamiento

Ecuación 34. Parámetros cinéticos de la reacción de pirólisis escala laboratorio a diferentes set points de temperatura en la mufla.

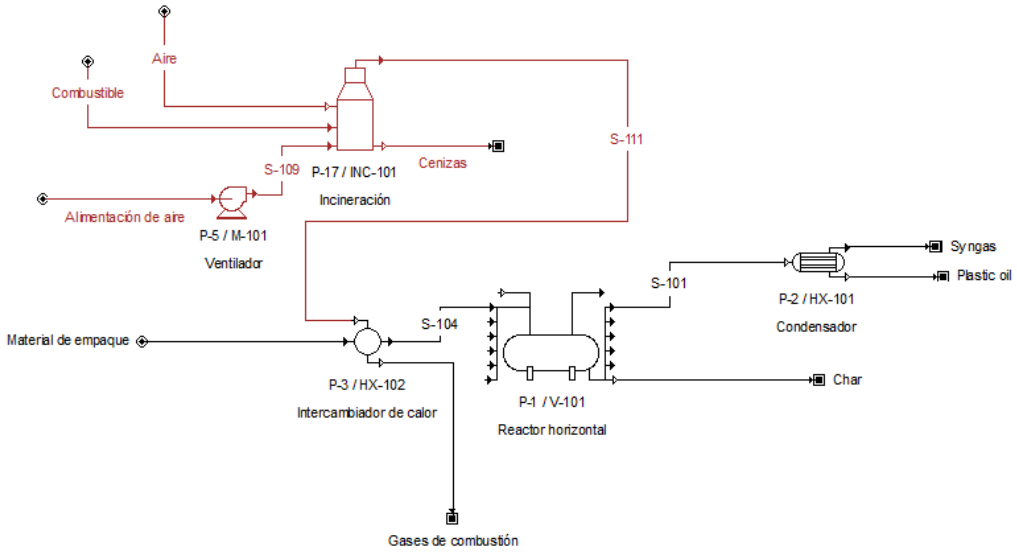
Set point (°C)	Función de T(t)				Parámetros cinéticos			
	T1 (K)	T2 (K)	t1/2 (min)	m (K/min)	A (1/min)	Ea (Cal/mol)	n	Wf(g)
415	236	692.7	19.7	10.91	1.5030E+18	59489.10	0.54	27.69
430	236.8	708.7	18.6	11.02	4.3972E+17	58714.17	0.52	24.05
450	209.4	738.3	21	14.00	9.4770E+16	57494.74	0.55	26.24
460	196.2	749.6	19.3	13.51	3.3038E+16	56411.16	0.52	25.40
475	133.6	774.3	15.5	15.84	5.7830E+16	57664.13	0.50	24.70

Figura 239. Determinación de tiempo de reacción de la pirólisis de material de empaque con los valores de la escala laboratorio y una masa incial de 2,300,000 gramos.



*Se observó un tiempo de reacción de 1015 minutos para completar el calentamiento hasta llegar al Wf.

Figura 240. Diagrama de los procesos y flujos registrados en el simulador SuperPro Designer



Ecuación 35. Cálculo de la altura de una porción de un cilindro horizontal:

$$V = \frac{masa\ material}{densidad} = L\left[\frac{\pi r^2}{2} + (h-r)\sqrt{2*r*h-h^2} + r^2 \sin^{-1}\frac{-r+h}{r}\right]$$

$$\left(\frac{2300}{0.456}\right) = 4.019\left[\frac{\pi 0.6965^2}{2} + (h-0.6965)\sqrt{2*0.6965*h-h^2} + 0.6965^2 \sin^{-1}\frac{-0.6965+h}{0.6965}\right]$$

Introducir el siguiente texto en Wolfram alpha para despejar h de la ecuación:

solve 0.250909=Pi*0.6965^2/2+(y-0.6965)*√(2*0.6965*y-y^2)+0.6965^2*arcsin((-0.6965+y)/0.6965)

$$h = 1.02878\ m$$

Donde,

V = Volumen del material de empaque dentro de reactor (m^3)

Densidad = Densidad del material de empaque, 0.456 kg/m^3

L = Largo dereactor, 4.019 m

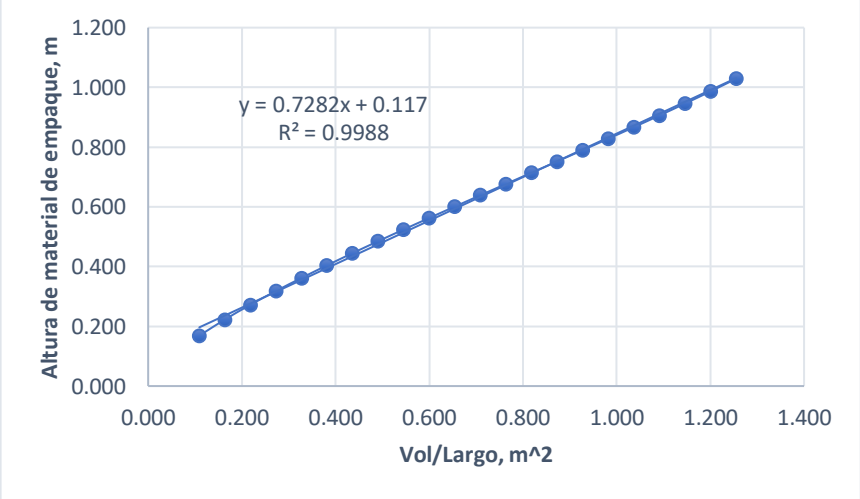
r = Radio de reacor (m)

h = altura del material de empaque dentro del reactor. (m)

Cuadro 203. Datos calculados para realizar una correlación entre la masa de material de empaque en el reactor y la altura que este ocupa en el mismo.

Masa material de empaque (kg)	Volumen/Largo (m^2)	Altura de material (m)
2300	1.207	1.029
2200	1.154	0.987
2100	1.102	0.946
2000	1.049	0.906
1900	0.997	0.867
1800	0.944	0.828
1700	0.892	0.790
1600	0.839	0.752
1500	0.787	0.714
1400	0.734	0.677
1300	0.682	0.639
1200	0.630	0.601
1100	0.577	0.563
1000	0.525	0.524
900	0.472	0.485
800	0.420	0.445
700	0.367	0.404
600	0.315	0.362
500	0.262	0.318
400	0.210	0.272
300	0.157	0.223
200	0.105	0.169

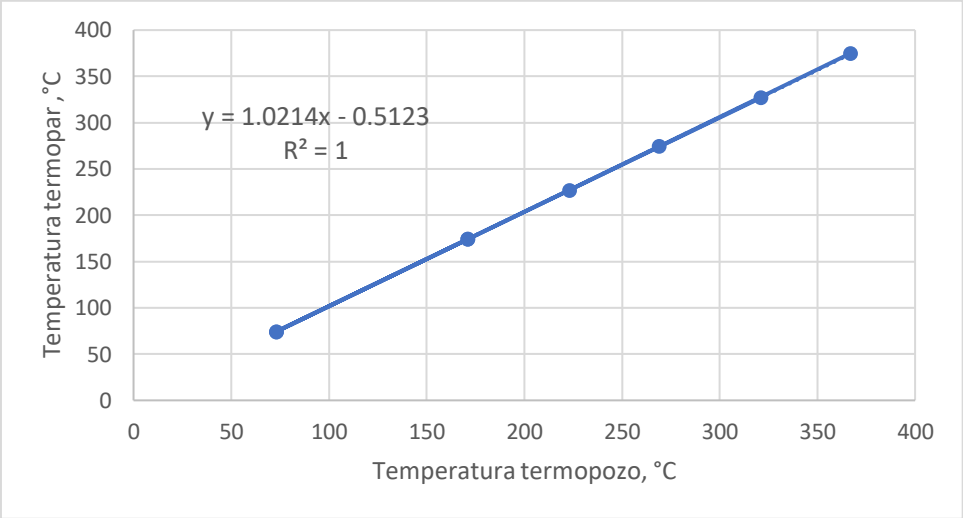
Figura 241. Gráfico de correlación entre el volumen de material de empaque dividido el largo del reactor escala planta piloto contra la altura del material de empaque dentro del reactor.



Cuadro 204. Calibración del termopar con termo pozo calibrado para corregir las mediciones de temperatura de la mufla

Termopar (°C)	Termopozo (°C)
367	375
269	274.3
171	174.1
73	74.2
171	174
73	74.242
223	227
321	326.8

Figura 242. Regresión lineal de la curva de temperatura de termopar contra temperatura de termopozo para la corrección de las lecturas realizadas con este instrumento.



Cuadro 205. Corrida de calentamiento con set point de 475°C en el reactor escala laboratorio para corregir la temperatura leída por la mufla y determinar el calor cedido hacia el reactor

Tiempo	Mufla (°C)	Reactor (°C)	Reactor corregido (°C)	Mufla corregida (°C)
0	25	30	30	46
2	53	33	33	74
4	75	38	38	96
6	84	42	42	105
8	103	51	52	124
10	121	62	63	142
12	147	82	83	168

Tiempo	Mufla (°C)	Reactor (°C)	Reactor corregido (°C)	Mufla corregida (°C)
14	166	99	101	187
16	180	113	115	201
18	201	135	137	222
20	219	157	160	240
22	237	178	181	258
24	257	202	206	278
26	274	224	228	295
28	291	247	252	312
30	303	263	268	324
32	327	294	300	348
34	341	311	317	362
36	356	330	337	377
38	373	350	357	394
40	386	367	374	407
42	400	384	392	421
44	418	407	415	439
46	425	414	422	446
48	429	422	431	450
50	435	431	440	456
52	438	436	445	459
54	443	443	452	464
56	446	448	457	467
58	454	460	469	475
60	458	465	474	479
62	464	474	484	485
64	468	479	489	489

Cuadro 206. Corrida de calentamiento con set point de 415°C en el reactor escala laboratorio para corregir la temperatura leída por la mufla y determinar el calor cedido hacia el reactor

Tiempo	Mufla (°C)	Reactor (°C)	Reactor corregida (°C)	Mufla corregida (°C)
0	66	34	34	87
2	88	42	42	109
4	92	47	47	118
6	117	58	59	138
8	135	70	71	156
10	153	83	84	174
12	172	97	99	193
14	191	112	114	212
16	209	129	131	230
18	237	165	168	258
20	248	183	186	269
22	260	201	205	281

Tiempo	Mufla (°C)	Reactor (°C)	Reactor corregida (°C)	Mufla corregida (°C)
24	278	223	227	299
26	294	243	248	315
28	310	264	269	331
30	328	290	296	349
32	346	312	318	367
34	359	329	336	380
36	368	342	349	389
38	380	363	370	401
40	386	373	380	407
42	392	384	392	413
44	398	394	402	419
46	403	403	411	424
48	407	410	418	428
50	410	416	424	431
52	413	421	429	434
54	415	424	433	436
56	416	427	436	437

Cuadro 207. Corrección del lector de temperatura de la mufla con el termopar calibrado

Tiempo (min)	Mufla (°C)	Termopar (°C)	Corregida (°C)
1	178	165	168
2	190	183	186
3	203	205	209
4	214	222	226
5	225	237	242
6	234	247	252
7	246	260	265
9	261	275	280
11	283	298	304
13	298	311	317
15	313	326	332
17	330	343	350
19	346	359	366
21	361	374	381
23	380	393	401
25	395	408	416
27	411	424	433
29	427	439	448
31	436	449	458
33	444	456	465
35	450	463	472
37	457	469	479
39	461	473	483

Tiempo (min)	Mufla (°C)	Termopar (°C)	Corregida (°C)
41	466	477	487
43	469	480	490
45	463	473	483
47	474	485	495
49	475	485	495
51	476	486	496

*Ambos medidores se colocaron en la misma ubicación.

Ecuación 36. Resistencia térmica para transferencia de calor por conducción en superficies sólidas

$$R_{material} = \frac{L}{k * A}$$

$$A = \frac{Vol}{L} = (W_o - W_A) * densidad/L$$

$$R_{material} = \frac{4.019}{0.22 * \frac{(2{,}300 - 0)/456}{4.019}} = 0.0014556\ °C/W$$

Donde,

R = Resistencia térmica por conducción del material de empaque, °C/W

L = Largo del reactor, 4.019 m

Densidad = 456 kg/m^3

k = Conductividad térmica del material de empaque, 0.22 W/m*°C

A = Área superficial del material de empaque dentro del reactor, m^2

Wa * = Masa de material de empaque en un tiempo determinado, kg (Ecuación 6).

*El valor de Wa se utilizó para corregir los datos de la transferencia de calor luego de obtener el modelo de cambio de temepratura y aplicarlo a la ecuación de la cinética.

Ecuación 37. Cálculo del número de Rayleigh para determinar la trasnferencia de calor por convección dentro del reactor.

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_1 - T_2)\left(D_c\ - h(V)\right)^3}{v^2} Pr$$

$$= \frac{(9.8)\left(\frac{1}{273.15 + 475}\right)(46 - 30)(1.204 - 1.029)^3}{(5.89 * 10^{-5})^2} 0.6946$$

$$= 6.64 * 10^5$$

Donde:

Ra = Número de Rayleigh

* β= Coeficiente de expansión volumétrica, 1/K

h (V) = Altura de material de empaque dentro de reactor escala planta piloto en función del volumen de material de empaque presente dentro del reactor., m

g = Aceleración gravitacional, 9.8 m/s^2

T1 = Temperatura de reactor, °C

T2 = Temperatura de mufla, °C

Do = Diámetro interno del reactor, 1.204 m

* v = Viscosidad cinemática, 5.89 x 10^-5

* Pr = Número de Prandaltl, 0.6946

* Valores del aire obtenidos de la Cuadro A-15 para 475°C (Cengel et al, 2011)

Ecuación 38. Cálculo del número de Nusselt para determinar la transferencia de calor por conducción en el reactor escala planta piloto.

$$Nu = \left(0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{\Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 = \left(0.6 + \frac{0.387(0.69469_D^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{0.6946}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 = 12.93$$

Donde,

Nu = Número de Nusselt

Ra = Número de Rayleigh

Pr = Número de Prandaltl

Ecuación 39. Cálculo de la resistividad térmica por convección de los gases dentro del reactor.

$$R_{convección} = \frac{1}{h * A} = \frac{1}{\left(\frac{k}{(Do - h(V))} * Nu\right) * A}$$

$$A = \pi(Do - h)Lc$$

$$R_{convección} = \frac{1}{\left(\frac{k}{(Do - h(V))} * Nu\right) * (\pi(Do - h(V))Lc)}$$

$$= \frac{1}{\left(\frac{0.04104}{1.204 - 1.029} * 12.93\right) * (\pi(1.204 - 1.029)4.977)}$$

$$= 0.1205\ °C/W$$

Donde,

R = Resistencia térmica por conveeción de aire dentro de reactor, °C/W

A = Áreas de contacto, m^2

K = Conductividad térmica, 0.04104 W/m*K

Nu = Número de Nusselt

D = Diámetro interno del reactor, 1.204 m

h(V) = Altura de material de empaque dentro de reactor escala planta piloto en función del volumen de material de empaque presente dentro del reactor., m

Lc = Largo del reactor, 4.977 m

Ecuación 40. Resistencia térmica para transferencia de calor por conducción en superficies cilíndricas.

$$R_{reactor} = \frac{\ln\left(\frac{r2}{r1}\right)}{2 * \pi * L * k} = \frac{\ln\left(\frac{0.616}{0.602}\right)}{2 * \pi * 4.977 * 24.46} = 3.426 * 10^{-5}\ °C/W$$

Donde,

R = Resistencia térmica por conducción de la superficie del reactor, °C/W

L = Largo del reactor, 4.997 m

*k = Conductividad térmica de la superficie del reactor, 21.46 W/m*K

r1 = Radio interno del reactor, 0.602 m

r2 = Radio externo del reactor, 0.616m

*Dato obtenido de la Cuadro de conductividad térmica del Manuela del Ingeniero Químico de Perry (Perry, Green, & Maloney, 1997)

Ecuación 41. Cálculo del calor cedido al reactor para la reacción de pirólisis de material de empaque.

$$Q = \frac{(T2 - T1)}{R_{conducción\ reactor} + R_{conducción\ mat.\ empaque} + R_{convección\ dentro\ de\ reactor}}$$

$$= \frac{74 - 30}{0.1205 + 3.4255 * 10^{-5} + 22.0780} = \left(1.9829 \frac{W}{s}\right) 120s$$

$$= 237.948W$$

Donde,

Q = Calor cedido al reactor en 2 minutos de operación, W.

R conducción reactor = Resistencia térmica de la superficie del reactor.

R conducción mat. empaque = Resistencia térmica del material de empaque dentro del reactor.

R convección dentro de reactor = Resistencia térmica por gases dentro de reactor.

*Al ocurrir el cambio de T1 a T2 en un tiempo de 2 minutos, se multiplica por 120 s

Cuadro 208. Calor cedido según el modelo de transferencia de calor determinado para las temperaturas del reactor escala laboratorio.

Tiempo (min)	Temperatura Reactor °C	Temperatura Mufla °C	Q (W)
0	30.1	46.0	1.2
2	33.2	74.0	16.6
4	38.3	96.0	27.7
6	42.4	105.0	22.2
8	51.6	124.0	49.9
10	62.8	142.0	61.0
12	83.2	168.0	110.8
14	100.6	187.0	94.2
16	114.9	201.0	77.6
18	137.4	222.0	121.9
20	159.8	240.0	121.9
22	181.3	258.0	116.4
24	205.8	278.0	133.0
26	228.3	295.0	121.9
28	251.8	312.0	127.4
30	268.1	324.0	88.7
32	299.8	348.0	171.8
34	317.1	362.0	94.2
36	336.5	377.0	105.3
38	357.0	394.0	110.8
40	374.3	407.0	94.2
42	391.7	421.0	94.2
44	415.2	439.0	127.4
46	422.3	446.0	38.8
48	430.5	450.0	44.3
50	439.7	456.0	49.8
52	444.8	459.0	27.7
54	452.0	464.0	38.7
56	457.1	467.0	27.7
58	469.3	475.0	66.4
60	474.4	479.0	27.7
62	483.6	485.0	27.7
64	488.7	489.0	27.7
66	492.8	492.0	27.7
68	495.9	494.0	27.7
70	497.9	495.0	27.7
72	500.0	496.0	27.7

Ecuación 42. Modelo para determinar el calor cedido al reactor escala laboratorio respecto al tiempo de operación obtenido con software de GraphPad Prism.

$$Q = Q_2 + \frac{Q_1 - Q_2}{1 + 10^{(\log(EC50) - t) - m}}$$

Parámetro	Valor
Q_1 (W)	0.732
Q_2 (W)	0.167
EC50	2.215*10^42
m (min)	0.09063
t (min)	tiempo
$Q_{reactor}$ (W)	Calor transferido al reactor

Ecuación 43. Constantes y ecuación para modelar la temperatura interna, respecto al tiempo, en el reactor de pirólisis de material de empaque escala planta piloto.

$$T_{reactor} = T_2 + \frac{T_1 - T_2}{1 + e^{\frac{(V - Q)}{m}}}$$

Parámetro	Valor
T_1 (°C)	-229246
T_2 (°C)	1096
V	-3597
m (W)	632.1
Q (W)	Calor transferido
$T_{reactor}$	Temperatura dentro del reactor

Código para la simulación de la reacción escala planta piloto de la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado.

```
METHOD RK4

STARTTIME = 0
STOPTIME = 1200

DT = 0.02

{Type Equations Here.}

RXN1=A*exp(-E/(R*T))*(W-Wf)^n
A=5.783*10^16
E=57664.13
```

R=1.987
Wf=0.1188*2300000
n=0.50

T=T1+((T2-T1)/(1+exp((V-TIME)/m)))
T1=-229246
T2=1096
V=-3597
m=632.1

INIT W=2300000
INIT P=0

d/dt(P)=+RXN1
d/dt(W)=-RXN1

Código para la simulación de la reacción escala planta piloto de la pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado.

METHOD RK4

STARTTIME = 0
STOPTIME = 1200

DT = 0.02

{Type Equations Here.}

RXN1=k*A*exp(-E/(R*T))*(W-Wf)^n
k= 0.008
A=5.783*10^16
E=57664.13
R=1.987
Wf=0.1188*2300000
n=0.50

T=T1+((T2-T1)/(1+exp((V-TIME)/m)))
T1=-229246

T2=1096

V=-3597

m=632.1

INIT W=2300000

INIT P=0

d/dt(P)=+RXN1

d/dt(W)=-RXN1

Figura 243. Simulación de la pirólisis de material de empaque escala planta piloto para determinar la cantidad de sólido y gas pirolítico producido y tiempo de operación.

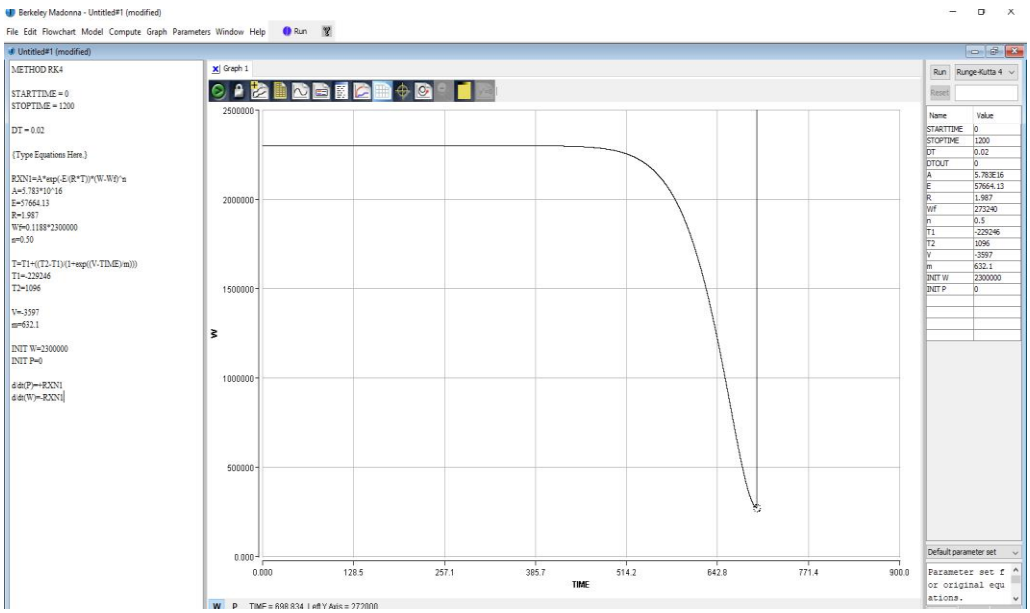


Figura 244. Simulación de la pirólisis de material de empaque escala planta piloto para determinar la cantidad de sólido y gas pirolítico producido para 648 minutos de reacción.

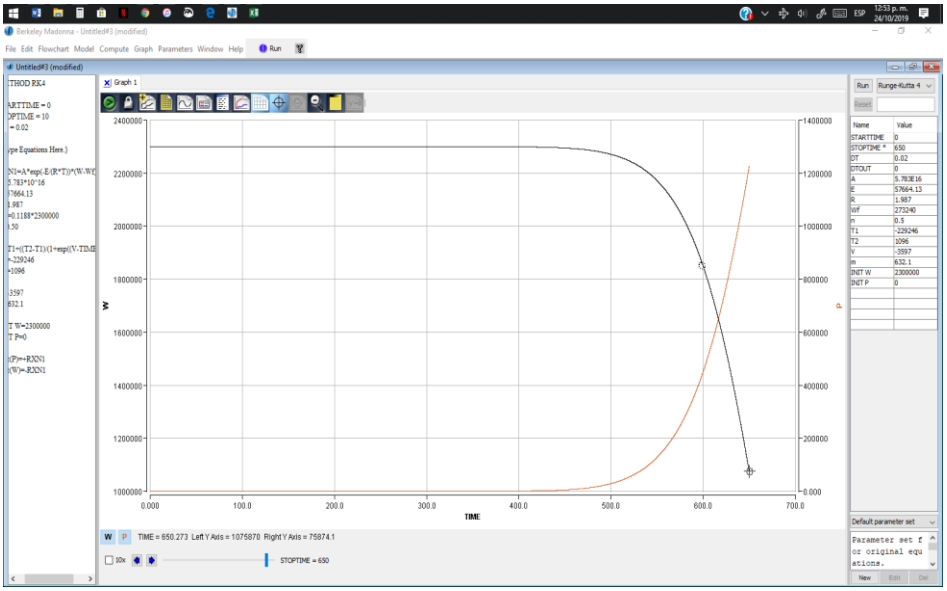


Figura 245. Simulación de la pirólisis de material de empaque escala planta piloto para determinar la cantidad de sólido y gas pirolítico producido para 598 minutos de operación.

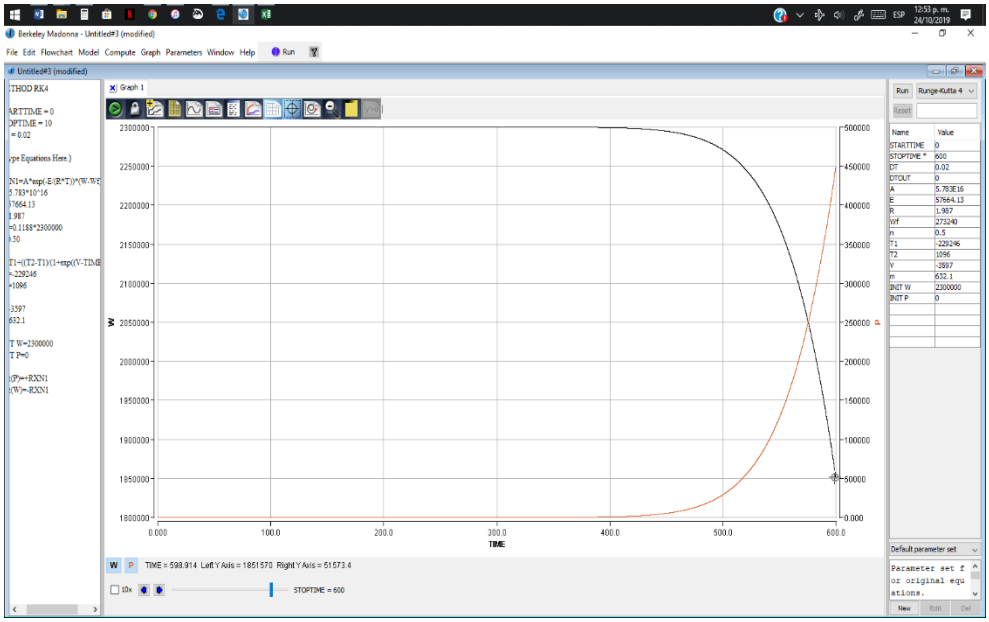


Figura 246. Simulación de la pirólisis escala planta piloto de material de empaque para la obtención del producto líquido en el tiempo de operación definido.

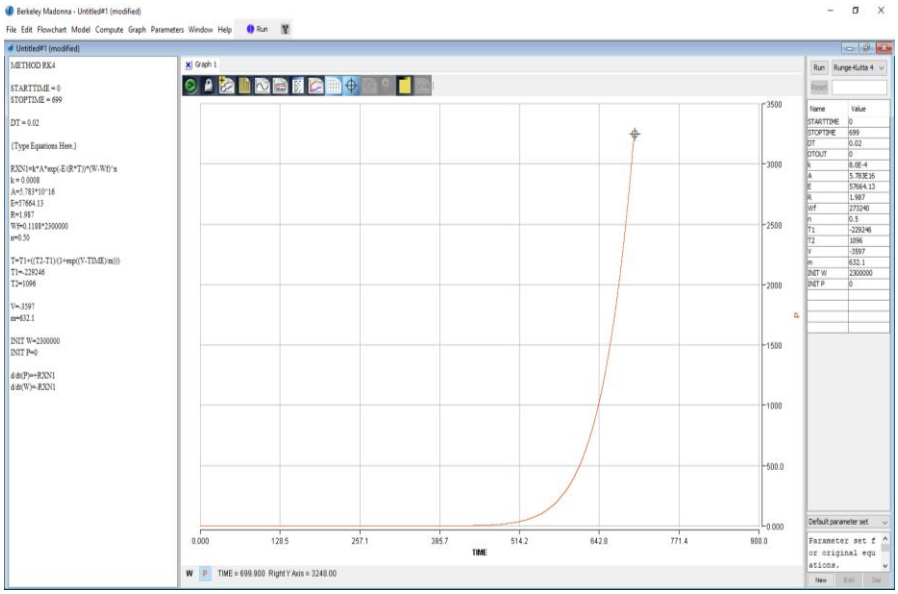


Figura 247. Simulación de la pirólisis escala planta piloto de material de empaque para la obtención del producto líquido para 598 minutos de operación.

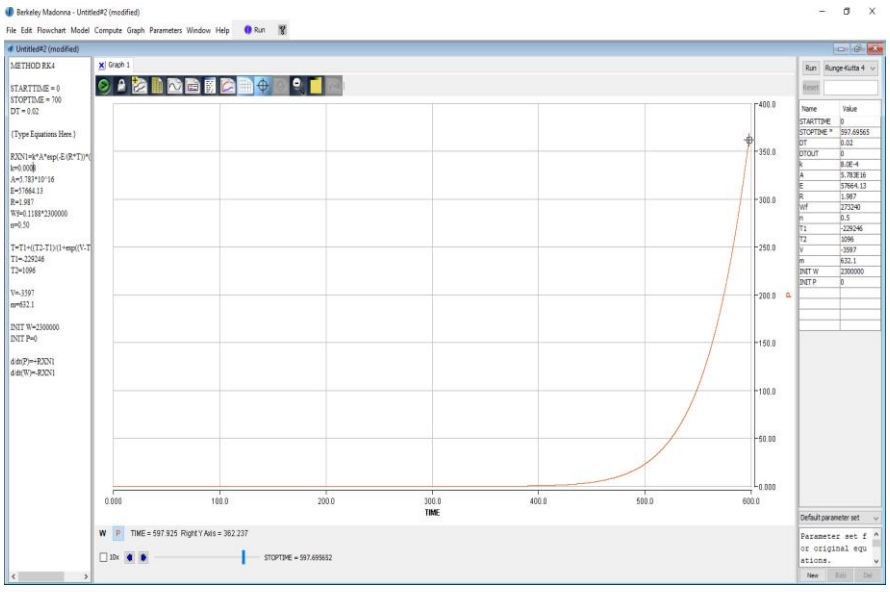
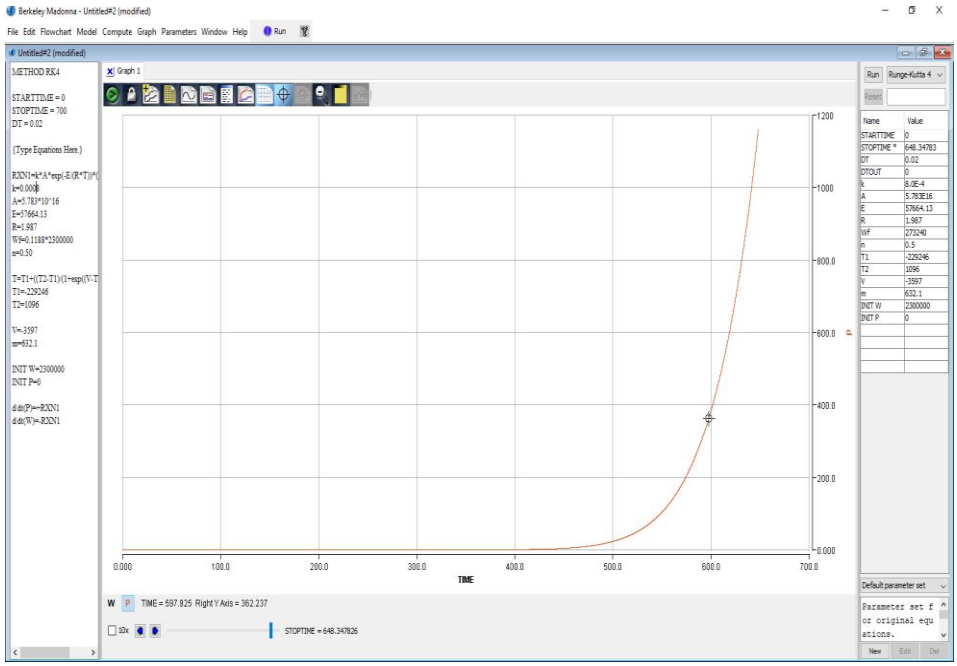


Figura 248. Simulación de la pirólisis escala planta piloto de material de empaque para la obtención del producto líquido para 648 minutos de operación.



Cuadro 209. Productos sólidos, líquidos y gaseoso obtenidos en la simulación de la pirólisis de material de empaque en el reactor escala planta piloto variando el tiempo de operación.

Tiempo (min)	669	549	429	309
Líquido(kg)	1575.12	83.23	1.56	0.00
Sólido(kg)	568.10	568.10	568.10	568.10
Gas (kg)	156.78	1648.67	1730.34	1731.90

Tiempo (min)	699	649	598
Líquido (%)	73.46	26.14	8.21
Sólido (%)	11.88	48.27	81.42
Gas (%)	14.66	25.59	10.37

Cuadro 210. Rendimientos y factores en la operación de una planta piloto del reactor de pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado según rendimientos mayoritarios para cada producto.

Tiempo de operación (min)		Plastic oil	Char	Syngas
699	Rendimiento (% m/m)	73.46	11.88	14.66
	Consideraciones	El tiempo de operación corresponde a la cantidad mínima de char a obtener en el reactor. La producción de plastic oil y Syngas se realiza en en el tiempo final.		
599	Rendimiento (% m/m)	26.14	48.27	25.59
	Consideraciones	Se favorece la producción de gas a menor temperatura y menor tiempo de reacción al simular el proceso de una reacción de gasificación		
499	Rendimiento (% m/m)	8.21	81.42	10.37
	Consideraciones	El rendimiento de char aumenta al disminuir el tiempo de rompimiento de las cadenas largas del polímero.		

Figura 249. Condiciones de operación del incinerador en el sistema de simulación en SuperPro Designer.

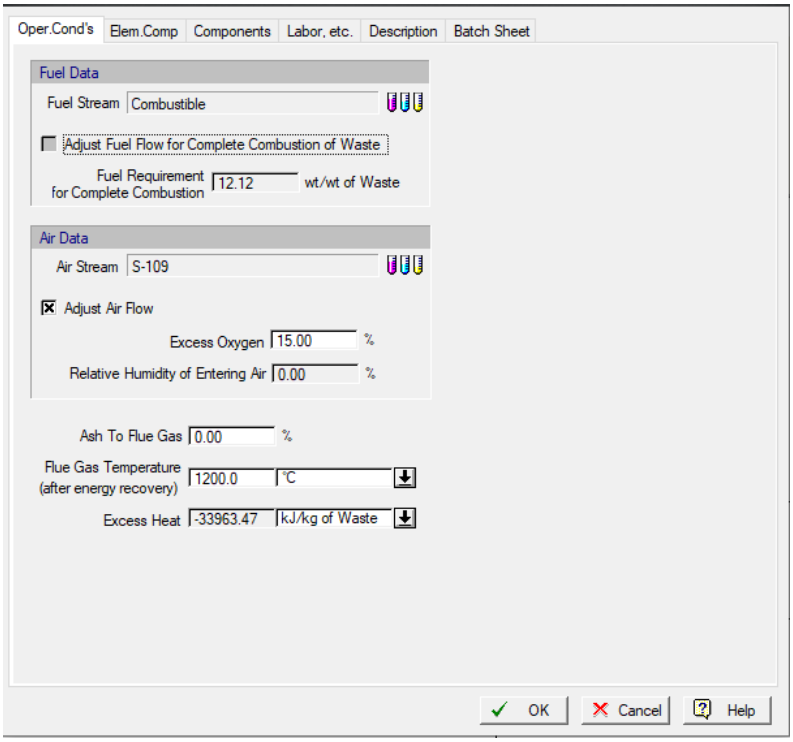


Figura 250. Componentes del incinerador en el sistema de simulación en SuperPro Designer.

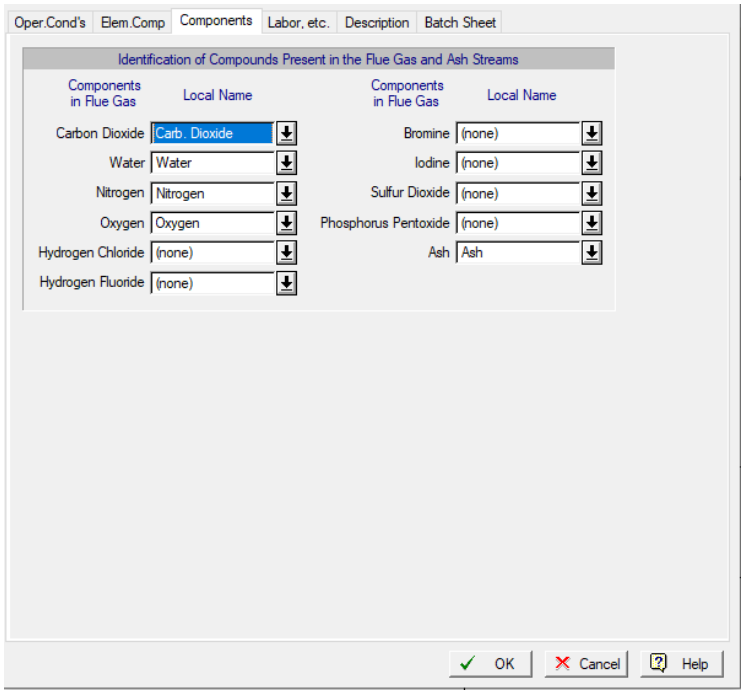


Figura 251. Condiciones de operación del ventilador que alimenta el incinerador en el sistema de simulación en SuperPro Designer.

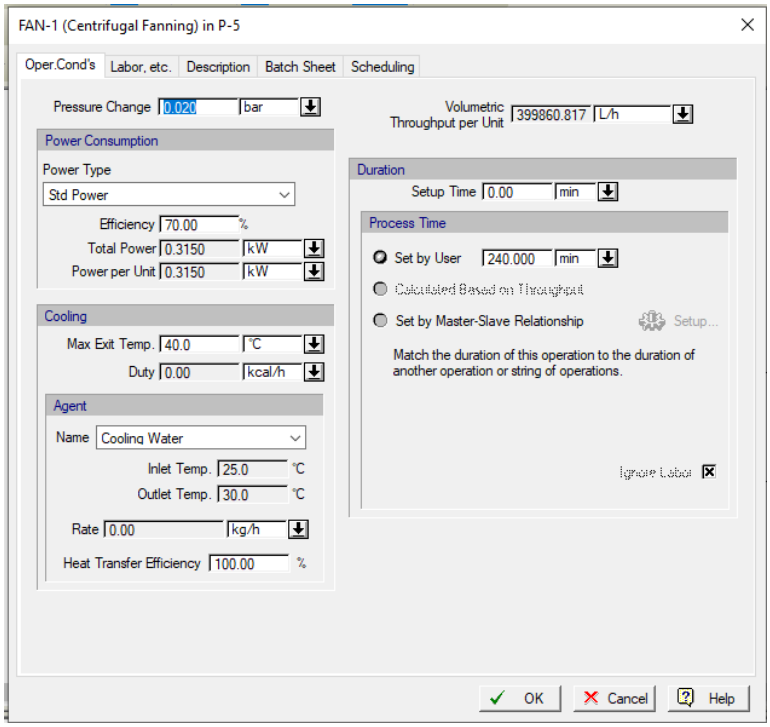


Figura 252. Condiciones de operación para el intercambiador de calor del reactor en el sistema de simulación en Super Pro Designer.

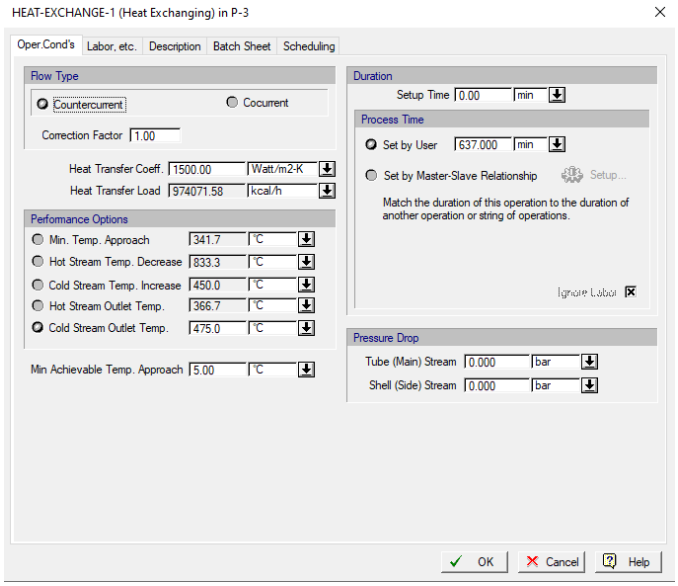


Figura 253. Operaciones establecidas para el reactor de pirólisis en el sistema de simulación en Super Pro Designer.

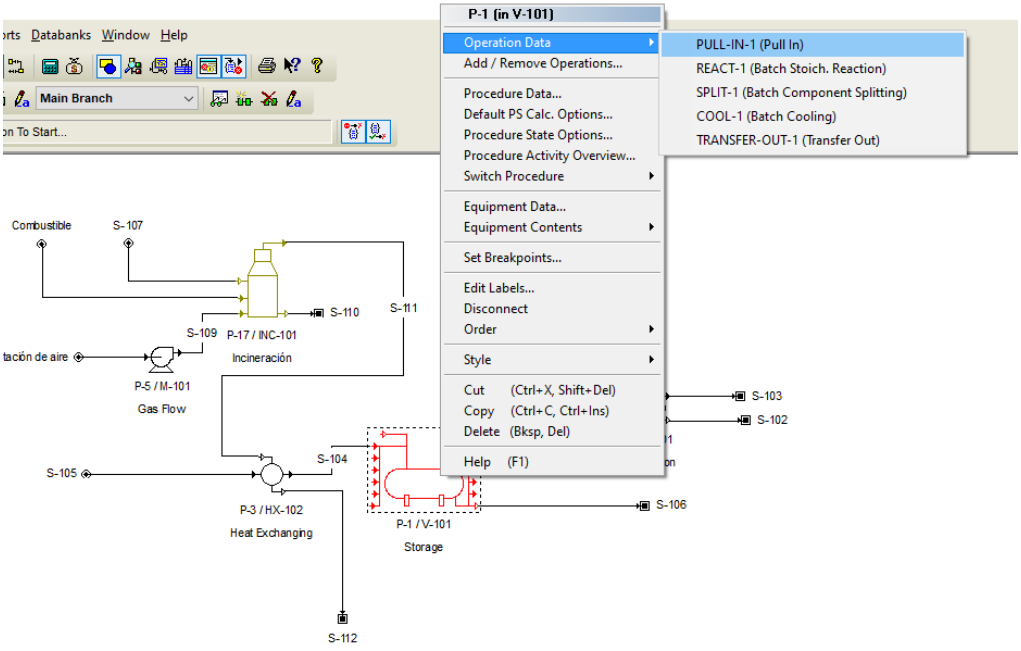


Figura 254. Condiciones de operación de la alimentación del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en Super Pro Designer.

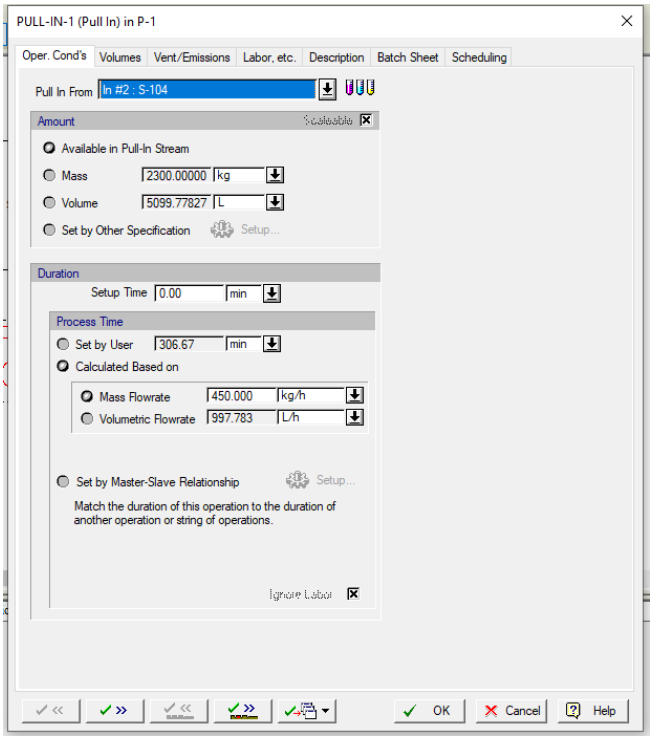


Figura 255. Volumen establecido para el llenado del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en Super Pro Designer.

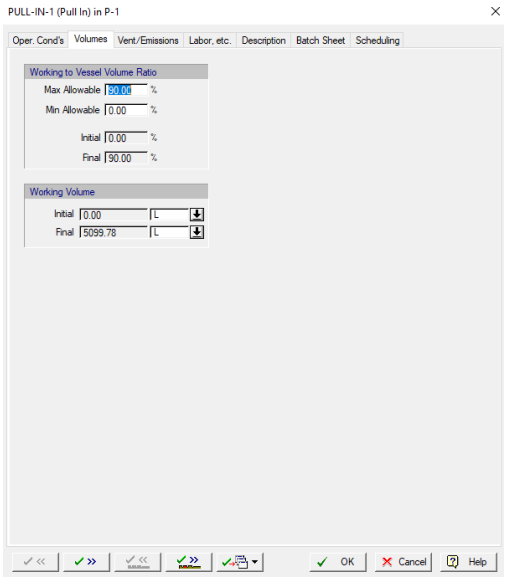


Figura 256. Condiciones de la operación de reacción del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en Super Pro Designer.

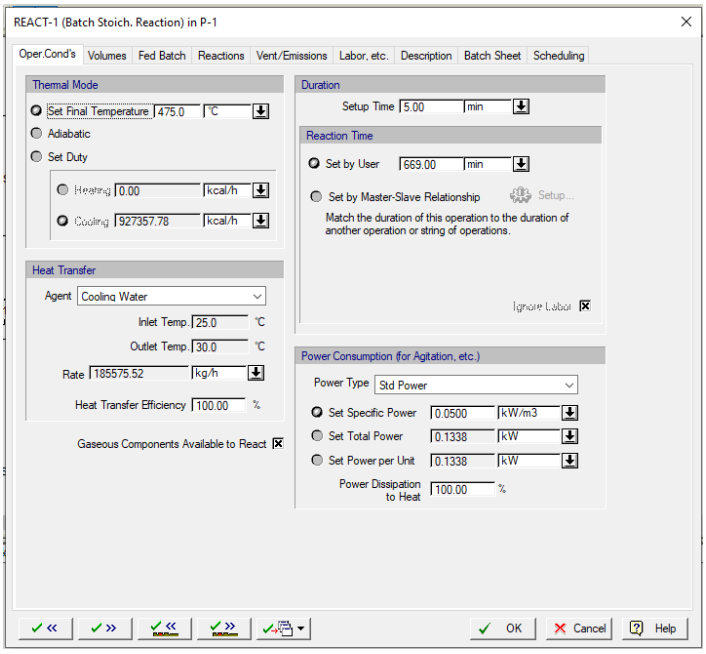


Figura 257. Condiciones de reacción establecidas para la operación del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en Super Pro Designer.

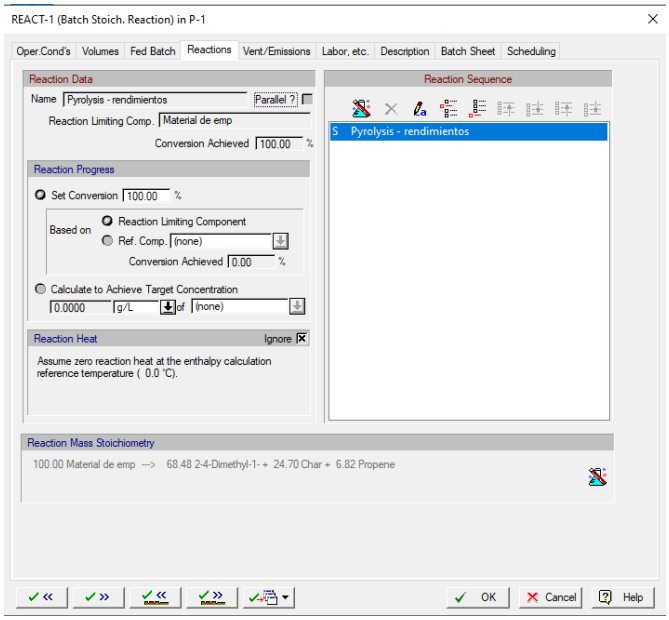
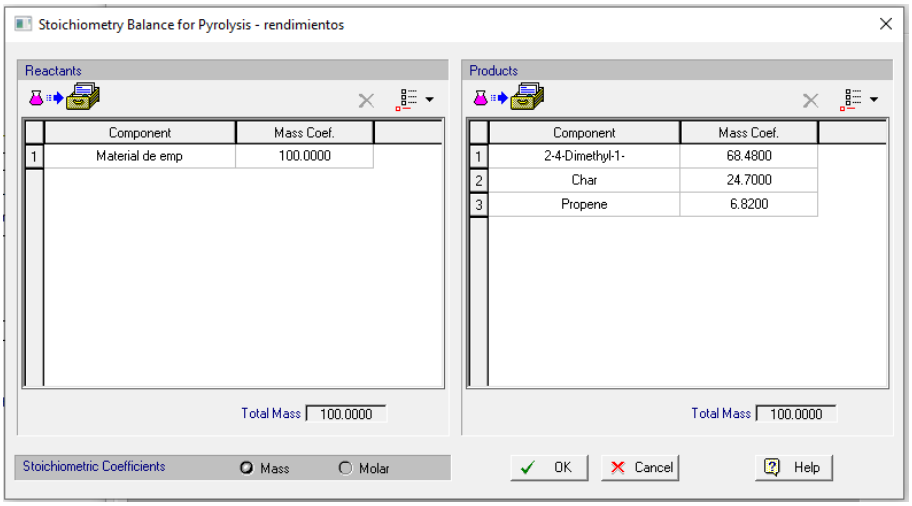


Figura 258. Estequiometria de la reacción establecida para la operación del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en Super Pro Designer*



*Para esta imagen se utilizan los valores finales de la simulación de la cinética escala planta piloto para la reacción de pirólisis de material de empaque tipo polipropileno metalizado.

Figura 259. Operación de extracción de syngas y plsatic oil como gases del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en Super Pro Desginer.

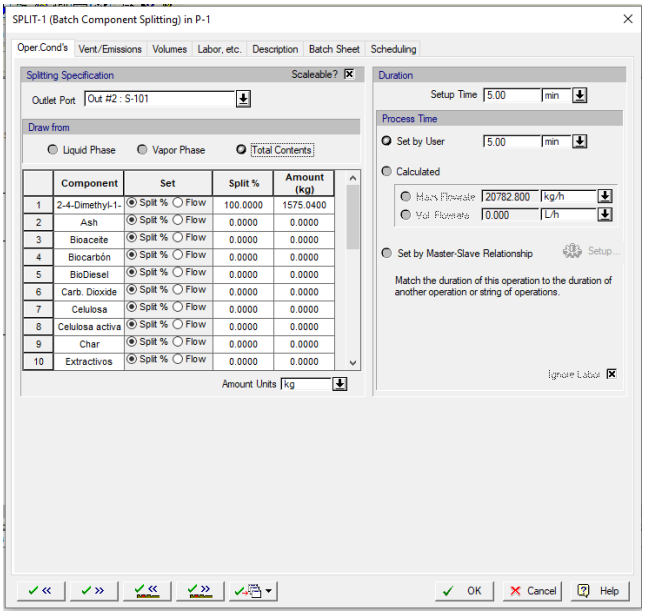


Figura 260. Condiciones de la operación de enfriamiento del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en SuperPro Designer.

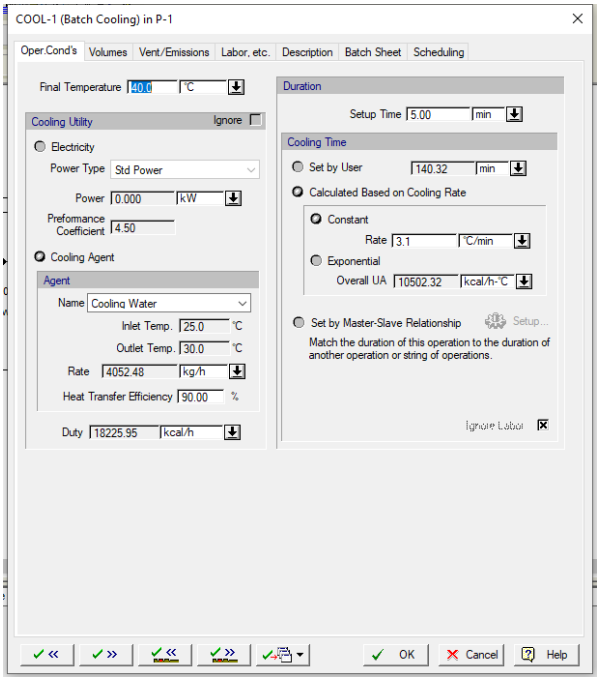


Figura 261. Condiciones de la operación de extracción del char del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en SuperPro Designer.

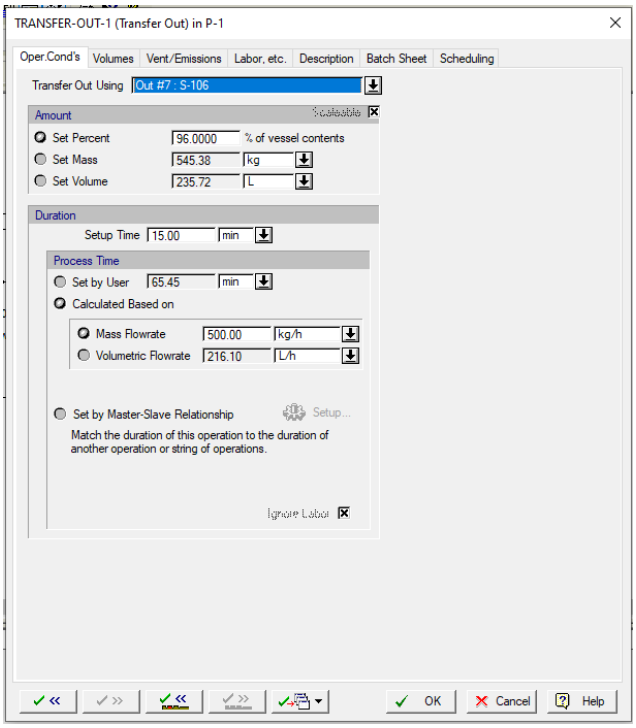
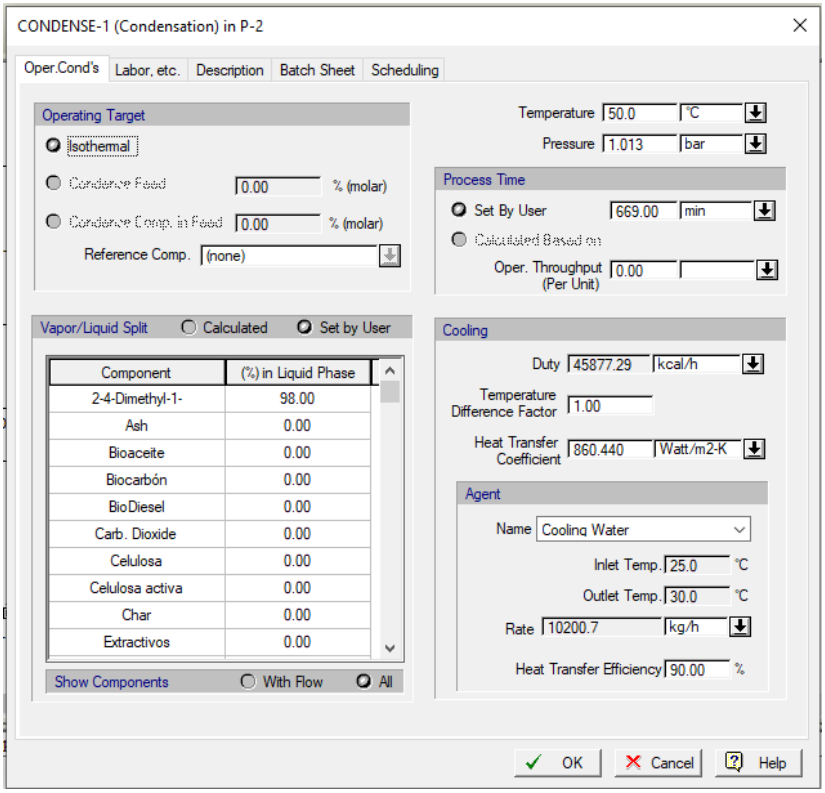


Figura 262. Condiciones de operación del intercambiador de calor para condensar el pplastic oil contenido en la corriente de salida del reactor de pirólisis en el sistema de simulación en SuperPro Designer.



Cuadro 211. Dimensiones del reactor escala planta piloto para el escalamiento de la reacción de pirólisis escala laboratorio, obtenido con el simulador Super Pro Designer

Dimensiones del reactor	
Diámetro externo (m)	1.232
Radio externo (m)	616
Espesor * (m)	0.0014
Diámetro interno (m)	1.204
Radio interno (m)	0.602
Longitud (m)	4.977
Relación longitud/diámetro	4.13
Conductividad térmica (W/m*K)	21.46

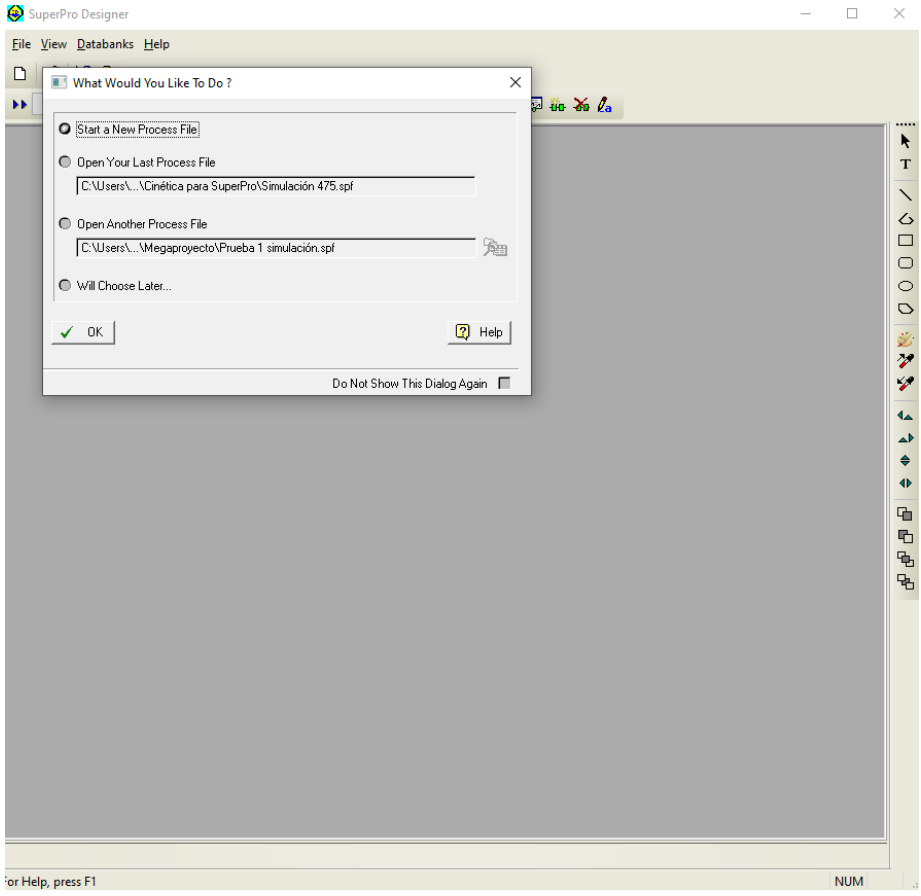
Cuadro 212. Datos de investigaciones de pirólisis escala piloto de polipropileno y polietileno.

	Líquido (% m/m)	Sólido (% m/m)	Gas (% m/m)	Observaciones
Arandes, et.al., 2004	70	10	20	Planta piloto de pirólisis de polipropileno a 400°C.
Gao, 2010	88	0.20	12	Planta semi industrial de pirólisis de polipropileno a 400°C
Shin, et. al., 2012	50	15	35	Pirólisis escala laboratorio de polipropileno a 400 °C
Crespo, 2013	77	19	4	Reactor escala laboratorio de polietileno, a 400°C

4. Instrucciones para la simulación de procesos en el programa SuperPro Designer.

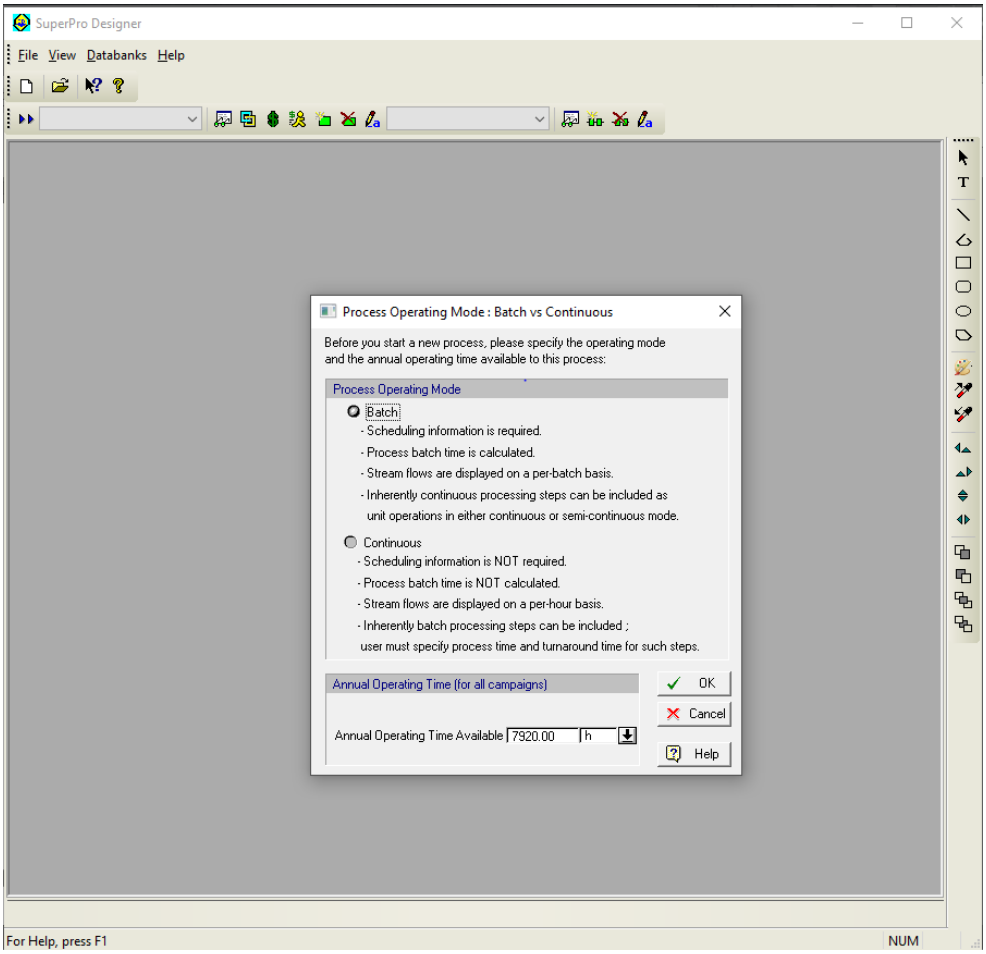
Abrir Super Pro Designer y seleccionar si se desea iniciar un proceso nuevo, o abrir una simulación previa.

Figura 263. Pantalla de inicio de SuperPro Designer



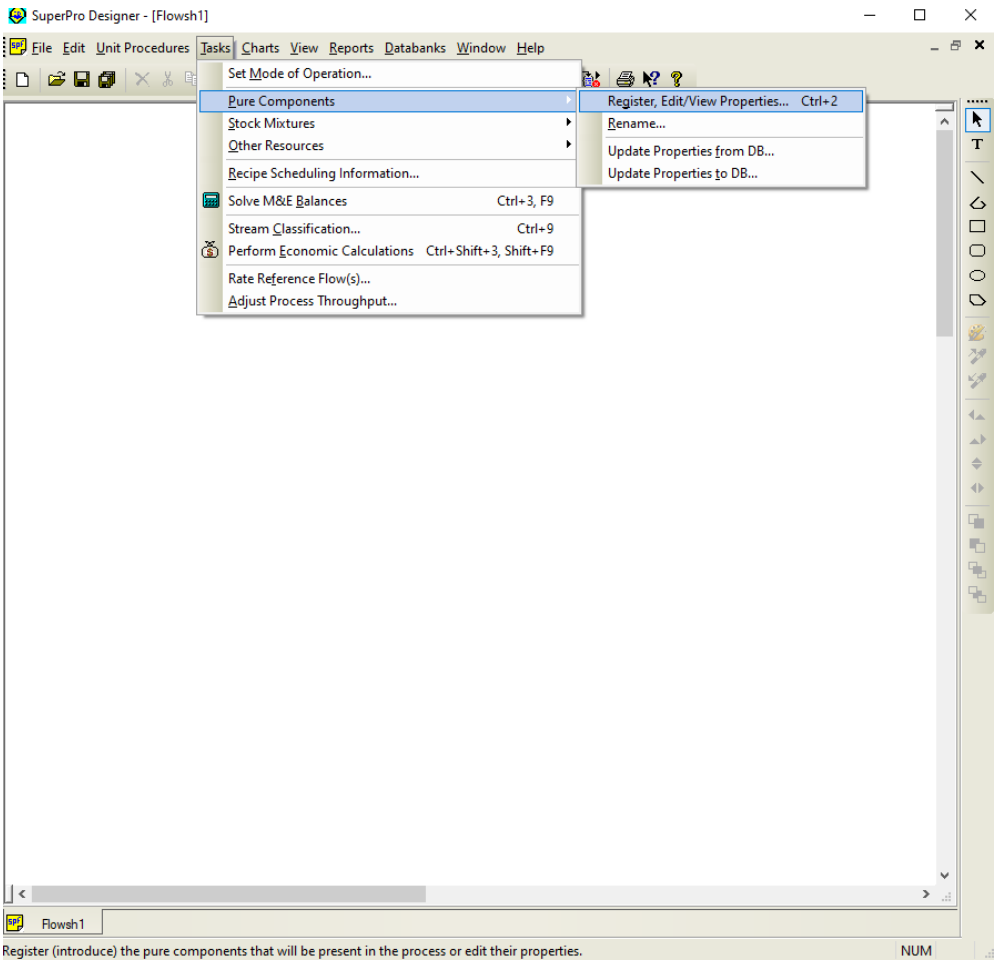
Seleccionar si el proceso a simular tendrá operación continua o por batch. Introducir el tiempo de operación anual.

Figura 264. Cuadro de diálogo para seleccionar el tipo de proceso a simular y el tiempo de operación anual.



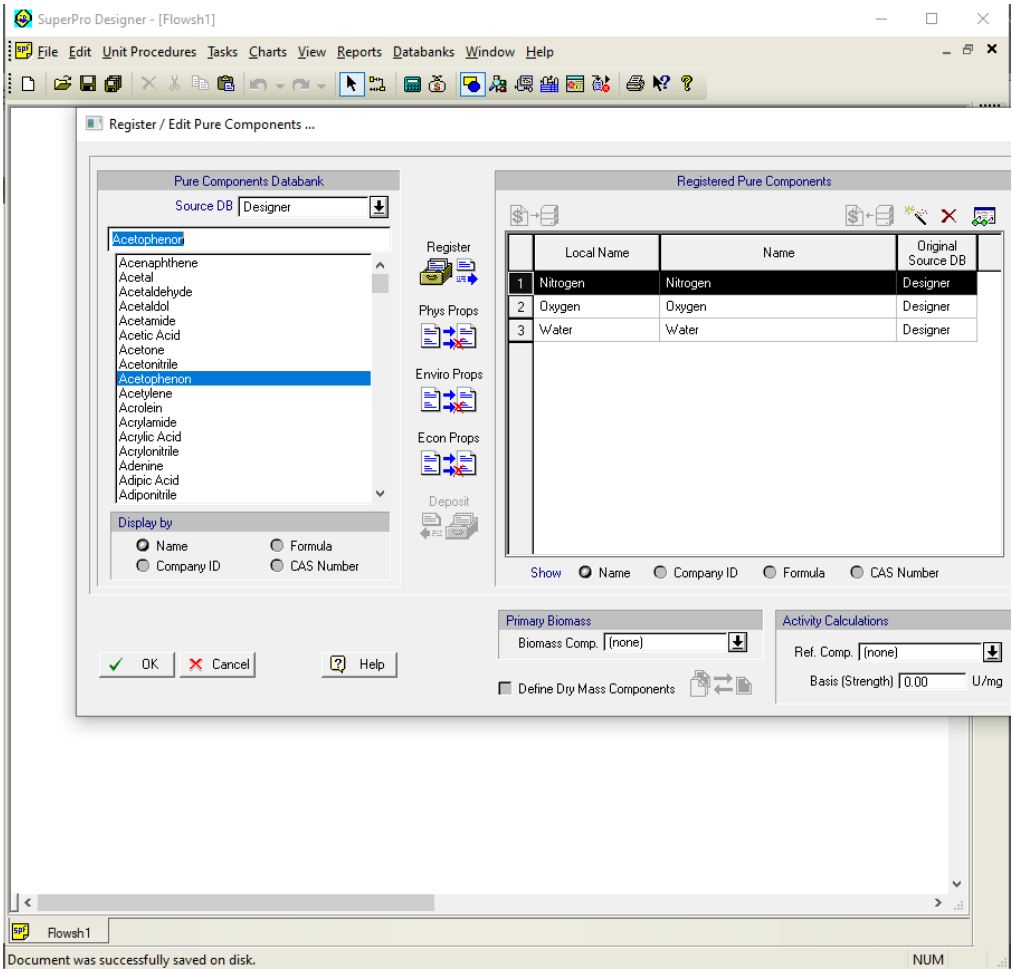
Seleccionar “Tasks”, luego “Pure components” y “Register, Edit/View Properties…” para introducir las propiedades de los compuestos puros que se encontrarán en los flujos del proceso a simular.

Figura 265.Mapa de la ubicación de la opción Registro, visualización y edición de los componentes puros que se utilizarán en el proceso de simulación.



Añadir el compuesto deseado de la base de datos del programa. Si el compuesto deseado no se encuentra en la base de datos, seleccionar el botón “Add a New Component”.

Figura 266. Pantalla para el registro, visualización y edición de los compuestos de las bases de datos y los agregados al programa de simulación.



Para registrar un compuesto nuevo, luego de seleccionar el botón “Add a New Component”, se debe definir en la base de datos. Luego, con el compuesto seleccionador, darle click al botón View/Edit the Selected Component Properties” e ingresar sus propiedades físicas. Se recomienda incluir toda la información conocida del compuesto.

Figura 267. Definición de un compuesto nuevo en la base de datos del simulador para utilizarlo en el proceso.

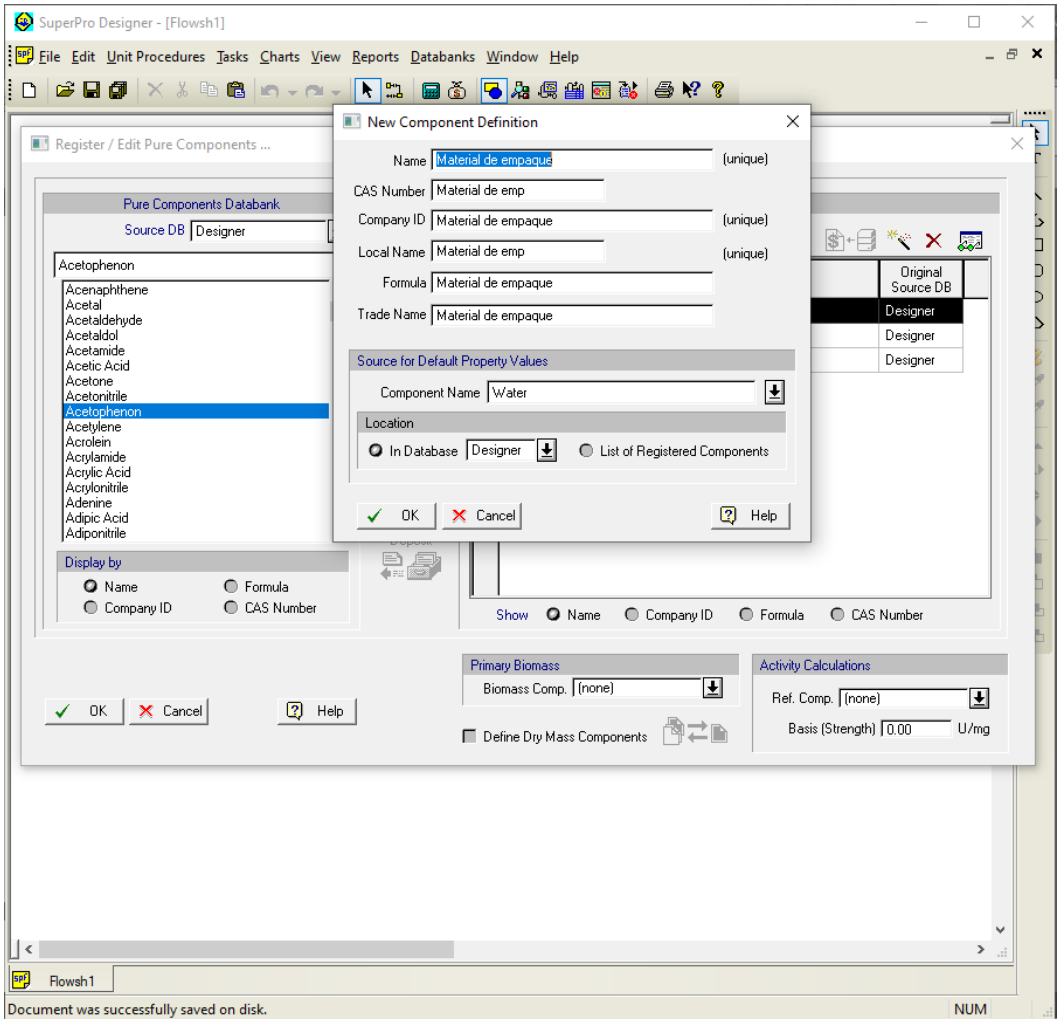


Figura 268. Pestaña IDs del cuadro de diálogo “Pure Componenet Properties for:”

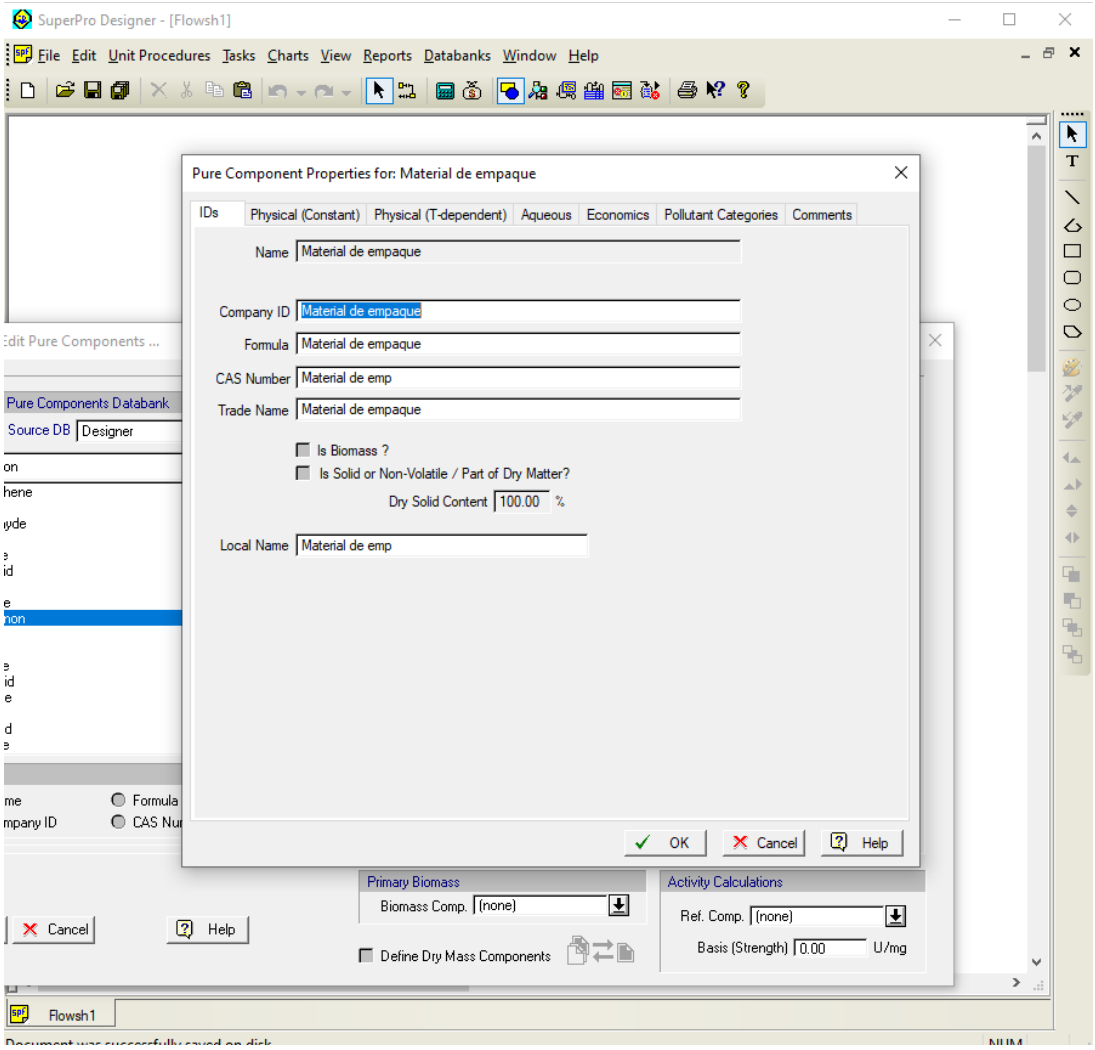
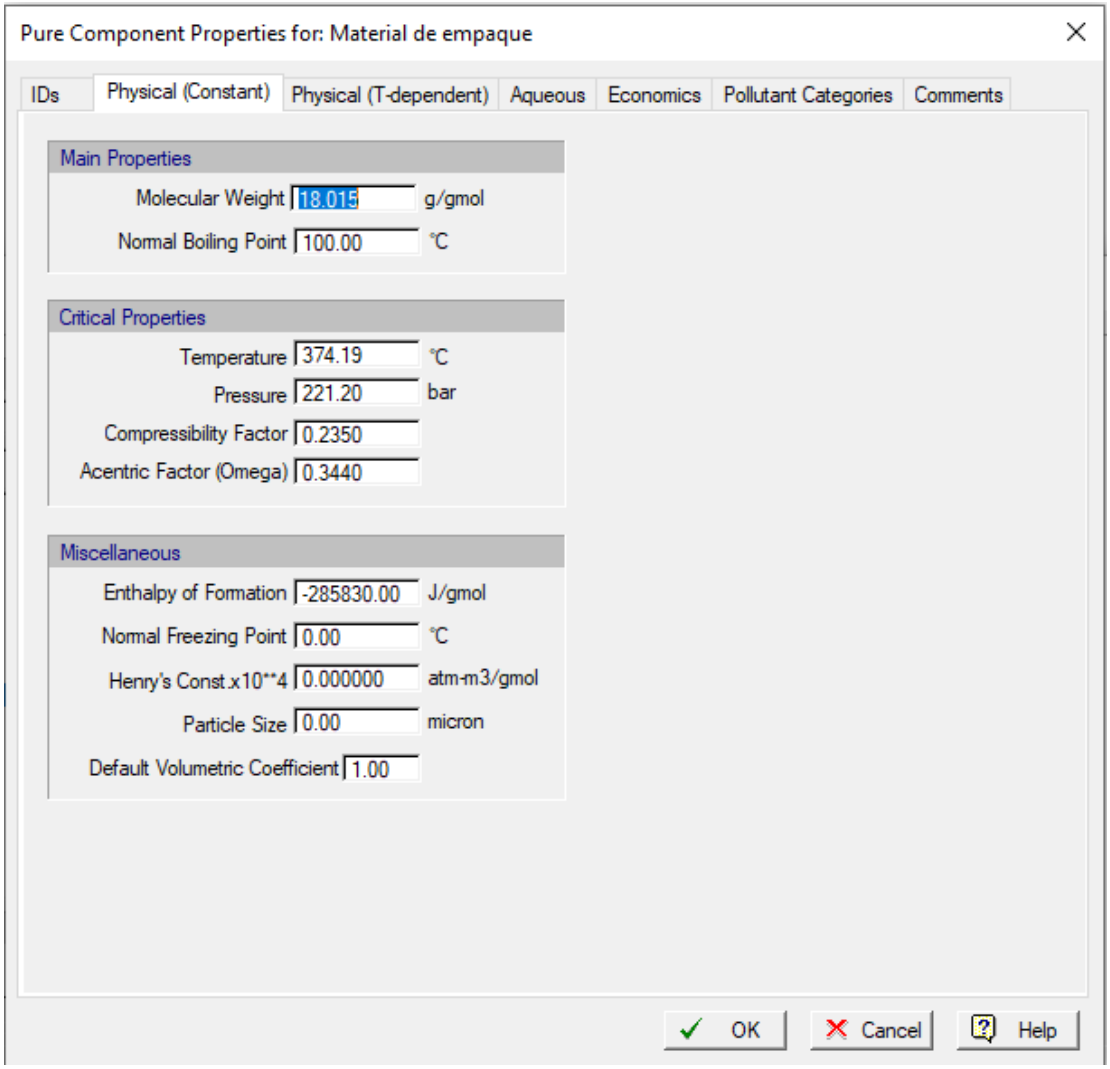


Figura 269. Pestaña Physical (Constant) del cuadro de diálogo “Pure Componenet Properties for:”



Seleccionar “Tasks”, luego “Stock Mixtures” y “Register, Edit/View Properties…” para introducir las propiedades de las mezclas de compuestos que se encontrarán en los flujos del proceso a simular con el mismo procedimiento que para los compuestos putos. Para registrar una mezcla es necesario que los compuestos puros que la conforman estén previamente registrados.

Figura 270. Mapa de la ubicación de la opción Registro, visualización y edición de las mezclas que se utilizarán en el proceso de simulación.

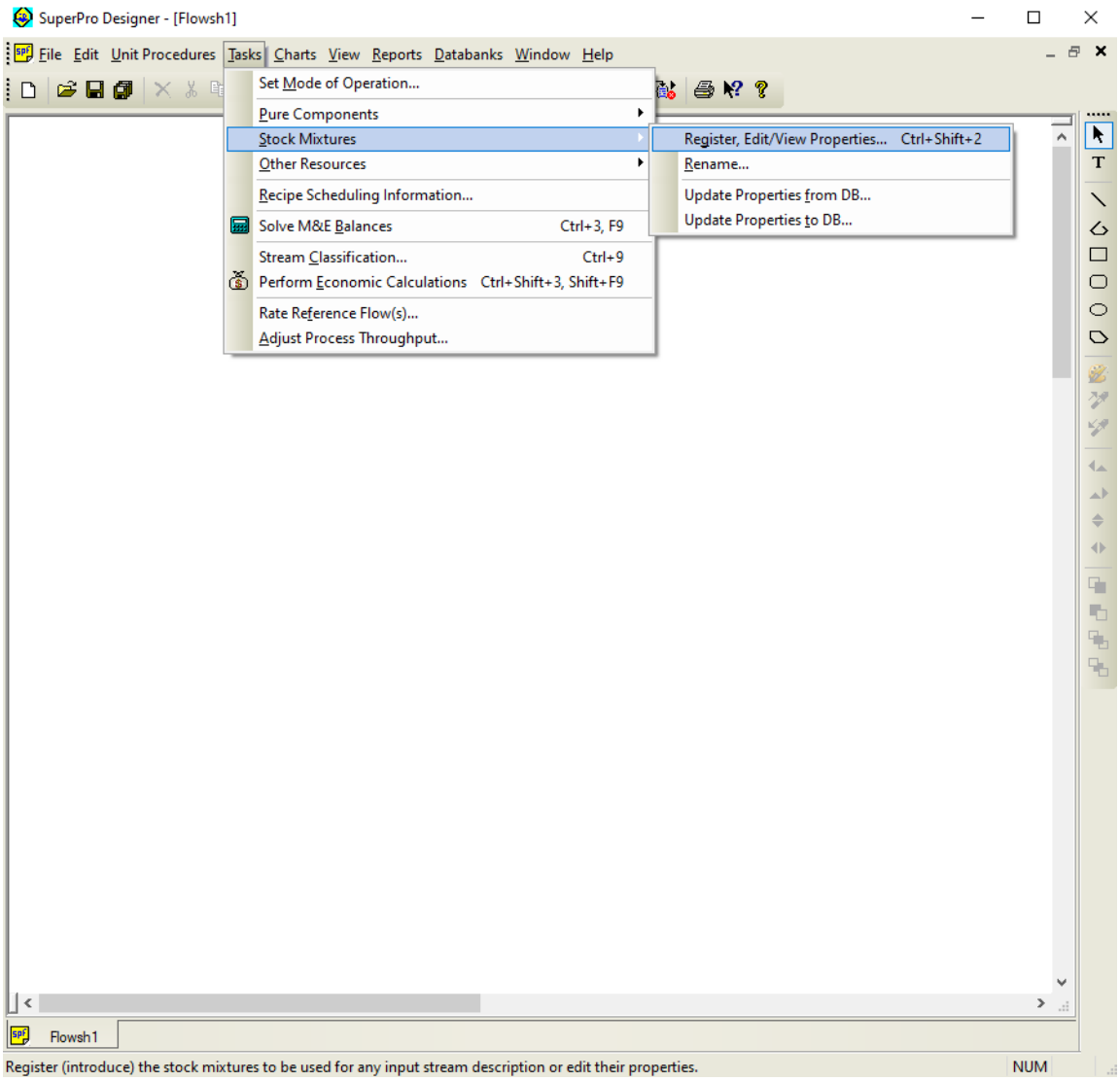


Figura 271. Cuadro de diálogo “Register/Edit Stock Mixtures …”

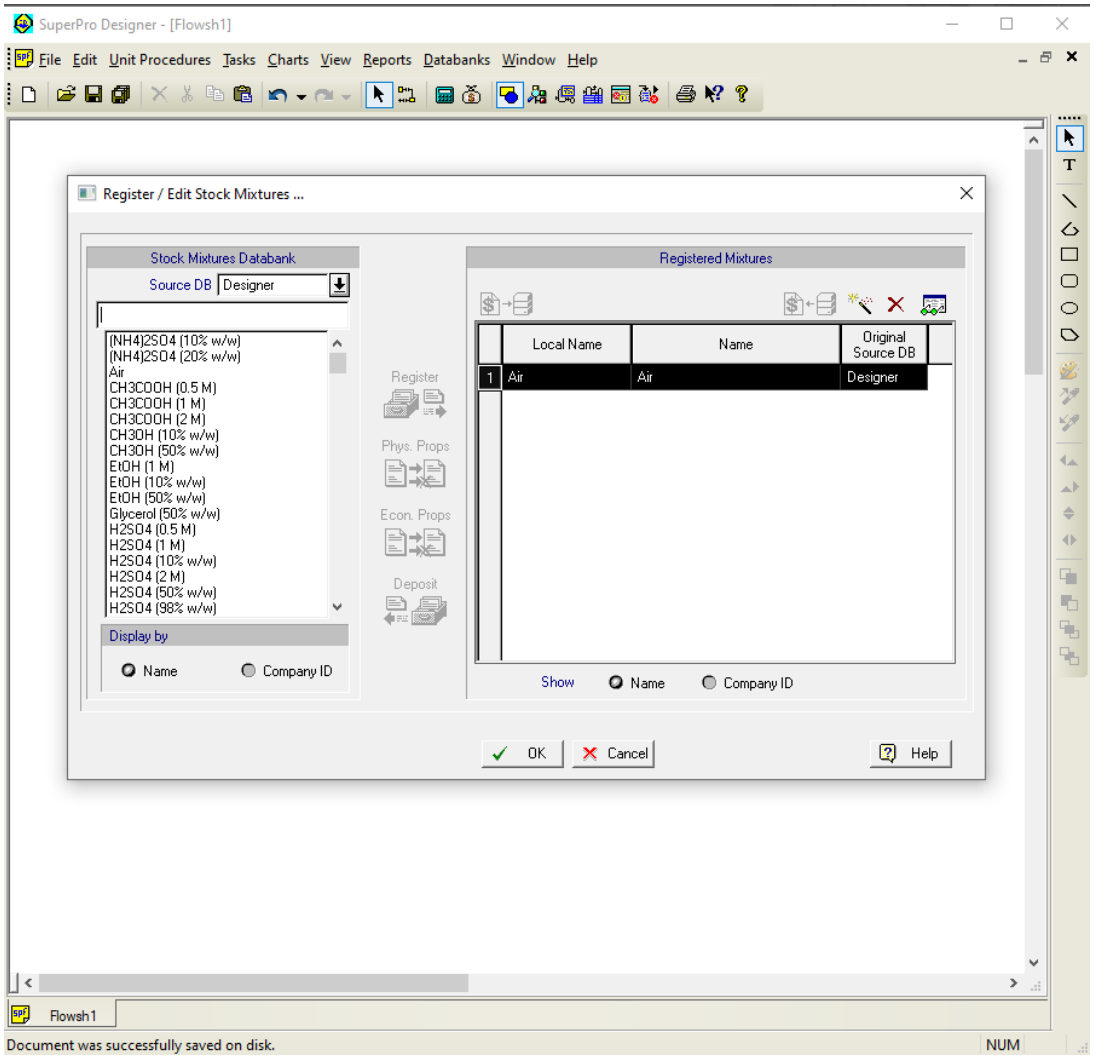
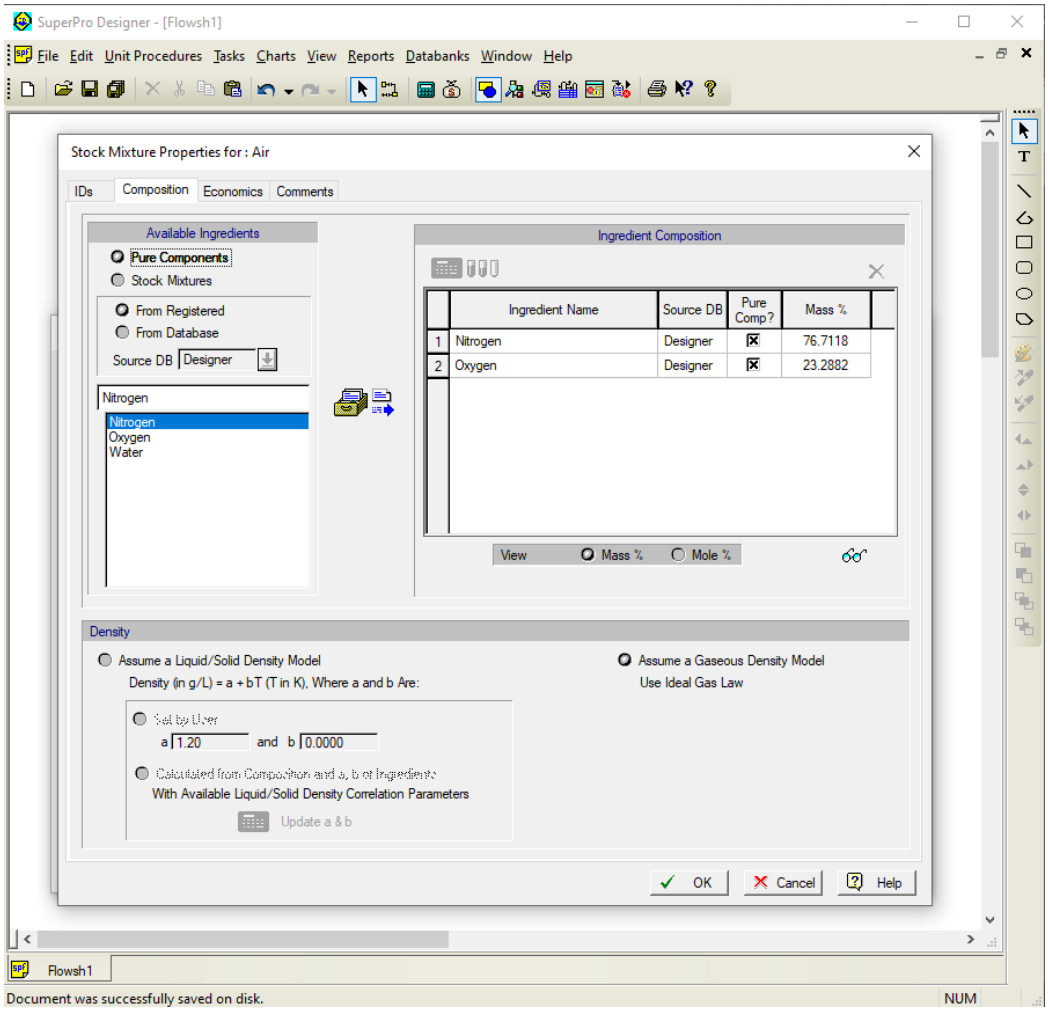
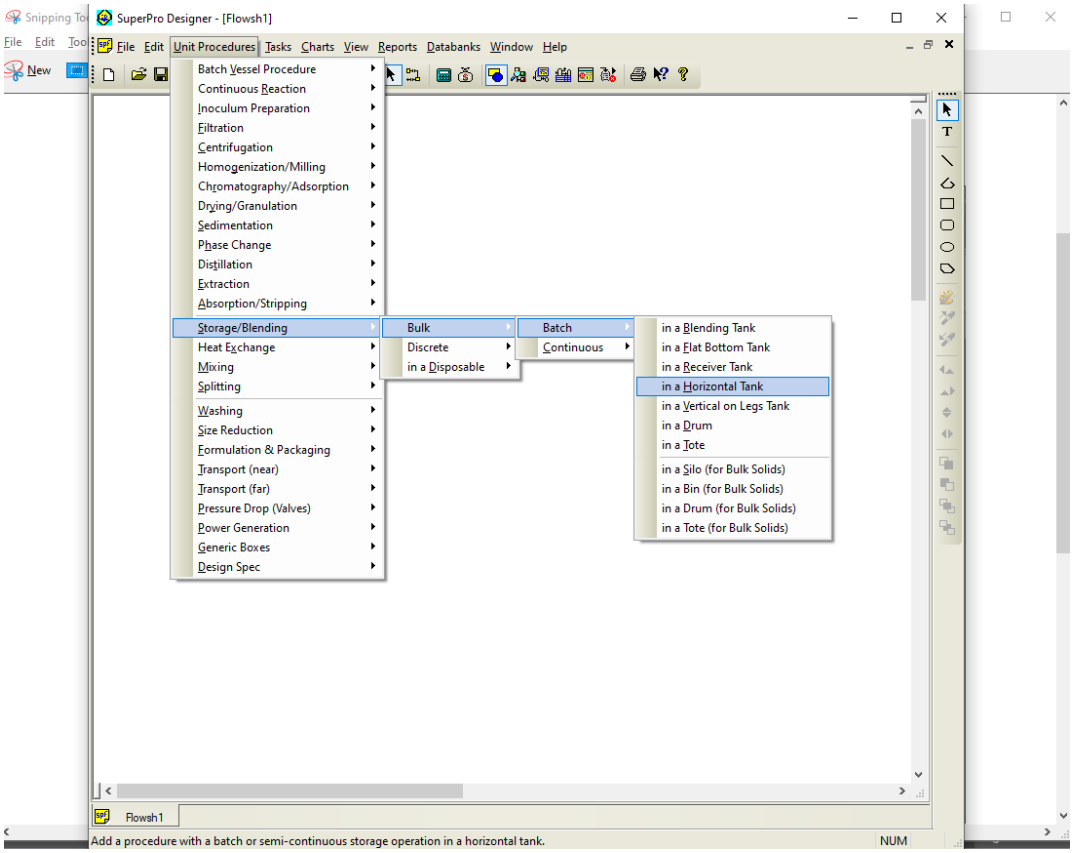


Figura 272. Cuadro de diálogo “Stock Mixture Properties for:” para editar las mezclas de componentes a utilizar en el proceso de simulación.



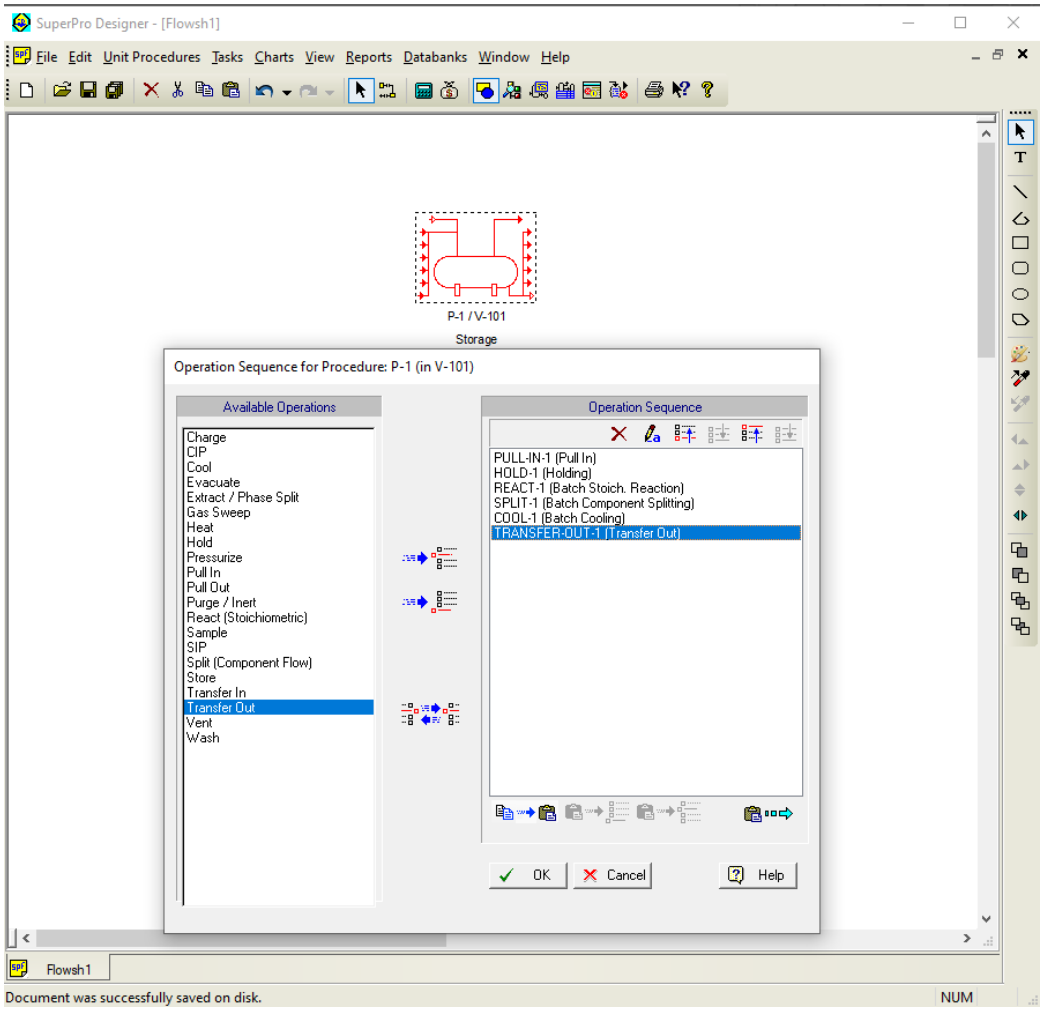
En la pestaña “Unit Procedures” seleccionar la operación a realizar y el equipo entre las opciones presentadas. Insertar el equipo en la ubicación deseada.

Figura 273. Mapa de opciones para insertar uno de los equipos a utilizar para el proceso de simulación de SuperPro Designer.



Si el equipo agregado es continuo se deben ajustar los parámetros y condiciones de operación. Si el equipo es tipo batch se deben seleccionar los procesos que se realizarán en el equipo. Presionar click derecho en el equipo y seleccionar Add/Remove Operations…, agregar las operaciones que se requieran en el equipo.

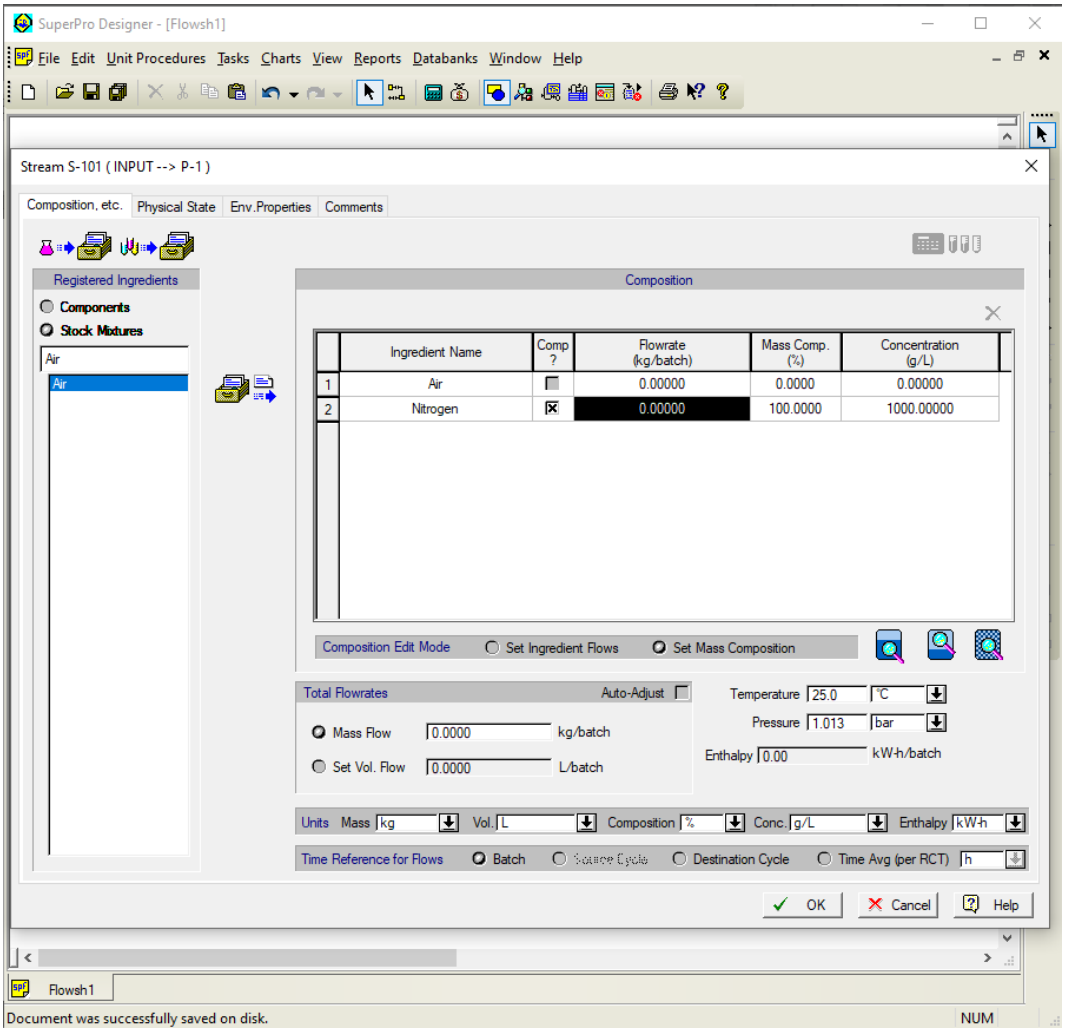
Figura 274. Cuadro de diálogo “Operation Sequence for Procedure P-1 (in V-101)” para agregar las operaciones que se realizarán en el equipo seleccionado.



Es necesario agregar los flujos de entrada y salida de cada equipo para su operación. Para esto, se selecciona el botón “Connect Mode” en la barra de tareas y se hace click en el área en blanco para agregar un flujo y luego en la entrada del equipo.

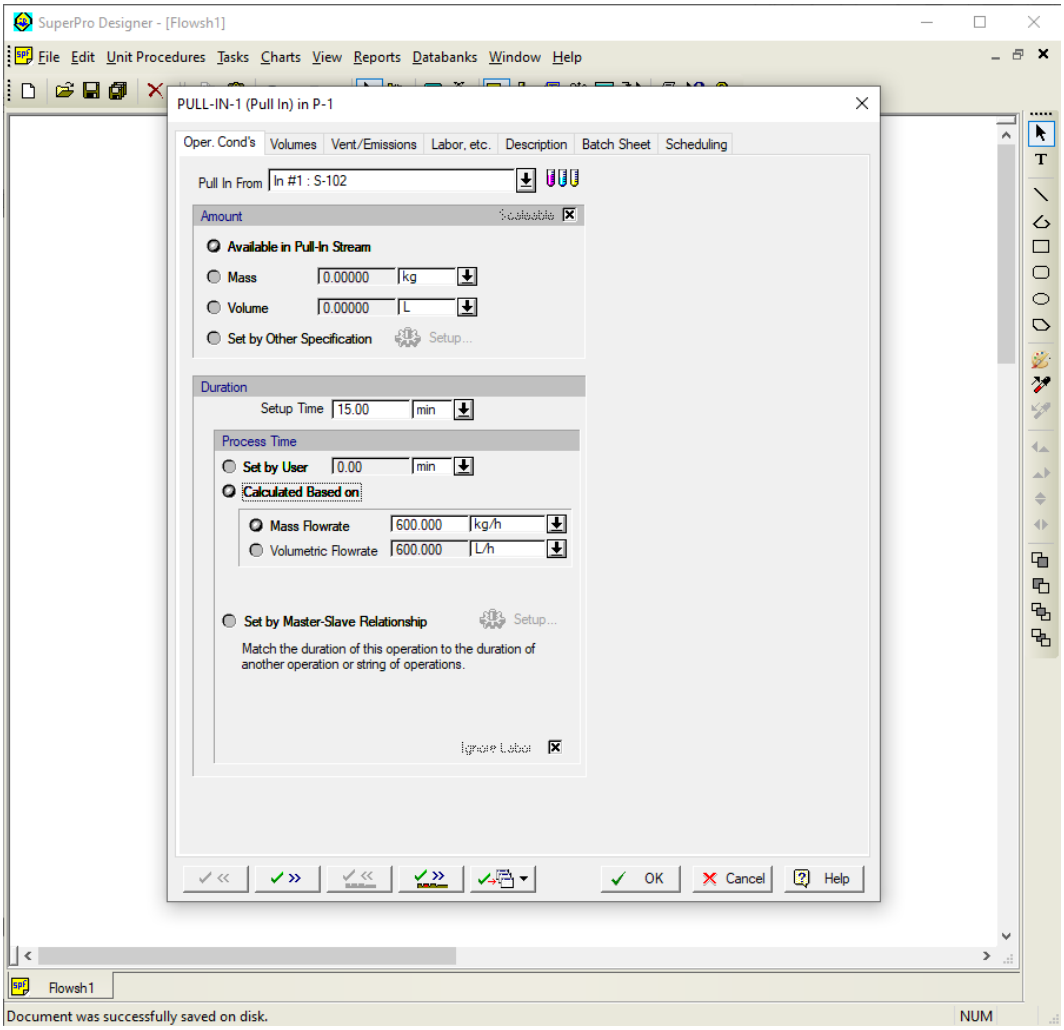
Para introducir compuestos puros o mezclas de compuestos en los flujos de alimentación de los procesos se realizar click derecho sobre la corriente deseada y seleccionar la opción “Simulation Data”. En el cuadro de diálogo “Stream --- (INPUT ---)” se indica la proporción de los componentes y las condiciones a las que se encuentra. Se tiene la opción de auto calcular según el proceso al que sea alimentado.

Figura 275. Cuadro de diálogo “Stream S-101 (INPUT --- P-1)” para indicar los componentes y condiciones de la corriente seleccionada.



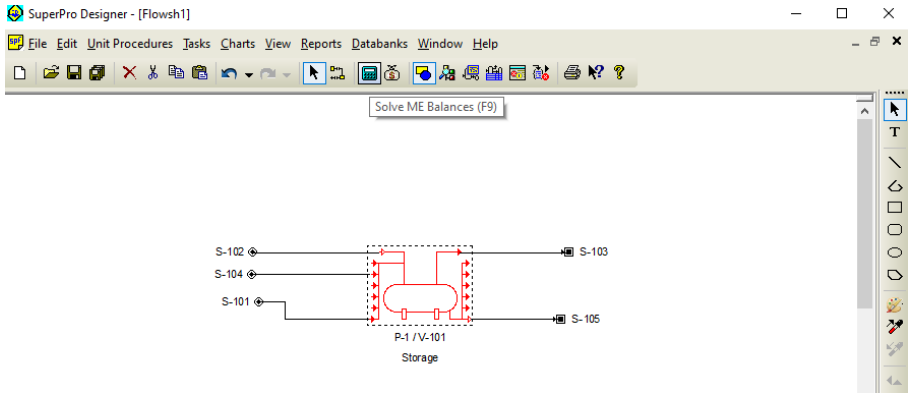
Realizar click derecho sobre el equipo deseado y en “Operation Data” seleccionar el proceso a modificar. En el cuadro de diálogo del proceso seleccionado se deben llenar las condiciones de operación básicas para que el proceso pueda realizarse. Si se desea un mejor resultado en la simulación se pueden llenar las demás condiciones de operación.

Figura 276. Cuadro de diálogo del proceso “Pull-IN-1 (Pull in) in P-1” para establecer las condiciones de operación.



Con todos los compuestos, mezclas, flujos, equipos, operaciones y condiciones establecidas, se selecciona el botón “Solve ME Balance (F9)” para realizar el balance de masa y energía de todos los procesos y el dimensionamiento de los equipos.

Figura 277. Selección del botón para la resolución del balance de masa y energía del proceso de almacenamiento y reacción utilizado como ejemplo.



5. Instrucciones para la utilización de GraphPad Prism para realizar regresiones no lineales de un conjunto de datos.

Abrir software de GraphPad Prism. En el cuadro de diálogo seleccionar la opción en “New table & Graph” de XY , en “Data table” marcar “Enter or import data”. En “Options” seleccionar las opciones deseadas según el tipo de datos.

Figura 278. Cuadro de diálogo de inicio de GraphPad Prism

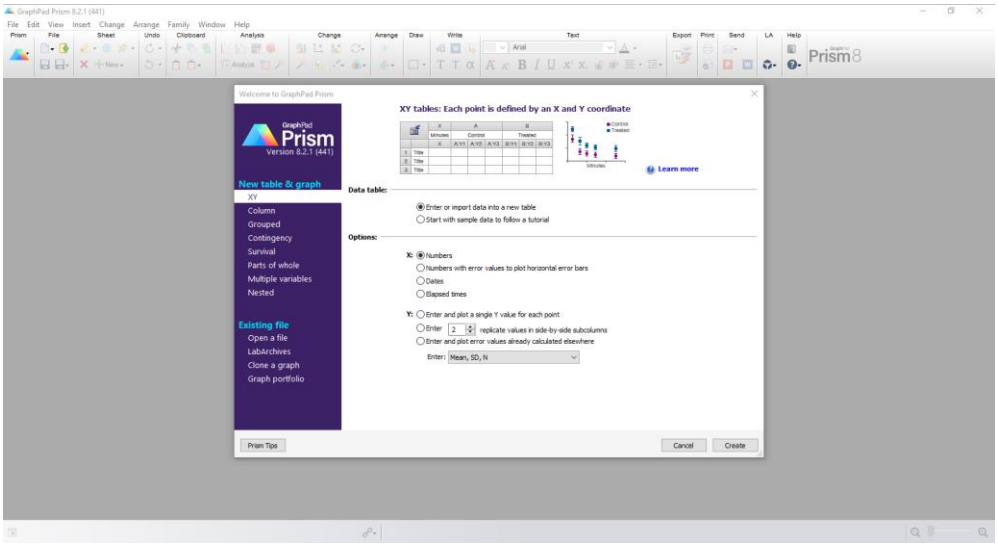
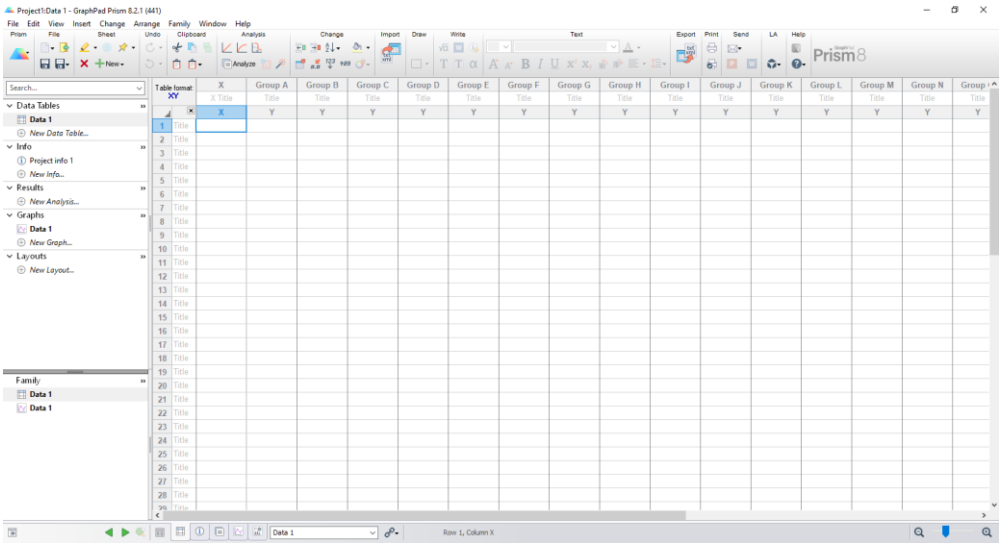
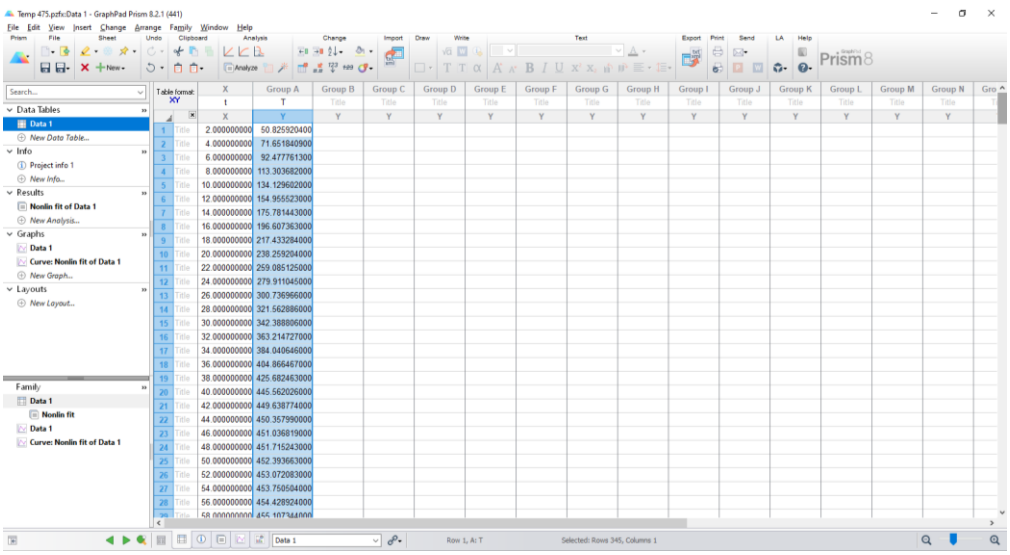


Figura 279. Interfaz principal para el uso de módulo de regresiones de GraphPad Prism



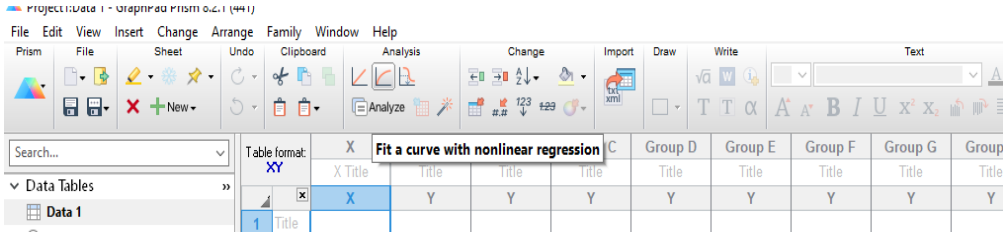
Seleccionar el conjunto de datos a los que se les desea realizar la regresión y colocarlos en la columna de x o y correspondiente (Es posible ingresar varios valores de y para los valores de x).

Figura 280. Tabulación de datos de tiempo y calor cedido en las columnas de “x” y “y” correspondientes para realizar la regresión no lineal.



Seleccionar los datos ingresados y hacer click en el botón de “Fit a non linear regresión”.

Figura 281. Botón para realizar regresiones no lineales a los datos seleccionados en el software.



Entre todos los modelos presentes, seleccionar el que parezca predecir de mejor forma el comportamiento de los datos evaluados.

Luego de seleccionada la regresión, revisar las nuevas opciones bajo los apartados “Results” y “Graphs” para evaluar los resultados numéricos y gráficos de la regresión seleccionada.

Figura 282. Resultados numéricos de la regresión no lineal seleccionada para los datos evaluadados.

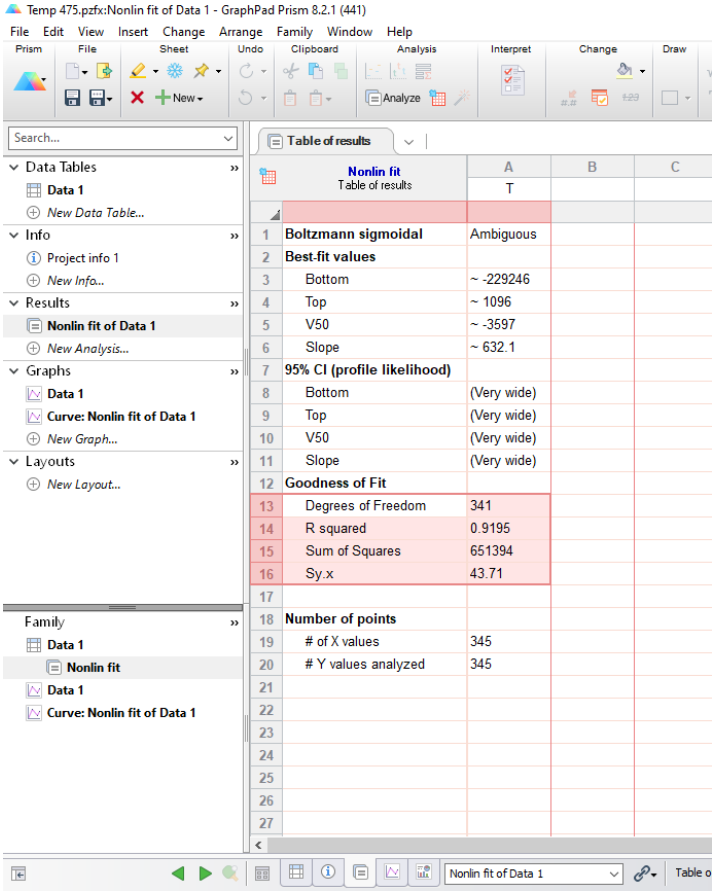
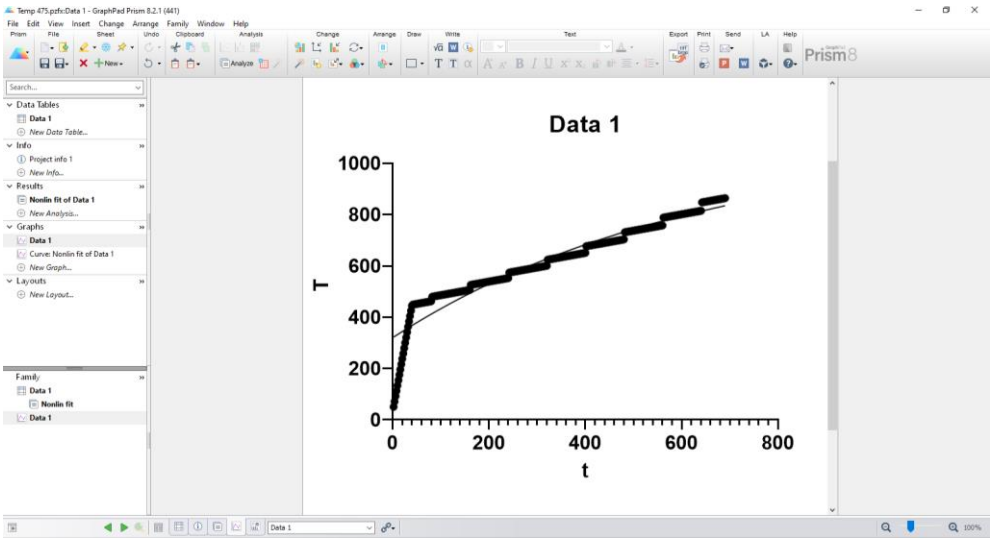


Figura 283. Resultados gráficos de la regresión lineal seleccionada para los datos evaluados.



Se pueden repetir estos pasos y comparar los resultados numéricos y gráficos de las regresiones seleccionadas.

E. ANÁLISIS TÉCNICO DEL USO INDUSTRIAL DEL PRODUCTO LÍQUIDO

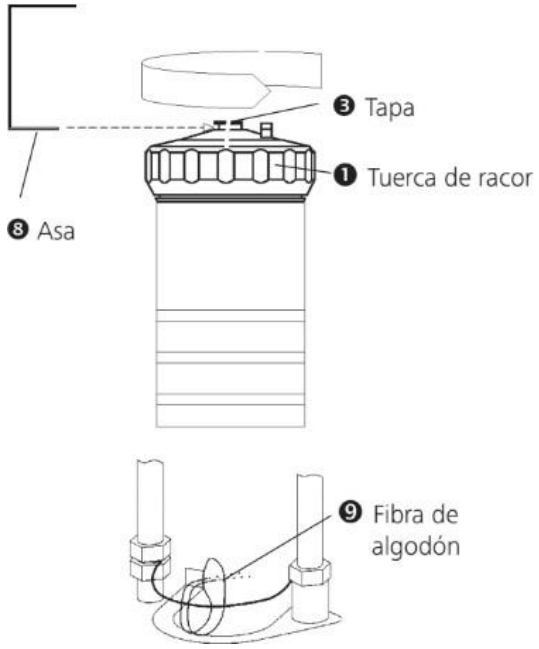
1. Figuras de metodología

Figura 284. Calorímetro IKA C-200 de laboratorio de operaciones unitarias UVG



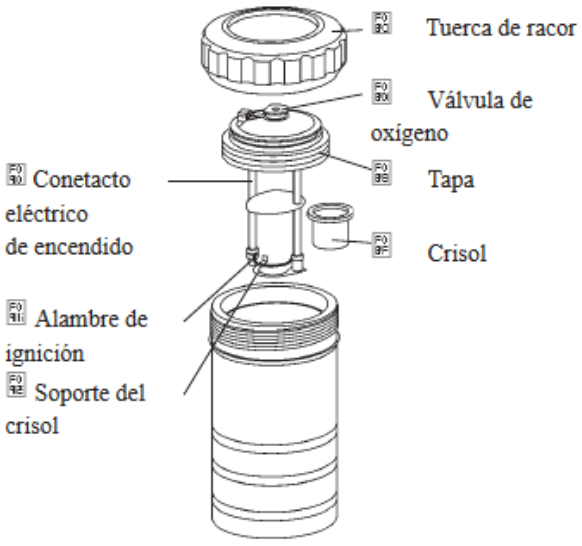
(IKA, 2018)

Figura 285. recipiente de disgregación de calorímetro IKA C-200



(IKA, 2018)

Figura 286. Estación de oxígeno C 5010 con partes señalizadas



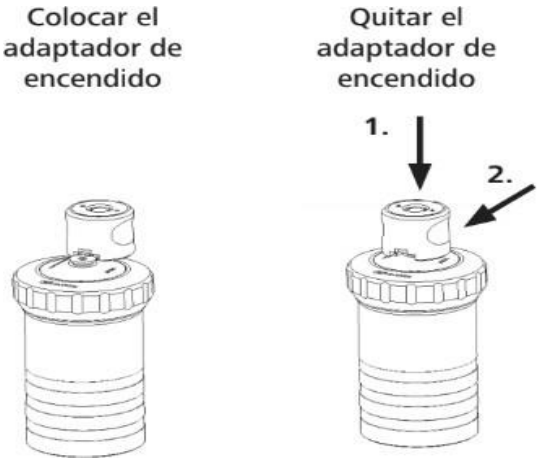
(IKA, 2018)

Figura 287. Sistema de llenado de oxígeno para recipiente de disgregación



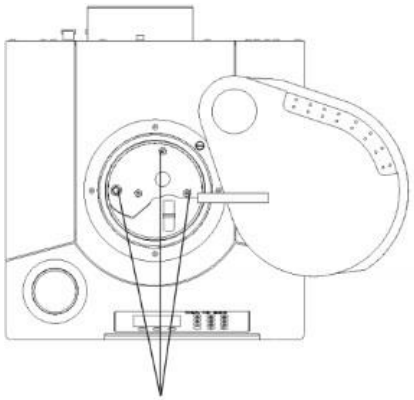
(IKA, 2018)

Figura 288. Adaptador de encendido de recipiente de disgregación



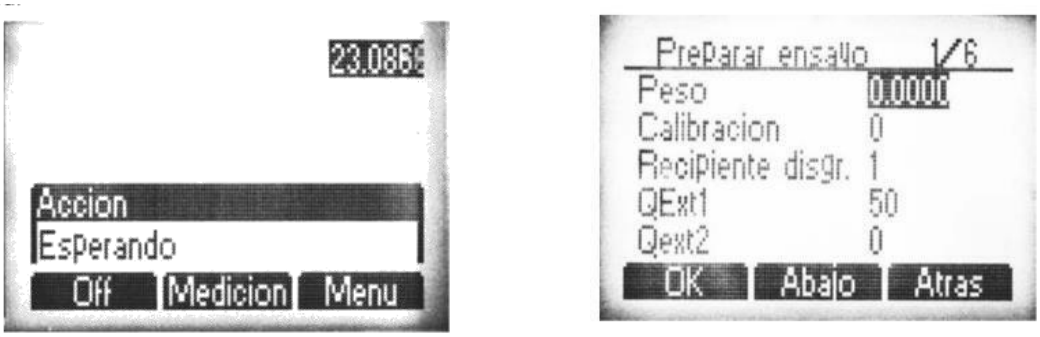
(IKA, 2018)

Figura 289. Vista en planta del calorímetro para colocar recipiente de disgregación en cámara interna



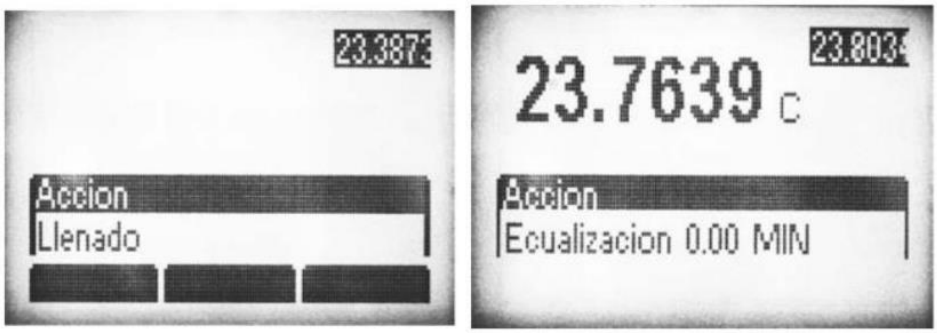
(IKA, 2018)

Figura 290. Pantallas de ingreso de masa de muestra para análisis



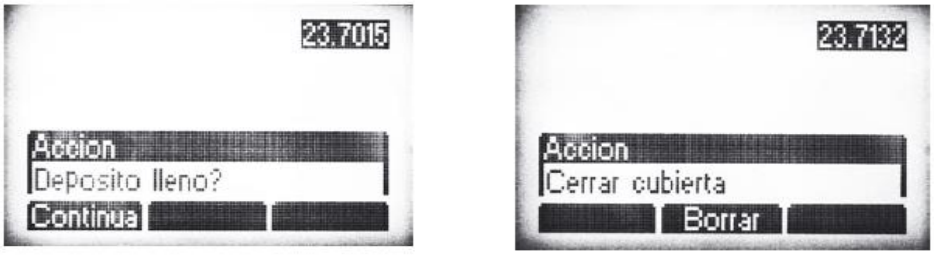
(IKA, 2018)

Figura 291. Pantallas indicadoras de llenado de equipo



(IKA, 2018)

Figura 292. Pantallas indicadoras de acciones de llenado de la cámara



(IKA, 2018)

Figura 293. Viscosímetro Cannon

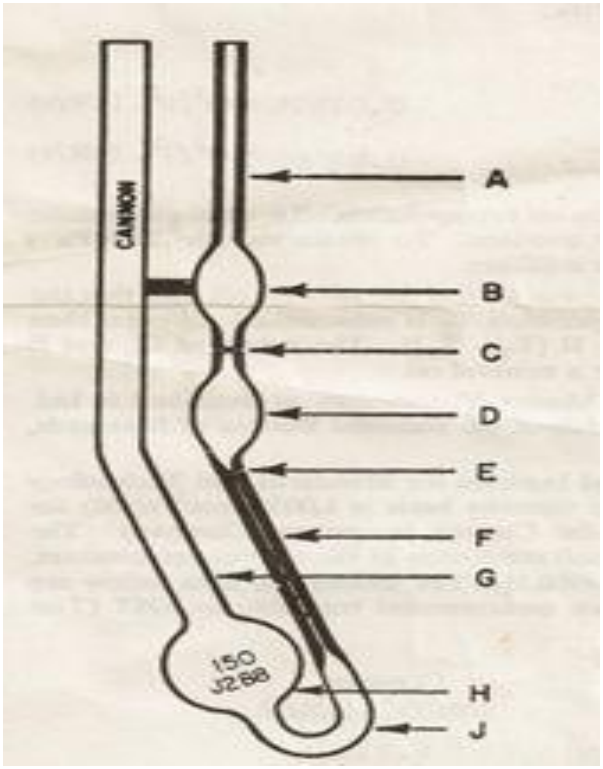


Figura 294. Especificaciones de Fuel Oil utilizado en la empresa

intertek
caleb brett

Lote # 65 "A" Aldea Modelo
La Esso, Puerto San Jose
Escuintla, Guatemala
Tel. +502 7930-3772
cbwguatemalaops@intertek.com

REPORT OF ANALYSIS

VESSEL	: N/A	DATE	: APRIL 18TH, 2018
PORT / TERMINAL	: SAN JOSE / PUMA	YOUR REF	: N/A
SAMPLE OF *	: FUEL OIL	ICB REF	: I-GTM01-000013592
DRAWN BY	: INTERTEK COMMODITIES, GUATEMALA	WITNESSED BY	: N/A
ANALYZED BY	: INTERTEK COMMODITIES, GUATEMALA	LAB REF. No.	: 0087-2018

CLIENT	: PUMA ENERGY GUATEMALA, S.A
ADDRESS	: 18 Calle 24-69 Zona 10 Boulevard los Proceres Edificio Zona Pradera Torre IV, Nivel XV Zona 10
SAMPLE DATE	: APRIL 18TH, 2018
RECEPTION DATE	: APRIL 18TH, 2018
ANALYSIS DATE	: APRIL 18TH, 2018

Identified as: SHORE TANK B2 / BY LEVELS AND COMPOSITE SAMPLE

	TEST	UNITS	METHOD	SPECIFICATION	RESULTS
1.	Api Gravity @ 60ºF	degrees	ASTM D 1298	Report	13.3
	UPPER	degrees	ASTM D 1298	Report	13.3
	MIDLLE	degrees	ASTM D 1298	Report	13.3
	LOWER	degrees	ASTM D 1298	Report	13.3
2.	Density @ 15ºC (calculated from table 3)	Kg/L	ASTM D 1298	Report	0.9766
	UPPER	Kg/L	ASTM D 1298	Report	0.9766
	MIDLLE	Kg/L	ASTM D 1298	Report	0.9766
	LOWER	Kg/L	ASTM D 1298	Report	0.9766
3.	Kinematic Viscosity @ 50ºC	Mm^2/s	ASTM D 445	Report	655.8
	UPPER	Mm^2/s	ASTM D 445	Report	655.0
	MIDLLE	Mm^2/s	ASTM D 445	Report	655.3
	LOWER	Mm^2/s	ASTM D 445	Report	658.4
4.	Sulfur Content	mass%	ASTM D 4294***	3.0 Max.	2.0122
5.	Water and Sediment	volume%	ASTM D 1796	2.0 Max	0.10
6.	Flash Point	ºC	ASTM D 93	60.0 Min	75.0
7.	Pour Point	ºC	ASTM D 97	24 Max.	-3
8.	Conradson Carbon Residue	mass%	ASTM D 189	Report	16.3
9.	Vanadium	ppm	ASTM D 5863B	Report	274
10.	Compatibility by Spot Test	Spot No.	ASTM D 4740	Report	1
11.	Stability by Spot Test	Spot No.	ASTM D 4740	Report	1
12.	Asphaltenes	mass%	IP 143	Report	11.9
13.	Ash Content	mass%	ASTM D 482	0.1 Max.	0.054
14.	Heat of Combustion (Net)	MJ/kg	ASTM D 4868	40 Min	40.43

* As per customer description

ICBFCA 019
Rev.1/09-04

Remarks:

*** This Analyses Was Performed by External Laboratory.

This Report of Analysis may not be reproduced in part or total without the written permission of INTERTEK COMMODITIES GUATEMALA The results of the test indicated on this report are only valid for the indicated sample and should not be used as a certificate of conformity or as a certificate of the quality system of the manufacturer.

EDWIN PANAMA / LABORATORY SUPERVISOR
INTERTEK COMMODITIES

Intertek de Guatemala, S. A.

ISO 9001 :2008 REGISTERED - Provision of Inspection and Testing Services

Figura 295. Especificaciones de calidad de gasolina según reglamento técnico centroamericano

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	VALORES
Aditivos	----------	----------	Reportar [a]
Color	----------	Visual.	Anaranjado
Contenido de Plomo [b]	g Pb/L	D-3237	0,013 máx.
Corrosión tira de cobre, 3 h, 50ºC	----------	D-130	No.1 máx.
Estabilidad a la oxidación, Tiempo de descomposición	Minutos	D-525	240 mín.
Contenido de azufre total	% masa	D-2622	0,10 máx.
Prueba Doctor o Azufre Mercaptano	---------- % masa	D-4952 D-3227	Negativa 0,003 máx.
Presión de vapor REID a 37,8 ºC	kPa (psi)	D-323	69 (10) máx.
Gravedad API a 15,56 ºC (60 ºF) o Densidad a 15ºC	ºAPI kg/m^3	D-287 D-1298	Reportar
Gomas existentes (lavado con solvente)	mg/100 mL	D-381	4 máx.
Destilación:			
10% recuperados	ºC	D-86	65 máx.
50% recuperados	ºC		77 – 121
90% recuperados	ºC		190 máx.
Punto final de ebullición	ºC		225 máx.
Residuo	% volumen		2 máx.
Número de octanos:			
RON	----------	D-2699	88,0 mín. (Ver nota para Nicaragua)
Índice de Octano (RON + MON)/2 [c]	----------	D-2699 y D-2700	83,0 mín. (Ver nota para Nicaragua)
Contenido de Aromáticos	% volumen	D-1319	Reportar [d]
Contenido de Olefinas	% volumen	D-1319	Reportar [d]
Contenido de Benceno	% volumen	D-3606	Reportar [d]
Oxígeno	% volumen	D-4815	Reportar [d]

[a] La información que se deberá presentar para cada aditivo que se agregó a este producto es la siguiente:
Hoja de Datos de Seguridad del Material ("Material Safety Data Sheet")
Proporción agregada del aditivo (mezcla)
Propiedad del producto que el aditivo genera o mejora en el mismo, ejemplo: antiespumante, antioxidante,

Figura 296. Especificaciones de calidad de fuel oil 6 según reglamento técnico centroamericano

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	METODO ALTERNATIVO	VALORES [a]
Contenido de azufre total	% masa	D-129	D- 1552, D-2622, D-4294	3,0 máx.
Residuo de carbón Conradson, ó	% masa	D-189	D-4530	Reportar [d]
Residuo de carbón Ramsbottom		D-524		Reportar [d]
Agua y sedimentos	% volumen	D-95 + D-473	D-1796	2,0 [b] máx.
Punto de inflamación (Flash Point)	°C	D-93		60 min.
Gravedad API a 15,56 °C (60 °F) o Densidad	°API kg/m³	D-287 D-1298	D-4052	Reportar
Viscosidad Cinemática a 50 °C	mm²/s [c]	D-445		Reportar [d]
Punto de Escurrimiento	°C	D-97	D-5949, D-5950, D-5985	24 máx.
Contenido total de cenizas	% masa	D-482		0,1 máx.
Asfaltenos	% masa	D-3279		Reportar [d]
Poder calorífico inferior	MJ/kg	D-240	D-4868	40 mín
Metales contaminantes: Vanadio (V)	mg/kg	D-5863		Reportar. [d]

[a] Aceites combustibles para usos industriales con valores diferentes a los especificados, excepto el contenido de azufre, podrán ser objeto de negociación / contratación entre las partes interesadas, previa autorización de la Dirección General de Hidrocarburos.

[b] La cantidad de agua por destilación por el método ASTM D-95 + la extracción del sedimento por el método ASTM D-473, no debe exceder la cantidad indicada en esta tabla; la cantidad de sedimento por extracción no debe exceder 0,50 % masa, y se debe hacer una deducción en la cantidad para toda agua y sedimento en exceso de 1,0 % masa.

[c] 1 mm²/s = 1 cSt

[d] Reportar indicando el resultado obtenido de acuerdo al método, por un periodo de un año y evaluar en los siguientes tres meses, con el propósito de definir si se mantiene reportar o se define un valor numérico.

Figura 297. Especificaciones de calidad de diésel según reglamento técnico centroamericano

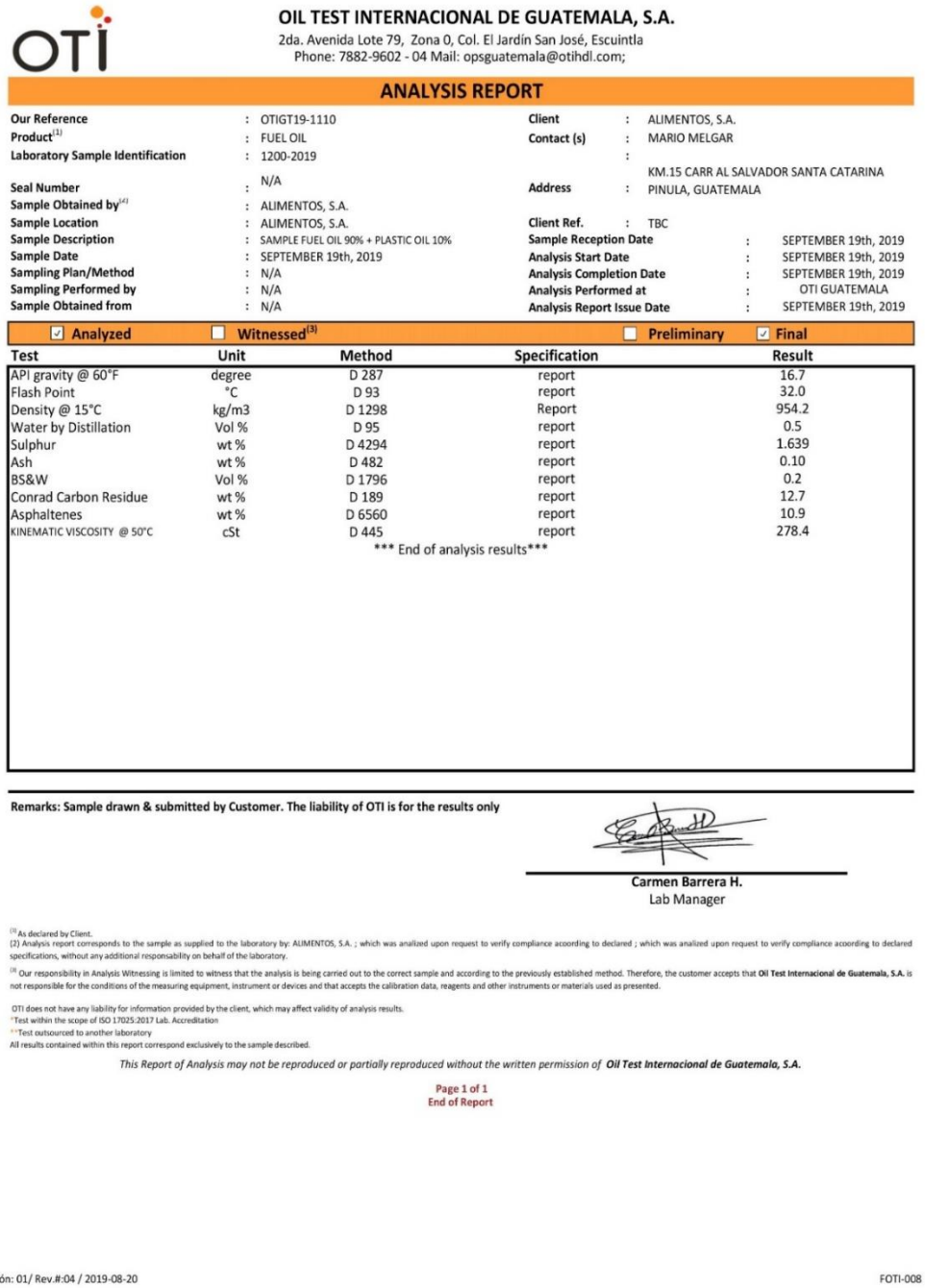
CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	VALORES
Apariencia	------	D-4176	Claro y Brillante [a]
Aditivos	------	-----	Reportar [b]
Color ASTM	------	D-1500	Reportar
Indice de cetano calculado	------	D-976	45 mín.
Número de cetano [c]	------	D-613	45 mín.
Corrosión tira de cobre, 3 h, 50 °C.	------	D-130	No.2 máx.
Contenido de cenizas	fracción de masa (% masa/masa)	D-482	0,0001 (0,01) máx.
Contenido de azufre total	fracción de masa (% masa/masa)	D-129	0,0005 (0,05) máx.[d] (Ver nota para todos los países)
Residuo de carbón Conradson en 10 % residuo	fracción de masa (% masa/masa)	D-189	0,0010 (0,10) máx.
o Residuo de carbón Ramsbottom en 10 % residuo		D-524	0,0013 (0,13) máx.
Agua y sedimentos	fracción de volumen (% volumen/volumen)	D-2709	0,0005 (0,05) máx.
Punto de inflamación (Flash Point)	°C	D-93	52 mín.
Gravedad API a 15,56 °C (60 °F) o densidad a 15 °C	°API kg/m^3	D-287 D-1298	Reportar
Punto de escurrimiento	°C	D-97	Reportar
Punto de enturbamiento	°C	D-2500	10 máx. [e] (Ver nota limitación climática para Guatemala)
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm^2/s [f]	D-445	1,9 - 4,1
Destilación: 10 % recuperados 50 % recuperados 90 % recuperados Punto final de ebullición	 °C °C °C °C	D-86	 Reportar Reportar 360 máx. Reportar
Aromáticos	fracción de volumen (% volumen/volumen)	D-1319	Reportar [g]

[a] Si el producto cumple con los valores establecidos en este reglamento, se considerará apto para la venta aún cuando su apariencia no sea claro y brillante.

[b] La información que se debe presentar para cada aditivo que se agregó a este producto es la siguiente:

- Hoja de Datos de Seguridad del Material ("Material Safety Data Sheet").
- Proporción agregada del aditivo (mezcla).
- Propiedad del producto que el aditivo genera o mejora en el mismo, ejemplo: antiespumante, antioxidante, detergente, etc.

Figura 298. Análisis de mezcla 90:10 bunker con líquido de pirólisis



OIL TEST INTERNACIONAL DE GUATEMALA, S.A.
2da. Avenida Lote 79, Zona 0, Col. El Jardín San José, Escuintla
Phone: 7882-9602 - 04 Mail: opsguatemala@otihdl.com;

ANALYSIS REPORT

Our Reference	: OTIGT19-1110	**Client**	:	ALIMENTOS, S.A.	
Product[1]	: FUEL OIL	**Contact (s)**	:	MARIO MELGAR	
Laboratory Sample Identification	: 1200-2019		:		
Seal Number	: N/A	**Address**	:	KM.15 CARR AL SALVADOR SANTA CATARINA PINULA, GUATEMALA	
Sample Obtained by[2]	: ALIMENTOS, S.A.				
Sample Location	: ALIMENTOS, S.A.	**Client Ref.**	:	TBC	
Sample Description	: SAMPLE FUEL OIL 90% + PLASTIC OIL 10%	**Sample Reception Date**	:	SEPTEMBER 19th, 2019	
Sample Date	: SEPTEMBER 19th, 2019	**Analysis Start Date**	:	SEPTEMBER 19th, 2019	
Sampling Plan/Method	: N/A	**Analysis Completion Date**	:	SEPTEMBER 19th, 2019	
Sampling Performed by	: N/A	**Analysis Performed at**	:	OTI GUATEMALA	
Sample Obtained from	: N/A	**Analysis Report Issue Date**	:	SEPTEMBER 19th, 2019	

☑ **Analyzed** ☐ **Witnessed**[3] ☐ **Preliminary** ☑ **Final**

Test	Unit	Method	Specification	Result
API gravity @ 60°F	degree	D 287	report	16.7
Flash Point	°C	D 93	report	32.0
Density @ 15°C	kg/m3	D 1298	Report	954.2
Water by Distillation	Vol %	D 95	report	0.5
Sulphur	wt %	D 4294	report	1.639
Ash	wt %	D 482	report	0.10
BS&W	Vol %	D 1796	report	0.2
Conrad Carbon Residue	wt %	D 189	report	12.7
Asphaltenes	wt %	D 6560	report	10.9
KINEMATIC VISCOSITY @ 50°C	cSt	D 445	report	278.4

*** End of analysis results***

Remarks: Sample drawn & submitted by Customer. The liability of OTI is for the results only

Carmen Barrera H.
Lab Manager

[1] As declared by Client.
(2) Analysis report corresponds to the sample as supplied to the laboratory by: ALIMENTOS, S.A. ; which was analized upon request to verify compliance according to declared ; which was analized upon request to verify compliance according to declared specifications, without any additional responsability on behalf of the laboratory.

[3] Our responsibility in Analysis Witnessing is limited to witness that the analysis is being carried out to the correct sample and according to the previously established method. Therefore, the customer accepts that **Oil Test Internacional de Guatemala, S.A.** is not responsible for the conditions of the measuring equipment, instrument or devices and that accepts the calibration data, reagents and other instruments or materials used as presented.

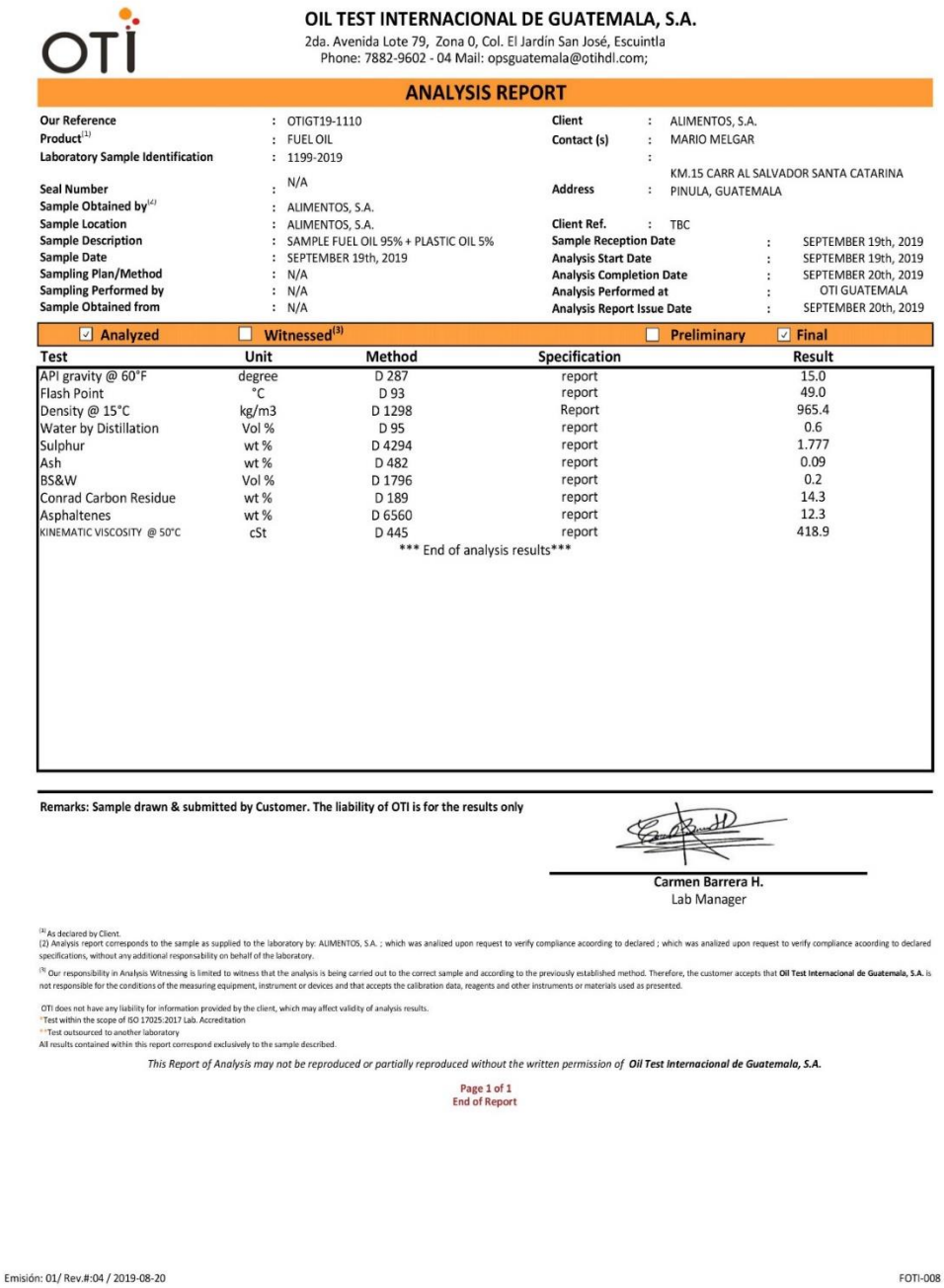
OTI does not have any liability for information provided by the client, which may affect validity of analysis results.
*Test within the scope of ISO 17025:2017 Lab. Accreditation
**Test outsourced to another laboratory
All results contained within this report correspond exclusively to the sample described.

This Report of Analysis may not be reproduced or partially reproduced without the written permission of ***Oil Test Internacional de Guatemala, S.A.***

Page 1 of 1
End of Report

Emisión: 01/ Rev.#:04 / 2019-08-20 FOTI-008

Figura 299. Análisis de mezcla 95:05 bunker con líquido de pirólisis



OIL TEST INTERNACIONAL DE GUATEMALA, S.A.

2da. Avenida Lote 79, Zona 0, Col. El Jardín San José, Escuintla
Phone: 7882-9602 - 04 Mail: opsguatemala@otihdl.com;

ANALYSIS REPORT

Our Reference	: OTIGT19-1110	**Client**	: ALIMENTOS, S.A.		
Product(1)	: FUEL OIL	**Contact (s)**	: MARIO MELGAR		
Laboratory Sample Identification	: 1199-2019		:		
Seal Number	: N/A	**Address**	: KM.15 CARR AL SALVADOR SANTA CATARINA PINULA, GUATEMALA		
Sample Obtained by(2)	: ALIMENTOS, S.A.				
Sample Location	: ALIMENTOS, S.A.	**Client Ref.**	: TBC		
Sample Description	: SAMPLE FUEL OIL 95% + PLASTIC OIL 5%	**Sample Reception Date**	:	SEPTEMBER 19th, 2019	
Sample Date	: SEPTEMBER 19th, 2019	**Analysis Start Date**	:	SEPTEMBER 19th, 2019	
Sampling Plan/Method	: N/A	**Analysis Completion Date**	:	SEPTEMBER 20th, 2019	
Sampling Performed by	: N/A	**Analysis Performed at**	:	OTI GUATEMALA	
Sample Obtained from	: N/A	**Analysis Report Issue Date**	:	SEPTEMBER 20th, 2019	

☑ **Analyzed** ☐ **Witnessed**(3) ☐ **Preliminary** ☑ **Final**

Test	Unit	Method	Specification	Result
API gravity @ 60°F	degree	D 287	report	15.0
Flash Point	°C	D 93	report	49.0
Density @ 15°C	kg/m3	D 1298	Report	965.4
Water by Distillation	Vol %	D 95	report	0.6
Sulphur	wt %	D 4294	report	1.777
Ash	wt %	D 482	report	0.09
BS&W	Vol %	D 1796	report	0.2
Conrad Carbon Residue	wt %	D 189	report	14.3
Asphaltenes	wt %	D 6560	report	12.3
KINEMATIC VISCOSITY @ 50°C	cSt	D 445	report	418.9

*** End of analysis results***

Remarks: Sample drawn & submitted by Customer. The liability of OTI is for the results only

Carmen Barrera H.
Lab Manager

(1) As declared by Client.
(2) Analysis report corresponds to the sample as supplied to the laboratory by: ALIMENTOS, S.A. ; which was analized upon request to verify compliance according to declared ; which was analized upon request to verify compliance according to declared specifications, without any additional responsability on behalf of the laboratory.

(3) Our responsibility in Analysis Witnessing is limited to witness that the analysis is being carried out to the correct sample and according to the previously established method. Therefore, the customer accepts that **Oil Test Internacional de Guatemala, S.A.** is not responsible for the conditions of the measuring equipment, instrument or devices and that accepts the calibration data, reagents and other instruments or materials used as presented.

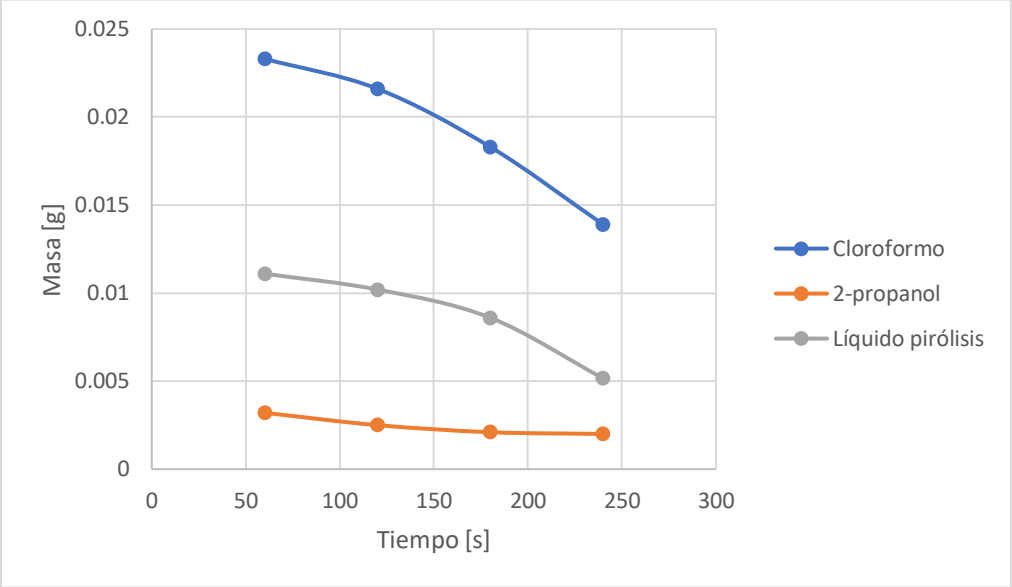
OTI does not have any liability for information provided by the client, which may affect validity of analysis results.
*Test within the scope of ISO 17025:2017 Lab. Accreditation
**Test outsourced to another laboratory
All results contained within this report correspond exclusively to the sample described.

This Report of Analysis may not be reproduced or partially reproduced without the written permission of ***Oil Test Internacional de Guatemala, S.A.***

Page 1 of 1
End of Report

Emisión: 01/ Rev.#:04 / 2019-08-20 FOTI-008

Figura 300. Relación de evaporación de masa respecto a tiempo



*Se utilizaron dos solventes para evaluar el comportamiento de pérdida de masa respecto a tiempo con el líquido de pirólisis y así evaluar su volatilidad.

2. Datos originales producto líquido

Cuadro 213. Mediciones realizadas para la determinación de poder calorífico del líquido de pirólisis

Prueba	Masa [±0.0001g]	Poder calorífico [MJ/kg]	± [MJ/kg]	Media [MJ/kg]	Desviación estándar
1	0.3021	45.0180	0.0149		
2	0.3015	44.9930	0.0149	45.0040	0.013
3	0.3005	45.0010	0.0150		
4	0.2960	44.4240	0.0150		
5	0.2996	45.1280	0.0151	44.5603	0.0143
6	0.2930	44.1290	0.0151		
7	0.3008	45.1890	0.0150		
8	0.2974	44.9900	0.0151	45.1833	0.0142
9	0.3001	45.3710	0.0151		
10	0.2947	44.8760	0.0152		
11	0.2934	44.6340	0.0152	44.8113	0.0155
12	0.2349	44.9240	0.0191		
13	0.3078	45.5870	0.0148		
14	0.3084	45.6700	0.0148	45.5620	0.0122
15	0.3067	45.4290	0.0148		

Cuadro 214. Datos de pruebas de pirólisis a escala laboratorio

Pirólisis No.	Tiempo de operación (h)	Temperatura alcanzada por set point (°C)	Masa Líquido (±0.0001)
1	1.16	475	47.5381
2	1.18	475	46.7194
3	1.13	475	50.1252
4	1.20	475	48.8602
5	1.15	475	48.9889

Cuadro 215. Masas de pruebas de volatilidad

Tiempo [s]	Masa Cloroformo (±0.0001)	Masa 2-propanol (±0.0001)	Masa Líquido pirólisis (±0.0001)
60	0.0233	0.0032	0.0111
120	0.0216	0.0025	0.0102
180	0.0183	0.0021	0.0086
240	0.0139	0.0020	0.0051

Cuadro 216. Propiedades de solventes utilizados en prueba de volatilidad

Compuesto	Temperatura de ebullición (°C)	Presión de vapor (mm Hg)
Cloroformo	61.3	159.6
2 - propanol	82.5	68.0

(Weast & Selby, 1967)

*Los datos presentados de temperatura de ebullición (°C) son a 1 atm.

* La presión de vapor es a 20°C

3. Cálculos de muestra

Cálculo de muestra 12. Determinación de contenido de BOPP en material de ingreso al reactor

$$Área\ de\ empaque = Masa\ \times \left(\frac{1}{rendimiento}\right)$$

$$Área\ de\ empaque = 60\ g\ \times \left(\frac{1}{30.3\ g/m^2}\right) = 1.98\ m^2/muestra$$

$$BOPP\ transparente = \ Área\ equivalente\ por\ masa\ de\ muestra\ \times BOPP\ transparente$$

$$BOPP\ transparente = \ \left(1.98\frac{m^2}{muestra}\right)\left(13.65\frac{g}{m^2}\right) = \frac{27.03g}{muestra}$$

$$BOPP\ metalizado = \left(1.98\frac{m^2}{muestra}\right)\left(13.65\frac{g}{m^2}\right) = \frac{27.03g}{muestra}$$

$$Masa\ de\ mezcla\ líquido\ gas\ obtenida\ a\ parir\ de\ BOPP\ de\ ingreso$$
$$= BOPP\ transparente + BOPP\ metalizado = 54.06\frac{g}{muestra}$$

Cálculo de muestra 13. Masa de líquido teórica a partir de BOPP de ingreso

Se usa el resultado del cálculo de muestra 1 con el rendimiento promedio reportado en el . Cuadro 44

$$Masa\ de\ líquido\ a\ parir\ de\ BOPP\ de\ ingreso = \left(54.06\frac{g\ mezcla\ líq - gas}{muestra}\right)(81\%)$$
$$= \frac{49.0214\ g\ líquido}{muestra}$$

Cálculo de muestra 14. Rendimiento de líquido obtenido

Se usan los datos presentados en el

Cuadro 214.

$$Rendimiento\ líquido = \frac{Masa\ ingresada}{Masa\ líquido\ obtenido} \times 100\% = \frac{60.0000\ g}{47.5381\ g} \times 100\% = 79.29\%$$

*Se realizó el mismo cálculo para las demás mediciones.

Cálculo de muestra 15. Determinación del volumen de tanque horizontal

A partir de la alimentación por lote, se determina el volumen de material a alimentar en el tanque.

$$2.3\ t\ \left(\frac{1000\ kg}{1\ t}\right) = 2{,}300\ kg$$

Empleando la conversión de 74% de líquido.

$$2{,}300\ kg * 0.74\% = 1{,}702.00\ kg$$

A partir de este dato se determina el volumen de líquido a almacenar

$$1{,}702.00\ kg\left(\frac{1\ m^3}{779.1\ kg}\right)\left(\frac{264.17\ gal}{1\ m^3}\right) = 577.10\ gal$$

Cálculo de muestra 16. Producción mensual de líquido de pirólisis

Por mes se realizan 20 lotes; las condiciones son las mismas del cálculo anterior por lo que se toma el volumen obtenido para la determinación

$$577.10\ gal * 20 = 11{,}541.97\ gal$$

Cálculo de muestra 17. Volumen de líquido a almacenar

Dado que se toma la proporción de mezcla 90:10 bunker-líquido de pirólisis, se determina el 10% del consumo de bunker que se tendría que satisfacer con el líquido.

$$(25{,}000\ gal) * 10\% = 2{,}500\ gal$$

Cálculo de muestra 18. Cálculo del área transversal

Diámetro de tubería de acero de 4 pulgadas, catálogo 40:

$$D = 4.026\ in\left(\frac{2.54\ cm}{1\ in}\right)\left(\frac{1\ m}{100\ cm}\right) = 0.1022\ m$$

$$s = 0.08840\ ft^2\left(\frac{1\ m}{3.28\ ft}\right)^2 = 0.0082168\ m^2$$

Cálculo de muestra 19. Determinación de caudal

*Tomando como tiempo de traspaso del tanque receptor al tanque de almacenamiento

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{577.1\ gal}{1\ hora} = 577.1\frac{gal}{h}\left(\frac{3.78\ L}{1\ gal}\right) = 2{,}184\frac{L}{h}$$

$$2{,}184\frac{L}{h} * \left(\frac{1\ m^3}{1000\ L}\right) = 2.184 m^3/h$$

** Determinación de caudal para bomba

$$577.1\frac{gal}{h}\left(\frac{1\ h}{60\ min}\right) = 9.61\ gpm$$

Cálculo de muestra 20. Cálculo del número de Reynolds

*Asumiendo $\bar{v} = 3.0$ m/s según Simpson por densidad del líquido de pirólisis superior a 800 kg/m³

$$N_{Re} = \frac{D\bar{v}\rho}{\mu} = \frac{(0.022\ m)\cdot(1.08\ m/s)\cdot(810.10\frac{kg}{m^3})}{0.1084\ kg/m\cdot s} = 237.68$$

Cálculo de muestra 21. Determinación de fricción en superficie de tubería

$$h_{fs} = 4f\frac{\Delta L\bar{v}^2}{2Dg_c} = 4(0.0090)\frac{(46\ m)(1.08 m/s)^2}{2(0.022\ m)(1)} = 100.2\ m^2/s^2$$

Según la carta del factor de fricción de fanning y el número de Reynolds:

$$\frac{k}{D} = \frac{0.0001524}{0.0266} = 0.0057$$

$$f = 0.0090$$

** Para la fricción de superficie de las tuberías de hierro galvanizado se utilizó los valores de la tabla “Surface coefficients to calculate friction and major pressure loss in ventilation ducts - concrete, galvanized steel, corroded steel and more” de Engineering ToolBox, (2003)

Cálculo de muestra 22. Determinación de la fricción por accesorios presentes en la tubería

$$h_{ff} = \frac{\bar{v}^2}{2g_c} k_f = \frac{\left(1.08\frac{m}{s}\right)^2}{2(1)}\left(4 \cdot (0.35) + 2 \cdot (0.17) + 4 \cdot (2) + 2 \cdot (0.85)\right) = 5.7\ m^2/s^2$$

Accesorios presentes:

4 Cheque de válvula $k_f = 2$

2 Válvula de compuerta completamente abierta $k_f = 0.17$

4 Codos 45° $k_f = 0.35$

2 uniones de T $k_f = 0.85$

Cálculo de muestra 23. Determinación de fricción total de tubería evaluada

$$h_f = h_{fs} + h_{ff} = 100.2\frac{m^2}{s^2} + 5.7\frac{m^2}{s^2} = 105.9\frac{m^2}{s^2}$$

Cálculo de muestra 24. Determinación de la caída de presión

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{\alpha v_a^2}{2g_c} + \frac{gZ_a}{g_c} + \eta W_p = \frac{P_b}{\rho} + \frac{\alpha v_b^2}{2g_c} + \frac{gZ_b}{g_c} + h_f$$

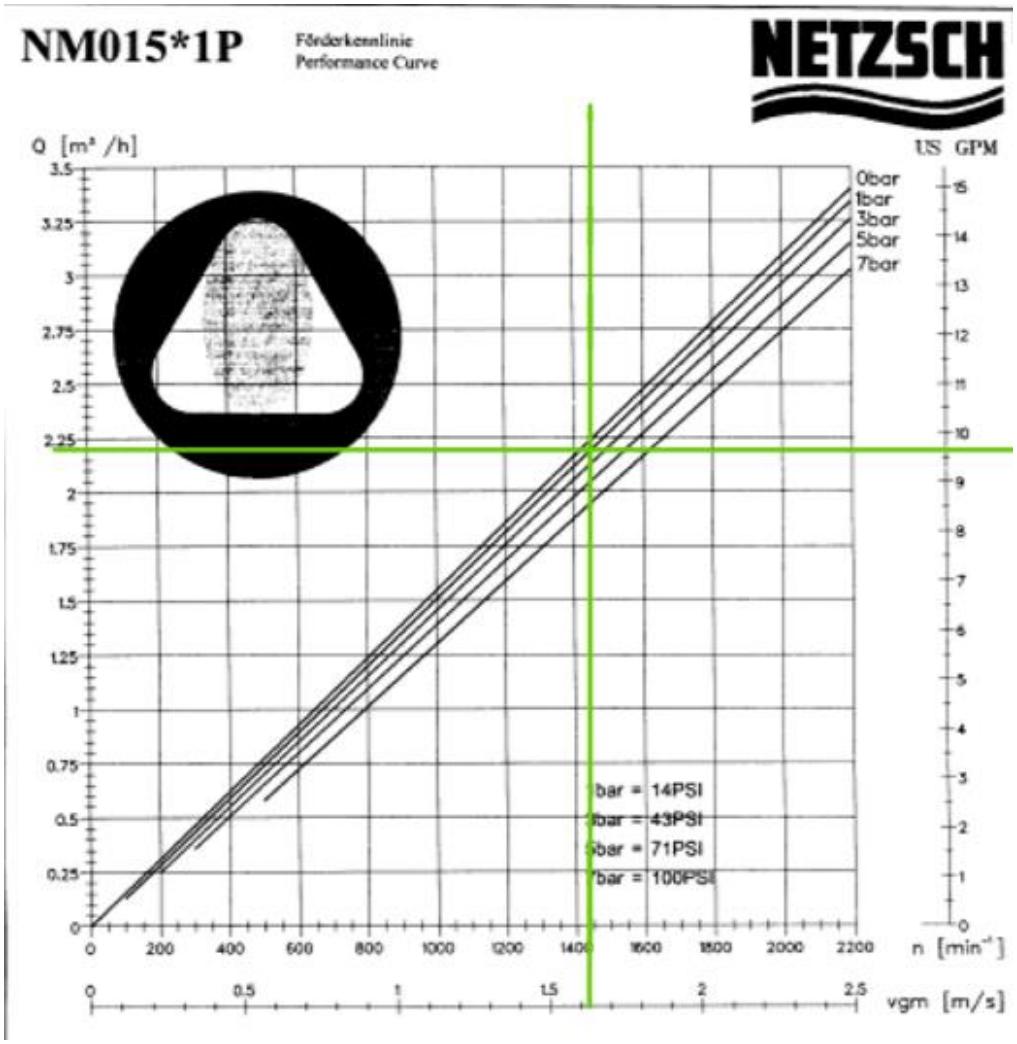
*Evaluando la misma velocidad y una de las alturas a nivel 0, se reduce la ecuación a:

$$P_a - P_b = gZ_b + \rho h_f - \eta W_P = \left(9.8\frac{m^2}{s} * 8\ m\right) + \left(810.1\frac{kg}{m^3}\right)\left(41.14\ \frac{m^2}{s^2}\right) - (1.1\ kW * 0.8)$$

$$= 38{,}546.48\ Pa$$

Cálculo de muestra 25. Selección de bomba

Se realizó la selección de bomba con los datos técnicos de rango de flujo proporcionados en el manual de la bomba Netzsch - NEMO 015


NM015*1P
Förderkennlinie
Performance Curve
NETZSCH
Q [m³/h]
US GPM
0bar
1bar
3bar
5bar
7bar
bar = 14PSI
bar = 43PSI
bar = 71PSI
bar = 100PSI
n [min⁻¹]
vgm [m/s]

4. Análisis de error

Análisis de error 1. Media de datos

$$X = \frac{\sum x}{n}$$

x = dato de la serie

n = total de datos en la serie

*Se utilizan datos de la primera muestra de líquido de pirólisis, ver **Cuadro *213*** en Anexos

$$X = \frac{(45.018 + 44.993 + 45.001)MJ/kg}{3} = 45.004\frac{MJ}{kg}$$

**Se realizó el mismo cálculo para las demás mediciones.

Análisis de error 2. Desviación estándar de pruebas poder calorífico

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x_i - x)^2}{(n-1)}}$$

xi = media de los datos de una serie

x = dato de la serie

n = total de datos de la serie

*Se utilizan datos de la primera muestra de líquido de pirólisis, ver **Cuadro *213*** en Anexos

$$S = \sqrt{\frac{(45.004 - 45.018)^2 + (45.004 - 44.993)^2 + (45.004 - 45.001)^2}{(3-1)}} = 0.013$$

**Se realizó el mismo cálculo para las demás mediciones.

Análisis de error 3. Propagación de error para multiplicación y división

$$\Delta y = y\left(\sqrt[2]{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2}\right)$$

Δy = Propagación de error

y = Resultado final

Δa,Δb,Δc = incertidumbres de los instrumentos

a,b,c = datos obtenidos con los instrumentos

*Se utilizan datos de la primera muestra de líquido de pirólisis, ver **Cuadro *213*** en Anexos

$$\Delta y = 45.018\left(\sqrt[2]{\left(\frac{0.0001}{0.3021}\right)^2}\right) = 0.0149$$

**Se realizó el mismo cálculo para las demás mediciones.

5. Datos calculados

Cuadro 217. Líquido obtenido por producción semanal y mensual

Parámetro	Total
Líquido obtenido semanalmente [kg]	8,510.0
Volumen de líquido [gal]	2,885.5
Líquido obtenido mensual [kg]	34,040.0
Volumen de líquido [gal]	11,542.0

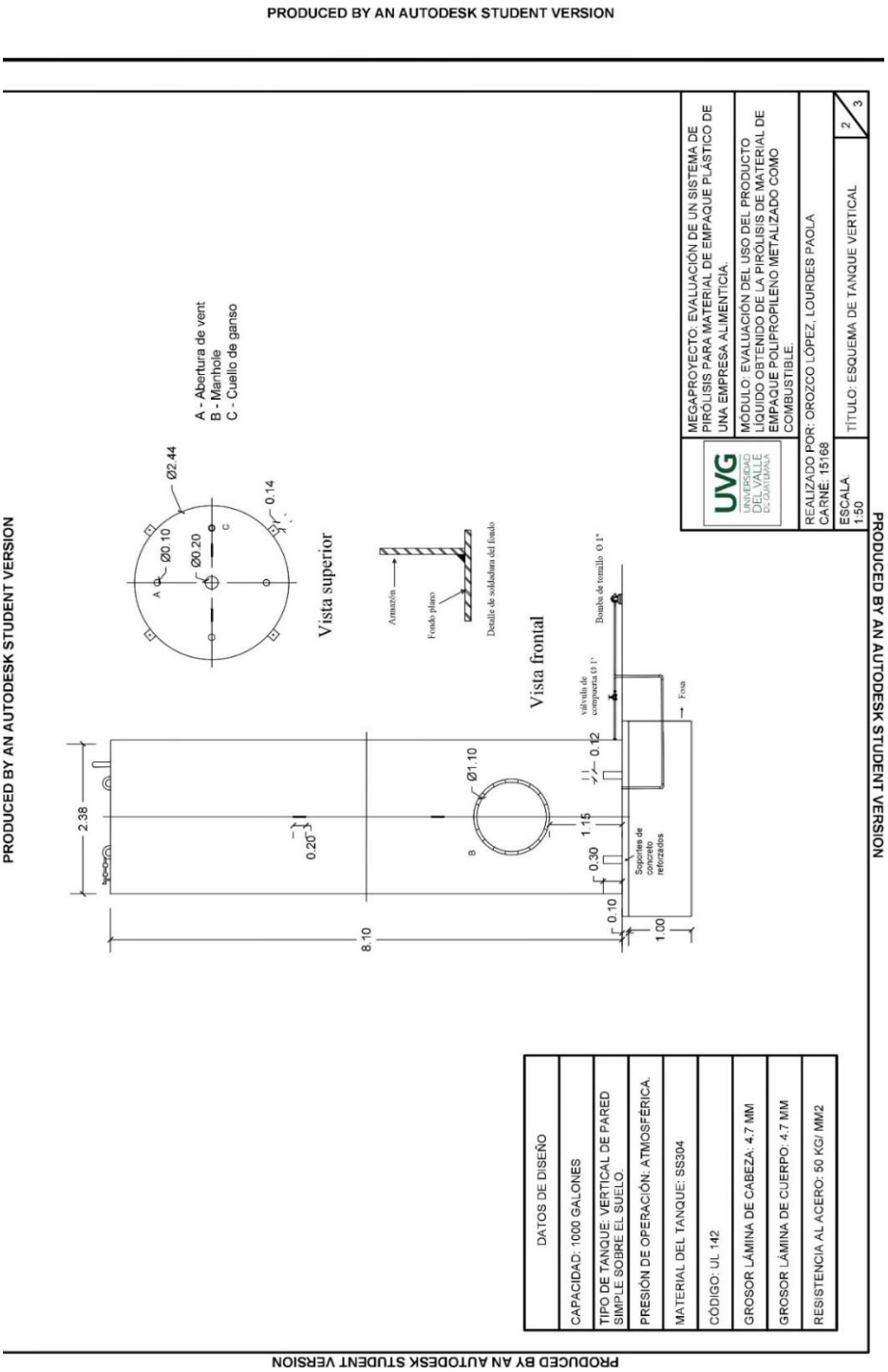
6. Especificaciones de equipo

Figura 301. Especificaciones de calorímetro IKA C 200

Información Técnica

Rango de medición max.	40000 J
Modo de medición dinámico 25°C	si
Modo de medición del isoperibólico 25°C	si
Tiempo de medición dinámico aprox.	8 min
Tiempo de medición isoperibólico aprox.	17 min
Reproducibilidad dinámica (1g ácido benzoico NBS39i)	0.1 %RSD
Reproducibilidad isoperibólico (1g ácido benzoico NBS39i)	0.1 %RSD
Funcionamiento de temperatura max.	25 °C
Resolucion de medida de temperatura	0.0001 K
Impresora del interfaz	Centronix
PC del interfaz	RS232
Vaso descomposición C 5010	si
Análisis de acuerdo al DIN 519000	si
Análisis de acuerdo al ISO 1928	si
Dimensiones (An x Al x Pr)	400 x 400 x 400 mm
Peso	28.912 kg
Temperatura ambiental permitida	20 - 25 °C
Humedad relativa permitida	80 %
Clase de protección de acuerdo al DIN EN 60529	IP 20
Interfaz de RS 232	si
Voltaje	100 - 240 V
Frecuencia	50/60 Hz
Consumo de energía	120 W

7. Planos


PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION
PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION
PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION
PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION
A - Abertura de vent
B - Manhole
C - Cuello de ganso
Ø2.44
Ø0.10
Ø0.20
0.14
Vista superior
Armazón
Fondo plano
Detalle de soldadura del fondo
Vista frontal
Válvula de compuerta @ 1"
Bonifo de tornillo @ 1"
Ø1.10
0.12
1.15
0.30
0.10
1.00
8.10
2.38
0.20
Soportes de concreto reforzados
Fosa
DATOS DE DISEÑO
CAPACIDAD: 1000 GALONES
TIPO DE TANQUE: VERTICAL DE PARED SIMPLE SOBRE EL SUELO.
PRESIÓN DE OPERACIÓN: ATMOSFÉRICA.
MATERIAL DEL TANQUE: SS304
CÓDIGO: UL 142
GROSOR LÁMINA DE CABEZA: 4.7 MM
GROSOR LÁMINA DE CUERPO: 4.7 MM
RESISTENCIA AL ACERO: 50 KG/ MM2
UVG
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
MEGAPROYECTO: EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE PIRÓLISIS PARA MATERIAL DE EMPAQUE PLÁSTICO DE UNA EMPRESA ALIMENTICIA.
MÓDULO: EVALUACIÓN DEL USO DEL PRODUCTO LÍQUIDO OBTENIDO DE LA PIRÓLISIS DE MATERIAL DE EMPAQUE POLIPROPILENO METALIZADO COMO COMBUSTIBLE.
REALIZADO POR: OROZCO LÓPEZ, LOURDES PAOLA
CARNÉ: 15168
ESCALA: 1:50
TÍTULO: ESQUEMA DE TANQUE VERTICAL
2
3

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

F. ANÁLISIS TÉCNICO DEL USO INDUSTRIAL DEL PRODUCTO SÓLIDO

1. Datos obtenidos experimentalmente

Cuadro 218. Masa del char obtenido de las pruebas a escala laboratorio.

No. de prueba	Masa (±0.01 g)
1	5.94
2	5.30
3	5.30
4	5.70
5	4.80
Promedio	5.41
Desviación estándar	0.44

*Para cada prueba a escala laboratorio se utilizó una muestra de materia prima de 60g.

Cuadro 219. Humedad del char obtenido de las pruebas a escala laboratorio.

No. de prueba	Humedad (±0.01 % m/m)
1	5.83
2	5.65
3	5.86
4	5.81
5	5.75
Promedio	5.78
Desviación estándar	0.08

Estos datos fueron medidos por medio de una balanza de humedad, la cual se muestra en la Figura 308.

Cuadro 220. Poder calorífico del char obtenido de las pruebas a escala laboratorio.

No. de prueba	Poder calorífico (MJ/mg)
1	22.30
2	24.10
3	21.50
4	21.69
5	19.70
Promedio	21.86
Desviación estándar	1.58

*Los valores originales se obtuvieron de las pruebas realizadas en la sección de caracterización de los productos.

Cuadro 221. Masa del char retenida en los tamices según el número de mesh.

No. de Mesh	Abertura (µm)	Masa retenida (±0.01 g)
20	850	10.65
30	600	5.85
45	355	6.85
60	250	4.25
80	180	3.85
100	150	0.95
Finos	-	0.35
Total	-	32.75

*Se utilizó una muestra de 32.7 g para realizar las mediciones, el tamizador empleado se muestra en la Figura 304.

Cuadro 222. Volumen aparente y compactado del char para medición de densidades.

No. de prueba	Volumen aparente (±0.01 mL)	Volumen compactado (±0.01 mL)
1	68.00	44.00
2	65.00	43.00
3	66.00	43.00
4	64.00	42.00
5	63.00	43.00

*Se utilizó una muestra de 7.0 g para realizar las mediciones.

Cuadro 223. Alturas y radios obtenidos para el cálculo de ángulos de reposo y deslizamiento del char.

No. de prueba	Altura 1 (±0.01 cm)	Radio 1 (±0.01 cm)	Altura 2 (±0.01 cm)	Radio 2 (±0.01 cm)
1	5.20	5.50	10.50	28.30
2	5.10	5.40	10.00	28.30
3	5.20	5.50	9.80	28.30
4	5.20	5.45	10.50	28.30
5	5.10	5.40	10.00	28.30

*El sistema empleado para las mediciones se muestra en la Figura 311.

2. Datos calculados

Cuadro 224. Características fisicoquímicas del char obtenido de pirólisis.

Característica	Unidades	Resultado	Desviación estándar
Densidad aparente	kg/m3	107.44	3.14
Densidad compactada	kg/m3	162.83	2.68
Humedad	% m/m	5.78	0.08
Ángulo de reposo	°	43.43	0.13
Ángulo de deslizamiento	°	19.75	0.58
Tamaño de partícula	m	0.00085	-

*Todos los datos fueron calculados experimentalmente, realizando 5 pruebas para cada característica, empleando los equipos respectivos para su medición. Se calculó el promedio de cada conjunto de datos y su desviación estándar.

Cuadro 225. Resultados del análisis de determinación de Aluminio en el char.

Característica	Unidades	Resultado
Aluminio	kg/m3	0.0027
	ppm	2.70

*El análisis fue realizado por el Agrolaboratorio CERES por medio el método de acidez intercambiable

Cuadro 226. Análisis granulométrico del char obtenido de las pruebas a escala laboratorio.

No. de Mesh	% Retenido	% Retenido acumulado
20	32.52	32.52
30	17.86	50.38
45	20.92	71.30
60	12.98	84.27
80	11.76	96.03
100	2.90	98.93
Finos	1.07	100.00
Total	100.00	-

*Se utilizó una muestra de 32.7 g para realizar las mediciones.

Cuadro 227. Densidades aparente y compactada del char obtenido de las pruebas a escala laboratorio.

No. de prueba	Densidad aparente (g/cm3)	Densidad compactada (g/cm3)	Densidad aparente (kg/m3)	Densidad compactada (kg/m3)
1	0.10	0.16	102.94	159.09
2	0.11	0.16	107.69	162.79
3	0.11	0.16	106.06	162.79
4	0.11	0.17	109.38	166.67
5	0.11	0.16	111.11	162.79
Promedio	0.11	0.16	107.44	162.83
Desviación estándar	0.003	0.003	3.140	2.679

*Todos los datos fueron calculados experimentalmente, realizando 5 pruebas para cada medición. Se calculó el promedio de cada conjunto de datos y su desviación estándar.

Cuadro 228. Ángulos de reposo y deslizamiento del char obtenido de las pruebas a escala laboratorio.

No. de prueba	Ángulo de reposo (°)	Ángulo de deslizamiento (°)
1	43.39	20.36
2	43.36	19.46
3	43.39	19.10
4	43.66	20.36
5	43.36	19.46
Promedio	43.43	19.75
Desviación estándar	0.13	0.58

*Todos los datos fueron calculados experimentalmente, realizando 5 pruebas para cada medición. Se calculó el promedio de cada conjunto de datos y su desviación estándar.

Cuadro 229. Datos utilizados para el dimensionamiento del silo.

Parámetros	Unidades	Valor
*Capacidad del reactor	kg	2300
*Rendimiento del char	% m/m	11.88
Cantidad de char por lote	kg	273.24
**Lotes semanales	-	5
Cantidad de char semanal	kg	1366.20
Ángulo de reposo	°	43.43
Diámetro de partícula	m	0.00085
Densidad compactada	kg/m3	162.83

3. Cálculo de muestra

Cálculo de muestra 26. Porcentaje de masa retenido en cada tamiz

Se partió de los datos de la masa retenida en los tamices, presentados en la Cuadro 221, considerando que se utilizaron 32.75 g de char para tamizar.

$$\frac{(10.65 * 100)}{60} = 32.52\ \%$$

Se realizó el mismo cálculo para cada uno de los tamices.

4. Cálculo de muestra 27. Densidad aparente

Se partió de los datos del volumen aparente, presentados en la Cuadro 222, considerando que se utilizaron 7 g de char para cada prueba.

$$\frac{7.0\ \text{g}}{68\ \text{mL}}\left(\frac{1\ kg}{1000\ g}\right)\left(\frac{0.000001\ mL}{1\ m^3}\right) = 102.94\ \text{kg}/m^3$$

Se realizó el mismo cálculo para cada una de las 5 pruebas.

Cálculo de muestra 28. Densidad compactada

Se partió de los datos del volumen compactado, presentados en la Cuadro 222, considerando que se utilizaron 7 g de char para cada prueba.

$$\frac{7.0\ \text{g}}{44\ \text{mL}}\left(\frac{1\ kg}{1000\ g}\right)\left(\frac{0.000001\ mL}{1\ m^3}\right) = 159.09\ \text{kg}/m^3$$

Se realizó el mismo cálculo para cada una de las 5 pruebas.

Cálculo de muestra 29. Ángulo de reposo y deslizamiento

Se partió de los datos de la altura y radio de la pila presentados en la Cuadro 223.

$$\tan^{-1}\left(\frac{5.20\ cm}{5.50\ cm}\right) = 43.39\ °$$

Se realizó el mismo cálculo para cada una de las 5 pruebas.

Cálculo de muestra 30. Cantidad de aluminio presente en el char

Se utilizó el resultado del análisis de contenido de aluminio intercambiable realizado por un laboratorio externo, este se encuentra en el apartado G de la sección de anexos y el peso molecular del aluminio.

$$0.10\left(\frac{mmol}{dm^3}\right)\left(\frac{1\ mol}{1000\ mmol}\right)\left(\frac{26.98\ g}{1\ mol}\right)\left(\frac{1\ dm^3}{1000\ cm^3}\right)\left(\frac{1\ kg}{1000\ g}\right)\left(\frac{1\ x\ 10^6\ cm^3}{1\ m^3}\right)$$

$$= 2.70\ x\ 10^{-3}\ \text{kg}/m^3$$

$$2.70\ x\ 10^{-3}\ \left(\frac{kg}{m^3}\right)\left(\frac{1\ m^3}{1000\ L}\right)\left(\frac{1000000\ mg}{1\ kg}\right) = 2.70\ \text{ppm}$$

Cálculo de muestra 31. Dimensionamiento del silo

Cantidad de char producida por semana. Se utilizó el dato de la capacidad del reactor escalado para la planta piloto, el rendimiento del char y la cantidad de lotes por semana, estos datos se muestran en la Cuadro 229.

$$(2300\ \text{kg}) * (0.1188) * 5\ = 1366.20\ \text{kg}$$

Cálculo de muestra 32. Dimensiones del cilindro

Se calculó el volumen de material a partir de la cantidad de char semanal y la densidad compactada, presentados en la Cuadro 229.

$$V_m\ = \frac{1366.20\ kg}{162.83\ kg/m^3} = \ 8.39\ m^3$$

Se utilizó la ecuación del volumen del cilindro para calcular el radio, empleando el volumen de material y considerando como regla gruesa que la altura es 2 veces el diámetro y 4 veces el radio del cilindro.

$$r_{cilindro} = \sqrt[3]{\frac{8.39\ m^3}{4\pi}} = 0.87\ m$$

Teniendo este dato, se procedió a calcular la altura y diámetro del cilindro.

$$h_{cilindro} = 4 * 0.87\ \text{m} = 3.50\ m$$

$$D_{cilindro} = 2 * 0.87\ \text{m} = 1.75\ m$$

Cálculo de muestra 33. Volumen del cono

Se calculó el ángulo de la tolva a partir del ángulo de reposo.

$$\alpha_{tolva} = 43.43° + 10 = 53.43\ °$$

Se calculó la altura del cono, empleando el radio del cilindro y posteriormente se calculó el volumen del cono, según la ecuación del mismo.

$$h_{cono} = 0.87 \tan(53.43) = 1.18\ m$$

$$V_{cono} = \frac{1}{3}\pi(0.87)^2(1.18) = 0.94\ m^3$$

Cálculo de muestra 34. Volumen del cono inferior

Se utilizó un radio de 0.2 m para permitir la salida del material del silo.

$$V_{cono2} = \frac{1}{3}\pi(0.2)^3(\tan 53.43) = 0.01129\ m^3$$

$$h_{cono2} = 0.2(\tan 53.43) = 0.27\ m$$

Cálculo de muestra 35. Dimensiones de la tolva

Se restó el volumen del segundo cono al volumen del primer cono, se hizo lo mismo con la altura y se calculó el volumen como un cono truncado para verificar.

$$V_{tolva} = 0.94 - 0.01129 = 0.93\ m^3$$

$$h_{tolva} = 1.18 - 0.27 = 0.91\ m$$

$$V_{cono\ truncado} = \frac{\pi(0.91)}{3}(0.87)^2 + (0.2)^2 + (0.87)(0.2) = 0.94\ m^3$$

Cálculo de muestra 36. Sobre diseño en el cono superior

Se calculó el volumen del cono que se forma en la parte superior, empleando el radio del cilindro, el ángulo de reposo y la ecuación del volumen del cono.

$$V_{cono3} = \frac{1}{3}\pi(0.87)^3(\tan(43.43)) = 0.66\ m^3$$

Con este dato se procedió a calcular el volumen dentro del cilindro, empleando los valores del volumen de material, el volumen de la tolva y el volumen del cono superior.

$$V_{dentro\ cilindro} = 8.93 - 0.93 - 0.66 = 6.80\ m^3$$

Se calculó la altura del material ocupado, por medio de la ecuación del volumen del cilindro, empleando el volumen dentro del cilindro y el radio.

$$h_{material\ ocupado} = \frac{6.80}{\pi(0.87)^2} = 2.83\ m$$

Se calculó la altura del espacio vacío dentro del cilindro, empleando la altura inicial del cilindro y la altura del material ocupado. Y se procedió a calcular el porcentaje de espacio vacío que esta altura representa.

$$h_{vacío} = 3.50 - 2.83 = 0.67\ m$$

$$\%\ h_{vacío} = \frac{0.67 * 100}{3.50} = 19.11\ \%$$

Se calculó la altura necesaria para obtener un sobre diseño del 20%.

$$h_{vacío} = \frac{20 * 0.67}{19.11} = 0.70\ m$$

Se calculó la altura que hace falta para tener el sobre diseño del 20%

$$h_{faltante} = 0.70 - 0.67 = 0.03\ m$$

Cálculo de muestra 37. Dimensiones del cilindro nuevo

Se calculó la altura del nuevo cilindro, sumando la altura del cilindro anterior y la altura faltante para cumplir con el sobre diseño.

$$h_{nueva} = 3.50 + 0.03 = 3.53\ m$$

Se calculó el volumen nuevo del cilindro, empleando la ecuación del cilindro y manteniendo el radio anterior.

$$V_{nuevo} = \pi(0.87)^2(3.53) = 8.47\ m^3$$

Cálculo de muestra 38. Dimensiones finales del silo

Para calcular el volumen total del silo se utilizó el volumen del cilindro nuevo, el volumen de la tolva y el volumen del cono superior que representa el sobre diseño.

$$V_{total} = 8.47 + 0.94 + 0.66 = 10.07\ m^3$$

Para calcular la altura total, se utilizó la altura del cilindro nuevo, la altura del cono superior y la altura de la tolva.

$$h_{total} = 3.53 + 0.70 + 0.91 = 5.14\ m$$

$$D = (0.87)(2) = 1.75\ m$$

Cálculo de muestra 39. Flujo másico de la banda transportadora

Se utilizó la densidad aparente del material, la cual se muestra en el Cuadro 224 para calcular el peso específico del material.

$$\gamma = \frac{107.44\ kg/m^3(9.81\ m/s^2)}{1000} = 1.05\ ton/m^3$$

Se calculó la capacidad real de transporte en ton/h y el coeficiente de reducción de la capacidad obtenido de las tablas de la literatura adjuntadas en el apartado H de la sección de anexos para una velocidad de 1 m/s. Se utilizó la ecuación 9 para calcular la capacidad de transporte.

$$Q_m = \left(23\frac{m^3}{h}\right)\left(107.44\frac{kg}{m^3}\right)\left(\frac{1\ ton}{1000\ kg}\right) = 2.47\ ton/h$$

$$Q_t = \left(2.47\frac{ton}{h}\right)(1)\left(1.05\frac{ton}{m^3}\right)\left(1\frac{m}{s}\right) = 2.60\ ton/h$$

A partir de la capacidad de transporte se calculó el flujo másico de la banda en kg/s.

$$\mathrm{Q} = \left(2.47\frac{ton}{h}\right)\left(\frac{1000\ kg}{1\ ton}\right)\left(\frac{1\ h}{3600\ s}\right) = 0.72\ kg/s$$

Flujo másico del elevador de cangilones

Se utilizó el paso y capacidad del cangilón en kg, obtenidos de las tablas del catálogo de proveedores una velocidad de 1 m/s y el coeficiente de llenado de las tablas obtenidas de la literatura adjuntas en el apartado H de la sección de anexos. Se utilizó la ecuación 10 para calcular el caudal másico del cangilón en kg/s.

$$\mathrm{q} = 0.01\ m^3 * \left(107.44\frac{kg}{m^3}\right) = 1.07\ kg$$

$$Q_m = \left(\frac{1.07\ kg}{0.33\ m}\right)(1\ m/s)(0.85) = 2.77\ kg/s$$

5. Análisis de error

Análisis de error 4. Cálculo del promedio

Se llevaron a cabo 5 pruebas para validar los resultados de cada análisis realizado, por lo que fue necesario calcular el promedio como representación de los datos obtenidos, por medio de la siguiente ecuación:

$$X = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5}$$

Análisis de error 5. Cálculo de la desviación estándar

Se calculó la desviación estándar como medida de dispersión de los datos respecto a la media, por medio de la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{\frac{(x_1 - X)^2 + (x_2 - X)^2 + (x_3 - X)^2 + (x_4 - X)^2 + (x_5 - X)^2}{5}}$$

6. Fichas técnicas de mejoradores de suelos

Figura 302. Especificaciones de enmienda agrícola FERTICONSA



Abono Con CERTIFICACIÓN DE COMPATIBILIDAD Para Producción Orgánica

MAYACERT REGISTRO DE INSUMOS

COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DEL ABONO FERTICONSA	
pH	6.0 - 7.5%
Materia Orgánica	40 - 60%
Materia Inerte	30 - 40%
Humedad	14 - 20%
Relación C/N	18 - 21
Macronutrientes Primarios	**Concentración (%) p/p**
Nitrógeno (N)	1.8 - 3.3 p/p
Fósforo (P_2O_5)	1.8 - 3.0 p/p
Potasio (K_2O)	1.2 - 3.0 p/p
Macronutrientes Secundarios	**Concentración (%) p/p**
Calcio (Ca)	2.0 - 3.0 p/p
Magnesio (MgO)	0.6 - 1.5 p/p
Macronutrientes	**Concentración (%) p/p**
Boro (B_2O_3)	0.013 - 0.018 p/p
Cobre (Cu)	0.0015 - 0.003 p/p
Hierro (Fe)	0.09 - 0.30 p/p
Manganeso (Mn)	0.028 - 0.035 p/p
Zinc (Zn)	0.014 - 0.024 p/p
Relación C/N: 10-20	

(FERTICONSA, 2019)

Figura 303. Especificaciones de la gallinaza comercial.

Materia seca	83,10	%
pH	7,90	
Materia orgánica	58,00	%
Nitrógeno	4,00	%
Fósforo	2,60	%
Potasio	2,30	%
Calcio	9,50	%
Magnesio	0,80	%
Sodio	0,30	%
Hierro	506,10	mg/kg
Manganeso	297,50	mg/kg
Cobre	37,40	mg/kg
Zinc	531,80	mg/kg
Relación C/N	7,26	
Conductividad	4,57	dS/m
Densidad	500	kg/m^3

(TAM, 2019)

7. Equipos empleados

Cuadro 230. Datos de placa de equipos.

Equipo	Especificaciones	Valor
Balanza semianalítica	Marca	Ohaus
	Modelo	V31XH2
	Serie	B652517672
Balanza de humedad	Marca	Ohaus
	Modelo	MB120
	Serie	B605071576
Tamizador	Marca	W.S. Tyler
	Modelo	RX-29
	Serie	I9I83

Figura 304. Tamizador



Figura 305. Colocación de la muestra en tamizador.



Figura 306. Prueba de tamizado.



Figura 307. Muestra empleada en el tamizador.



Figura 308. Balanza de humedad.



Figura 309. Balanza analítica.



Figura 310. Muestras de char obtenido en las pruebas de pirólisis.



Figura 311. Pruebas de medición de ángulos.



8. Resultados de análisis externos

Figura 312. Resultados del análisis de abonos orgánicos realizado por ANACAFE

Orden: 26 - 4577
Cliente: UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA,
Finca: ANABEL PEREZ en Jurisdiccion de: Guatemala GUATEMALA

Analab
ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS Y AGUAS

Análisis de Abono Orgánico O-1

				%						ppm						%	
	Identificación de la muestra	pH	*C/N	N	P2O5	K2O	CaO	MgO	Azufre	Boro	Cobre	Hierro	Manganeso	Zinc	*C.O.	*M.O.	Ceniza
No.																	
17739	LOTE MUESTRA UNICA	8.55	26.42	1.35	0.17	0.01	0.40	0.04	0.05	0.01	139.90	288.80	0.77	20.67	35.56	64.00	36.00

*N = Nitrogeno
*P_2O_5 = Fósforo
*K_2O = Potasio
*CaO = Calcio
*MgO = Magnesio
*C.O. = Carbono Orgánico
*M.O. = Materia Orgánica
*C/N = Relación Carbono-Nitrógeno

Observaciones: Dichos niveles son por lo tanto, extremadamente generales, y en consecuencia, a la hora de usarlos para interpretar hay que considerarlos como tales.

Fecha de ingreso: 13/08/2019
Fecha de ejecución:
Fecha de Impresión: 28/08/2019

ASOCIACION NACIONAL DEL CAFE ANALAB

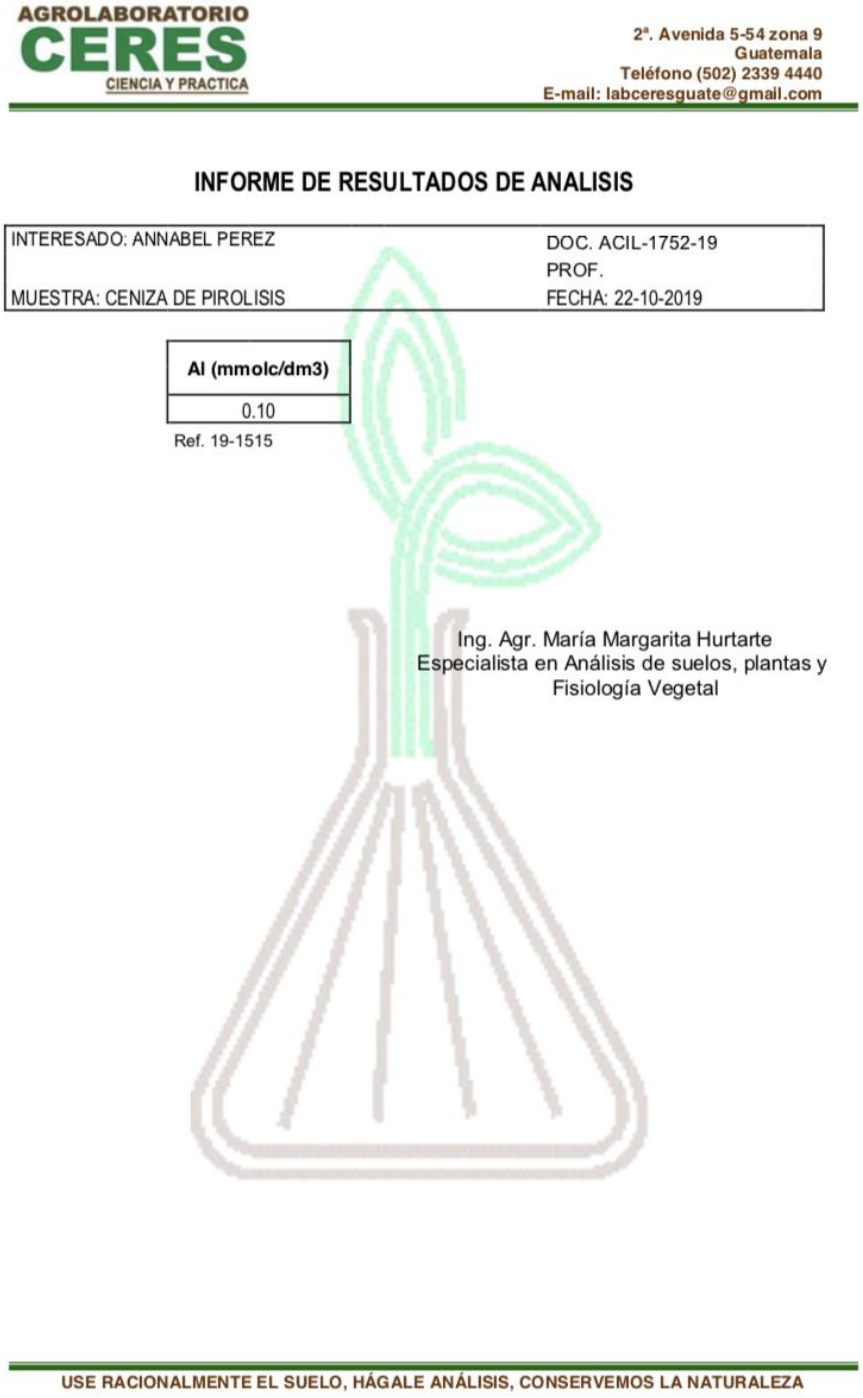
Ing. Gelver Larios
Especialista de Plantas y Esp.

Los resultados de este informe son validos únicamente para las muestras recibidas en el laboratorio y en su impresión original
Los resultados de este informe corresponden a muestras recibidas de acuerdo a los Criterios de Aceptación establecidos por Analab.
El laboratorio ANALAB, no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le de a este informe
La reproducción parcial o total de este informe debera ser autorizada por escrito por ANALAB
Todo documento fuera del servidor Control_Documentos(\\ancgua05) y de la carpeta \Publicados se considera una copia no controlada

Pág. 1 / 1

5a. calle 05-50, zona 14 Guatemala,Guatemala, C.A. e-mail: analab@anacafe.org www.anacafe.org pbx: (502) 24213700 ext. 1132, 1133 y 1137

Figura 313. Resultado del análisis de determinación de Aluminio realizado por Agrolaboratorio Ceres.



AGROLABORATORIO CERES
CIENCIA Y PRACTICA

2ª. Avenida 5-54 zona 9
Guatemala
Teléfono (502) 2339 4440
E-mail: labceresguate@gmail.com

INFORME DE RESULTADOS DE ANALISIS

INTERESADO: ANNABEL PEREZ	DOC. ACIL-1752-19
	PROF.
MUESTRA: CENIZA DE PIROLISIS	FECHA: 22-10-2019

Al (mmolc/dm3)
0.10

Ref. 19-1515

Ing. Agr. María Margarita Hurtarte
Especialista en Análisis de suelos, plantas y Fisiología Vegetal

USE RACIONALMENTE EL SUELO, HÁGALE ANÁLISIS, CONSERVEMOS LA NATURALEZA

9. Especificaciones del sistema de transporte

Figura 314. Tipo del cangilón.



*Figura obtenida del catálogo de 4B

Figura 315. Especificaciones del cangilón.

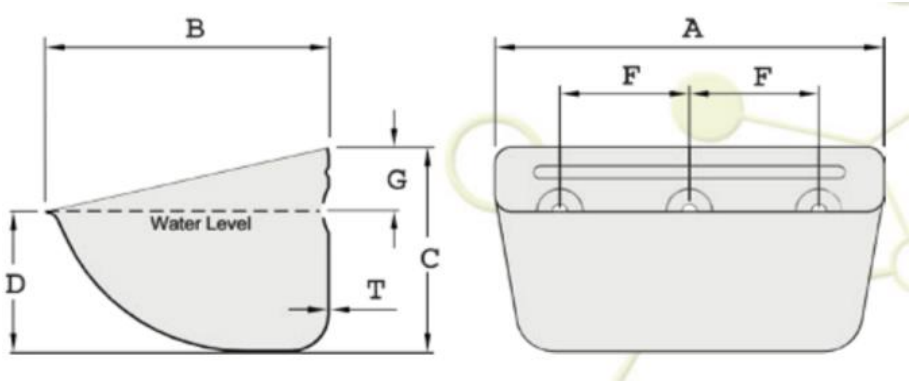


*Figura obtenida del catálogo de 4B

Figura 316. Tabla de especificaciones del proveedor 4B.

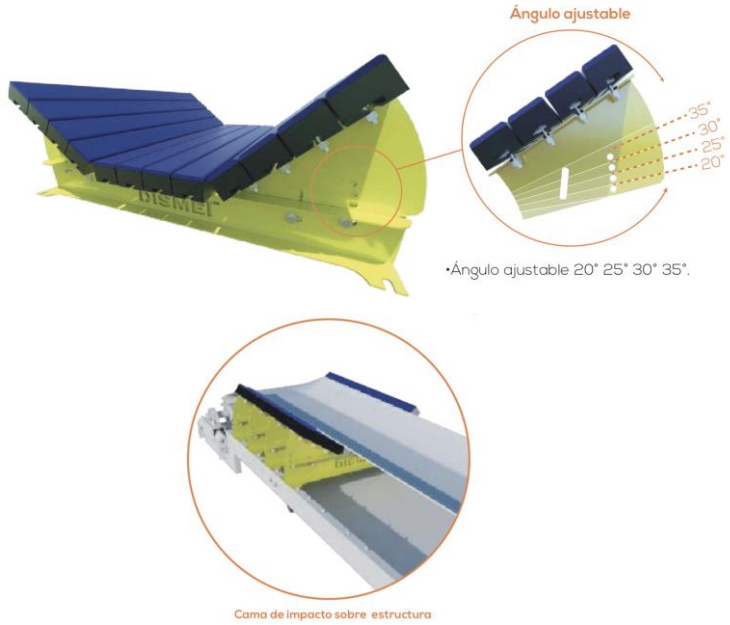
		Dimensiones (pulg.)				Perforación Estándar (pulg.)				Capacidad (pulg.³)			
Tamaño Nominal (pulg.)	Nº Parte	Longitud A	Proyección B	Profundidad C	Espesor (Calibre) T	Nº Hoyos	Diámetro Perno	Distancia F	Distancia G	Nivel de Agua	Gross	Espaciado Mínimo (pulg.)	Peso (lbs.)
24 x 8	SPS630-215	24-13/16	8-11/16	6-7/16	11	7	3/8	3-1/2	2	666	872	6-3/4	16.31

*Figura obtenida del catálogo de 4B

Figura 317. Tabla para el coeficiente de llenado del cangilón.

Características del material	Material	Tipo de elevador	Coeficiente de llenado	Velocidad (m/s)
Pulverulento	Polvo de carbón	Baja velocidad. Descarga por gravedad	0,85	0,6-0,8
	Cemento, yeso, fosfatos, fertilizantes, etc	Alta velocidad. Descarga centrifuga	0,75	1,25-1,8
Granular y con pequeños trozos (inferiores a 60 mm), medianamente abrasivos	Serrín, arcilla seca en trozos, carbón	Alta velocidad. Descarga centrifuga	0,75-0,85	1,25-2
Muy abrasivos	Grava, mineral	Baja velocidad. Descarga directa por gravedad	0,75-0,85	0,8-1
	Arena. Ceniza, tierra	Alta velocidad. Descarga centrifuga	0,7-0,8	1,6-1,8
Polvorientos, en granos, húmedo	Tierra, arena húmeda, yeso polvoriento, húmedo	Alta velocidad. Descarga centrifuga	0,4-0,6	1,25-1,8
	Muchos productos químicos	Baja velocidad. Descarga por gravedad	0,4-0,6	0,6-0,8

Figura 318. Tipo de banda transportadora.



*Figuras obtenidas del catálogo de DISMET

Figura 319. Disposición de los rodillos de la banda.

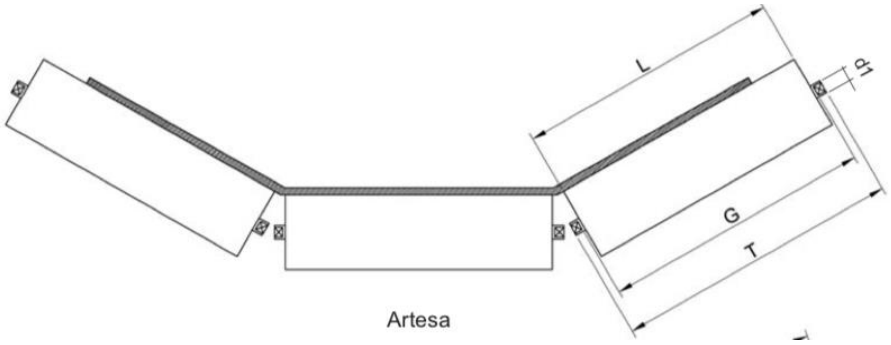


*Figura obtenida del catálogo de DISMET

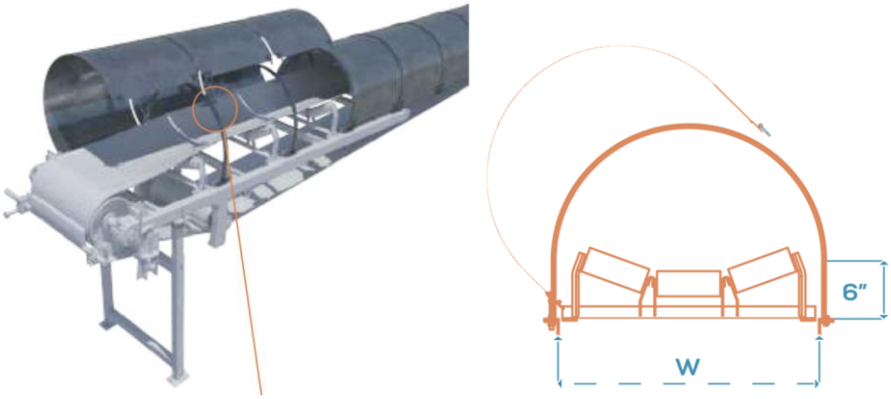
Figura 320. Dimensiones de los rodillos.

3 Rollers

Ancho de banda	L	G	d1 ∅20 T	d1 > ∅20 T
400	160	168	186	192

*Figura obtenida del catálogo de DISMET

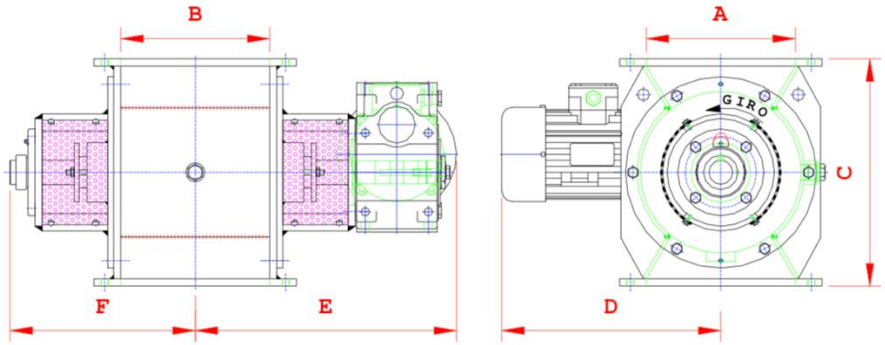
Figura 321. Cubierta para la banda.



ANCHO DE CINTA	W (MM)
18″	762

*Figuras obtenidas del catálogo de DISMET

Figura 322. Tipo de válvula para la descarga.



*Figuras obtenidas del catálogo de Gruber Hermanos.

Figura 323. Dimensiones de la válvula de descarga.

TIPO	rpm	KW (HP)	CAPACIDAD m3/h al 100%	ESTRELLA Ø x l	A	B	C	D	E	F	Peso Kg.
VR 100-CH-PE	20	3 (4)	150	540x500	400	500	700	480	690	480	600

*Figuras obtenidas del catálogo de Gruber Hermanos.

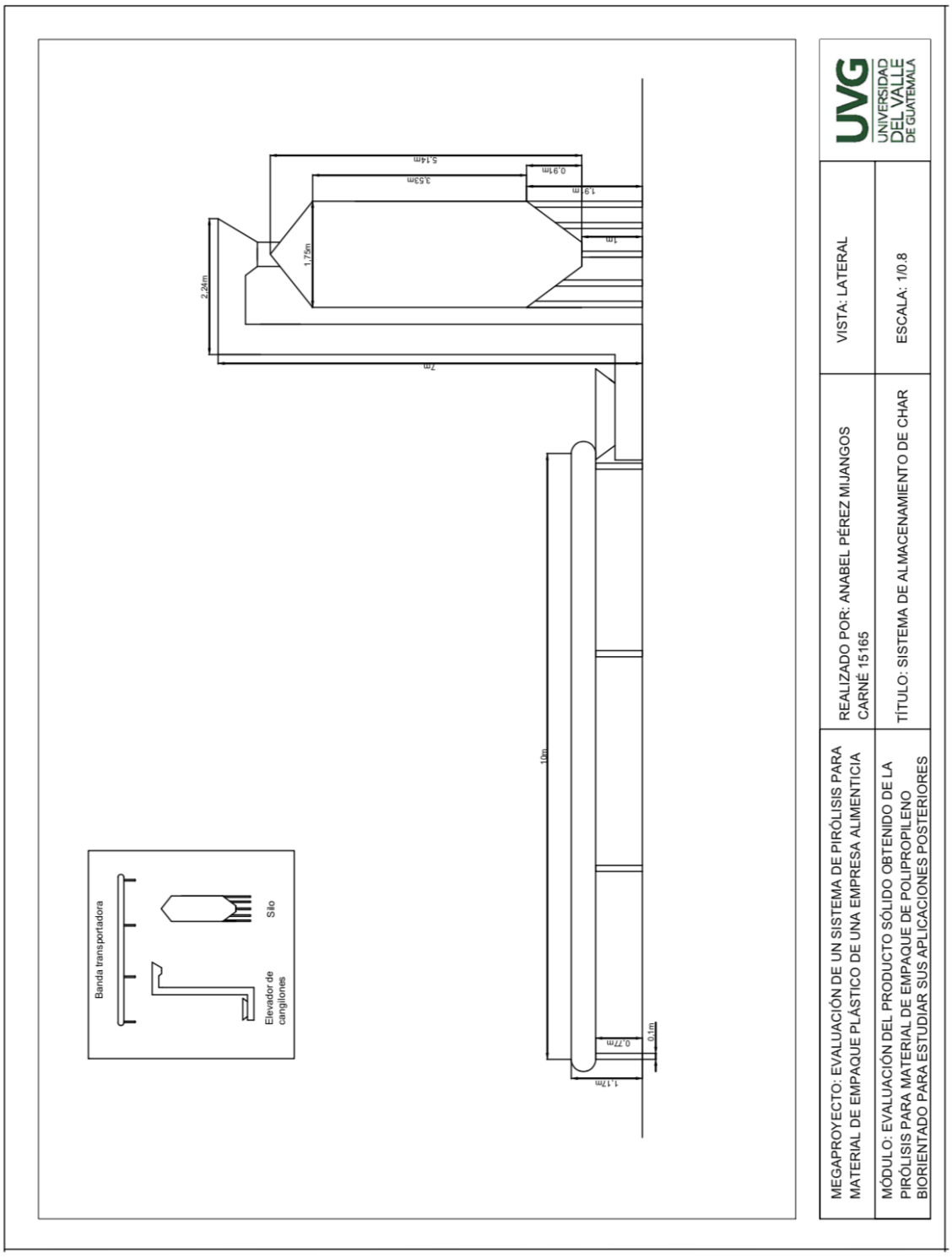
Figura 324. Tabla para la capacidad real de transporte de la banda.

TABLA II.- CAPACIDAD DE TRANSPORTE QM PARA V = 1M/SEG., EN M^3/H							
	Montaje	Montaje en Artesa (para valores de β indicados)					
Ancho	Plano	20º	25º	30º	35º	40º	45º
400	23	42	47	51	54	56	58
450	30	55	61	67	70	73	76
500	38	70	77	84	89	93	96
550	48	87	96	105	111	115	119
600	58	106	116	127	134	139	145
650	69	126	139	151	160	166	173
700	81	148	163	178	188	195	203
750	94	172	189	206	218	227	235
800	108	198	217	237	251	261	271
850	123	225	247	270	286	297	308
900	139	254	280	305	323	335	348
950	156	285	314	342	362	376	391
1.000	173	318	350	381	404	420	436
1.100	212	389	428	467	494	513	533
1.200	255	467	513	560	593	616	640
1.300	301	552	607	662	701	729	756
1.400	351	644	709	773	818	850	883
1.500	406	744	818	892	944	982	1.019

Figura 325. Tabla para el coeficiente de reducción de la capacidad de la banda.

TABLA III.- VALORES DE "K"	
Inclinación δ	K
0	1
2	1
4	0,99
6	0,98
8	0,97
10	0,95
12	0,93
14	0,91
16	0,89
18	0,85
20	0,81
21	0,78
22	0,76
23	0,73
24	0,71
25	0,68
26	0,66
27	0,64
28	0,61

10. Esquema del sistema de transporte



G. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA REACCIÓN DE PIRÓLISIS A ESCALA INDUSTRIAL

1. Cotizaciones utilizadas como propuesta para la implementación de una planta de pirólisis

Figura 326. Cotización de planta de pirólisis de 2 ton/lote propuesta por "Henan Lingfine Machinery Co., Ltd".

LINGFINE 领帆机械

Quotation No.: LF190930

2 Ton /Batch Waste Plastic Pyrolysis Machine Quotation Proposal

---- Environmental friendly model



Henan Lingfine Machinery Co., Ltd.

September. 30, 2019

TEL	0086-17703822190
R&D ADD	No. 57 of Science Avenue, High-tech District, Zhengzhou, Henan, China
WEB	www.lingfine.com
EMAIL	annie@lingfine.com

LINGFINE 领帆机械

Business Term

- Payment Term: 30% of the total contract cost should be paid as deposit, the balance should be paid before delivery.
- Delivery Time: within 20 working days after Seller receive deposit.
- Equipment Packing: standard export package.
- Installation and Commissioning Cost: If need, we can provide 1 engineer to give instruction on installation and commissioning and training of Buyer staff. The cost is calculated separately, USD100/Day per person. And the board and lodging is provided by the Buyer, the price does not include visa application and transportation cost.
- Warranty: 12 months after commissioning and acceptance by client.

Quotation Summary

S/N	ITEM	QTY	POWER (KW)	EXW PRICE	REMAKRS
1	2 Tons Pyrolysis Machine	1 line	9.94 kw	USD 22,900	Including 2 sets of burner
2	Installation Material			included	
3	Power Contribution System			included	
	TOTAL			USD 22,900 EXW factory price	

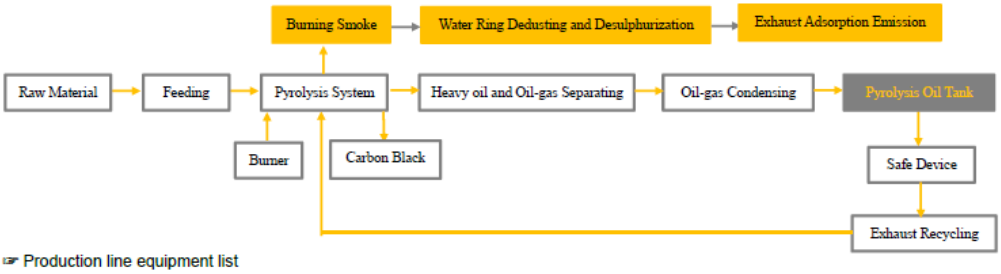
Plant Design

☞Production capacity: 2 ton waste plastics pyrolysis production.
☞Customer production material: waste plastics sorted from the city waste, moisture within 20%.

LINGFINE

Equipment List

☞ Pyrolysis Production

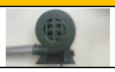


☞ Production line equipment list

S/N	EQUIPMENT	MODEL	MATERIAL	QTY	POWER	PICTURE
PYROLYSIS EQUIPMENT SYSTEM						
1	Material auto feeder	hydraulic part	Q345R	1	Optional (extra charged)	
2	Pyroylsis reactor (includes base frame, reactor boiler, insulation shell, refractory material etc.)	Φ1800x4000xδ14mm	Q345R	1	3 kw	

LINGFINE

3	Buffer tank	Φ600x1500xδ5mm	Q235A	1		
4	Condenser	Φ600x1500xδ5mm	Q235A	2		
5	Oil tank	Φ1000x1200xδ5mm	Q235A	1		
6	Water seal	Φ600x700xδ5mm	Q235A	1		
7	Oil pump		assembly	1	1.5 kw	
8	Water pump		assembly	1	2.2 kw	
9	Induced draft fan		assembly	1	3 kw	

10	Water spray tower	Φ600x3000xδ5mm	Q235A	1		
11	Desulfurizing tower	Φ600x3000xδ5mm	Q235A	1		
12	chimney	10m	Q235A	1		
13	Installation materials			1 assort		Pipeline, valve, instrument, cable, gasket, etc.
14	Power control cabinet			1		
EXHAUST RECYCLE SYSTEM						
15	Air blower	120 W		2		
16	Exhaust burner			2		
17	Flexible metal exhaust pipe			2		

Technical Data

- Pyrolysis system whole batch production time needs about 14-16 hours.
- Waste plastic from city waste oil rate is about 30-50%, if with much impurity, oil rate is about 20% for reference.

During production, there are about 5-10% uncondensable gas, will be collected and back for reactor heating to save heating material.

S/N	RAW MATERIAL	OIL YIELDING
1	Pure PE	≈ 90%
2	Pure PP	≈ 90%
3	Pure PS	≈ 90%
4	PVC	≈ 20-30% not recommended to use
5	ABS	≈ 40%
6	Pure plastic bags	≈ 50%
7	PET	Not available
8	Paper mill waste	Wet ≈ 15-20，dry 60%
9	Household garbage	≈ 30-50%，if more impurities ≈ 20%
10	Plastic cloth	≈ 70%
11	Plastic trademark	≈ 20%
12	Plastic cap	≈ 50%
13	Woven bag, hand bag	≈ 60%

Production Consumption

Item	Natural gas	Water	Electricity	Worker
Consumption	60-100 kg/batch	natural volatilization	25-30 Kwh/batch	2 /shift

Installation Area

Pyrolysis workshop: 18*12*6m

LINGFINE

Hydraulic Feeder







LINGFINE

Burner









LINGFINE

Plant Reference Project





--- 2* 10 ton pyrolysis plant during installation

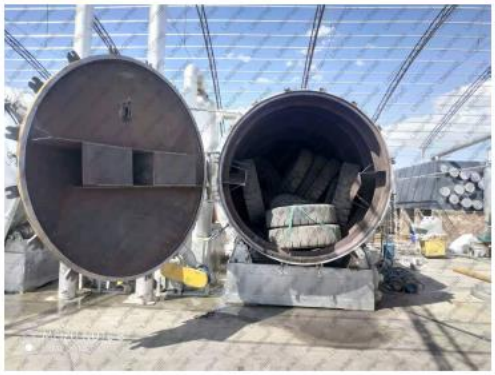
LINGFINE





--- 2 ton pyrolysis plant during installation

LINGFINE





--- 6*10 ton pyrolysis plant installed

Figura 327.Cotización de planta de pirólisis de 2 ton/lote de proveedor “Xinxiang Huayin

Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co.,Ltd

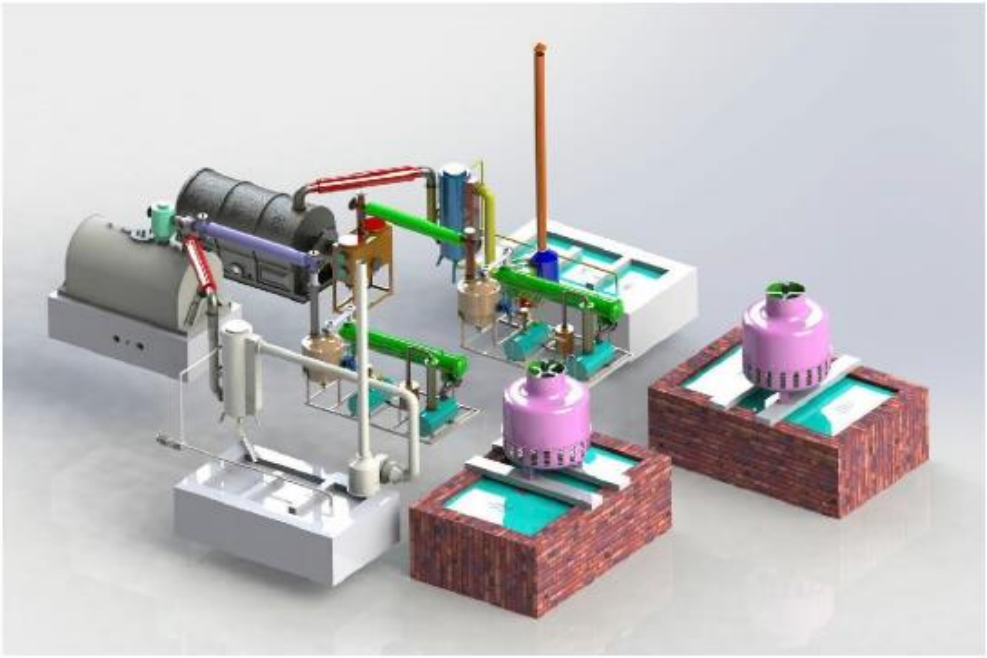
Add: Kangcun Train Station Industry Zone, Xinxiang City, Henan Province, China

Tel: 0086-371-55917089 **Web**: www.huayinenery.com

2 Ton Plastic to Diesel Plant Quotation

Contact: Lili Wei **Validez del precio:** 90 días

Fecha: 15 Aug 2019



	Nombres	Especificaciónes	Precio FOB Qingdao(USD)	Notas
1	Planta de pirólisis de 2 toneladas diseño integrado	D1700*5000	39000	
2	Planta de pirólisis de 2 toneladas diseño a granel	D1700*5000	33000	

Contact Person: Lili Wei

RenewablE Energy Equipment Co., Ltd”.

La máquina ya terminó de instalación desde la fábrica,el usuario no necesita gastar mucho tiempo en la instalación.Solo necesita conectar las tuberías del agua y el gas,eso tomaría 7 días para poder terminar la instalación y poner en operación la máquina.

3	oil purification plant	1 unti	10000	
4	Sistema de alimentación automatico	Hidraulico de 30 ton	5000	opcional
5	Quemador de aceite (solo en caso de que si usan gas)	4 sets	8000	opcional
6	Flete máritimo hasta el puerto Quetzal	40HQ*2	2100*2	
6	Total		47200	

El precio es bajo CIF QUETZAL-Guatemala

Lista de equipos

Reactor con horno All-in-one machine	Placa de caldera Q345R de 16 mm de espesor, Incluye cuerpo del reactor, base, rodillos, engranajes, reductor y capa de aislamiento térmico	1	
Camara de catalización		1	

Contact Person: Lili Wei

Tubos de enfriamiento	Enfriamiento de primara etapa	1	
Separator de agua-aceite	1. en el tapa de reciclaje de agua separa el gas y el aceite 2. Limpia el gasóleo 3. El sellado de agua evita que el gas residual regresa al reactor, garantiza la seguridad	1	
Tanque de aceite	1. Bomba de aceite automático 2. Brida nueva y grande,facil para limpiar	2	
Sistema de enfriamiento integrar	1. Segunda etapa de enfriamiento 2. Cada uno tiene 57 tubos pequeños de enfriamiento,puede enfriar uniformemente. 3. Usa el circuito de agua para asegurar el efecto del enfriemiento	1	

Contact Person: Lili Wei

Condensador de enfriameinto del gas residual (condensador vertical blanco)	Enfríe el gas para conseguir el aceite	1	
Dispositivo anti-backfire (tanques rojos)	1. Sello de agua evita que el gas residual vuelva al reactor. 2. recicla el gas de escape al horno y lo quema como combustible	1	
Sistema de eliminación de polvo	Elimine el contenido de azufre y el polvo, convertir el humo en vapor de agua, evita la contaminación del aire	1	

Contact Person: Lili Wei

Ventilador	Chupa el humo y lo procesa a la chimenea	1	
Tubo de conexión			
Control electronico	Controla toda la operación de la máquina	1	

Términos y Condiciones

Contact Person: Lili Wei

Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co.,Ltd

Add: Kangcun Train Station Industry Zone, Xinxiang City, Henan Province, China

Tel: 0086-371-55917089 **Web: www.huayinenery.com**

1. Forma de pago: el depósito (50% del total) cuando firmamos el contrato y el 50% restante del dinero debe pagarse por T / T antes de que la máquina salga de la fábrica.
2. Tiempo de entrega: 25-30 días despúes de recibir el depósito.
3. Garantía: un año apartir la fecha de la operación normal de la máquina.
4. Servicio postventa:
(1)Durante la instalación de la máquina ,enviaremos nuestro ingeniero a su sitio para guiar la instalación y poner en marca la máquina.Durante la instalación y puesta en marcha,ofrecemos servicio de capacitación a sus trabajadores.
(3)El comprador será responsable de los pasajes del ingeniero,la pensión, el alojamiento y el salario del ingeniero es de 80 dólares / día..
(4)Ofrecemos dibujo de base, enviamos el diseño en 3D dentro de una semana, verá todo claramente desde el diseño, es igual a la instalación de la planta en su fábrica.

2. Materiales necesarios para la realización de la obra gris de la planta de pirólisis

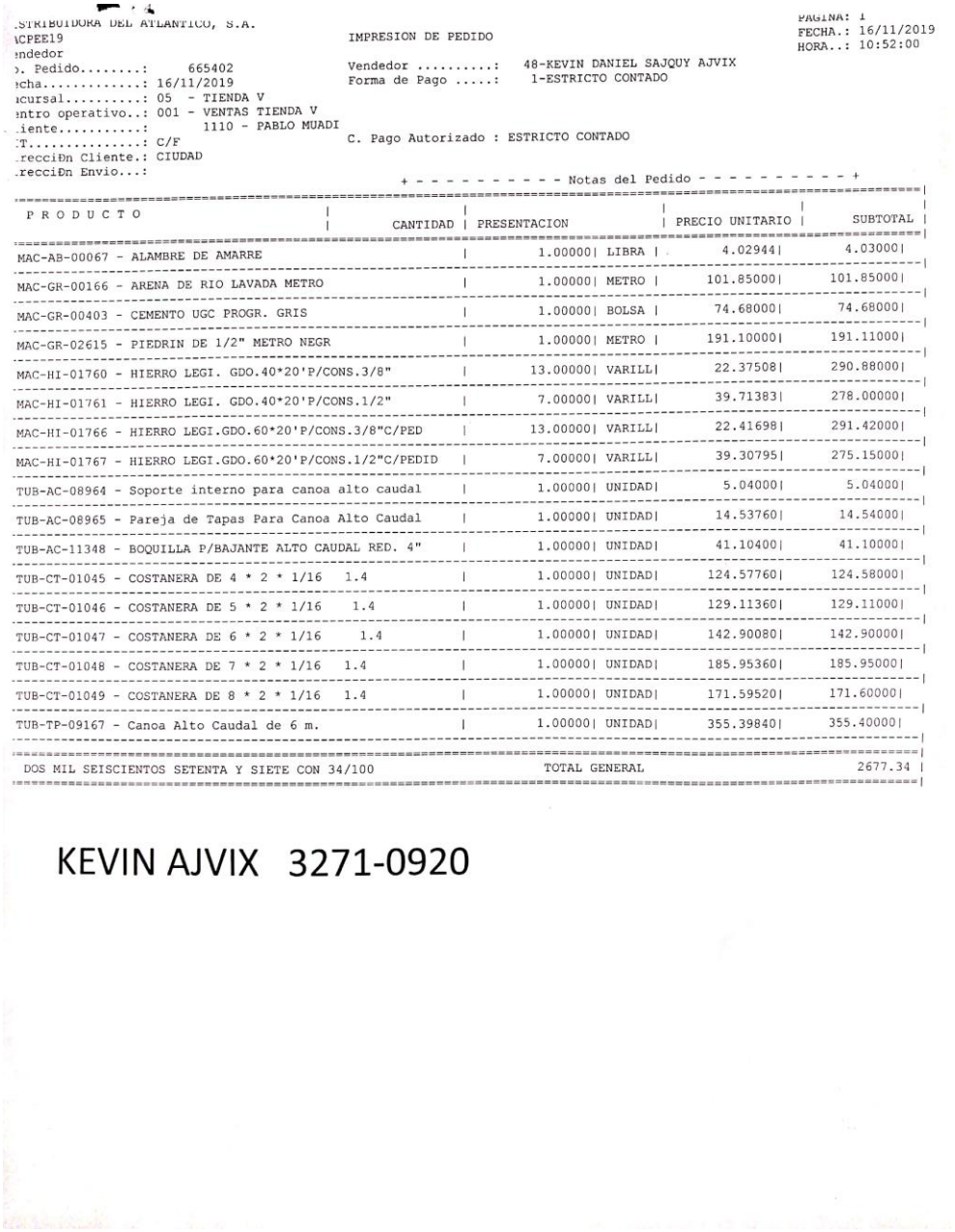
Figura 328.Cotización de laminado para techo de planta de pirólisis.

CINDU DE GUATEMALA, S. A.
TODO EN TECHOS...

COTIZACION No. SJ-3010568-69
GUATEMALA, 07 DE AGOSTO DEL 2019.

CANTIDAD M2 O GLOBAL	DESCRIPCIÓN				TOTAL
Techo a 2 aguas	CAMBIO LAMINA EXISTENTE POR CINDURIB IT + TRASLÚCIDA ACRYLIT.				
270.89	M2 instalados de LÁMINA CINDURIB IT blanco + Acrylit Cindu.				
	32.55	$/M2 Precio lista	28.66	$/M2 con descuento	TOTAL: $7,763.71

Figura 329.Cotización con costo de materiales para construcción de obra gris.



.STRIBUIDORA DEL ATLANTICO, S.A.
\CPEE19
:ndedor
). Pedido.....: 665402
:cha.....: 16/11/2019
:cursal.....: 05 - TIENDA V
:ntro operativo..: 001 - VENTAS TIENDA V
.iente.....: 1110 - PABLO MUADI
:T.....: C/F
.recciDn Cliente.: CIUDAD
.recciDn Envio...:

IMPRESION DE PEDIDO

Vendedor .....: 48-KEVIN DANIEL SAJQUY AJVIX
Forma de Pago .....: 1-ESTRICTO CONTADO

C. Pago Autorizado : ESTRICTO CONTADO

PAGINA: 1
FECHA.: 16/11/2019
HORA..: 10:52:00

+ - - - - - - - - - - Notas del Pedido - - - - - - - - - - +

PRODUCTO	CANTIDAD	PRESENTACION	PRECIO UNITARIO	SUBTOTAL
MAC-AB-00067 - ALAMBRE DE AMARRE	1.00000	LIBRA	4.02944	4.03000
MAC-GR-00166 - ARENA DE RIO LAVADA METRO	1.00000	METRO	101.85000	101.85000
MAC-GR-00403 - CEMENTO UGC PROGR. GRIS	1.00000	BOLSA	74.68000	74.68000
MAC-GR-02615 - PIEDRIN DE 1/2" METRO NEGR	1.00000	METRO	191.10000	191.11000
MAC-HI-01760 - HIERRO LEGI. GDO.40*20'P/CONS.3/8"	13.00000	VARILL	22.37508	290.88000
MAC-HI-01761 - HIERRO LEGI. GDO.40*20'P/CONS.1/2"	7.00000	VARILL	39.71383	278.00000
MAC-HI-01766 - HIERRO LEGI.GDO.60*20'P/CONS.3/8"C/PED	13.00000	VARILL	22.41698	291.42000
MAC-HI-01767 - HIERRO LEGI.GDO.60*20'P/CONS.1/2"C/PEDID	7.00000	VARILL	39.30795	275.15000
TUB-AC-08964 - Soporte interno para canoa alto caudal	1.00000	UNIDAD	5.04000	5.04000
TUB-AC-08965 - Pareja de Tapas Para Canoa Alto Caudal	1.00000	UNIDAD	14.53760	14.54000
TUB-AC-11348 - BOQUILLA P/BAJANTE ALTO CAUDAL RED. 4"	1.00000	UNIDAD	41.10400	41.10000
TUB-CT-01045 - COSTANERA DE 4 * 2 * 1/16 1.4	1.00000	UNIDAD	124.57760	124.58000
TUB-CT-01046 - COSTANERA DE 5 * 2 * 1/16 1.4	1.00000	UNIDAD	129.11360	129.11000
TUB-CT-01047 - COSTANERA DE 6 * 2 * 1/16 1.4	1.00000	UNIDAD	142.90080	142.90000
TUB-CT-01048 - COSTANERA DE 7 * 2 * 1/16 1.4	1.00000	UNIDAD	185.95360	185.95000
TUB-CT-01049 - COSTANERA DE 8 * 2 * 1/16 1.4	1.00000	UNIDAD	171.59520	171.60000
TUB-TP-09167 - Canoa Alto Caudal de 6 m.	1.00000	UNIDAD	355.39840	355.40000

DOS MIL SEISCIENTOS SETENTA Y SIETE CON 34/100 TOTAL GENERAL 2677.34

KEVIN AJVIX 3271-0920

3. Equipos utilizados para el pretratamiento del material de empaque

Figura 330.Cotización para extrusora con cortadora de pellets

INTERNATIONAL PROCESS PLANTS
Your Partner for Complete Plant Solutions

IPP Stock #: 705278 EXTRUDER 10



Description: 9 1/2" (242mm) diameter, Henry Simon aluminum single screw plodder/extruder. Serial #145. Production rate: 500 Kg/hr maximum (soap). Worm speed ? rpm. Head temperature 90 degrees C maximum. Cast iron barrel and removable nose cone, both with aluminum lining, aluminum worm screw. Barrel with cooling/heating jacket, nose cone with electric heater. Die produces (8) 30mm diameter laces, circular die head. Screw driven by approx 20 HP, 1470 rpm motor. Unit with feed hopper. Hopper with roll feeder, 1.1 KW, 3/50/220/380 volt, 1390-42 rpm geared motor. Unit with spare barrel section and (1) aluminum screw, (1) carbon steel screw. Control panel. Unit base mounted.

Ships From: Billingham, Middlesbrough *** **Price:** $8,000.00 GBP

(IPPE, 2019g)

Figura 331.Cotización para el triturador de material de empaque

Hi **Pablo**,

Here's the quote you ask for:

IPP Stock #: 47457 PLASTIC GRINDER AND GRANULATOR 8



Description: Size 24M-AGUER-2KD, Cumberland rotary knife plastic scrap grinder. CS construction. SN 47200-789 & 790. Rotor has 2 fly knives, 2 bed knives, 6" diameter screw feed with (1) 14" x 24" feed hopper. Equipped for both gravity and pneumatic discharge. Furnished with control panels and starters. Driven by 7.5 HP, 230/460 volt motor, with electric brake.

Ships From: Williamstown, NJ *** **Price:** $7,000.00 USD

Click here for more pictures (on ippe.com)

4. Equipos utilizados para desplazamiento y almacenamiento de productos de pirólisis

Figura 332.Cotización de válvulas de compuerta y tubería para el desplazamiento del producto líquido

"EL ARENAL PETAPA"

CASA DE MATERIALES SOCIEDAD ANONIMA
Av. Petapa 34-08 Zona 12, Guatemala
Tels.: 2310-4949 e mail: ventaspt@elarenal.com.gt

COTIZACION: 001PT3CO57514
FECHA: 11/11/2019
Telefono Cliente:
Telefono:
Correo:
Distancia:

CLIENTE : **Vijusa Centroamérica**
NIT : C/F
ENTREGA : CIUDAD Guatemala
www.elarenal.com.gt

CODIGO	CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO	TOTAL
TG1L	8.00	TUBO HG LIGERO 1 (ROSCA Y COPLA)	146.55	1,172.40
VCI1	4.00	VALVULA COMPUERTA 1 ITALIANA	149.99	599.96

** CAMBIOS DE PRECIOS SIN PREVIO AVISO**

VENDEDOR: 37 Tele Servicios **TOTAL :** **Q1,772.36**
TIENDA: Petapa
C/PAGO: C - Contado

COMENTARIOS: cliente recoge

Figura 333.Cotización de tanque de acero inoxidable horizontal de 1000 gal para el almacenamiento del producto líquido.

Hi **Pablo**,

Here's the quote you ask for:

IPP Stock #: 232097 TANK STAINLESS STEEL PRESSURE 1000



Description: 1000 gallon, 316 Stainless Steel horizontal pressure tank. Manufactured by Whiting Metals. Vessel rated for FV 100 psi at 400. degrees F. 4'0" diameter by 8'0" straight side, with 5/16" wall thickness, welded dish heads. Mounted on legs. Top 24" man way, Four 2" top nozzles, two 2" bottom nozzles.

Ships From: Elgin, NO STATE PROVIDED *** **Price:** $9,000.00 USD

Click here for more pictures (on ippe.com)

(IPPE, 2019b)

Figura 334.Cotización de tanque de acero inoxidable horizontal de 10000 gal para el almacenamiento del producto líquido.

IPP Stock #: 233282 TANK STAINLESS STEEL 10000



Description: 10,000 Gallon, 316 SS, vertical storage tank. Manufactured by A. J. Schmidt. . Rated for atmospheric at 200 degrees F. Built to API 650. 9' diameter x 22' straight side, with welded flat bottom and welded slight cone roof. Pad mounted.

Ships From: Conshohocken, PA *** **Price:** $20,000.00 USD

Click here for more pictures (on ippe.com)

(IPPE, 2019)

Figura 335.Cotización de bomba de Desplazamiento Positivo de Tornillo para producto líquido

adjunto cotización y caracteristicas.

bomba "netzsch/nemo®" modelo – nm053by01l07v

carcasa: hierro fundido
ejes: acero inoxidable 304
rotor: acero inoxidable aisi 304 – cromado especial um20
estator: goma sbe
articulaciones: tipo pasador y buje con sellado "sm®" sbe
sellado del eje: sello mecánico
sentido de rotación: izquierda
instalación: horizontal
conexión de succión: brida dn 4" – según n. ansi 16.5 – 150 psi – vertical
conexión de descarga: brida dn 3" – según n. ansi 16.5 – 150 psi – horizontal
pintura: color gris ral 7031/ estator verde b60g plano de pintura nº 3
performance: ensayo padrón ndb – 114

PRECIO : 7101 DOLAR AMERICANO

Precio estimativo: Sujeto a confirmación

Componentes Industriales S.A.

(Industriales, 2019)

Figura 336.Cotización de módulo de fibra hueca para producto gaseoso.

Tipo CUT-04 - T-CUT – Módulos tubulares para la microfiltración y la ultrafiltración

Descripción de tipo



Las membranas son colocadas sobre material de alta calidad y se distinguen por su larga vida útil y tiempos de reposo prolongados.

Especificaciones

- Largo: 5.0 metros.
- Ancho: 0.3 metros.
- Rango de flujo: 20.0 a 30.0 kg/h.

Precio

Figura 337.Membrana para extracción de propileno del producto gaseoso.

UBE INDUSTRIES,LTD.

UBE Propylene Separation



Details

- Number of fibers: 250
- Material: Polimide
- Contact Area: 1100 m^2

Price

USD 12,000.00

(Ind., 2019)

Figura 338.Cotización de tanque de almacenamiento de 1000 gal para propileno del producto gaseoso.

INTERNATIONAL PROCESS PLANTS
Your Partner for Complete Plant Solutions

IPP Stock #: 229023 TANK CARBON STEEL PRESSURE 1057



Description: 4000 liter carbon steel horizontal high pressure separator tank, manufactured by CIB Industrie, serial number 1987, wellded dishit heads, 1000mm diameter x 4480mm straight side, internal pressure 45 bar @ -15/100 degrees C, openings: top (1) 500mm manway with cover, (2) 152mm, sidewall (2) 84mm, (2) 54mm, bottom (2) 84mm, mounted on (2) carbon steel saddles.

Ships From: Bitterfeld-Wolfen, OT Bitterfeld *** **Price:** $12,000.00 EUR

Click here for more pictures (on ippe.com)

(IPPE, 2019c)

Figura 339.Cotización de tanque del almacenamiento de 5000 gal para gas de descarte proveniente del producto gaseoso.

INTERNATIONAL PROCESS PLANTS
Your Partner for Complete Plant Solutions

Hi **Pablo**,
Here's the quote you ask for:

IPP Stock #: 232179 TANK CARBON STEEL PRESSURE 5000



Description: 5000 gallon, carbon steel , with lead lining .Horizontal pressure tank. Manufactured by Lone Star Lead, Vessel rated for FV/50 psi at 300 degrees F.8' diameter by 9' straight side with welded dish heads. Mounted on saddles. Two 24" top man ways.

Ships From: Elgin, NO STATE PROVIDED *** **Price:** $50,000.00 USD

Click here for more pictures (on ippe.com)

(IPPE, 2019d)

Figura 340.Cotización de compresores para el transporte del producto gaseoso.

INTERNATIONAL PROCESS PLANTS
Your Partner for Complete Plant Solutions

Hi **Pablo**,
Here's the quote you ask for:

IPP Stock #: 109465 COMPRESSOR CENTRIFUGAL 250



Description: 250 cfm @ 107 psi, Atlas-Copco centrifugal compressor. Model # GA345, Serial # ARP868502. Direct driven 60 hp, 3 ph, 60 cyc, 460 volts, 3600 rpm, TEFC label. 280 cfm free air delivery. On - Off switch. Digital controls.

Ships From: Bloomsbury, NJ *** **Price:** $6,000.00 USD

Click here for more pictures (on ippe.com)

(IPPE, 2019e)

Figura 341.Cotización de intercambiadores de calor para propileno extraído y gas de descarte

INTERNATIONAL PROCESS PLANTS
Your Partner for Complete Plant Solutions

Hi **Pablo**,
Here's the quote you ask for:

IPP Stock #: 232130 HEAT EXCHANGER SHELL TUBE - CARBON STEEL 0



Description: 75 Sq. Ft., CS tubes, CS tubesheet, CS heads, Cs Shell, vertical heat exchanger manufactured by Ward Tank Co. Serial # W-1009A, NB # 3268. Shell rated for 150 psi at 300 degrees F, tubes rated for 100 psi at 300 degrees F. 12" diameter x 6' F/F, 9' overall length.

Ships From: Elgin, NO STATE PROVIDED *** **Price:** $1,500.00 USD

Click here for more pictures (on ippe.com)

(IPPE, 2019h)

Figura 342.Cotización de bomba de desplazamiento positivo para el producto gaseoso

LOCATION: LAPORTE TX

GENERAL DESC: USED - PUMPS-POSITIVE DISPLACEMENT,PREVIOUS SERVICE: ENZYME DOSING PUMP; 30' HEAD; ALLOY : E; TYPE : METER; GPM : 6; MATERIAL : ALUMINUM; V/H : H; MANUFACTURER : WATSON MARLOW; MODEL : 825; SIZE : 1X1; DRIVER TYPE : MOTOR; HP : 1.5; RPM : 1740; VOLTAGE : 230/460;

PHOTO LINKS:
http://www.lcec.com/objects/catalog/product/extras/109678_2.jpg

Technical Drawings/Spec Sheets:
http://www.lcec.com/objects/catalog/product/extras/109678_1.pdf

PRICE: $3,500.00

(LCEC, 2019a)

Figura 343.Cotización de Silo para almacenamiento del producto sólido.

PHOTO LINKS:
http://www.lcec.com/objects/catalog/product/extras/93026_1.jpg
http://www.lcec.com/objects/catalog/product/extras/93026_2.jpg
http://www.lcec.com/objects/catalog/product/extras/93026_3.jpg

Technical Drawings/Spec Sheets:
http://www.lcec.com/objects/catalog/product/extras/93026_1.pdf

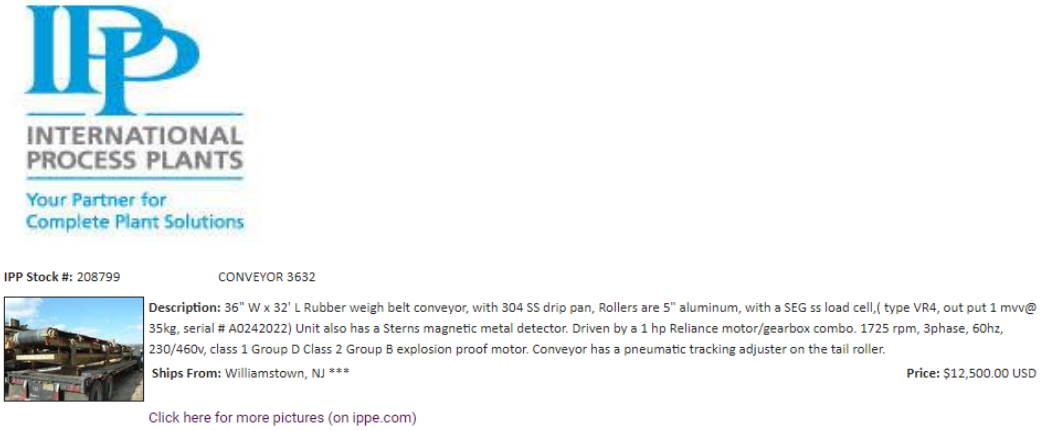
PRICE: $20,000.00

COMMENTS:

*** END OF QUOTE ***
LCEC is not responsible for any typographical errors.
All questions about pricing or technical info should be directed
to your sales representative:
Javier Ramirez
mexicosales@lcec.com

(LCEC, 2019b)

Figura 344.Cotización de banda transportadora para el transporte del producto sólido.



(IPPE, 2019f)

Figura 345.Elevador de cangilones para el transporte del producto sólido.



(FACMA, 2019)

Figura 346.Cotización de tubo de acero inoxidable para la creación del reactor a escala laboratorio.



Acero inoxidable

Soluciones en Acero, S.A.
Ofibodegas Fraijanes
Ofibodega 5
Kilometro 17 Calle a Monte Vista Club
Guatemala

Dirección de facturación y de envío:
Universidad del Valle de Guatemala, Paola Castellanos
11 Calle 15-79 zona 15,
Vista Hermosa III
CIF/NIF: 1751758-3

Universidad del Valle de Guatemala, Paola Castellanos
11 Calle 15-79 zona 15,
Vista Hermosa III

Presupuesto # SO4969

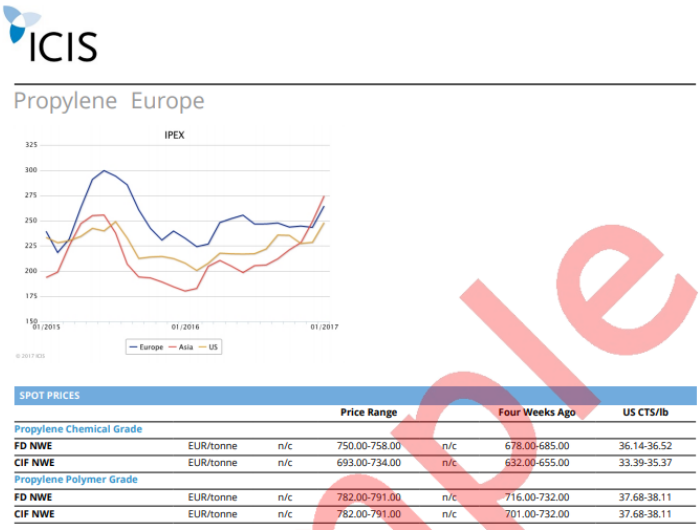
Fecha de presupuesto: 10/10/2017 15:59:08
Comercial: Robin Rodríguez
Fecha de caducidad: 09/11/2017

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Impuestos	Precio total
[Tubo_redondo_sanitario_AI-304-76.2x1.5mm] Tubo redondo sanitario en acero inoxidable SS304 de diferentes grosor de pared y diámetro (3 in, 1.5 mm) Tubo redondo sanitario en acero inoxidable serie 304. Pulido interior y exterior 180 Grit. *Actualmente agotado	1.000	821.00	IVA por Pagar	821.00 Q

Total base	733.04 Q
Impuestos	87.96 Q
Total	821.00 Q

(Castellanos, Paola *et. al*. 2017)

Figura 347.Precio de venta mundial de Propileno según ICIS.



ICIS

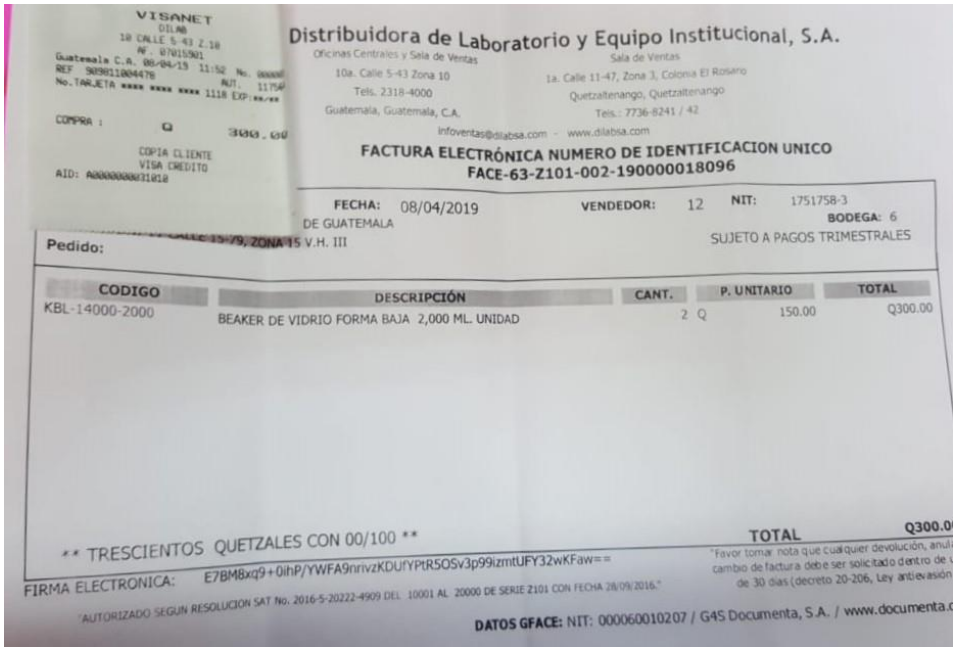
Propylene Europe

SPOT PRICES

			Price Range		Four Weeks Ago	US CTS/lb
Propylene Chemical Grade						
FD NWE	EUR/tonne	n/c	750.00-758.00	n/c	678.00-685.00	36.14-36.52
CIF NWE	EUR/tonne	n/c	693.00-734.00	n/c	632.00-655.00	33.39-35.37
Propylene Polymer Grade						
FD NWE	EUR/tonne	n/c	782.00-791.00	n/c	716.00-732.00	37.68-38.11
CIF NWE	EUR/tonne	n/c	782.00-791.00	n/c	701.00-732.00	37.68-38.11

(ICIS, 2019)

Figura 348.Factura de compra de Beakers para análisis de laboratorio.



VISANET
DILAB
10 CALLE 5-43 Z.10
AF. 07015501
Guatemala C.A. 08/04/19 11:52 No. 000000
REF. 309011004476 AUT. 11754
No.TARJETA **** **** **** 1118 EXP:**/**
COMPRA : Q 300.00
COPIA CLIENTE
VISA CREDITO
AID: A0000000031010

Distribuidora de Laboratorio y Equipo Institucional, S.A.
Oficinas Centrales y Sala de Ventas
10a. Calle 5-43 Zona 10
Tels. 2318-4000
Guatemala, Guatemala, C.A.
Sala de Ventas
1a. Calle 11-47, Zona 3, Colonia El Rosario
Quetzaltenango, Quetzaltenango
Tels.: 7736-8241 / 42
infoventas@dilabsa.com - www.dilabsa.com

FACTURA ELECTRÓNICA NUMERO DE IDENTIFICACION UNICO
FACE-63-Z101-002-190000018096

FECHA: 08/04/2019 VENDEDOR: 12 NIT: 1751758-3
DE GUATEMALA BODEGA: 6
Pedido: 15 V.H. III SUJETO A PAGOS TRIMESTRALES

CODIGO	DESCRIPCIÓN	CANT.	P. UNITARIO	TOTAL
KBL-14000-2000	BEAKER DE VIDRIO FORMA BAJA 2,000 ML. UNIDAD	2 Q	150.00	Q300.00

** TRESCIENTOS QUETZALES CON 00/100 **
TOTAL Q300.0
FIRMA ELECTRONICA: E7BM8xq9+0ihP/YWFA9nrivzKDUfYPtR5OSv3p99izmtUFY32wKFaw==
"Favor tomar nota que cualquier devolución, anul... cambio de factura debe ser solicitado dentro de ... de 30 días (decreto 20-206, Ley antievasión
"AUTORIZADO SEGUN RESOLUCION SAT No. 2016-5-20222-4909 DEL 10001 AL 20000 DE SERIE Z101 CON FECHA 28/09/2016."
DATOS GFACE: NIT: 000060010207 / G4S Documenta, S.A. / www.documenta.c

Cuadro 231.Especificaciones técnicas de ambas propuestas de planta de pirólisis

Equipo	Capacidad	Unidad	Potencia	Unidad
Planta Propuesta 1	2	t / lote	9.94	kW
Planta Propuesta 2	2	t / lote	15.0	kW

5. Componentes de la Inversión Inicial

Cuadro 232.Inversión Inicial Desglosada para la propuesta de “Henan Lingfine Machinery Co., Ltd”.

Maquinaria	**Costo**	**Costo (Q)**
Obra gris	$90,277.16	Q699,647.99
Pruebas de laboratorio realizadas	$4,239.00	Q32,852.27
Planta pirólisis 2 toneladas*	$22,900.00	Q177,475.00
Planta de purificación de aceite	$4,200.00	Q32,550.00
Flete hasta puerto quetzal	$4,200.00	Q32,550.00
eEtrusora con cortadora de pellets	$10,283.20	Q79,694.80
Triturador	$7,000.00	Q54,250.00
Bombas desplazamiento positivo	$14,020.00	Q108,655.00
Válvulas compuerta	$77.41	Q599.96
Tuberias	$151.28	Q1,172.40
Tanque de 1000 galones	$9,000.00	Q69,750.00
Tanque de 10000 galones	$20,000.00	Q155,000.00
Módulo de fibra hueca	$22,000.00	Q170,500.00

Maquinaria	Costo	Costo (Q)
Membrana separadora de propileno	$12,000.00	Q93,000.00
Compresor 1 (previo a membrana)	$6,000.00	Q46,500.00
Compresor 2 (propileno extraido)	$6,000.00	Q46,500.00
Compresor 3 (gas de rechazo)	$6,000.00	Q46,500.00
Tanque permeado para propileno	$13,210.56	Q102,381.84
Tanque gas de rechazo	$50,000.00	Q387,500.00
Tubería para transporte de gas	$87.74	Q680.00
Bomba de desplazamiento positivo gas	$3,500.00	Q27,125.00
Intercambiador de calor propileno	$1,500.00	Q11,625.00
Intercambiador de calor gas de rechazo	$1,500.00	Q11,625.00
Silo	$20,000.00	Q155,000.00
Banda transportadora	$12,500.00	Q96,875.00
Elevador de cangilones	$20,000.00	Q155,000.00
total	$285,369.20	Q2,211,611.27

Cuadro 233.Inversión Inicial Desglosada para la propuesta de “Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co., Ltd”.

Maquinaria	Costo	Costo (Q)
Obra gris	$90,277.16	Q699,647.99
Pruebas de laboratorio realizadas	$4,239.00	Q32,852.27
Planta pirólisis 2 toneladas*	$33,000.00	Q255,750.00
Planta de purificación de aceite	$10,000.00	Q77,500.00
Flete hasta puerto quetzal	$4,200.00	Q32,550.00
Extrusora con cortadora de pellets	$10,283.20	Q79,694.80
Triturador	$7,000.00	Q54,250.00
Bombas desplazamiento positivo	$14,020.00	Q108,655.00
Válvulas compuerta	$77.41	Q599.96
Tuberias	$151.28	Q1,172.40
Tanque de 1000 galones	$9,000.00	Q69,750.00
Tanque de 10000 galones	$20,000.00	Q155,000.00
Módulo de fibra hueca	$22,000.00	Q170,500.00
Membrana separadora de propileno	$12,000.00	Q93,000.00
Compresor 1 (previo a membrana)	$6,000.00	Q46,500.00
Compresor 2 (propileno extraido)	$6,000.00	Q46,500.00
Compresor 3 (gas de rechazo)	$6,000.00	Q46,500.00
Tanque permeado para propileno	$13,210.56	Q102,381.84
Tanque gas de rechazo	$50,000.00	Q387,500.00
Tubería para transporte de gas	$87.74	Q680.00
Bomba de desplazamiento positivo gas	$3,500.00	Q27,125.00
Intercambiador de calor propileno	$1,500.00	Q11,625.00

Maquinaria	Costo	Costo (Q)
Intercambiador de calor gas de rechazo	$1,500.00	Q11,625.00
Silo	$20,000.00	Q155,000.00
Banda transportadora	$12,500.00	Q96,875.00
Elevador de cangilones	$20,000.00	Q155,000.00
Total	$301,269.20	Q2,334,836.27

Cuadro 234. Almacenamiento, tratamiento y transporte del producto líquido

Equipo	Especificaciones	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Bombas de deplazamiento positivo	Marca: NETZSCH Modelo: NEMO NM021 Potencia: 1.1 Kw Flujo: 1,100 L/h	2	Q54,327.50	Q108,655.00
Tanque horizontal	Capacidad: 1000 Gal Presión de OP: Atmosférica Material del Tanque: SS304 Diametro: 1.22 m. Largo: 3.25 m. 2 soportes de acero sobre concreto	1	Q69,750.00	Q69,750.00
Tanque vertical	Capacidad: 10000 Gal Presión de OP: Atmosférica Material del Tanque: SS304 Diametro: 2.44 m. Largo: 8.10 m. 2 soportes de acero sobre concreto	1	Q155,000.00	Q155,000.00
Tubería para transporte	Material: Acero Galvanizado Diametro: 1 pulg. Largo: 46 m.	8	Q146.55	Q1,172.40
Válvulas	Tipo: Compuerta. Diametro: 1 pulg.	4	Q149.99	Q599.96

Cuadro 235.Almacenamiento, transporte y producción del producto sólido para ambas propuestas de planta piloto.

Equipo	Especificaciones	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Elevador de cangilones	Marca: 4b group altura: 7.0 m. Dimensión cangilón: 20x60 cm capacidad: 1.074 kg potencia: 5 kw material: acero al carbono	1	Q155,000.00	Q155,000.00
Banda transportadora	Material: pvc largo: 10 m espesor: 4 mm ancho: 0.4 m capacidad: 3.85 t/h flujo: 0.72 kg/s potencia: 5 kw	1	Q96,875.00	Q96,875.00
Silo	Marca: lcec altura: 5.0 m. Diametro: 2.5 m. Volumen total: 20.9 m3. Capacidad: 2040.5 kg. Material: acero carbón altura cilindro: 3.5 m. Altura tolva: 1.5 m.	1	Q155,000.00	Q155,000.00

Cuadro 236. Almacenamiento y purificación del producto gaseoso para ambas propuestas.

Equipo	Especificaciones	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Módulo de fibra hueca	Largo: 5.0 m ancho: 0.3 m flujo: 27.51 kg/h	1	Q170,500.00	Q170,500.00
Membrana separadora de gas	Marca: ube ind. Área: 1059.4 m2 número de fibras: 222 material: polimida	1	Q93,000.00	Q93,000.00
Compresor 1 (previo a membrana)	Tipo: centrifuga eficiencia: 65% potencia: 2.1 hp flujo: 74.37 kg/h trabajo: 1.52 kw	1	Q46,500.00	Q46,500.00
Compresor 2 (corriente de propileno)	Tipo: centrifuga eficiencia: 65% potencia: 1 hp flujo: 11.23 kg/h trabajo: 0.594 kw	1	Q46,500.00	Q46,500.00
Compresor 3 (corriente de rechazo)	Tipo: centrifuga eficiencia: 65% potencia: 1 hp flujo: 16.32 kg/h trabajo: 0.45 kw	1	Q46,500.00	Q46,500.00

Equipo	Especificaciones	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Tanque permeado para propileno (horizontal)	Material: acero al carbón capacidad: 1000 gal diametro: 1.95 m largo: 2.19 m número de soportes: 2	1	Q102,381.84	Q102,381.84
Tanque de gases de rechazo (horizontal)	Material: acero al carbón capacidad: 5000 gal diametro: 2.60 m largo: 6.216 m número de soportes: 2	1	Q387,500.00	Q387,500.00
Tubería para transporte	Material: ácero al carbón largo: 25 m diametro: 2 pulg	4	Q170.00	Q680.00
Bomba de desplazamiento positivo	Material: aluminio potencia: 1.5 hp marca: watson marlow voltaje: 230 v	1	Q27,125.00	Q27,125.00
Intercambiador de calor propileno	Material: acero carbón posición: vertical presión: 150 psi temperatura: hasta 300°f capacidad: 6 m^2	1	Q11,625.00	Q11,625.00
Intercambiador de calor gas de descarte	Material: acero carbón posición: vertical presión: 150 psi temperatura: hasta 300°f capacidad: 6 m^2	1	Q11,625.00	Q11,625.00

6. Costos de equipos y materiales utilizados para pruebas de laboratorio

Cuadro 237. Costo de equipos, utensilios y cristalería utilizada

No.	Artículo	Cantidad	Precio unitario	Precio total	Proveedor
1	Mufla	1	Q27.081,34	Q27.081,34	Biokim
2	Lámina de grafito extendido sin inserción de lámina	1	Q2.670,00	Q2.670,00	Proindesa
3	Reactor**	1	Q821,00	Q821,00	Soluciones en Acero S.A.
4	Bomba de pecera	1	Q150,00	Q150,00	Acuario Paraiso Tropical
5	Frasco de desechos	1	Q57,00	Q57,00	Dilab
6	Rollo de aislante de fibra de vidrio	1	Q84,80	Q84,80	DIDERISA
7	Globo para almacenamiento de gas	20	Q0,57	Q11,42	VH3
8	Beaker de vidrio 2000 mL***	2	Q150,00	Q300,00	Dilab
9	Balón 500 mL	1	Q49,50	Q49,50	Proinca
10	Condensador	1	Q590,00	Q590,00	Proinca
11	Conector de vidrio 24/40 de 3 cuellos	2	Q300,00	Q600,00	Interlab
12	Soporte universal	1	Q200,00	Q200,00	Proinca
13	Pinza universal de 3 dedos	3	Q75,00	Q225,00	Proinca
14	Manguera	1	Q12,21	Q12,21	Orion
TOTAL			**Q32.241,42**	**Q32.852,27**	

7. Propiedades fisicoquímicas del producto sólido de la pirólisis.

Cuadro 238. Comparación de char de pirólisis obtenido y otros mejoradores de suelos

Parámetro	Unidades	Char de Pirólisis	Enmienda Agrícola Ferticonsa	Estiercol Vacuno	Estiercol Ovino	Gallinaza	Bocashi
pH		8.55	6.0 - 7.5	7.80	8.51	7.90	8.13
Relación C/N		26.42	18 – 21	10.90	14.30	7.26	-
Cenizas	% m/m	36.00	30 – 40	-	-	-	-
Materia Orgánica	% m/m	64.00	40 – 60	33.10	45.60	58.00	44
Carbono orgánico	% m/m	35.56	-	19.20	25.20	-	-
Nitrógeno	% m/m	1.35	1.8 – 3.3	1.80	1.77	4.00	1.44
Fósforo	% m/m	0.17	1.8 – 3.0	2.00	2.20	2.60	2.49
Potasio	% m/m	0.01	1.2 – 3.0	1.10	16.50	2.30	2.46
Calcio	% m/m	0.40	2.0 – 3.0	2.30	10.90	9.50	10.85
Magnesio	% m/m	0.04	0.6 – 1.5	0.70	1.87	0.80	1.21
Azufre	% m/m	0.05	-	-	13200	-	-
Boro	Ppm	0.01	130 – 180	-	-	-	-
Cobre	Ppm	139.90	15 – 30	64.00	51	37.40	200
Hierro	Ppm	288.80	900 – 3000	6124.00	4139	506.10	11500
Manganeso	Ppm	0.77	280 – 350	422.00	226	297.50	500

Parámetro	Unidades	Char de Pirólisis	Enmienda Agrícola Ferticonsa	Estiercol Vacuno	Estiercol Ovino	Gallinaza	Bocashi
Zinc	Ppm	20.67	140 – 240	308.00	185	531.80	400
Humedad	%	5.78	14 – 20	-	-	16.90	30.30

8. Consumo de combustible y consumo eléctrico para cada propuesta de planta

Cuadro 239.Consumo anual de combustible para trabajo de planta de pirólisis

Nombre	Tamaño	Unidad	Precio según proveedor (Q/gal)	Gasto combustible al mes	Gasto anual
Planta 1	36.42	Gal/lote	Q 16.00	Q 11,656.83	Q 139,881.93
Planta 2	45.53	Gal/lote	Q 16.00	Q 14,571.03	Q 174,852.41

*Planta 1 se refiere a la propuesta de “Henan Lingfire Machinery Co., Ltd”, mientras Planta 2 se refiere a la propuesta de “Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co., Ltd”.

Cuadro 240. Consumo anual de electricidad para operación de planta de pirólisis.

Nombre	Tamaño	Unidad	Precio según AMM (Q/kWh)	Gasto energía al mes	Gasto anual
Planta 1	9.94	kW	Q 0.60450	Q 2,884.19	Q 34,610.28
Planta 2	15	kW	Q 0.60450	Q 4,352.40	Q 52,228.80

*Planta 1 se refiere a la propuesta de “Henan Lingfire Machinery Co., Ltd”, mientras Planta 2 se refiere a la propuesta de “Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co., Ltd”.

9. Costos de operación para ambas propuestas de planta piloto de pirólisis

Cuadro 241. Costos de operación para planta propuesta por "Henan Lingfire Machinery Co., Ltd".

Costos de operación	
Salario de operarios	Q199,788.72
Mantenimiento (4% de la inversión inicial)	Q113,660.37
Gastos anuales en combustible	Q139,881.93
Costo de producción de sacos para sólido	Q9,987.84
Costos anuales de consumo energético	Q34,610.28
Total	Q497,929.15

Cuadro 242. Costos de operación para planta propuesta por "Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co., Ltd".

Costos de operación	
Salario de operarios	Q199,788.72
Mantenimiento (4% de la inversión inicial)	Q118,589.37
Gastos anuales en combustible	Q174,852.41
Costo de producción de sacos para sólido	Q9,987.84
Costos anuales de consumo energético	Q52,228.80
Total	Q555,447.15

10. Costo determinado para imprevistos durante la vida de la planta piloto

Ecuación 44. Determinación de imprevistos para la planta propuesta por "Henan Lingfine MachineryCo., Ltd".

$$Imprevistos = (Mantenimiento\ (4\%) + Costos\ de\ Energía + Gastos\ en\ Combustible) * 0.15$$

$$Imprevistos = (Q113{,}660.37 + Q34{,}610.28 + Q139{,}881.93) * 0.15$$

$$Imprevistos = Q43{,}222.89$$

Ecuación 45. Determinación de imprevistos para la planta propuesta por "Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co. Ltd"

$$Imprevistos = (Mantenimiento\ (4\%) + Costos\ de\ Energía + Gastos\ en\ Combustible) * 0.15$$

$$Imprevistos = (Q118{,}589.37 + Q52{,}228.80 + Q174{,}852.41) * 0.15$$

$$Imprevistos = Q51{,}850.59$$

11. Costos de Obra Gris

Cuadro 243. Materiales necesarios para la realización de la obra gris de la planta de pirólisis para ambas propuestas

Producto	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Precio total
Alambre de Amarre	100	Libra	Q4.0294	Q402.944
Arena de rio	690.82	Metro	Q101.8500	Q70,360.017
Cemento UGC	690.82	Bola	Q74.6800	Q51,590.438
Piedrin 1/2"	690.82	Metro	Q191.1000	Q132,015.702
Hierro para base de concreto	8980.66	Varilla	Q22.4170	Q201,319.276
Soporte interno canoa alto caudal	15	Unidad	Q5.0400	Q75.600
Pareja tapas canoa alto caudal	15	Unidad	Q14.5376	Q218.064
Boquilla bajante alto caudal	15	Unidad	Q41.1040	Q616.560
Costanera 6*2*1/16	24	Unidad	Q142.9008	Q3,429.619
Canoa alto caudal	15	Unidad	Q355.3984	Q5,330.976
Lamina CINDURIB IT blanco	928.75	m2	Q252.2625	Q234,288.797
			Total	**Q699,647.992**

12. Depreciación del proyecto

Cuadro 244. Depreciación de la planta de pirólisis de la propuesta de “Henan Lingfine MachineryCo., Ltd”.

Rubro	Porcentaje	Inversión	Depreciación
Edificio	5.00%	Q699,647.99	Q34,982.40
Mejoras proviedad ajena	5.00%	-	-
Maquinaria y equipo	10.00%	Q2,076,459.00	Q207,645.90
Implementos	20.00%	-	-
Herramientas y equipo de taller	20.00%	-	-
Equipo de laboratorio	20.00%	-	-
Mobiliario y equipo	20.00%	-	-
Equipo de computación	33.00%	-	-
Vehiculos	20.00%	-	-
		Total	**Q242,628.30**

Cuadro 245. Depreciación de la planta de pirólisis de la propuesta de "Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co. Ltd"

Rubro	Porcentaje	Inversión	Depreciación
Edificio	5.00%	Q699,647.99	Q34,982.40
Mejoras proviedad ajena	5.00%	-	-
Maquinaria y equipo	10.00%	Q2,199,684.00	Q219,968.40
Implementos	20.00%	-	-
Herramientas y equipo de taller	20.00%	-	-
Equipo de laboratorio	20.00%	-	-
Mobiliario y equipo	20.00%	-	-
Equipo de computación	33.00%	-	-
Vehiculos	20.00%	-	-
		Total	Q254,645.90

13. Información utilizada para la determinación de salarios del personal

Cuadro 246.Salario mínimo mensual en Guatemala por sector

ACTIVIDADES ECONÓMICAS	HORA DIURNA ORDINARIA	HORA ORDINARIA JORNADA MIXTA	HORA ORDINARIA NOCTURNA	SALARIO DIARIO	SALARIO MENSUAL	BONIFICACIÓN INCENTIVO	SALARIO TOTAL
NO AGRÍCOLAS	Q.11.27	Q.12.88	Q.15.03	Q.90.16	Q.2,742.37	Q.250.00	Q.2,992.37
AGRÍCOLAS	Q.11.27	Q.12.88	Q.15.03	Q.90.16	Q.2,742.37	Q.250.00	Q.2,992.37
EXPORTADORA Y DE MAQUILA	Q.10.30	Q.11.78	Q.13.74	Q.82.46	Q.2,508.16	Q.250.00	Q.2,758.16

Acuerdo Gubernativo No. 242-2018

(Ministerio de Trabajo, 2019)

Cuadro 247.Salarios de Personal de Planta

Empleado	Cantidad	Salario mensual individual	Salario mensual + prestaciones	Salario anual
Técnico de mantenimiento	1	Q2,742.37	Q3,568.27	Q42,819.21
Operador	2	Q2,742.37	Q3,568.27	Q85,638.42
Asistentes administrativos	1	Q2,742.37	Q3,568.27	Q42,819.21
			Total	Q171,276.85

14. Información sobre ahorro de bunker para la producción principal de la empresa.

Cuadro 248.Ahorro de combustible "Bunker" en planta principal de producción utilizando producto líquido

Producto líquido	
Combustible	Bunker
Consumo mensual de planta principal	25000
Producción mensual planta pirólisis (10% del total)	1145.99
Ahorro de combustible	23,854.01
Precio de galón combustible + impuestos*	Q15.55
Costo anual (en miles Q.)	Q4,665.00
Costo con ahorros (en miles Q.)	Q4,445.15
Ahorro total (en miles Q.)	Q213.842

* El precio de galón de combustible más impuestos es de quince quetzales con cincuenta y cinco centavos. Los demás precios están en miles: Q4,665.00 *1000 = Q4,665,000.

15. Cálculos de comercialización y producción de char de pirólisis

Char de pirólisis

Producción: 0.27324 t / lote

Peso saco de mejorador de suelos: 45.36 kg

Precio de venta: Q40.00

Ecuación 46. Producción por lote de char de pirólisis en kilogramo

$$0.27324\frac{\text{t}}{\text{lote}} * 1000\frac{\text{kg}}{\text{t}} = 273.24\frac{\text{kg}}{\text{lote}}$$

Ecuación 47. Capacidad de producción en sacos de mejorador de suelos (45.36kg) por lote

$$\frac{273.24\frac{\text{kg}}{\text{lote}}}{45.36\frac{\text{kg}}{\text{saco}}} = 6.023\frac{\text{sacos}}{\text{lote}} \sim 6\frac{\text{sacos}}{\text{lote}}$$

Ecuación 48. Ventas de sacos al mes

$$6.00\ \frac{\text{sacos}}{\text{lote}} * 20.0\frac{\text{lotes}}{\text{mes}} * \text{Q}40.00\frac{\text{precio}}{\text{saco}} = \text{Q}4{,}800.00 \text{ mensuales}$$

Ecuación 49. Ventas anuales sacos de char de pirolisis como mejorador de suelos asumiendo que se vende todo lo producido.

$$\text{Q}4{,}800\frac{\text{ventas}}{\text{mes}} * 12 \text{ meses} = \text{Q } 58{,}163.07 \text{ anual}$$

Cálculos de comercialización de propileno proveniente del producto gaseoso.

Propileno

Producción: 0.33718 t / lote

Composición de Propileno en mezcla gaseosa: 64.85%.

% de conversión a través de membrana:

Pureza final de propileno para comercialización: 95%.

Ecuación 50. Producción por lote de propileno en base a su composición en la mezcla gaseosa.

$$0.33718\frac{\text{t}}{\text{lote}} * 0.6485 = \ 0.2186\ \frac{\text{t}}{\text{lote}}$$

Ecuación 51. Producción por lote de propileno en kilogramos.

$$0.2186\frac{\text{t}}{\text{lote}} * 1000\frac{\text{kg}}{\text{t}} = \ 218.6\frac{\text{kg}}{\text{lote}}$$

Conversión de la membrana de separación de propileno en base al módulo "Evaluación del producto gaseoso obtenido de la pirolisis de material de empaque de Polipropileno metalizado.".

$$218.6\frac{\text{kg}}{\text{lote}} * 2.25\% = \ 5.229\frac{\text{kg}}{\text{lote}}$$

Ecuación 52. Producción de propileno a 95% de pureza

$$5.229\frac{\text{kg}}{\text{lote}} * 0.95 = 4.968\ kg/lote$$

Ecuación 53. Producción mensual de propileno.

$$4.968\frac{\text{kg}}{\text{lote}} * 20\frac{lotes}{mes} = 99.36\frac{kg}{mes}$$

Ecuación 54. Ventas mensuales de propileno en cantidades de 1 kilogramo asumiendo que se vende todo lo producido.

$$99.36\frac{kg}{mes} * \frac{\$1.056}{1.0\ \text{kg}} * \frac{\text{Q}7.75}{\$1} = \text{Q}.\,813.16\ \text{mensual}$$

Ecuación 55. Ventas anuales de propileno

$$\text{Q}.\,813.16\frac{\text{kg}}{\text{mes}} * 12\ meses = Q9{,}757.94\ anuales$$

Cuadro 249. Flujo de efectivo para propuesta de planta de pirólisis de “Henan Lingfine Machinery Co., Ltd” a un precio de venta de propileno de $1.056

Concepto / Periodo	Análisis 1										
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Ingresos (+)											
Venta de Propileno	-	Q9,757.95	Q9,953.11	Q10,152.17	Q10,355.21	Q10,562.32	Q10,773.56	Q10,989.03	Q11,208.81	Q11,432.99	Q11,661.65
Venta de Sólido	-	Q58,163.07	Q59,907.96	Q62,903.36	Q66,048.52	Q69,350.95	Q72,818.50	Q76,459.42	Q80,282.39	Q84,296.51	Q88,511.34
Egresos (-)											
Salarios Operarios	-	Q199,788.72	Q199,788.72	Q199,788.72	Q199,788.72	Q203,784.50	Q203,784.50	Q203,784.50	Q203,784.50	Q207,860.19	Q207,860.19
Mantenimiento (4%)	-	Q113,660.37	Q113,660.37	Q113,660.37	Q113,660.37	Q113,660.37	Q113,660.37	Q113,660.37	Q113,660.37	Q113,660.37	Q113,660.37
Gastos Combustible	-	Q139,881.93	Q139,881.93	Q139,881.93	Q139,881.93	Q139,881.93	Q139,881.93	Q139,881.93	Q139,881.93	Q139,881.93	Q139,881.93
Costos Producción Sacos	-	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84
Imprevistos (15%)	-	Q43,222.89	Q43,222.89	Q43,222.89	Q43,222.89	Q43,222.89	Q43,222.89	Q43,222.89	Q43,222.89	Q43,222.89	Q43,222.89
Energia	-	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28
Ahorro en Bunker (-)	-	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54
Depreciación	-	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80
Utilidad		-Q514,339.28	-Q512,399.23	-Q509,204.77	-Q505,856.56	-Q506,342.80	-Q502,664.01	-Q498,807.61	-Q494,764.86	-Q494,602.26	-Q490,158.77
Impuestos (25%)		Q0.00	Q0.00	Q0.00	Q0.00	Q0.00	Q0.00	Q0.00	Q0.00	Q0.00	Q0.00
Depreciación		Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80
Inversión Inicial	Q2,841,509.26										
Flujo Neto Efectivo	-Q2,841,509.26	-Q769,290.08	-Q767,350.03	-Q764,155.57	-Q760,807.36	-Q761,293.60	-Q757,614.81	-Q753,758.41	-Q749,715.66	-Q749,553.06	-Q745,109.57

Cuadro 250. Flujo de efectivo para propuesta de planta de pirólisis de “Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co.. Ltd” a un precio de venta de propileno de $1.056

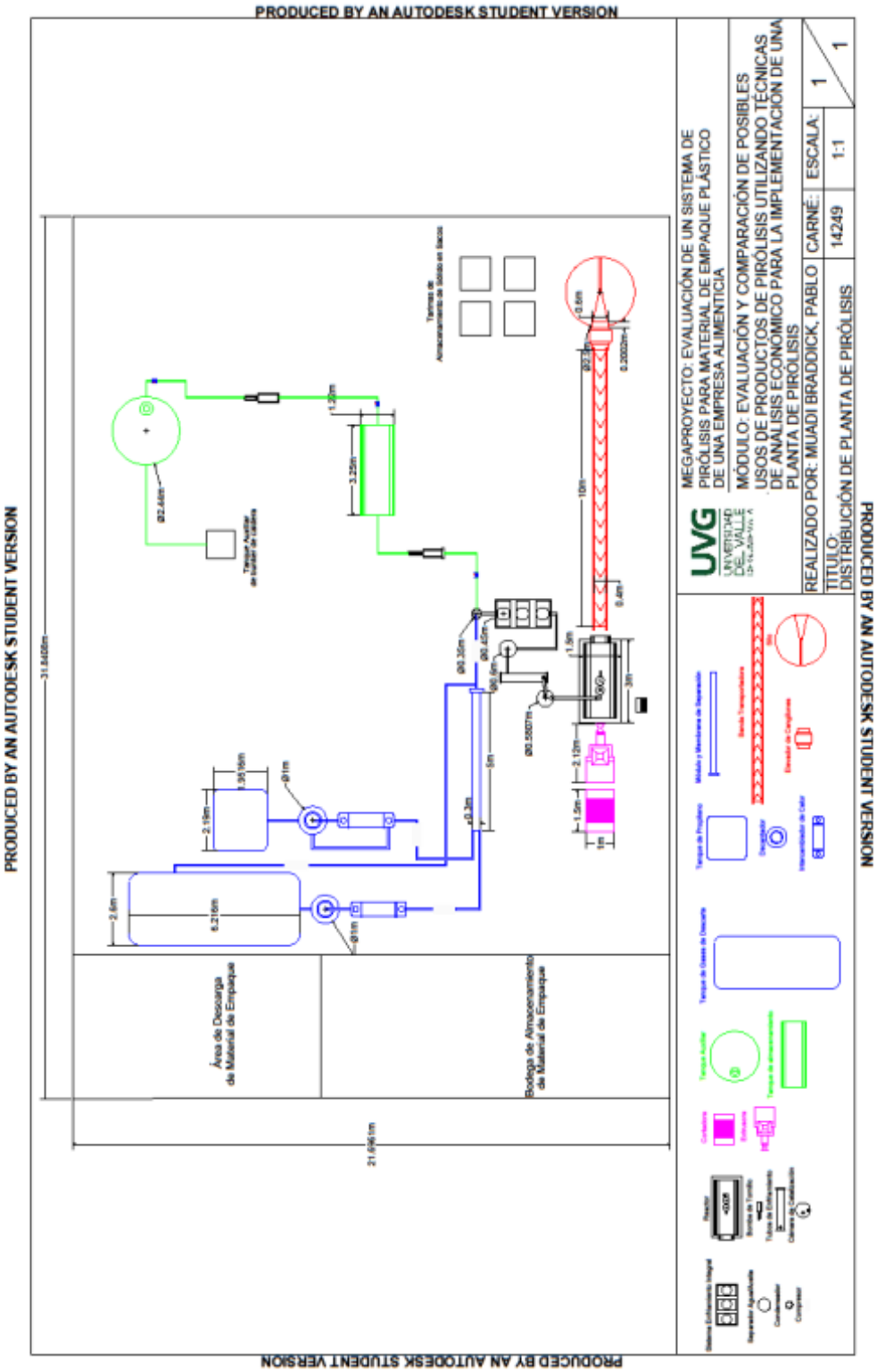
Concepto / Periodo	Análisis 1										
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Ingresos (+)											
Venta de Propileno	-	Q9,757.95	Q9,953.11	Q10,152.17	Q10,355.21	Q10,562.32	Q10,773.56	Q10,989.03	Q11,208.81	Q11,432.99	Q11,661.65
Venta de Sólido	-	Q58,163.07	Q59,907.96	Q62,903.36	Q66,048.52	Q69,350.95	Q72,818.50	Q76,459.42	Q80,282.39	Q84,296.51	Q88,511.34
Egresos (-)											
Salarios Operarios	-	Q199,788.72	Q199,788.72	Q199,788.72	Q199,788.72	Q203,784.50	Q203,784.50	Q203,784.50	Q203,784.50	Q207,860.19	Q207,860.19
Mantenimiento (4%)	-	Q118,589.37	Q118,589.37	Q118,589.37	Q118,589.37	Q118,589.37	Q118,589.37	Q118,589.37	Q118,589.37	Q118,589.37	Q118,589.37
Gastos Combustible	-	Q174,852.41	Q174,852.41	Q174,852.41	Q174,852.41	Q174,852.41	Q174,852.41	Q174,852.41	Q174,852.41	Q174,852.41	Q174,852.41
Costos Producción Sacos	-	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84	Q9,987.84
Imprevistos (15%)	-	Q51,850.59	Q49,207.81	Q49,207.81	Q49,207.81	Q49,207.81	Q49,207.81	Q49,207.81	Q49,207.81	Q49,207.81	Q49,207.81
Energia	-	Q52,228.80	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28	Q34,610.28
Ahorro en Bunker (-)	-	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54	-Q213,842.54
Depreciación	-	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80
Utilidad		-Q580,484.98	-Q558,283.64	-Q555,089.18	-Q551,740.97	-Q552,227.21	-Q548,548.42	-Q544,692.02	-Q540,649.27	-Q540,486.66	-Q536,043.18
Impuestos (25%)		Q0.00	Q0.00	Q0.00	Q0.00	Q0.00	Q0.00	Q0.00	Q0.00	Q0.00	Q0.00
Depreciación		Q242,628.30	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80	Q254,950.80
Inversión Inicial	Q2,964,734.26										
Flujo Neto Efectivo	-Q2,964,734.26	-Q823,113.28	-Q813,234.44	-Q810,039.98	-Q806,691.77	-Q807,178.01	-Q803,499.22	-Q799,642.82	-Q795,600.07	-Q795,437.46	-Q790,993.98

Cuadro 251. Cálculo del Valor Actual Neto para la tercerización de 46 toneladas de empaque

Concepto / Periodo	Análisis 1										
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Ingresos (+)											
Egresos (-)											
Ahorro de Tratamiento Desechos (-)	Q162,932.67	Q1,722,000.00	Q1,756,440.00	Q1,791,568.80	Q1,827,400.18	Q1,863,948.18	Q1,901,227.14	Q1,939,251.69	Q1,978,036.72	Q2,017,597.45	Q2,057,949.40
Flujo Neto Efectivo	-Q162,932.67	-Q1,722,000.00	-Q1,756,440.00	-Q1,791,568.80	-Q1,827,400.18	-Q1,863,948.18	-Q1,901,227.14	-Q1,939,251.69	-Q1,978,036.72	-Q2,017,597.45	-Q2,057,949.40

Concepto / Periodo	Análisis 1										
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Ingresos (+)											
Egresos (-)											
Ahorro de Tratamiento Desechos (-)	Q162,932.67	Q166,191.32	Q169,515.14	Q172,905.45	Q176,363.56	Q179,890.83	Q183,488.64	Q187,158.42	Q190,901.59	Q194,719.62	Q198,614.01
Flujo Neto Efectivo	-Q162,932.67	-Q166,191.32	-Q169,515.14	-Q172,905.45	-Q176,363.56	-Q179,890.83	-Q183,488.64	-Q187,158.42	-Q190,901.59	-Q194,719.62	-Q198,614.01

Figura 349. Plano de la distribución de equipos en la planta de pirólisis proporcionada por la Propuesta 2.



*Los equipos están representados por colores, siendo de color negro los equipos proporcionados por el proveedor, de rosa los equipos para el pretratamiento del material de empaque, de azul los equipos necesarios para el transporte y almacenamiento del producto gaseoso, de color verde los equipos necesarios para el transporte y almacenamiento del producto líquido, y por último, de rojo los equipos para el transporte y almacenamiento del producto sólido. Cabe mencionar que los equipos de almacenamiento del producto líquido distribuidos a un mínimo de 4 metros de distancia del reactor, esto debido a indicaciones de seguridad propuestas por el (Minas, 2019b) para el tratamiento de productos de carácter combustible.

**El área total que ocupará la planta es de 690.81 m2. De este espacio, 112.75 m2 son ocupados por espacios especializados para la recepción y almacenamiento del material empaque. El área de trabajo está expuesto a la intemperie de los lados de la planta, sin embargo, el techo está formado de láminas que protegerán a los empleados de diferentes condiciones climáticas.

XIII. GLOSARIO

- Asfáltenos: Es una fracción de hidrocarburos de alto peso molecular precipitado del producto utilizando nafta.
- API (American Petroleum Institute): Es una medida de densidad que describe cuán pesado o liviano es el petróleo comparándolo con el agua
- ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials).
- Biochar: Nombre que recibe el carbón vegetal cuando es empleado como enmienda para el suelo.
- Bocashi: Productos orgánicos que aportan humus ejerciendo una influencia positiva sobre el suelo, favoreciendo retención de agua, mejoramiento de estructura, capacidad tampón, CIC, capacidad de quelación e incremento de disponibilidad de nutrientes.
- Bomba calorimétrica: Instrumento con aislamiento interno que permite determinar el poder calorífico de un compuesto sólido o líquido si se combustiona en un ambiente controlado de oxígeno
- BOPP: Abreviación para polipropileno biorientado.
- Cenizas: Residuo remanente después de que una muestra de combustible ha sido calentada en un crisol a una temperatura de 775°C (1427°F).
- Char: Las cadenas de hidrocarburos más largas y las que no se fragmentaron forman estos productos llamados char. Estos no han sido muy estudiados debido al valor que comercial que tienen el plastic oil y syngas, además de ser productos de menor rendimiento (Alonso, 2008).
- Energía de activación: Cantidad de energía mínima que se necesita para poder iniciar una reacción.
- Enmienda agrícola: Aporte de un producto fertilizante o de materiales destinados a mejorar la calidad de los suelos.
- Factor de frecuencia: Índice relacionado con la frecuencia de las colisiones entre las moléculas de reactivos.
- Gas pirolítico: Mezcla de gases producidos por la descomposición termoquímica de la materia, incluyendo en su composición una fase de gases condensables y una fase de gases no condensables (Maldonado, 2017).
- Hidrocarburos olefínicos: Hidrocarburos insaturados que presentan uno o más enlaces dobles entre dos átomos de carbono en la molécula: C=C y tienen configuración en cadenas normales o ramificadas.
- Humus: Es la sustancia compuesta por ciertos productos orgánicos de naturaleza coloidal, que proviene de la descomposición de los restos orgánicos por organismos y microorganismos descomponedores como hongos y bacterias.
- Material residual: Material contaminado con restos de grasas, harinas o frituras de la empresa alimenticia.

- Material de rechazo en bobina: Material que no se utilizó y fue rechazado y desechado debido a incumplimientos de los parámetros de la empresa.
- Mejorador de suelos: Enmiendas que mejoran la estructura del suelo al aumentar la aireación, la capacidad de retención de agua y los nutrientes.
- NFPA (National Fire Protection Association): Es una organización creada en Estados Unidos, encargada de crear y mantener las normas y requisitos mínimos para la prevención contra incendio, capacitación, instalación y uso de medios de protección contra incendio, utilizados tanto por bomberos, como por personal el encargado de la seguridad.
- Orden de reacción: Orden en que las partículas de los diferentes reactivos comisionan para producir un producto.
- Pirograma o cromatograma: Registro gráfico bidimensional obtenido en un medio absorbente, que muestra la separación de sustancias mediante una cromatografía.
- Pirólisis: Reacción de fraccionamiento de moléculas de largas cadenas, principalmente de hidrocarburos y polímeros, en una atmósfera inerte para la obtención de char, syngas y plastic oil (Arandes, Bilbao, & López Valerio, 2004)
- Plastic oil: Los productos líquidos, también llamados plastic oil por su fuente, están formados por cadenas de hidrocarburos de 5-6 carbonos o más, siendo esta una mezcla de distintos componentes. Están formados principalmente por hidrocarburos alifáticos con olefinas y diolefinas (Alonso, 2008).
- Polímero atáctico: Polímero con los grupos laterales en sitios aleatorios del esqueleto.
- Polímero isotáctico: Polímero con todos los grupos laterales en el mismo lado del esqueleto.
- Polímero sindiotáctico: Polímero con los grupos laterales en lados alternados del esqueleto.
- Polimerización: Proceso de enlazamiento de moléculas de monómero en un polímero.
- Poliolefinas: Son los polímeros obtenidos a partir de alquenos, también llamados olefinas (Kuester, 1980).
- Residuo de Carbón: Medida de las tendencias de depositar carbón de un combustible, cuando es calentado en un bulbo a condiciones determinadas. Es una aproximación de la tendencia del combustible a depositar carbón en los motores.
- Sinterización: El término sinterización designa los cambios geométricos que se producen cuando un conjunto de partículas es llevado a una temperatura elevada y dejado a ésta durante un tiempo suficientemente largo con el propósito de aumentar su resistencia.
- SS 304: Acero inoxidable de aleación de cromo (entre 15% y 20%) y níquel (entre 2% y 10.5%). Resistente a corrosión.
- Suprayacente: Que yace por encima de algo.
- Syngas: Productos gaseosos de la pirólisis formados por las fracciones más pequeñas, monómeros. Tienen poder calorífico bajo o medio. En su composición se encuentran principalmente hidrocarburos,

pero también se pueden encontrar dióxido de carbono, si la atmósfera no era totalmente inerte, y gases inertes (Alonso, 2008).

- Tacticidad: Arreglo estereoquímica en centros quirales de la macromolécula.
- Temperatura de transición vítrea: Corresponde a la temperatura en la cual al calentarse un polímero amorfo sucede la transformación de un sólido rígido en un sólido con características de goma. Disminuye su densidad, dureza y rigidez.
- Volatilidad: Facilidad con la cual una substancia líquida pasa del estado líquido al gaseoso; tendencia de los líquidos a evaporarse.