

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de la pirólisis de mascarillas quirúrgicas para la
obtención de combustibles líquidos y sólidos a escala laboratorio

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Jose Esteban Illescas Rojas
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de la pirólisis de mascarillas quirúrgicas para la
obtención de combustibles líquidos y sólidos a escala laboratorio

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Jose Esteban Illescas Rojas
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala

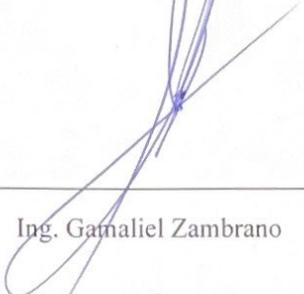
2024

Vo. Bo.

(f) 
Ing. Luis Núñez

Terna examinadora

(f) 
Ing. Luis Núñez

(f) 
Ing. Gamaliel Zambrano

(f) 
Ing. Carmen Ortiz

Fecha de aprobación: Guatemala, 3 de enero de 2,024

PREFACIO

El presente trabajo tuvo la finalidad de explorar una alternativa para tratar las mascarillas quirúrgicas desechables al someterlas a un proceso de pirólisis a diferentes temperaturas y determinar si los productos que se obtienen tienen un valor energético similar a los combustibles para que puedan ser una fuente potencial de energía.

A largo de la investigación tuve el apoyo de muchas personas, las cuales mencionaré a continuación.

Quiero agradecer a mi familia por ser un apoyo incondicional no solamente para este trabajo, sino que desde el inicio de la carrera ha sido un ejemplo de inspiración para mí.

Agradezco al Departamento de Ingeniería Química de la Universidad, especialmente al director de carrera Ing. Gamaliel Zambrano por brindar su apoyo, equipo e instalaciones para llevar a cabo la fase de experimentación. También agradezco a las personas que trabajan dentro del laboratorio de operaciones unitarias por brindar su apoyo en los instrumentos y equipos que utilicé.

Quiero agradecer al Laboratorio de Cementos Progresos (CETEC) por su apoyo y servicio para los análisis de mi experimentación.

Agradezco mis compañeros Stefan y Paula por su apoyo, motivación y ejemplo desde el inicio de este trabajo que fue el año pasado.

Por último, un agradecimiento al Ing. Luis Nuñez por brindar su apoyo y asesoría en todas las etapas del trabajo, por siempre tener un espacio durante el día para charlar y discutir sobre los análisis de resultados del proyecto.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	OBJETIVOS.....	2
	A. General.....	2
	B. Específicos.....	2
III.	JUSTIFICACIÓN.....	3
IV.	MARCO TEÓRICO.....	5
	A. CONTAMINACIÓN DURANTE LA PANDEMIA.....	5
	B. USO DE MASCARILLAS DESPUÉS DE LA PANDEMIA.....	5
	C. MASCARILLAS QUIRÚRGICAS.....	5
	D. POLÍMEROS.....	6
	1. Polímeros de adición.....	6
	2. Polímeros de condensación.....	7
	E. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES Y SUSTANCIAS.....	7
	1. Densidad.....	7
	2. Densidad aparente.....	7
	3. Densidad compactada.....	7
	F. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA).....	8
	G. PIRÓLISIS.....	8
	1. Tipos de pirólisis.....	9
	2. Parámetros de proceso.....	9
	H. SISTEMAS DE PIRÓLISIS.....	10
	1. Reactor batch.....	10
	2. Reactor de semicontinuo.....	10
	3. Reactor de lecho fijo.....	11
	4. Reactor de lecho fluidizado.....	12
	5. Reactor de tornillo.....	13

I.	PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS	14
1.	Líquido.....	14
2.	Sólido o Char	14
3.	Gas	14
J.	COMBUSTIBLES SÓLIDOS	15
1.	Carbón.....	15
K.	COMBUSTIBLES LÍQUIDOS	15
1.	Gasolina	15
2.	Queroseno	15
3.	Lubricantes.....	16
4.	Fuel oil	16
5.	Diésel	16
L.	CROMATOGRAFÍA DE GASES.....	16
1.	Gas portador.....	17
2.	Sistema de inyección	17
3.	Columna.....	17
4.	Sistema de detección.....	18
M.	ESPECTROSCOPIA INFRARROJA	18
N.	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	20
O.	PRUEBA F PARA VARIANZA DE DOS MUESTRAS	21
P.	PRUEBA T PARA DOS MUESTRAS ASUMIENDO DIFERENTES VARIANZAS	21
V.	ANTECEDENTES	22
A.	INVESTIGACIÓN DE PIRÓLISIS DE MASCARILLAS QUIRÚRGICAS	22
B.	INVESTIGACIÓN PIRÓLISIS EN EL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA.....	22
VI.	METODOLOGÍA.....	23
A.	CARACTERIZACIÓN DE MASCARILLAS QUIRÚRGICAS.....	23
1.	Análisis termogravimétrico.....	23
2.	Análisis de espectroscopía infrarroja.....	23
3.	Determinación del poder calorífico de la mascarilla	23

B.	PIRÓLISIS A ESCALA LABORATORIO.....	24
1.	Equipos y materiales	24
2.	Montaje del sistema de pirólisis.....	24
3.	Ejecución del sistema de pirólisis	25
4.	Recuperación de los productos de la pirólisis.....	25
5.	Limpieza del reactor	26
C.	CUANTIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS	26
1.	Medición de la masa obtenida	26
2.	Cromatografía de gases.....	26
3.	Densidad	26
4.	Poder calorífico.....	27
VII.	RESULTADOS	28
VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	31
IX.	CONCLUSIONES	35
X.	RECOMENDACIONES.....	36
XI.	BIBLIOGRAFÍA	37
	ANEXOS	43
A.	CARACTERIZACIÓN MASCARILLAS QUIRÚRGICAS	43
B.	CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTOS LÍQUIDOS Y SÓLIDOS.....	48
C.	BALANCES DE MASA Y ENERGÍA PARA EL PROCESO DE PIRÓLISIS	51
D.	CÁLCULOS DE MUESTRA.....	53
E.	DATOS CALCULADOS	55
F.	DATOS ORIGINALES	59
G.	ANÁLISIS DE ERROR.....	76
	GLOSARIO	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Volumen importado de mascarillas desechables en Guatemala.....	3
Figura 1. Cromatograma de la absorción de un compuesto en relación con la longitud de onda.	18
Figura 2. Espectro del PET	19
Figura 3. Espectro del Polipropileno	19
Figura 4. Espectro Polietileno de alta densidad.....	19
Figura 5. Espectro de Poliestireno	20
Figura 6. Espectro de Policarbonato.....	20
Figura 7. Espectro FTIR capa 1	46
Figura 8. Espectro FTIR capa 2	46
Figura 9. Espectro FTIR capa 3	47
Figura 10. Espectro FTIR bandas elásticas.....	47
Figura 11. Balance de masa y energía para el sistema de pirólisis a 380°C.....	51
Figura 12. Balance de masa y energía para el sistema de pirólisis a 410°C.....	52
Figura 13. comportamiento de la tela de mascarillas quirúrgicas con la temperatura en el análisis termogravimétrico.....	59
Figura 14. Comportamiento del elástico de mascarillas quirúrgicas con la temperatura en el análisis termogravimétrico.....	60
Figura 15. Recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación durante la primera corrida de pirólisis a una temperatura de 380°C.....	62
Figura 16. Recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación durante la primera corrida de pirólisis a una temperatura de 380°C.....	64
Figura 17. Recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación durante la primera corrida de pirólisis a una temperatura de 380°C.....	66
Figura 18. Recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación durante la primera corrida de pirólisis a una temperatura de 410°C.....	68
Figura 19. Recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación durante la segunda corrida de pirólisis a una temperatura de 410°C.....	70
Figura 20. Recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación durante la tercera corrida de pirólisis a una temperatura de 410°C.....	72
Figura 21. Cromatograma de la muestra del producto líquido obtenido de la pirólisis a 380°C.....	78
Figura 22. Cromatograma de la muestra del producto líquido obtenido de la pirólisis a 410°C.....	84
Figura 23. Cromatograma de la muestra del gas obtenido de la pirólisis a 410°C.....	91

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de pirólisis.....	9
Tabla 2: Caracterización de las mascarillas quirúrgicas.....	28
Tabla 3: Análisis fisicoquímicos de los productos líquidos de la pirólisis a diferentes temperaturas.....	29
Tabla 4: Análisis fisicoquímicos de los productos sólidos de la pirólisis a diferentes temperaturas	29
Tabla 5. Comparación de propiedades fisicoquímicas de los productos líquidos	29
Tabla 6. Clasificación del producto sólido según su poder calorífico	30
Tabla 7. Promedio de los rendimientos máxicos de los productos líquidos y sólidos de la pirólisis a 380°C	30
Tabla 8. Promedio de los rendimientos máxicos de los productos líquidos y sólidos de la pirólisis a 410°C	30
Tabla 9. Clasificación de carbón por rangos.....	48
Tabla 10. Lista de componentes del cromatograma GC/MS de residuos plásticos de polipropileno.....	49
Tabla 11. Lista de componentes de degradación característicos de distintos tipos de polímeros	50
Tabla 12. Componentes seleccionados de la cromatografía de gases para el producto líquido del proceso de pirólisis a 380°C	55
Tabla 13. Componentes seleccionados de la cromatografía de gases para el producto líquido del proceso de pirólisis a 410°C	55
Tabla 14. Masa y volumen utilizados para medir la densidad del producto líquido a 380°C	56
Tabla 15. Masa y volumen utilizados para medir la densidad del producto sólido a 380°C.....	56
Tabla 16. Rendimiento de los productos y material no pirolizado de la pirólisis a 380°C	56
Tabla 17. Rendimiento de los productos y material no pirolizado de la pirólisis a 410°C	56
Tabla 18. Masa de productos y material no pirolizado de la pirólisis a 410°C	57
Tabla 19. Prueba F para varianza de dos muestras para el producto líquido.....	57
Tabla 20. Prueba F para varianza de dos muestras para el producto sólido	57
Tabla 21. Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales para el producto líquido	58
Tabla 22. Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales para el producto líquido.....	58
Tabla 23. Masa de una mascarilla quirúrgica y cada uno de sus componentes.	59
Tabla 24. Datos originales para la tasa de calentamiento a una temperatura de 380°C	61
Tabla 25. Datos originales para la recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación de la primera corrida a 380°C.....	62
Tabla 26. Datos originales para la tasa de calentamiento de la segunda corrida a una temperatura de 380°C	63
Tabla 27. Datos originales para la recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación de la segunda corrida a 380°C.....	64

Tabla 28. Datos originales para la tasa de calentamiento de la tercera corrida a una temperatura de 380°C	65
Tabla 29. Datos originales para la recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación de la tercera corrida a 380°C	66
Tabla 30. Datos originales para la tasa de calentamiento de la primera corrida a una temperatura de 410°C	67
Tabla 31. Datos originales para la recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación de la primera corrida a 410°C.....	68
Tabla 32. Datos originales para la tasa de calentamiento de la segunda corrida a una temperatura de 410°C	69
Tabla 33. Datos originales para la recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación de la segunda corrida a 410°C	70
Tabla 34. Datos originales para la tasa de calentamiento de la tercera corrida a una temperatura de 410°C	71
Tabla 35. Datos originales para la recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación de la tercera corrida a 410°C	72
Tabla 36. Masa de productos y material no pirolizado de la pirólisis a 380°C	73
Tabla 37. Masa de productos y material no pirolizado de la pirólisis a 410°C	73
Tabla 38. Datos de masa y volumen para la determinación de la densidad del producto líquido a diferentes a temperaturas.....	73
Tabla 39. Datos de masa y volumen para la determinación de la densidad del producto sólido a diferentes a temperaturas.....	74
Tabla 40. Poder calorífico del producto líquido de la pirólisis a 380°C.....	74
Tabla 41. Poder calorífico del producto sólido de la pirólisis a 380°C	74
Tabla 42. Poder calorífico del producto líquido de la pirólisis a 410°C.....	74
Tabla 43. Poder calorífico del producto sólido de la pirólisis a 410°C	75
Tabla 44. Poder calorífico de las mascarillas quirúrgicas	75
Tabla 45. Reporte del cromatograma de gases para la muestra del producto líquido obtenido de la pirólisis a 380°C	79
Tabla 46. Reporte del cromatograma de gases para la muestra del producto líquido obtenido de la pirólisis a 410°C	85
Tabla 47. Reporte del cromatograma de gases para la muestra del gas obtenido de la pirólisis a 410°C	92

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Estructura del polipropileno	7
Ilustración 3. Reactor Batch.....	10
Ilustración 4. Reactor semicontinuo	11
Ilustración 5. Reactor de lecho fijo.....	12
Ilustración 7. Reactor de tornillo	14
Ilustración 8. Diagrama de un cromatógrafo de gases.....	17
Ilustración 9. Certificado de análisis termogravimétrico por parte del laboratorio de Cementos Progresos (CETEC).....	43
Ilustración 10. Identificación de los distintos componentes de las mascarillas quirúrgicas.....	44
Ilustración 11. Ficha técnica de mascarilla quirúrgica grupo	45
Ilustración 12. Determinación del peso de las mascarillas quirúrgicas	94
Ilustración 13. Sistema utilizado para la pirólisis de mascarillas quirúrgicas	94
Ilustración 14. Producto líquido de pirólisis a 380°C.....	95
Ilustración 15. Producto líquido de pirólisis a 410°C.....	95
Ilustración 16. Producto sólido de pirólisis a 410°C	96
Ilustración 17. Equipo de cromatografía de gases	96

RESUMEN

En este estudio se muestra la evaluación del proceso de pirólisis de mascarillas quirúrgicas para la obtención de productos líquidos y sólidos y así conocer su potencial aplicación. La pirólisis es un proceso termoquímico en el cual diferentes materiales se descomponen térmicamente en un ambiente sin oxígeno y se obtienen generalmente combustibles con cadenas cortas de carbono. Los procesos de pirólisis en este trabajo se realizaron a una temperatura final de 380°C y a 410°C con una tasa de calentamiento de 10°C cada 30 minutos durante 5 horas y 25 minutos. Para la caracterización de la materia prima se realizó un análisis termogravimétrico y espectroscopía infrarroja de los componentes más representativos del material siendo estos las bandas elásticas y los filtros para así conocer la temperatura de degradación y el tipo de polímero del cual están compuestos, a partir de los análisis se identificó que ambos materiales empiezan a degradarse notoriamente a los 410°C y el análisis FTIR detectó la presencia de polipropileno (filtros) y PET (bandas elásticas), sin embargo el TGA, mostró que el material de las bandas elásticas sigue degradándose alrededor de 460°C indicando así que existe la presencia de algún aditivo, los cuales se utilizan comúnmente para mejorar las características mecánicas del material, como lo puede ser su resistencia y flexibilidad. Para tener un mejor control de temperatura y evitar generar un sistema inestable de pirólisis debido a los cambios altos de temperatura se planteó una segunda temperatura de 380°C, la cual es una región donde los componentes de las mascarillas se degradan de forma lenta. Para la caracterización de los productos líquidos por medio de cromatografía de gases se identificó, luego de descartar ciertos componentes debido al porcentaje de coincidencia y de su estructura que el producto líquido a 380°C contiene principalmente hidrocarburos de 9 carbonos (55.15%) y de 5 carbonos (30.57%) mientras que para el proceso de 410°C se obtuvieron hidrocarburos de 9 carbonos (17.79%), de 7 carbonos (60.69%) y de 6 carbonos (15.58%). Asimismo, se obtuvo una densidad similar a la del Diesel de 0.7268 ± 0.0122 g/mL y 0.7603 ± 0.0070 g/mL para cada temperatura, sin embargo, el poder calorífico que se determinó fue de $42,174.67 \pm 307.12$ J/g y $42,897.33 \pm 408.03$ J/g similar al fuel oil. Los productos sólidos fueron clasificados según su poder calorífico como carbón bituminoso tipo A y sub-bituminoso tipo B. Por último, se determinó que bajo las mismas condiciones a 380°C se obtiene un rendimiento del producto líquido de $42.6247 \pm 5.3855\%$ y para el sólido un rendimiento de $12.5995 \pm 3.0049\%$. De igual manera, para la temperatura de 410°C se obtuvo valores para el líquido y sólidos de $66.9730 \pm 3.8895\%$ y $3.1779 \pm 0.5462\%$ respectivamente. Los resultados demostraron que al realizar la pirólisis de mascarillas se obtienen productos con características similares a los combustibles convencionales y además, la temperatura puede afectar el rendimiento de los productos antes mencionados.

I. INTRODUCCIÓN

La pandemia de COVID-19 en su punto más crítico trajo como consecuencia el uso masivo de mascarillas quirúrgicas como equipo de protección personal y así prevenir o disminuir el riesgo de contagio. A pesar de que el riesgo de contagio ha disminuido a través de los dos últimos años debido a las vacunas, aún hay personas que las siguen utilizando ya sea por decisión propia o por requerimientos que piden las instituciones donde laboran (Mahmood, 2020). Debido al aumento de demanda de este producto también se ha generado un incremento considerable de residuos de mascarillas.

En el ámbito de protección personal las mascarillas quirúrgicas son las más utilizadas en hospitales y clínicas dentales, durante la pandemia se produjeron alrededor de 89 millones de este tipo de mascarillas cada mes durante el año 2020 (Aragaw, 2020). Los materiales de los que están compuestas las mascarillas son polímeros como polipropileno, poliéster, celulosa y nylon, aunque la composición puede variar dependiendo de la marca del fabricante o la forma de la cual esta tejida (Rodríguez & Bejarano, 2021).

La pirólisis es un proceso térmico por el cual la materia prima con la que se trabaja se descompone térmicamente a altas temperaturas y en ausencia de oxígeno a partir de esta operación se obtienen productos en fases líquidas, sólidas y gaseosas que pueden tener un valor agregado como combustibles o se pueden separar los componentes de la fase líquida y gaseosa para ser utilizados como materia prima en la industria química (Harussani et al., 2021).

Los productos de la pirólisis de polímeros como el aceite pirolítico, conocido como biocombustible sintético, puede utilizarse como una alternativa sostenible a los combustibles convencionales como la gasolina y el diésel, lo cual plantea una serie de ventajas medioambientales y económicas. El proceso de pirólisis se destaca como un método de reciclaje innovador que no solo reduce la acumulación de residuos plásticos, sino que también contribuye a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero y la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles. La calidad de los combustibles es diferente según la fuente de plásticos utilizado y el proceso de pirólisis específico, lo que puede influir en su rendimiento y composición.

Este estudio realizó una evaluación de la pirólisis de mascarillas quirúrgicas para conocer la aplicación del producto líquido y sólido generado durante el proceso, dicha evaluación se llevó a cabo a través de distintos análisis en los cuales se incluye espectroscopía infrarroja para conocer los componentes de la materia prima, cromatografía de gases y calorimetría para conocer las propiedades fisicoquímicas de los productos.

II. OBJETIVOS

A. General

Evaluar la pirólisis de mascarillas quirúrgicas con el fin de generar combustibles líquidos y sólidos, para así conocer su potencial aplicación.

B. Específicos

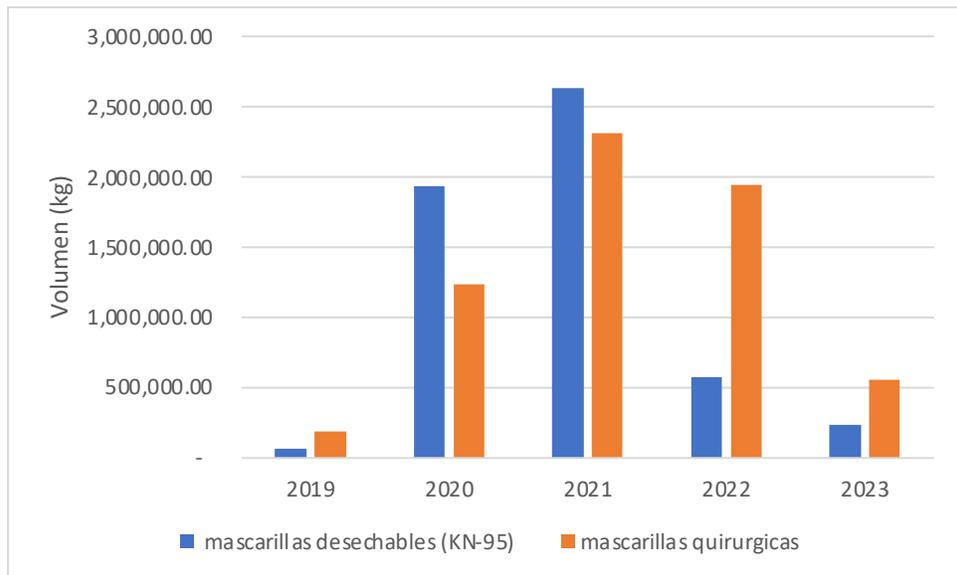
1. Realizar la caracterización de las mascarillas quirúrgicas para conocer sus propiedades y componentes presentes con el fin de establecer las condiciones a las cuales se llevará a cabo el proceso de pirólisis.
2. Caracterizar el producto líquido y sólido obtenido a través de análisis fisicoquímicos para evaluar su uso como combustibles alternativos a los derivados del petróleo.
3. Determinar los rendimientos de la pirólisis de mascarillas quirúrgicas a diferentes temperaturas a través de los balances de masa para evaluar la diferencia entre la proporción de producto líquido y sólido al momento de realizar un escalamiento industrial.

III. JUSTIFICACIÓN

Durante los últimos 2 años las mascarillas han tenido un aumento de demanda debido a la crisis del coronavirus y han surgido diferentes variantes, siendo las más comunes las mascarillas quirúrgicas debido a que son más fáciles de conseguir y son cómodas a comparación de las KN95 (Mahmood, 2020). Según la Organización Mundial de la Salud alrededor de 89 millones de mascarillas quirúrgicas fueron producidas cada mes durante la pandemia (Aragaw, 2020). Alrededor del 75% de mascarillas usadas acaban en vertederos, el ambiente o son arrastradas hacia el mar y tardan alrededor de 300 años en degradarse, el resto de estos residuos es incinerado (ONU,2021).

En Guatemala, el año 2021 cuando se dio el auge de la pandemia, ocurrió un aumento drástico del volumen de mascarillas que se importaron al compararlo con los datos del año 2019 en la Figura 1, dentro del mismo gráfico se muestra como previo a la implementación de las vacunas el volumen de mascarillas que más se importaba eran las de mayor protección como lo son las KN-95, sin embargo en el año 2022 y 2023 las que más se importaron fueron las de tipo quirúrgicas debido a que la gente dio inicio al esquema de vacunación y esto provocó que el grado de protección que se requería con las mascarillas disminuyera.

Figura 1. Volumen importado de mascarillas desechables en Guatemala



(Banco de Guatemala, 2023).

Durante estos últimos años se han llevado a cabo investigaciones para generar procesos para tratar las mascarillas desechables ya sea para reutilizarlas o reciclarlas, sin embargo ambas se ven limitadas por el factor de contaminación puesto que primero se debe de llevar a cabo una descontaminación de estos artículos por medio de productos químicos o de equipos para esterilizar como lo es un autoclave, esta limitación es lo que ha dificultado su tratamiento para disminuir el impacto que generan en el ambiente (Melillo, 2022). Por

otro lado, la incineración es una técnica que se ha optado para tratar las mascarillas debido a que usualmente este es el tratamiento que se le da a los artículos bioinfecciosos como lo son los desechos de hospitales, pero al igual que las técnicas anteriores la incineración también presenta un obstáculo, el cual es que no se generan productos útiles al final del proceso (Idowu, 2023).

Otra forma de tratar los desechos de mascarillas desechables es la pirólisis, el cual es un proceso de degradación térmica que ocurre en un ambiente sin oxígeno y a altas temperaturas donde las moléculas de la materia prima utilizada se descomponen en moléculas más simples, formando así productos en diferentes fases. La principal ventaja de la pirólisis es que se pueden generar productos líquidos, sólidos y gaseosos que pueden ser utilizados en diferentes procesos, siendo uno de los más comunes, su uso como combustibles (Harussani et al., 2021).

En Guatemala no se han encontrado estudios específicos acerca de la pirólisis de mascarillas quirúrgicas debido a la mayor parte de estos artículos se tratan como desechos médicos por lo que son incinerados debido a esto se analizó que es lo sucede con este material al someterlo a este proceso de degradación térmica y como se ven afectados los productos al modificar las temperaturas finales de la operación (380°C y 410°C), por último, se evaluó si los productos obtenidos pueden ser aprovechados como combustibles alternativos a partir de su poder calorífico, densidad y composición.

IV. MARCO TEÓRICO

A. CONTAMINACIÓN DURANTE LA PANDEMIA

La cantidad de desechos sólidos aumentó durante la pandemia debido a que la gente y empresas empezaron a optar por productos desechables como platos, cubiertos, bolsas así mismo como el empaque de estos (Dharmaraj et al., 2021). El sector médico fue el que tuvo mayor crecimiento con base en los materiales que desechaban, la razón de esto es porque son los individuos más expuestos a la enfermedad por lo que necesitan de protocolos de limpieza más rigurosos, como el cambio constante de equipo de protección. Las mascarillas, guantes y piezas de prevención utilizadas por cualquier persona son consideradas como “desechos de COVID-19” ya que pueden contener trazas del virus (Dharmaraj et al., 2021).

El problema con los desechos de COVID-19 es que no pueden reciclarse debido a que los materiales con los que se fabricaron no son biodegradables como el polipropileno (PE), polietileno (PE) y Nylon (N), al ser productos biocontaminantes tampoco es recomendable tratarlo como cualquier otro desperdicio, lo que recomiendan las autoridades es empacar el desecho en una bolsa plástico y etiquetarlo para que la gente que se encarga de recolectar la basura sepa el riesgo que tiene ese material (Aragaw & Mekonnen, 2021).

B. USO DE MASCARILLAS DESPUÉS DE LA PANDEMIA

Según la publicación del Boletín Oficial del Estado el 8 de febrero de 2023, se modifica obligatoriedad del uso de mascarillas durante la situación de crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19. El uso de este equipo queda de forma obligatoria para trabajadores y visitantes en residencias de la tercera edad, para centros de salud, hospitales y para clínicas bucodentales (BOE, 2023).

C. MASCARILLAS QUIRÚRGICAS

El equipo de protección personal más común frente a la pandemia de SARS-CoV-2 fueron las mascarillas debido a que son capaces de proteger al individuo de partículas de aerosoles o biológicas suspendidas en el aire que puedan dañar su salud (ONU,2021). La normativa UNE establece que el material principal del cual están hechas las mascarillas quirúrgicas es el tejido no tejido (TNT) y no consta de ningún componente elástico (Rodríguez & Bejarano, 2021).

Las mascarillas quirúrgicas están compuestas de 3 capas donde la primera está en contacto con la cara y está fabricada a partir de polipropileno TNT o de celulosa, según la norma UNE la capa debe de ser 100% polipropileno spunbond. La segunda capa es la central y está fabricada a partir de una doble tela de polipropileno y es la encargada de la mayor parte de filtración de partículas, las normas UNE indican que el tejido spunlance debe estar compuesto de 80% poliéster y 20% viscosa (celulosa). Por último, la capa exterior debería estar compuesta de polipropileno spunbond 100% pero con un grosor mayor. Existe otro tipo de

mascarillas de media-alta filtración que contienen 5 capas haciendo que sean más eficaces para filtrar (Rodríguez & Bejarano, 2021).

D. POLÍMEROS

Son un tipo de macromoléculas se forman a través de reacciones de polimerización donde una unidad o monómero se une a otro igual y este proceso se repite hasta tener una estructura más larga que se denomina un polímero, si todos monómeros son idénticos se llama homopolímero, pero si es una combinación de dos o más monómeros se conoce como copolímero (Carrasquero, 2004). Existen de tipo natural como los polisacáridos y los sintéticos como el caucho (Carrasquero, 2004).

1. Polímeros de adición

Son polímeros que se forman por la unión de repetidas moléculas, la reacción inicia con la adición de un radical libre más un monómero y da como producto otro radical libre que puede seguir reaccionando hasta que ocurra una reacción de inhibición (Carrasquero, 2004).

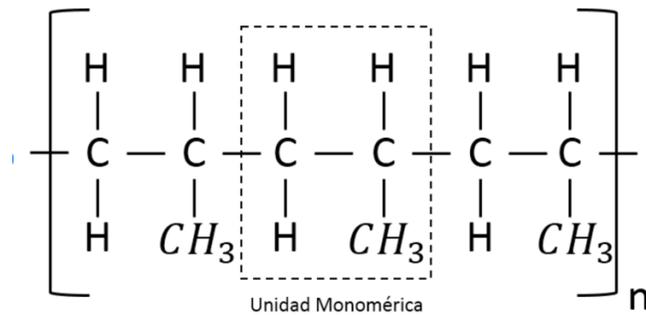
Polipropileno

Es un polímero termoplástico que tiene varias aplicaciones comerciales e industriales debido a que se puede utilizar como estructura o fibra, se fabrica a través de la polimerización del propileno y se puede utilizar para la elaboración de piezas de plástico, alfombras, electrónicos y equipos de laboratorio (Maddah, 2016).

El polipropileno tiene mejores propiedades respecto a otros plásticos debido a que tiene una densidad menor, es resistente químicamente, punto alto de fusión y su absorción de agua es muy baja (Maddah, 2016).

El polipropileno aplicado como fibras y tejidos se puede encontrar en película cortada, fibras cortadas, telas no tejidas y monofilamentos. Las telas no tejidas son las más comunes y se dividen en dos tipos que son el spundbond y spundlance, siendo el primero fabricado solamente de polipropileno mientras que el segundo este hecho a base de poliéster y viscosa (Maddah, 2016).

Ilustración 1. Estructura del polipropileno



(Serrano, 2015)

2. Polímeros de condensación

Son un tipo de polímeros formados a partir de reacciones de condensación donde se eliminan pequeñas moléculas como el agua y se obtienen productos como poliamidas y poliésteres (Carrasquero, 2004).

E. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES Y SUSTANCIAS

1. Densidad

La densidad es una propiedad que la relaciona el peso de un material o sustancia por unidad de volumen. En sistema internacional para un material se expresa en kg/m³ o g/cm³ y para sustancias se utiliza kg/L o g/mL (Groover, 1997).

Ecuación 1. Fórmula para densidad

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

(Groover, 1997)

2. Densidad aparente

Es una propiedad que relaciona la masa por unidad de volumen tomando en cuenta el volumen de los espacios vacíos. Se utiliza la misma ecuación que para la densidad, pero la diferencia está en que para esta medición el material se deja caer dentro del contenedor provocando así que se formen espacios vacíos y ese es el volumen que se utiliza para la fórmula (López & Goyanes, 2017).

3. Densidad compactada

Esta propiedad se refiere a la masa del material por unidad de volumen sin tomar en cuenta los espacios vacíos. Para realizar esta medición el material se deja caer y se compacta para evitar que haya espacios vacíos (Groover, 1997).

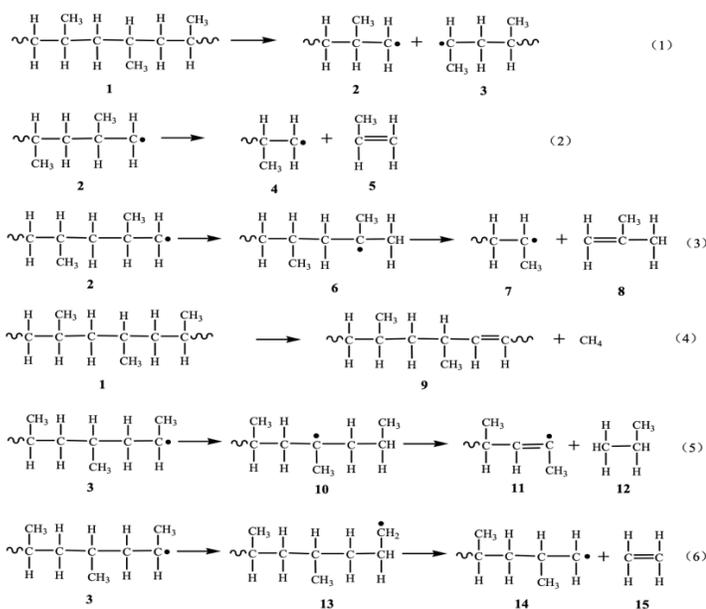
F. ANÁLISIS TERMOGAVIMÉTRICO (TGA)

Es una técnica para estudiar el comportamiento de un material cuando es sometido a diferentes temperaturas en una atmósfera inerte, a partir de este análisis se pueden conocer las temperaturas a las que se eliminan ciertos componentes volátiles y a la cual el material se descompone (Alonso et al., 2009). Para el análisis termogravimétrico se lleva un control y registro de la pérdida de masa del material conforme aumenta la temperatura hasta llegar a valores de 1200°C y como resultado se obtienen gráficos conocidos como termogramas que relacionan las variables de peso y temperatura (Alonso et al., 2009).

G. PIRÓLISIS

Es un método termoquímico en donde diferentes materiales se pueden descomponer térmicamente en un ambiente sin oxígeno de manera que se evite la combustión. Los productos que se suelen obtener de la pirólisis son combustibles con bajo peso molecular y cadenas de carbono cortas debido a la aplicación de calor a la que fueron obtenidos mientras que en otros procesos como la incineración se obtienen principalmente dióxido de carbono y agua (Harussani et al., 2021).

Ilustración 2. Mecanismo de formación de varios tipos de productos de pirólisis



(Huang, 2017)

La pirólisis es proceso que reduce las emisiones de CO₂ y los productos se pueden utilizar para diferentes procesos:

1. Tipos de pirólisis

Los diferentes tipos de pirólisis se dividen con base en los parámetros de operación como el flujo de calor que se utiliza, el tiempo de residencia y de las temperaturas de operación (Harussani et al., 2021).

Según el flujo de calor se pueden dividir en:

- Pirólisis rápida
- Pirólisis lenta
- Pirólisis flash

Las pirólisis rápidas y lentas tienden a llevarse a cabo en ambientes inertes, aunque existen otros tipos como la hidro-pirólisis que se lleva a cabo en un ambiente con agua y la pirólisis de hidrógeno que requiere alrededores que tengan hidrógeno (Harussani et al., 2021).

Tabla 1. Tipos de pirólisis

Método de pirólisis	Tiempo de residencia (seg)	Rampa de calentamiento (°C/seg)	Temperatura (°C)	Productos obtenidos
Rápida	< 2	Alta ~100	650	Bio-aceite
Flash	< 1	Muy alta > 500	> 650	Bio-aceite Gas
Ultra rápida	< 0.5	Muy alta	1000	Químicos Gas
Hidro-pirólisis	< 10	Alta	< 500	Químicos Bio-aceite

(Harussani et al., 2021)

2. Parámetros de proceso

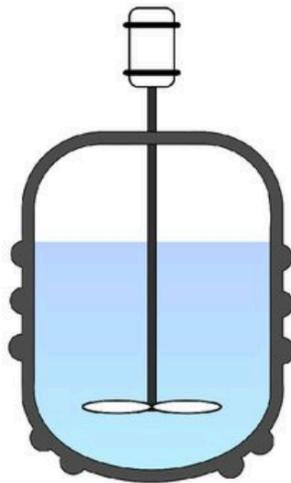
Los productos como los aceites, carbón y gases obtenidos a partir de la pirólisis se pueden ver afectados por la temperatura a la que se lleva el proceso, el tamaño del material que se ingresa al reactor, el tiempo de operación, la velocidad con la que se calienta y la presencia de catalizadores de forma que si se quieren obtener la mayor cantidad de ciertos productos se pueden alterar las condiciones de operación para que favorezcan al producto que se desea obtener como se observa en la Figura 3 (Harussani et al., 2021).

H. SISTEMAS DE PIRÓLISIS

1. Reactor batch

Un reactor batch se distingue por tener una chaqueta térmica y, en la mayoría de los casos, un dispositivo de agitación mecánica (Acosta & Pérez, 2012). A diferencia de otros reactores, este tipo no emplea flujos gaseosos inertes para eliminar los productos volátiles de la reacción. Esta particularidad conduce a la ocurrencia de reacciones secundarias, como la aromatización o ciclación, que pueden afectar adversamente el rendimiento del equipo al generar productos no deseados (Basu, 2013).

Ilustración 3. Reactor Batch

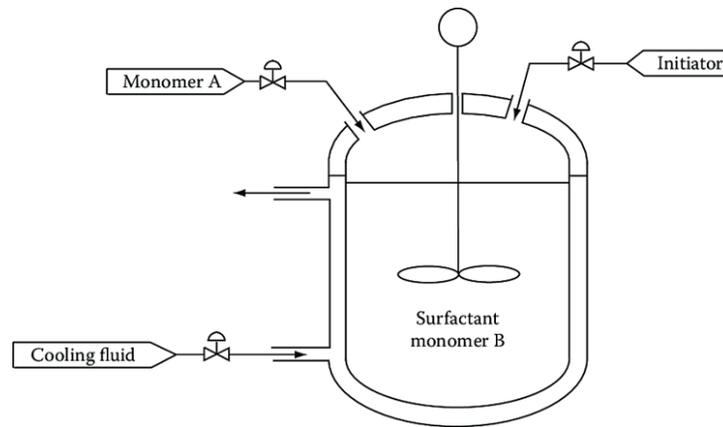


(Obando. 2015)

2. Reactor de semicontinuo

Un reactor semi-batch comparte similitudes con un reactor batch, aunque se diferencia por la inclusión de un flujo de gas inerte, generalmente nitrógeno, que se emplea para desplazar y dirigir los compuestos volátiles generados hacia otras zonas del reactor. Este enfoque reduce la probabilidad de reacciones secundarias en el interior del equipo (Acosta & Pérez, 2012).

Ilustración 4. Reactor semicontinuo



(IQR, 2021)

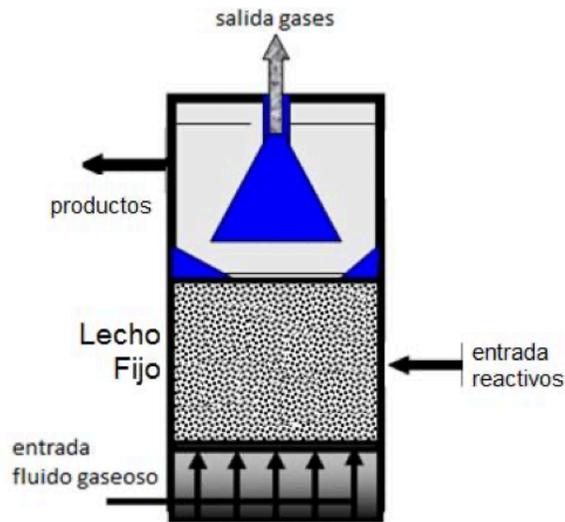
En general, tanto los reactores batch como los semi-batch son preferidos debido a la simplicidad de su diseño y su ahorro potencial en los costos de fabricación (Álvarez, 2015). Sin embargo, es importante destacar que estos tipos de reactores tienden a requerir tiempos de reacción prolongados, lo que se traduce en costos operativos más elevados. Esto se debe a que se forma coque o residuo carbonoso en las paredes del equipo, lo que dificulta la transferencia de calor y, por lo tanto, aumenta la duración de las reacciones y sus costos operativos (Álvarez, 2015).

Además, los reactores semi-batch, al igual que los batch, pueden afectar la eficiencia de los catalizadores, lo que resulta en rendimientos similares entre reacciones térmicas y catalíticas, como se menciona en (Sendrós, s/f).

3. Reactor de lecho fijo

Un reactor de lecho fijo se refiere a un equipo en el cual el catalizador se ubica en una posición fija en relación al reactor y permanece inmóvil. El reactivo, ya sea en forma líquida o gaseosa, se hace circular a través de este lecho, lo que provoca su degradación en el proceso. Este tipo de dispositivo se emplea extensamente en numerosas reacciones catalíticas heterogéneas. No obstante, presenta desventajas relacionadas con las reacciones de pirólisis de residuos orgánicos (Arbeláez et al., 2013).

Ilustración 5. Reactor de lecho fijo



(Obando. 2015)

4. Reactor de lecho fluidizado

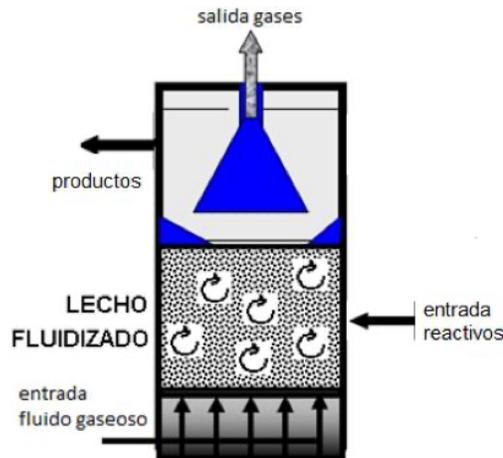
A diferencia del reactor de lecho fijo, en el cual el flujo de reactivos no induce movimiento en el lecho de sólidos, el reactor de lecho fluidizado se caracteriza por tener un flujo ascendente que dispersa las partículas del lecho, mejorando significativamente la transferencia de calor y masa en su volumen de reacción. Esta capacidad para facilitar estos procesos es una ventaja clave del reactor de lecho fluidizado en comparación con el lecho fijo, lo que lo convierte en una alternativa atractiva desde una perspectiva industrial. Permite la operación continua del pirólisis sin los desafíos que presenta el lecho fijo en términos de escalabilidad (Arauzo et al., 2014).

En los reactores de lecho fluidizado, el lecho se mueve cuando el peso aparente de sus partículas es igual o menor que la fuerza de arrastre generada por la velocidad del gas portador. En este contexto, la velocidad de fluidización se convierte en un parámetro crucial que determina la distribución de tiempos de residencia de los productos generados en el reactor (Basu, 2013).

Las ventajas del reactor de lecho fluidizado incluyen un excelente contacto entre el catalizador y el reactivo, lo que ocupa gran parte del volumen de reacción en la realización de la pirólisis. Esto conlleva una operación sencilla sin la formación de puntos calientes en la mayoría de los casos, siempre que no haya canalizaciones, y la existencia de gradientes uniformes, lo que facilita el control y lo convierte en una opción viable para su implementación a nivel industrial (Basu, 2013).

Sin embargo, algunas desventajas asociadas a este tipo de reactor incluyen la necesidad de altos contenidos de catalizador para homogeneizar el volumen del reactor y el desgaste de los sólidos y del propio reactor debido a la fricción generada por el movimiento de las partículas en el lecho (Basu, 2013).

Ilustración 6. Reactor de lecho fluidizado



(Obando. 2015)

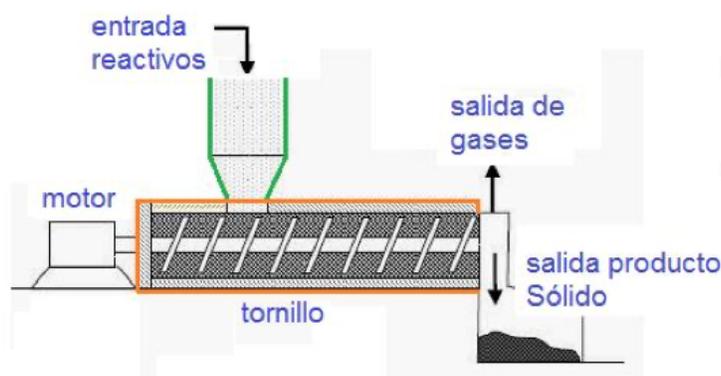
5. Reactor de tornillo

El reactor de tipo tornillo es un dispositivo que se compone principalmente de una tolva de entrada, a través de la cual los reactivos ingresan a un tornillo sinfín encargado de transportar la materia prima a lo largo de un barril calentado, donde se desarrollan las reacciones de transformación. En términos sencillos, se asemeja en su funcionamiento a una extrusora de polímeros.

En comparación con las tecnologías previamente mencionadas, los reactores de tipo tornillo son una innovación relativamente reciente. Su característica distintiva radica en la capacidad de controlar el tiempo de residencia a través de la velocidad de rotación del tornillo sinfín (Díaz et al., 2015). Esta ventaja se traduce en la posibilidad de influir significativamente en los rendimientos de los productos deseados (Guzmán et al., 2015).

Además, al igual que otros tipos de reactores mencionados, el reactor de tornillo es una alternativa que permite la operación continua y no presenta obstáculos aparentes en términos de escalabilidad, lo que lo convierte en una opción atractiva desde una perspectiva industrial (Walendziewski, 2005).

Ilustración 7. Reactor de tornillo



(Obando. 2015)

I. PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS

1. Líquido

Los aceites que se obtienen por medio de los sistemas de condensación de gases durante el proceso de pirólisis tienen características como alto contenido de agua, alta acidez y viscosidad que no hacen posible que sean utilizados como combustibles refinados como el Diésel o la gasolina (Pinedo, 2013). La variable que más influye en el rendimiento para obtener este producto es la temperatura la cual es proporcional a la cantidad de gas no condensable que se obtendrá (Pinedo, 2013).

2. Sólido o Char

El residuo sólido que queda al final de la pirólisis tiende a tener un alto contenido de carbono por lo cual puede ser utilizado como fuente de calor comparándolo con el carbón bituminoso debido a su poder calorífico, la ventaja que tiene este producto es que al momento de su combustión las emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno son menores en comparación a carbones convencionales. Se suele utilizar como fertilizantes, materia prima para carbón activado o captador de CO₂ (Pinedo, 2013).

3. Gas

El producto gaseoso de la pirólisis es el resultado de la descomposición térmica de materiales orgánicos o inorgánicos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Este proceso genera una mezcla de gases que puede contener compuestos como hidrocarburos, monóxido de carbono, dióxido de carbono y otros subproductos. La composición precisa del producto gaseoso puede variar según las condiciones de operación y los materiales de partida. Este gas puede tener aplicaciones potenciales en la producción de energía o como materia prima en la industria química, dependiendo de su composición y calidad. La caracterización detallada de este producto es esencial para evaluar su viabilidad y posibles usos posteriores. (Pinedo, 2013).

J. COMBUSTIBLES SÓLIDOS

Los combustibles sólidos se refieren a sustancias en estado sólido que tienen la capacidad de ser incineradas con el propósito de liberar energía en forma de calor. Estos recursos encuentran utilidad en diversas aplicaciones, abarcando desde el calentamiento residencial hasta la producción de energía en instalaciones eléctricas centrales. Una de las ventajas que tienen este tipo de combustibles sobre los líquidos es que se pueden transformar de forma sencilla sin la necesidad de refrigeración o presurización combustibles (Perry, 1997).

1. Carbón

Este tipo de combustible se origina a partir de la descomposición interrumpida de los restos de los árboles, helechos, musgos entre otras formas de vida vegetal que florecieron millones de años atrás. La turberas son el precursor del carbón y se forman a partir de los microorganismos presentes en los restos de vegetales, posteriormente debido a fenómenos en el ambiente como calor y presión metamorformaron la turba generando así los distintos tipos de carbón que hoy conocemos combustibles (Perry, 1997).

K. COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Los principales combustibles líquidos se obtienen mediante una destilación fraccionada durante el refinamiento del petróleo crudo, son una mezcla de hidrocarburos y sus derivados que abarcan desde el metano hasta los bituminosos pesados. Debido a que el crudo contiene entre un cuarto y la mitad de los átomos de azufre, nitrógeno, oxígeno, vanadio, níquel o arsénico se utilizan distintos procesos para refinar el crudo como la desulfuración, hidrogenación, el craqueo para disminuir el peso molecular de los hidrocarburos presentes y otros procesos son los que se realizan previo a la mezcla y comercialización de los combustibles (Perry, 1997).

1. Gasolina

Es un producto derivado del petróleo crudo que este compuesto principalmente por alcanos, compuestos aromáticos y naftas reformadas que aumentan el octanaje del combustible. La gasolina viene en diferentes tipos con distintos octanajes, que indican su capacidad para resistir la detonación en motores de alta compresión. Estos tipos incluyen la gasolina regular (menor octanaje), la gasolina premium (mayor octanaje) y grados intermedios. En resumen, la gasolina es un combustible líquido ampliamente utilizado en vehículos y equipos con motores de combustión interna, compuesta (Reiland, 2023).

2. Queroseno

Es un producto que se obtiene durante la destilación fraccionada del petróleo crudo y se ubica entre la gasolina y el diésel, el queroseno está compuesto alrededor de un 70% por naftenos, alcanos ramificados y de cadena recta, el 30% lo representan los alquibencenos y los alquinaftalenos, por último, el 5% restante

pertenece al grupo de olefinas. Hoy en día el queroseno se utiliza principalmente como combustible de aviación, iluminación, disolvente y para mezclas de combustible (Reiland, 2023).

3. Lubricantes

Los lubricantes obtenidos del petróleo crudo son derivados que se emplean para disminuir la fricción y el desgaste en maquinaria y motores. En su mayoría, estos lubricantes consisten en un 80 - 90% de aceites base, obtenidos mediante la refinación del petróleo crudo, a los cuales a veces se les incorporan aditivos los cuales representan el 10 – 20% y se utilizan para mejorar sus características y su eficiencia (Mangas, 2014).

4. Fuel oil

El fuel oil, también conocido como aceite combustible o simplemente "fuel", es un combustible líquido derivado del petróleo crudo mediante el proceso de refinación. Se emplea en diversas aplicaciones, especialmente en la industria y para la producción de energía. Este combustible se destaca por su elevado contenido de carbono y su viscosidad, lo que lo hace apropiado para aplicaciones específicas como: calefacción, industria marítima, industria manufacturera entre otras (Still, 2023).

5. Diésel

El diésel es un combustible con una mezcla compleja que se conforma principalmente por parafinas y compuestos aromáticos con un alto poder calorífico y se obtiene mediante la destilación y purificación del petróleo crudo, a diferencia de la gasolina este producto se extrae de la parte inferior de la torre de destilación debido a que contiene hidrocarburos pesados provocando que su densidad y peso molecular sean superiores a los de gasolina. A pesar de que tiene una gran eficiencia también genera una mayor cantidad de contaminantes como óxidos de nitrógeno (Gad, 2014).

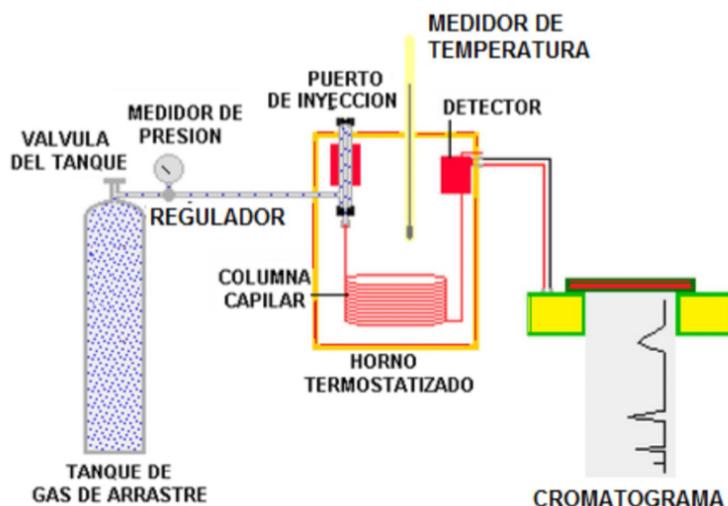
L. CROMATOGRAFÍA DE GASES

El análisis de cromatografía de gases es una técnica analítica que se utiliza para separar y analizar componentes de una muestra gaseosa. Algunas de las muestras que se suelen analizar con este método son las siguientes:

- **Análisis de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs):** Se utiliza comúnmente para analizar compuestos orgánicos en aire, agua, suelos, alimentos y productos farmacéuticos.
- **Análisis de Gases en la Industria Química:** Control de calidad y monitoreo de procesos industriales.
- **Identificación de Compuestos en Investigación Científica:** En química orgánica y análisis de productos naturales.
- **Análisis de Residuos y Contaminantes Ambientales:** Detecta trazas de contaminantes en el medio ambiente.

La cromatografía es un método que consta de dos fases, una fase se denomina estacionaria que se encuentra dentro una columna como un sólido o película que la recubre y la otra fase es la móvil y consiste en un gas inerte que su función es transportar las partículas de la muestra a largo de la columna en donde interaccionan con la fase estacionaria. Es una técnica útil para detectar componentes volátiles (Acevedo, 2014).

Ilustración 8. Diagrama de un cromatógrafo de gases



(Acevedo, 2014)

1. Gas portador

Debido a que los gases transportadores no deben de reaccionar con la muestra se suelen utilizar gases como el helio, nitrógeno e hidrogeno, el flujo de gas suele controlarse a través de la válvula del tanque teniendo de referencia la presión que se debería de mantener entre 10 y 50 psi. Se buscan caudales de aire constantes por lo que es muy importante mantener una presión estable (Acevedo, 2014).

2. Sistema de inyección

El método más común para inyectar la muestra al sistema es a través de una micro jeringa, el líquido o gas se inyecta en una cámara de vaporización que se encuentra a temperatura por encima del punto de ebullición del componente menos volátil. Las cantidades de muestra que se utilizan suelen ser mínimas alrededor de 1uL a 20 uL (Acevedo, 2014).

3. Columna

Esta es la parte del sistema que se encarga de hacer la separación, la separación o resultados dependerán de la columna que se haya escogido puesto que esta es la que contiene el líquido ya sea en las paredes o en un sólido que interacciona con la muestra, para muestra con alto contenido de hidrocarburos es

recomendable utilizar la columna de vidrio. Para aumentar la eficiencia de la columna se debe de disminuir su diámetro es debido a esto que las columnas suelen tener diámetros externos de 0.15 cm e interno de 0.025 a 0.05 cm (Acevedo, 2014).

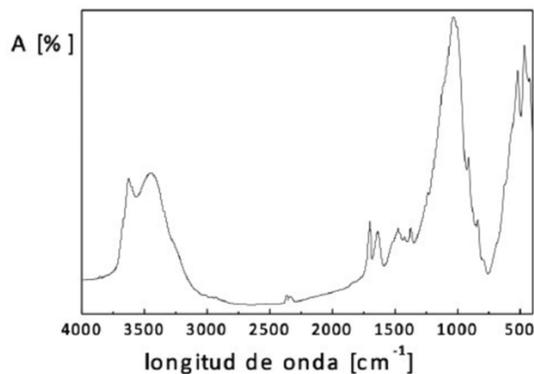
4. Sistema de detección

Para detectar las ondas que se generan se utiliza un detector cromatográfico que se encarga de medir la concentración de los componentes de la muestra y a partir de eso genera una señal eléctrica representativa de dicha concentración (Acevedo, 2014).

M. ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

La espectroscopia IR estudia la interacción entre la muestra que se está estudiando y la radiación electromagnética de forma que se analiza la absorción o emisión de energía que se emite. Cada molécula puede rotar y vibrar en distintas frecuencias de modo que cada compuesto tiene un comportamiento característico al momento que rota o vibra mientras se le aplica un haz de infrarrojos (Vazquez, 2012).

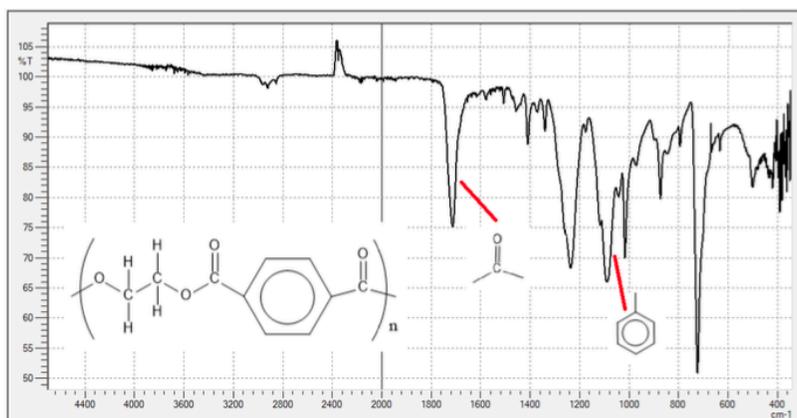
Figura 1. Cromatograma de la absorción de un compuesto en relación con la longitud de onda.



(Vazquez, 2012)

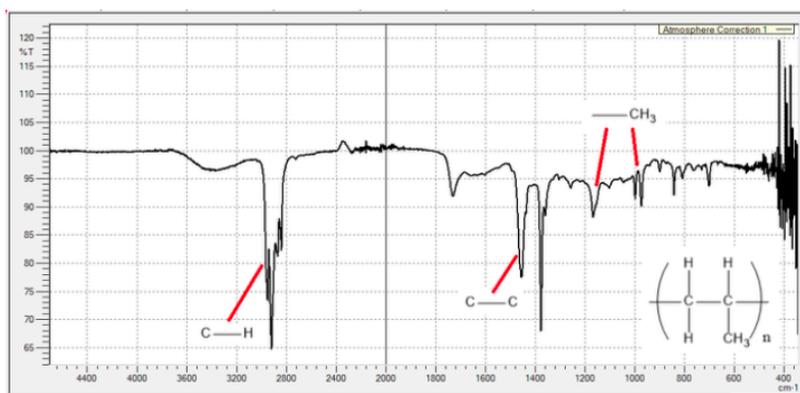
A continuación, se presentan espectros de distintos tipos de polímeros:

Figura 2. Espectro del PET



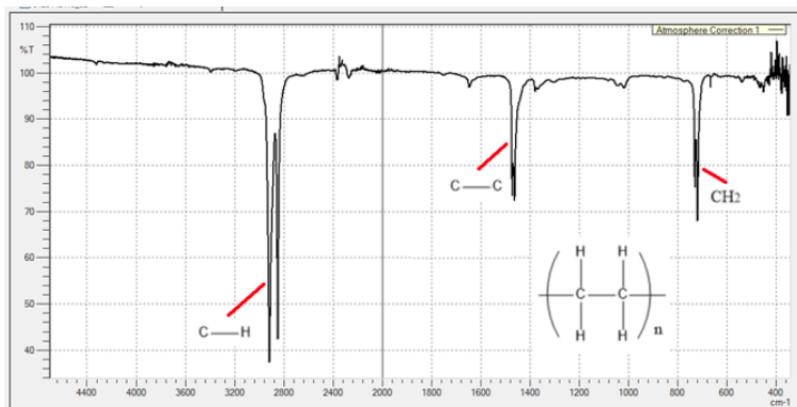
(Velandia, 2017)

Figura 3. Espectro del Polipropileno



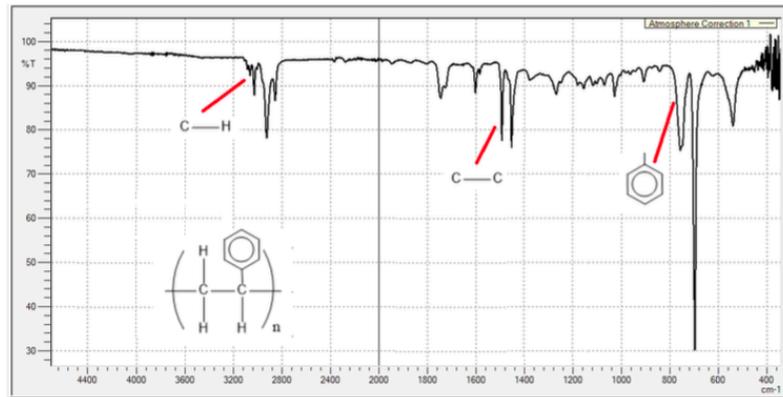
(Velandia, 2017)

Figura 4. Espectro Polietileno de alta densidad



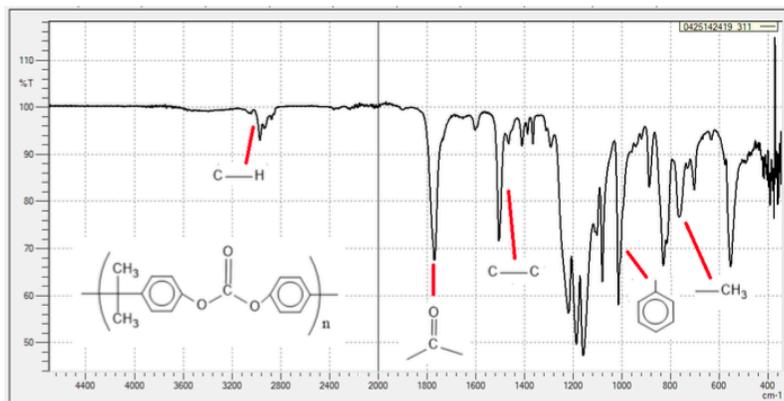
(Velandia, 2017)

Figura 5. Espectro de Poliestireno



(Velandia, 2017)

Figura 6. Espectro de Policarbonato



(Velandia, 2017)

N. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

La estadística descriptiva es una rama fundamental de la estadística que se enfoca en la recopilación, organización, resumen y presentación de datos de manera que sea comprensible y significativa. Su objetivo principal es proporcionar una descripción detallada de un conjunto de datos, revelando patrones, tendencias y características clave sin necesidad de realizar inferencias o generalizaciones. En esencia, la estadística descriptiva ayuda a convertir datos crudos en información útil y accesible para la toma de decisiones (Anderson, 2012).

Ecuación 2. Longitud de réplicas

$$N = \frac{Z_{\alpha}^2 * P * q}{E^2}$$

(Zamora, 2013)

Para lograr esto, la estadística descriptiva emplea diversas técnicas, como la elaboración de tablas, gráficos, medidas de tendencia central (como la media y la mediana) y medidas de dispersión (como la desviación estándar y el rango intercuartil). Al proporcionar un resumen claro y conciso de los datos, la estadística descriptiva se convierte en una herramienta valiosa en campos tan diversos como la economía, la medicina, la psicología y la investigación científica, ya que permite a los analistas y tomadores de decisiones entender mejor el comportamiento de los datos, identificar anomalías y comunicar de manera efectiva hallazgos clave a audiencias variadas (Anderson, 2012).

O. PRUEBA F PARA VARIANZA DE DOS MUESTRAS

La prueba F es una herramienta estadística que se utiliza para comparar las varianzas de dos muestras independientes. Esta prueba es particularmente valiosa cuando se necesita determinar si las varianzas de dos poblaciones son iguales o si una es significativamente mayor o menor que la otra. En el contexto de la investigación y el análisis de datos, la prueba F se emplea para evaluar la homogeneidad de las varianzas y, por ende, es fundamental en la toma de decisiones sobre qué técnicas estadísticas utilizar (Anderson, 2012).

P. PRUEBA T PARA DOS MUESTRAS ASUMIENDO DIFERENTES VARIANZAS

La prueba t para dos muestras, asumiendo varianzas iguales o desiguales, es una técnica estadística ampliamente utilizada para comparar las medias de dos grupos o poblaciones distintas. Cuando se asume igualdad de varianzas entre las dos muestras, se emplea la prueba t de muestras independientes con varianzas iguales, también conocida como la prueba t de Student para dos muestras con varianzas homogéneas. Por otro lado, cuando se asume que las varianzas son diferentes, se utiliza la prueba t de muestras independientes con varianzas desiguales, que relaja la restricción de igualdad de varianzas. La elección entre ambas depende de si se ha validado o no la igualdad de varianzas mediante una prueba como la prueba F (Anderson, 2012).

La prueba t permite determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los dos grupos, lo que es crucial en la investigación y el análisis de datos. Cuando las varianzas son iguales, la prueba t proporciona una estimación precisa de la diferencia de medias, mientras que cuando las varianzas son desiguales, se recurre a un enfoque que tiene en cuenta esta desigualdad en la varianza para realizar una comparación más precisa. En ambos casos, la prueba t es esencial para respaldar las decisiones basadas en evidencia y para identificar si las diferencias observadas entre los grupos son debidas al azar o si son estadísticamente significativas (Anderson, 2012).

V. ANTECEDENTES

A. INVESTIGACIÓN DE PIRÓLISIS DE MASCARILLAS QUIRÚRGICAS

Existe un estudio realizado por Sun Xuli, Liu Zhenyu, Shi Lei y Liu Qingya en la Universidad de Tecnología Química en Beijing y se titula “Pirólisis de mascarillas desechables COVID-19 y craqueo catalítico de los volátiles”, el objetivo de este estudio era realizar la pirólisis de mascarillas quirúrgicas agregando catalizadores de óxidos de metal y determinar si había una diferencia en el rendimiento cuando se llevaba a cabo la pirólisis sin catalizador.

El trabajo describe el procedimiento y condiciones con las que se llevó a cabo la pirólisis, el proceso se realizó a 440-580°C y se obtuvieron rendimientos de 23.4%, 74.7% y 42.1% de producto gaseoso, líquido y aceite respectivamente. Los resultados indican que a 400°C es una temperatura suficiente para realizar la pirólisis y obtener los rendimientos antes mencionados. Las diferentes fases se analizaron a través de cromatografía de gases y se determinó que el 30% del producto líquido son hidrocarburos de C6-C35, el otro 70% son hidrocarburos de C36-C70. El estudio concluyó que el uso de catalizadores convierte el producto líquido en polipropileno, buteno y gases orgánicos más pequeños.

B. INVESTIGACIÓN PIRÓLISIS EN EL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

Dentro del departamento de Ingeniería Química, el trabajo en modalidad de megaproyecto titulado “Evaluación de un sistema de pirólisis para material de empaque plástico de una empresa alimenticia” se realizó el proceso de pirólisis a una tasa de calentamiento de 10°C cada 30 minutos. Previo a la obtención de los productos pirolíticos se llevó a cabo un análisis termogravimétrico en el cual se obtuvo que el material de empaque de polipropileno tiene una mayor pérdida de masa del material entre 400°C y 480°C. Por otro lado, el rendimiento de producto líquido a presión atmosférica fue de 87.12 m/m a una temperatura de 475°C, a las mismas condiciones de operación se determinó un rendimiento de 11.88% m/m para el producto sólido.

VI. METODOLOGÍA

A. CARACTERIZACIÓN DE MASCARILLAS QUIRÚRGICAS

1. Análisis termogravimétrico

- A través del laboratorio de Cementos Progreso se envían las muestras de cada capa o filtro que tienen las mascarillas quirúrgicas junto a la pieza de soporte de la nariz y las bandas elásticas de las orejas para determinar a través de un análisis termogravimétrico las temperaturas de degradación térmica de cada pieza. Estos resultados se utilizan para conocer las temperaturas a las que se tiene que llevar el proceso de pirólisis.
- Graficar los datos de temperatura y masa de los filtros con el soporte de nariz y los elásticos de las mascarillas quirúrgicas
- Observar el punto en donde empieza la pérdida de masa debido a la degradación del material.
- Establecer el rango a operar según el tipo de productos que se desee obtener.

2. Análisis de espectroscopía infrarroja

- Separar los componentes de la mascarilla a analizar (filtros y bandas elásticas)
- Enumerar cada una de las tres capas de filtros para diferenciarlos en los análisis del espectro.
- Analizar cada muestra por separado en el espectrómetro para obtener el respectivo cromatograma.
- Comparar los cromatogramas obtenidos con los de distintos polímeros hasta obtener coincidencias en las bandas características de los materiales.

3. Determinación del poder calorífico de la mascarilla

- Recortar pedazos delgados y finos de los filtros de las mascarillas quirúrgicas
- Aflojar la tuerca de racor y quitar la tapa del recipiente de disgregación
- Colocar una fibra de algodón en el centro del alambre de ignición y sujetarla con un lazo
- Pesar 0.1 gramos del material a medir en el crisol y anotar el peso que se obtuvo.
- Colocar el crisol en el soporte de crisol.
- Colocar 5 mL de agua destilada dentro del recipiente de disgregación.
- Orientar la fibra de algodón con una pinza para que este en contacto con el material que se va a medir, de esta manera se asegura que la fibra ardiente encenderá la muestra durante el proceso de encendido.
- Colocar la tapa del recipiente de disgregación y apretar correctamente la tuerca de racor.

- Rellenar el recipiente de disgregación con la estación de oxígeno C 248 durante 10 segundos.
- Colocar el adaptador de encendido sobre la tapa del recipiente de disgregación
- Colocar el recipiente de disgregación en la caldera interna del calorímetro. El recipiente debe colocarse entre los 3 pernos de alojamiento.
- Llenar el depósito con aproximadamente 2 litros de agua templada, observar el indicador de nivel de llenado.
- En caso no ocurra un cambio de temperatura, mezclar un poco de ácido benzoico (anotar el peso que se agrega).

B. PIRÓLISIS A ESCALA LABORATORIO

1. Equipos y materiales

- Balanza semianalítica Ohaus, modelo 3000 Xtreme
- Sistema de condensación de vidrio.
- Reactor pequeño de pirólisis de 100 gramos.
- Sistema de chimenea del reactor de pirólisis.
- Sistema de soporte
- Mufla Thermo Scientific, Thermolyne con un rango de 25 a 1200 grados Celsius.
- Bomba o motor de pecera.
- 1 espátula de metal
- Beakers de 300 mL
- 6 frascos de vidrio
- Termómetro láser Digi-Sense
- Mangueras plásticas

2. Montaje del sistema de pirólisis

- Utilizar un horno mufla como fuente de calor para el proceso de pirólisis y un equipo de condensación para obtener los productos líquidos.
- Abrir la parte superior del reactor para introducir el material previamente molido con una espátula de metal.
- Verificar que el reactor no este sobrecargado debido a que durante la degradación térmica la masa podría salirse del reactor.
- Cerrar el reactor verificando que se coloque la unión para que este cierre correctamente.
- Colocar el reactor cargado dentro del horno mufla

- Colocar el sistema de chimenea sobre el agujero que tiene el reactor en la parte superior de forma que ambas partes se enrosquen.
- Colocar los aislantes en la parte superior de la chimenea para evitar que se tape el sistema.
- Acoplar el sistema de condensación a la chimenea de gases y junto con el soporte colocar el condensador de vidrio.
- Introducir el motor de pecera dentro de un recipiente de plástico previamente llenado con agua que se debe de acoplar al sistema de condensación a través de mangueras de plástico.
- Colocar un balón de 50 mL a la salida del condensador para recolectar los gases que se vayan condensando.

3. Ejecución del sistema de pirólisis

- Encender la mufla y se ingresa una temperatura de 350°C y se espera hasta que la mufla alcance dicha temperatura.
- Después que el sistema haya alcanzado la temperatura de 350°C se debe aumentar la temperatura 10°C cada 30 minutos hasta llegar a las temperaturas finales deseadas.
- Registrar cada 5 minutos las temperaturas de la mufla para obtener las rampas de temperatura durante todo el proceso de pirólisis.
- Recolectar el líquido cuando empiece a cambiar de color a tonalidades amarillas más oscuras se debe de cambiar de frasco para recoger el aceite. Esto sucederá cuando sistema empiece a cercarse a la temperatura obtenida de las curvas del análisis
- Realizar 3 corridas por cada temperatura final a la que se va a realizar la pirólisis.
- Tomar las temperaturas de agua de entrada y salida del condensador cuando el líquido empieza caer al balón

4. Recuperación de los productos de la pirólisis

- Recolectar en frascos de vidrio etiquetados durante la corrida del sistema de pirólisis las fracciones líquidas para llevar un control de la temperatura y masa recuperada.
- Para recuperar el producto sólido se debe de esperar que la temperatura del sistema disminuye para que su manejo sea fácil, se debe de retirar la chimenea y el sistema de condensación.
- Abrir el reactor y con ayuda de una espátula se debe de recolectar el sólido y colocarlo en un recipiente de vidrio.

5. Limpieza del reactor

- Esperar un día para abrir el reactor y desmontar el equipo para evitar daño el reactor debido a los cambios drásticos de temperatura.

C. CUANTIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS

1. Medición de la masa obtenida

- Colocar los recipientes de vidrio dentro de la balanza analítica para obtener la masa y por diferencias de peso de los frascos vacíos obtener la masa de los productos líquidos a diferentes temperaturas.

2. Cromatografía de gases

- En un beaker limpio, seco y tarado, pesar 0.2500 g del producto líquido en balanza analítica.
- En una campana de extracción agregar 5 mL de cloroformo medidos en probeta de 10 mL.
- Agitar con una varilla de vidrio hasta diluir la muestra y formar una solución homogénea.
- Trasvasar 1.5 mL de dilución a un vial de 1.5 mL.
- Indicar en el equipo de cromatografía de gases la secuencia en la que se tienen que analizar previo a colocarlos en el auto muestreador.
- Utilizar el cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 con un detector de masas, columna HP5, y helio como gas acarreador.
- Al terminar cada muestra en el cromatógrafo, se debe obtener el cromatograma generado por el equipo.
- Utilizar el software AMDIS incluido en el equipo de cromatografía, utilizar los componentes que están en la biblioteca interna del equipo con la finalidad de comparar los compuestos obtenidos que tengan un porcentaje de coincidencia mayor con los que tiene la base de datos.

3. Densidad

- Pesar una masa conocida del producto líquido y anotar el valor que proporciona la balanza.
- Verter el líquido obtenido en una probeta de 10 mL para determinar el volumen que ocupa el producto y anotar el valor obtenido.

4. Poder calorífico

- Aflojar la tuerca de racor y quitar la tapa del recipiente de disgregación
- Colocar una fibra de algodón en el centro del alambre de ignición y sujetarla con un lazo
- Pesar 0.1 gramos del material a medir en el crisol y anotar el peso que se obtuvo.
- Colocar el crisol en el soporte de crisol.
- Colocar 5 mL de agua destilada dentro del recipiente de disgregación.
- Orientar la fibra de algodón con una pinza para que este en contacto con el material que se va a medir, de esta manera se asegura que la fibra ardiente encenderá la muestra durante el proceso de encendido.
- Colocar la tapa del recipiente de disgregación y apretar correctamente la tuerca de racor.
- Rellenar el recipiente de disgregación con la estación de oxígeno C 248 durante 10 segundos.
- Colocar el adaptador de encendido sobre la tapa del recipiente de disgregación
- Colocar el recipiente de disgregación en la caldera interna del calorímetro. El recipiente debe colocarse entre los 3 pernos de alojamiento.
- Llenar el depósito con aproximadamente 2 litros de agua templada, observar el indicador de nivel de llenado.
- Se cierra la caldera interna del calorímetro
- En la pantalla del calorímetro se debe ingresar en la opción de medición y luego se debe de colocar el peso de la muestra que se midió.
- La caldera interna se llena automáticamente y luego se proporciona el mensaje que el ensayo ha iniciado mostrando el tiempo que falta para que este termine.
- Después de 15 minutos anotar el poder calorífico en J/g

VII. RESULTADOS

Tabla 2: Caracterización de las mascarillas quirúrgicas

Característica o propiedad fisicoquímica	Resultado promedio
Piezas de las cuales está compuesta una mascarilla	<ul style="list-style-type: none"> • 3 capas filtrantes • Bandas elásticas • Soporte de nariz
Porcentaje que representa cada pieza de la mascarilla (% m/m)	<ul style="list-style-type: none"> • Filtros ($81.3702 \pm 0.7548\%$) • Elásticos ($12.8365 \pm 0.5211\%$) • Soporte de nariz ($5.7934 \pm 0.2407\%$)
Densidad (g/cm^3)	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad de bulto aireada (0.0090 g/cm^3) • Densidad de bulto compacta (0.0361 g/cm^3)
Temperatura de degradación ($^{\circ}\text{C}$)	<ul style="list-style-type: none"> • Filtros y soporte de nariz (~ 410) • Bandas elásticas (~ 450 y ~ 630)
Componentes detectados (FTIR y TGA)	<ul style="list-style-type: none"> • Polipropileno • Tereftalato de polietileno • Aditivos como elastómeros
Poder calorífico (J/g)	<ul style="list-style-type: none"> • $38,231.00 \pm 977.00$

Nota: Datos obtenidos a presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura de 23°C en el laboratorio de operaciones unitarias de UVG. Para las temperaturas de degradación se evaluaron las Figuras 13 y 14.

Tabla 3: Análisis fisicoquímicos de los productos líquidos de la pirólisis a diferentes temperaturas

Propiedad fisicoquímica	Pirólisis hasta 380°C	Pirólisis hasta 410°C
Poder calorífico (J/g)	42,174.67 ± 307.12	42,897.33 ± 408.03
Densidad (g/mL)	0.7268 ± 0.0122	0.7603 ± 0.0053
Cromatografía GC según número de carbonos (% m/m)	Hidrocarburos con 9 C: 5.71%	Hidrocarburos con 12 C: 3.13%
	Hidrocarburos con 7 C: 55.15%	Hidrocarburos con 9 C: 17.79%
	Hidrocarburos con 6 C: 8.57%	Hidrocarburos con 8 C: 2.70%
	Hidrocarburos con 5 C: 30.57%	Hidrocarburos con 7 C: 60.69%
		Hidrocarburos con 6 C: 15.68%

Nota: Los porcentajes presentados en el cuadro anterior son en relación con el área representada en los cromatogramas de las Ilustraciones 22 y 23. Los valores corregidos de la cromatografía de gases se extrajeron de las Tablas 12 y 13. Por último los valores de las propiedades fisicoquímicas de los productos líquidos se obtuvieron de las Tablas 14, 40 y 42.

Tabla 4: Análisis fisicoquímicos de los productos sólidos de la pirólisis a diferentes temperaturas

Propiedad fisicoquímica	Pirólisis hasta 380°C	Pirólisis hasta 410°C
Poder calorífico (J/g)	23,267.00 ± 549.88	34,214.33 ± 1060.94
Densidad (g/mL)	1.2600 ± 0.2100	1.0812 ± 0.1523

Nota. Los valores fueron tomados en el laboratorio de operaciones unitarias de la UVG y los datos se obtuvieron de las Tablas 15, 41 y 43.

Tabla 5. Comparación de propiedades fisicoquímicas de los productos líquidos

Producto	Líquido a 380°C	Líquido a 410°C	Claverton Energy		
			Gasolina	Fuel oil no. 2 (Diésel)	Fuel oil no. 6
Poder calorífico (J/g)	42,174.67 ± 307.12	42,897.33 ± 408.83	46,940.00	45,600.00	43,260.00
Densidad (g/mL)	0.7268 ± 0.0122	0.7603 ± 0.21	0.7410	0.8370	0.9590

Nota. En esta tabla se comparan los valores experimentales de los productos líquidos con los valores extraídos de Claverton Energy. Los datos del poder calorífico del líquido son valores promedios extraídos de las Tablas 14, 40 y 42.

Tabla 6. Clasificación del producto sólido según su poder calorífico

Producto	Sólido a 380°C	Sólido a 410°C	Perry: Manual del Ingeniero Químico	
			Carbón bituminoso tipo A	Carbón sub-bituminoso tipo B
Poder calorífico (J/g)	23,267.00 ± 0.01	34,214.33 ± 0.01	>32,600.00	<30,000.00 – 32,600.00

Nota. En esta tabla se comparan los valores experimentales de los productos sólidos con los valores extraídos del Perry: Manual del ingeniero químico 7ed. Los datos del poder calorífico del sólido son valores promedios extraídos de las Tablas 41 y 43.

Tabla 7. Promedio de los rendimientos máxicos de los productos líquidos y sólidos de la pirólisis a 380°C

Producto	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de desviación estándar	Intervalo de confianza 95%
Líquido (% m/m)	42.6247 ± 0.3590%	5.3855%	0.1263	± 13.3783%
Sólido (% m/m)	12.5995 ± 0.3324%	3.0049%	0.2385	± 7.4645%
Gas (% m/m)	39.2032 ± 0.3544%	9.1802%	0.2342	± 23.4169%
Material no pirolizado (% m/m)	5.5726 ± 0.3302%	1.2750%	0.2288	± 3.1672%

Nota. En esta tabla se muestran los rendimientos promedios de todos los productos de la pirólisis y su estadística descriptiva. Los datos se obtuvieron de la Tabla 16.

Tabla 8. Promedio de los rendimientos máxicos de los productos líquidos y sólidos de la pirólisis a 410°C

Producto	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de desviación estándar	Intervalo de confianza 95%
Líquido (% m/m)	66.9730 ± 0.3968%	3.8895%	0.0581	± 9.6621%
Sólido (% m/m)	3.1779 ± 0.3298%	0.5462%	0.1719	± 1.3568%
Gas (% m/m)	24.4396 ± 0.3395%	3.6183%	0.1480	± 8.9883%
Material no pirolizado (% m/m)	4.9277 ± 0.3301%	0.6701%	0.1239	± 1.6647%

Nota. En este cuadro se muestran los rendimientos promedios de todos los productos de la pirólisis y su estadística descriptiva. Los datos se obtuvieron de la Tabla 17.

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo principal de este trabajo fue realizar una pirólisis de mascarillas quirúrgicas para obtener productos líquidos y sólidos. Previamente a la pirólisis se realizó la caracterización de las mascarillas, luego se llevó a cabo el proceso a diferentes temperaturas para determinar su efecto sobre los rendimientos máxicos de los productos y por último, se caracterizaron los productos obtenidos.

Debido a que las mascarillas están compuestas por distintas piezas como las bandas elásticas, capas filtrantes y soporte de nariz, se determinó el porcentaje respecto a la masa total de la mascarilla que cada pieza representa y se obtuvo que los filtros representan el $81.3702 \pm 0.7548\%$ m/m, las bandas elásticas el $12.8365 \pm 0.5211\%$ m/m y $5.7934 \pm 0.2407\%$ m/m del soporte de nariz. Por otro lado, para el transporte y manejo de las mascarillas se determinó la densidad de bulto aireada con un valor de $0.0090 \pm 0.0017 \text{ g/cm}^3$ y una densidad de bulto compacta de $0.0361 \pm 0.0012 \text{ g/cm}^3$. Para el proceso de pirólisis se colocaron 20 mascarillas aproximadamente, no se llevó a cabo una reducción de tamaño debido a que se quería simular un proceso industrial en el cual las mascarillas se colocaran empacadas en una bolsa de plástico dentro del reactor con el fin de disminuir el contacto entre el material y la persona dentro del proceso, para lograr colocar una mayor cantidad de material dentro del reactor se puede llevar a cabo un proceso de compresión y al finalizar la pirólisis se podría utilizar un imán o un proceso de tamizaje para separar las piezas metálicas que contienen las mascarillas del producto sólido.

Para conocer las temperaturas a las cuales se llevaría a cabo el proceso de pirólisis se realizó un análisis termogravimétrico para cada pieza de la mascarilla. La Figura 13 muestra el comportamiento de la masa de los filtros y el soporte de nariz conforme aumenta la temperatura, a partir de eso se identificó que el material empieza a degradarse notoriamente alrededor de una temperatura de 410°C hasta llegar a los 480°C donde ocurre la mayor degradación del material a comparación del comportamiento en el rango de 480°C y 830°C donde la pérdida de masa es más leve y se observa que la cantidad de masa que no se degrada es mayor a comparación de la Figura 14 esto se debe a la pieza metálica del soporte de nariz que no se degrada. Por otro lado, en la Figura 14 se muestra el comportamiento de masa y temperatura de las bandas elásticas y se identificó que este material se degrada igualmente a una temperatura de 410°C hasta los 460°C donde se presenta otro cambio drástico en la masa debido a que sigue disminuyendo hasta alcanzar una temperatura de 640°C donde ya no se detecta más cambios en la masa debido a la sensibilidad del equipo.

A partir de las temperaturas que se identificaron en los análisis termogravimétricos se planteó trabajar el proceso a 410°C donde todos los componentes empiezan a degradarse y para la siguiente temperatura se planteó la de 460°C debido a que esa temperatura se siguen degradando las bandas elásticas, sin embargo, para alcanzar a esa temperatura se necesitaría una rampa de temperatura más rápida que la de 10°C cada 30 minutos y esto provocaría que el comportamiento del reactor fuera inestable alterando completamente el rompimiento de los componentes y por ende los productos que se generan, debido a esto

se evaluó una temperatura menor que fuera más fácil de alcanzar con la rampa de temperatura propuesta y donde aún se degradaran las piezas de la mascarilla quirúrgica evaluando así la temperatura de 380°C (Díaz, 2014). Por último, también se concluyó que a pesar de que las bandas elásticas requieran de mayor temperatura para seguir degradándose están solamente representan el $12.8365 \pm 0.5211\%$ m/m de la masa total de una mascarilla a comparación de los filtros que representan el $81.3702 \pm 0.7548\%$ m/m y requieren de menores temperaturas para degradarse.

Se realizó un análisis FTIR de los distintos filtros de la mascarilla quirúrgica y de sus bandas elásticas, en la ilustración 10 se puede observar el numero asignado para cada capa filtrante. Las figuras 7, 8 y 9 muestran los espectros de cada filtro, cada uno presenta tres grupos de bandas correspondientes al polipropileno, lo movimientos de tensión debido a los enlaces C-H a se observan s 2900 cm^{-1} , también se pueden encontrar bandas en la región de $1300 -1450 \text{ cm}^{-1}$ características de los enlaces C-C y por último se observan bandas provocadas por los enlaces $-\text{CH}_3$ en el rango de 1000 a 1200 cm^{-1} . Por otro lado, la Figura 10 muestra que el espectro de las bandas elásticas generó movimientos de tensión característicos de los grupos cetona con enlaces $\text{C}=\text{O}$ y de los enlaces $\text{C}=\text{C}$ en el rango de $1000 - 1250 \text{ cm}^{-1}$, estas bandas representan al PET. La temperatura a la cual inicia la degradación del polipropileno y el PET esta aproximadamente entre un rango de 330°C y 400°C . (Velandia, 2017).

Por medio de los espectros de FTIR se detectó la presencia de los polímeros de polipropileno y polietileno tereftalato (PET), sin embargo, es importante destacar las limitaciones de dicho análisis puesto que solamente presenta resultados cualitativos y no cuantitativos (Thain, 2012). Por otro lado, en mezclas complejas de componentes puros la dificultad para detectar aumenta (Thain, 2012). Se puede observar que para las bandas elásticas el FTIR detectó bandas características del PET pero en su análisis termogravimétrico se identificó que su degradación ocurre en dos pasos (410°C y 455°C), lo que indica que hay otros elementos presentes en las bandas elásticas. El PET es un termoplástico que pertenece a la familia de los poliésteres y tiene propiedades de resistencia mecánica debido a su rigidez debido a esto se suelen agregar aditivos que mejoren sus características de resistencia a altas temperaturas o elasticidad, en la Ilustración 11 se observa que el material de una mascarilla quirúrgica comúnmente es polipropileno y Spandex, teniendo el ultimo mejor elasticidad que el PET, usualmente se lleva a cabo una combinación de polímeros (Spandex y fibras de PET) con el fin de mejorar su elasticidad, resistencia y comodidad (Hua, 2017).

Para la caracterización de los productos líquidos se llevó a cabo un análisis de cromatografía de gases para detectar los componentes que estaban presentes en las muestras, se descartaron los componentes que tenían un porcentaje de coincidencia menor a 80% con el fin de reducir la lista y además se excluyeron los componentes que presentaban estructuras no acordes a los productos que se degradaron como algunos alcoholes o cicloalquenos que se detectaron. Para una temperatura de 380°C se obtuvo que los mayores porcentajes respecto al área del cromatograma pertenecen a hidrocarburos con cadenas de 9 (55.15%) y 5

(30.57%) carbonos y el resto son de componentes con cadenas de 6 y 9 carbonos. Para una temperatura de 410°C se detectaron principalmente hidrocarburos de 7 (60.69%), 9 (17.79%) y 6 (15.68%) carbonos. Cabe mencionar que a pesar de que el análisis demostró que en el producto líquido hay presencia de hidrocarburos con más de 7 carbonos presentes también se compararon los resultados con las reacciones de degradación térmica de la pirólisis, en la Ilustración 2 se observa que los diferentes productos que se generan de la degradación de los polímeros son hidrocarburos con cadenas más pequeñas, la presencia de componentes con cadenas más largas puede ocurrir por la presencia de otros compuestos más complejos como podría ser el PET, Spandex o algún otro aditivo como se mencionó anteriormente.

Al comparar los resultados anteriores con la literatura sobre la pirólisis de residuos de polipropileno y otros polímeros como se muestra en las Tablas 10 y 11, se observa que los componentes mencionados anteriormente (principalmente hidrocarburos con 5 carbonos) suelen estar presentes en los productos que se obtienen de la pirólisis de dichos polímeros. Debido a que el soporte para nariz normalmente esta recubierto por dos láminas de polietileno, también se compararon los valores con un cromatograma de polietileno en los cuales los componentes principales son cadenas más largas de carbono entre 8 y 17 carbonos (Tecnol, 2021). Por otro lado, se identificó una similitud en la estructura de los productos con los hidrocarburos que suelen estar presentes en la gasolina los cuales son: alcanos, alcanos ramificados y cicloalcanos y en el diésel con estructuras entre 5 y 10 carbonos. Se obtuvo valores para una densidad que se asemeja a la gasolina de 0.7268 ± 0.0125 g/mL y 0.7603 ± 0.0129 g/mL. Por último, se determinó el poder calorífico para la temperatura de 380°C y 410°C obteniendo valores de $42,174.67 \pm 0.01$ J/g y $42,897.33 \pm 0.01$ J/g respectivamente. En la Tabla 5 se observa que el valor obtenido para 380°C se acerca al poder calorífico del fuel oil No. 6 y el de 410°C al del diésel.

Los productos sólidos se clasificaron según su poder calorífico, se obtuvieron valores de $23,267.00 \pm 0.01$ J/g y $34,214.33 \pm 0.01$ J/g para una temperatura de 380°C y 410°C respectivamente, en la Tabla 6 se observa que el valor a 380°C se clasifica como carbón sub-bituminoso tipo B y para el de 410°C es carbón bituminoso tipo A de alta volatilidad. La densidad para los sólidos fue de 1.26 ± 0.01949 g/mL y 1.08 ± 0.1699 g/mL, estos valores tienen una amplia variación debido a la irregularidad que tenía el material granulado después del proceso de pirólisis dado que se obtuvo partículas gruesas y finas lo cual puede dificultar su almacenamiento o uso potencial ya que al tener diferentes tamaños de partículas aumenta la porosidad o espacios libres entre partículas generando así un mayor volumen el cual debe almacenarse.

Se realizaron los balances de masa globales a partir de la masa recuperada de los productos sólidos y líquidos obtenidos a una tasa de calentamiento de 10°C cada 30 minutos para que haya una mejor distribución de la temperatura en el sistema y reactor dado que una tasa de calentamiento rápida puede generar puntos más calientes en el reactor afectando así la cinética de la reacción, asimismo se tomó en cuenta el material no pirolizado el cual consta de piezas de metal que sirven para ajustar las mascarillas quirúrgicas, el

producto gaseoso se determinó a partir de la suposición de que no hubo pérdidas dentro del tubo por el cual pasaban los gases o dentro del sistema de condensación y todos los gases no condensables fueron ahogados en el recipiente con agua. Una de las principales fuentes de error fue la temperatura del reactor puesto que solamente se monitoreo el valor que indicaba la mufla por lo que se puede generar gradientes de temperatura modificando así la velocidad con la que se lleva a cabo la reacción y la tasa de generación de productos.

En las Tablas 7 y 8 se puede observar los rendimientos máxicos para los productos líquidos, gaseosos y sólidos a una temperatura final de 380°C en donde los valores fueron de $42.6247 \pm 5.3855\%$, $39.2032 \pm 9.1802\%$ y $12.5995 \pm 3.0049\%$ respectivamente y para la pirólisis a 410°C se obtuvo rendimientos de $66.9730 \pm 3.8895\%$, $24.4396 \pm 3.6183\%$ y $3.1779 \pm 1.3568\%$. Para comparar si había una diferencia significativa se realizaron distintos análisis estadísticos; para los productos líquidos se utilizó la prueba F (Tablas 19 y 20) y así poder determinar si las varianzas eran iguales y se determinó con una significancia del 95% que se acepta la hipótesis indicando que ambos grupos tienen varianzas iguales por lo que se realizó la prueba t (Tablas 21 y 22) para comparar medias de muestras con varianzas iguales y con un nivel de significancia del 95% descartando la hipótesis de que las medias para ambos grupos eran iguales. Se realizó el mismo procedimiento con los productos líquidos con la excepción de que en la prueba F se estableció que las varianzas de los grupos no eran iguales por lo que se realizó la prueba t para varianzas desiguales y de igual manera se concluyó que las medias de los grupos no coinciden.

Con lo expuesto anteriormente, se determinó que el cambio de temperatura de 380°C a 410°C es suficiente para indicar que si hay una diferencia significativa en los rendimientos de los productos líquidos y sólidos debido al efecto de la temperatura. Para determinar a cuál de las dos temperaturas se debe llevar a cabo el proceso de pirólisis de mascarillas quirúrgicas, se deben evaluar dos factores importantes, los cuales son el rendimiento de los productos obtenidos y el poder calorífico de cada uno, si lo que se busca dentro del proceso es el producto líquido principalmente se puede utilizar la temperatura de 410°C ya que el rendimiento aumenta y el poder calorífico en ambas temperaturas es similar. Por otro lado, si se desea obtener el producto sólido se puede llevar a cabo a una temperatura de 410°C puesto que el poder calorífico que aumento en un 47% respecto a la temperatura de 380°C, adicional a esto se puede evaluar el factor del consumo de energía del proceso a las diferentes temperaturas que se utilizaron en la experimentación para escoger a que temperatura es conveniente realizar el proceso.

IX. CONCLUSIONES

1. Se determinó que las mascarillas están compuestas por tres capas filtrantes ($82.3914 \pm 0.7548\%$ m/m), dos bandas elásticas ($12.8365 \pm 0.5211\%$ m/m) y un soporte de nariz ($5.7934 \pm 0.2407\%$ m/m). Por medio de espectroscopia infrarroja se detectó la presencia de polipropileno en los filtros y de PET en las bandas elásticas, sin embargo, el análisis termogravimétrico detectó la presencia de otros aditivos utilizados para mejorar las propiedades mecánicas de las mascarillas. Para finalizar con la caracterización de las mascarillas quirúrgicas se identificó que los componentes inician a degradarse alrededor de los 410°C y a 460°C también se siguen degradando las bandas elásticas, no obstante, para tener un mejor control de la temperatura se estableció un segundo de valor de 380°C donde los materiales se degradan de forma más lenta. Por lo tanto, la pirólisis se llevó a las temperaturas de 380°C y 410°C .

2. Se identificó que en la composición de los productos líquidos de la pirólisis a una temperatura de 380°C se presentaron hidrocarburos con cadenas de 9 (55.15%) y 5 (30.57%) carbonos mientras que para una temperatura de 410°C se obtuvieron hidrocarburos con cadenas de 7 carbonos (60.69%). Los productos líquidos poseen una densidad de 0.7268 ± 0.0122 g/mL y 0.7603 ± 0.0070 g/mL y un poder calorífico de $42,174.67 \pm 307.12$ J/g y $42,897.33 \pm 408.03$ J/g respectivamente. Estos valores indican que los productos tienen propiedades similares a la gasolina, diésel y fuel oil No. 6. Para los productos sólidos se obtuvo un poder calorífico de $23,267.00 \pm 549.88$ J/g y $34,214.33 \pm 1060.94$ J/g, a partir de estos valores se clasificaron como carbón subbituminoso tipo B y bituminoso tipo A.

3. Se obtuvo un rendimiento del producto líquido de $42.6247 \pm 5.3855\%$ y para el sólido de $12.5995 \pm 3.0049\%$ para una temperatura de 380°C . Por otro lado, para una temperatura de 410°C , el rendimiento del líquido fue de $66.9730 \pm 3.8895\%$ y de $3.1779 \pm 0.5462\%$ para el sólido. Los valores indican que al incrementar la temperatura final de operación mientras se mantiene la tasa de calentamiento, provoca una mayor cantidad del producto líquido y disminuye la del sólido, esto ocurre debido a que el incremento de temperatura permite degradar con mayor facilidad las cadenas presentes en las mascarillas quirúrgicas.

X. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar un análisis térmico diferencial de las mascarillas quirúrgicas y utilizar como referencias los polímeros de polipropileno y polietileno para identificar si siguen el mismo comportamiento a lo largo del calentamiento y así realizar correcciones en las temperaturas a las que se llevará el proceso de pirólisis.
2. Para determinar si los productos obtenidos pueden utilizarse como combustibles alternativos, se debe evaluar la estabilidad de los productos al exponerlos a diferentes condiciones de temperatura, humedad, luz y aire, asimismo, realizar análisis de rendimientos como pruebas de ignición y de emisiones.
3. Realizar un análisis de costo-beneficio en función de la energía que se utiliza en el proceso y la que se obtiene de los productos de la pirólisis para evaluar la viabilidad económica de realizar el proceso a escala industrial a diferentes temperaturas.
4. Realizar un análisis energético de la pirólisis y compararlo con la energía que requieren otros procesos como lo es la incineración de mascarillas quirúrgicas con el fin de evaluar su rentabilidad para un escalamiento industrial.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, M. (2014). *Estandarización y validación del método por cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masa (gc-ms), para el análisis de tres benzodicepinas y sus metabolitos en muestras biológicas de interés forense en el instituto nacional de medicina legal y ciencias forenses*. Universidad Tecnológica de Pereira, <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/9815adcc-eb65-4f41-a893-43514e07f82b/content>
- Acosta J & Pérez, R. (2012). *Estudio experimental y simulación de la saponificación del acetato de etilo en tres reactores CSTR en serie*, Tesis (Ingeniero Químico). Universidad de Cartagena. Facultad de Ciencias E Ingenierías. Programa de Ingeniería Química. Recuperado de <http://190.25.234.130:8080/jspui/handle/11227/107>.
- Alonso, I. S., Ruiz, S. G., Quintanilla, D. P., & Zarcero, S. M. (2009). *Análisis Instrumental*. In Google Books. Netbiblo. https://books.google.com.gt/books?id=7kqqf47xB1cC&dq=analisis+termogravimetria&hl=es&source=gs_navlinks_s
- Álvarez Medina, C. R. (2015). *Monitoreo estadístico de procesos batch: aplicaciones a reactores de polimerización*.
- Anderson, D; Sweeney, D & Williams, T. (2012). *Estadística para negocios y economía*. Mexico: Cengage Learning.
- Anleu Aceituno, S. M., Fuentes Paniagua, L. M., Melgar Bonilla, M. F., Muadi Braddick, P., Orozco López, L. P., Orozco Tzic, J. I., & Pérez Mijangos, C. A. (2019). *Evaluación de un sistema de pirólisis para material de empaque plástico de una empresa alimenticia*. Universidad del Valle de Guatemala. 628 p.
- Aragaw, T. A. (2020). *Surgical face masks as a potential source for microplastic pollution in the COVID-19 scenario*. Marine Pollution Bulletin, 159, 111517. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111517>
- Aragaw, T., & Mekonnen, B. (2021). *Current plastics pollution threats due to COVID-19 and its possible mitigation techniques: a waste-to-energy conversion via Pyrolysis*. Environmental Systems Research, 1-11.

- Arbeláez, J; Janna, F; Gutiérrez, C; Rentería, C; Velasco, J; Blanco, L & Chaparro, J. (2013). *Pirólisis rápida de biomasa*. Universidad Nacional de Colombia.
- Arauzo, J., Bimbela, F., Ábrego, J., Sánchez, J. L., & Gonzalo, A. (2014). *Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa*.
- Banco de Guatemala (s/f). Gob.gt. obtenido el 18 de diciembre de 2023. Recuperado de: <https://www.banguat.gob.gt>
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic press.
- Bermúdez, B, et al. (2018). *Conversión termoquímica de residuos plásticos en combustibles*. Jóvenes en la Ciencia, Revista de Divulgación Científica. Vol.4, No.1. <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/5902>
- BOE. (2023). *Boletín Oficial del Estado: miércoles 8 de febrero de 2023*. Núm.33. Extraído de: <https://www.boe.es/boe/dias/2023/02/08/>
- Carrasquero, F. (2004). *Fundamentos de polímeros*. Escuela Venezolana para la enseñanza de la química. Cuarta edición. [10.13140/RG.2.1.2573.0000](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2573.0000)
- Castellanos López, M. P., Imeri Cabrera, L. M., Morfín Ajá, P. I., Méndez García, P. A., Súchite Sosa, D. A., Maldonado de León, H. A., & Piedrasanta Ramírez, J. M. (2017). *Estudio técnico y evaluación económica de la pirólisis de estípita de palma africana Deli x AVROS a nivel laboratorio y su escalamiento*. Universidad del Valle de Guatemala. 355 p.
- CDCP, (2023). *Chemical and physical information about gasoline*. Centers of Disease Control and prevention. Extraído de: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp72-c3.pdf>
- Cinco cosas que debes saber sobre las mascarillas desechables y la contaminación por plásticos*. (2021, March 28). Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2021/03/1490132>
- Díaz, A; Sandoval, A & Hernandez, C. (2015). *Análisis y control de un reactor de parámetros distribuidos en el proceso de pirólisis*. Revista Mexicana Ingeniería Química; Vol. 14, No. 2. <https://www.redalyc.org/pdf/620/62041194029.pdf>

- Dharmaraj, S., Ashokkumar, V., Pandiyan, R., Munawaroh, H., Chew, K., Chen, W.-H., & Ngamcharussrivichai, C. (2021). *Pyrolysis: An effective technique for degradation of COVID-19 medical wastes*. Elsevier, 1-20.
- Gad, S. (2014) Diesel fuel. *Encyclopedia of Toxicology*. 3ra ed. 115 – 118. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00837-X>
- Díaz, A., Martínez, J., García Ramírez, R. Benítez R. & Marrero, S. (2015). *Análisis para la modelación y optimización geométrica de un reactor tipo tornillo sin-fín empleando el método de grafos dicromáticos*. Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. In Google Books. Pearson Educación. https://books.google.com.gt/books?id=tcV0l37tUr0C&dq=densidad&source=gbs_navlinks_s
- Guzmán Caraballo K., Castilla Caballero D. R. y Colina Marquez J. A., 2015. *Diseño, construcción y evaluación de un reactor fotocatalítico solar de placa plana para degradar ácido tereftálico*. Universidad de Cartagena, Tesis (Ingeniero Químico). Universidad de Cartagena. Facultad de Ciencias E Ingenierías. Programa de Ingeniería Química. Recuperado de <http://190.25.234.130:8080/jspui/handle/11227/143>.
- El petróleo y su comportamiento*. (2020). Gob.es. Recuperado de: https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/petroleo_y_comportamiento.aspx
- Harussani, M., Sapuan, S., Rashid, U., & Khalina, A. (2021). *Plastic waste conversion into electrical, thermal and fuel energy via incinerations and pyrolysis amidst COVID-19 pandemic*. *Africa & International Use of Energy*, 1-9.
- Hossain, M; Ferdous, M; Islam, M; Mustafi, N; Haniu, H. (2019). *Production of liquid fuel from co-pyrolysis of polythene waste and rice straw*. Volume 160, 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.126>.
- Hua, T; Wong, N. (2017). *Study on properties of elastic core-spun yarns containing a mix of spandex and PET/PTT bi-component filament as core*. Sage Journals, Vol. 88. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0040517517693982>

- Huang, J. (2017). *Studies on thermal decomposition behaviors of polypropylene using molecular dynamics simulation*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/94/1/012160/pdf>
- Idowu, G; Olonimoyo, E. (2023). *How has COVID-19 medical face mask altered the dynamics of pollutants from incinerated wastes?*. Journal of Hazardous Materials Advances. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772416623001225>
- López, A., & Goyanes, S. (2017). *Food Powder Properties*. Universidad de Buenos Aires. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21198-0>
- Maddah, H. (2016). *Polypropylene as a Promising Plastic: A Review*. American Journal of Polymer Science. <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20160601.01>
- Mahmood, S, et al. (2020). *Strategies for Rational Use of Personal Protective Equipment (PPE) Among Healthcare Providers During the COVID-19 Crisis*. Cureus, 12(5). <https://www.cureus.com/articles/32667-strategies-for-rational-use-of-personal-protective-equipment-ppe-among-healthcare-providers-during-the-covid-19-crisis>
- Mangas, I. (2014). Lubricating oils. Encyclopedia of Toxicology. 3ra ed. 670-676. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00525-X>
- Melillo, G. (2022). *Yes, 'single use' masks are recyclable. Here's how*. The hill. Extraído de: <https://thehill.com/changing-america/sustainability/environment/3597482-yes-single-use-masks-are-recyclable-heres-how/>
- Noguera, B. (2021). *Reactores semi-continuos o semi-batch*. IQR: ingeniería química. Extraído de: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/01/reactores-semi-continuos-o-semi-batch.html>
- Pinedo, A. (2013). *Universidad Nacional de Educación a Distancia "obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual"*. Consejo superior de investigaciones científicas. https://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf

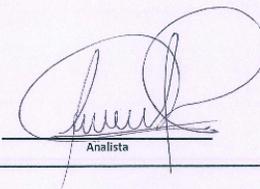
- Piqué, Teresa M., & Vázquez, Analía. (2012). *Uso de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento*. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, 3(2), 62-71. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112012000100004&lng=es&tlng=es.
- Perry, R. (1997). *Perry's chemical engineers' handbook* (7 ma ed., Vol.1). Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Reiland, B.. (2023). *Oil check: How is gasoline made? A general overview*. Extraído de: Motus. <https://www.motus.com/blog/how-is-gasoline-made/>
- Ribeiro, F; Okoffo, D; O'Brien, J; Kaserzon, S; Mueller, J. (2020). *Quantitative analysis of selected plastics in high commercial value Australian seafood by Pyrolysis Gas Chromatography Mass Spectrometry*. *Environmental Science & Technology* 2020 54 (15), 9408-9417. DOI: 10.1021/acs.est.0c02337
- Obando, G. (2015). *Condiciones de diseño de un Reactor de pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos (ROS)*. Universidad de Manizales.
- San Martín-Rodríguez, L., & Camacho-Bejarano, R. (2021). *Análisis de los materiales para la fabricación de mascarillas: el reto de hacer frente a la escasez de equipos de protección individual*. *Enfermería Clínica*, 31, S73–S77. <https://doi.org/10.1016/j.enfcli.2020.12.031>
- Sarker, M; Rashid, M. (2015). *Polypropylene Waste Plastic Conversion into Fuel Oil by using Thermal Degradation with Fractional Process*. Vol, 2. 1-10.
- Sendrós, C. F. (s/f). *Modelización y Control de Temperatura de un Reactor "Batch" para un Proceso Químico Exotérmico*.
- Serrano, F. (2017). *Introducción a la ciencia de los polímeros*. Extraído de: https://www.researchgate.net/figure/Figura-12-b-Estructura-del-polipropileno-PP-se-usa-en-telas-cuerdas-y-plasticos_fig2_286457627
- Skrzyniarz, M., Sajdak, M., Zajemska, M., et al. (2022). *Plastic Waste Management towards Energy Recovery during the COVID-19 Pandemic: The Example of Protective Face Mask Pyrolysis*. *Energies* 15(7) 2679 <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/7/2629>

- Still, K. (2023). *Fuel oils*. Reference Module in Biomedical Sciences. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00751-X>
- Thain, S. (2022). *IR Spectroscopy and FTIR Spectroscopy: How an FTIR Spectrometer Works and FTIR Analysis*. Technology Networks: Analysis & Separations. <https://www.technologynetworks.com/analysis/articles/ir-spectroscopy-and-ftir-spectroscopy-how-an-ftir-spectrometer-works-and-ftir-analysis-363938>
- Velandia, J. (2017). *Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja*. Facultad de Ingeniería- Universidad EAN. Vol, 5. 1-26
- Walendziewski, J. 2005. *Craqueo continuo de residuos plásticos*. Fuel Processing Technology. 86(12):1265_1278.
- Zamora, Y. (2013). *Determinación experimental de la eficiencia de un secador de túnel rotatorio en proceso discontinuo utilizando grano de café tipo Arábigo en pergamino*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de ingeniería.

ANEXOS

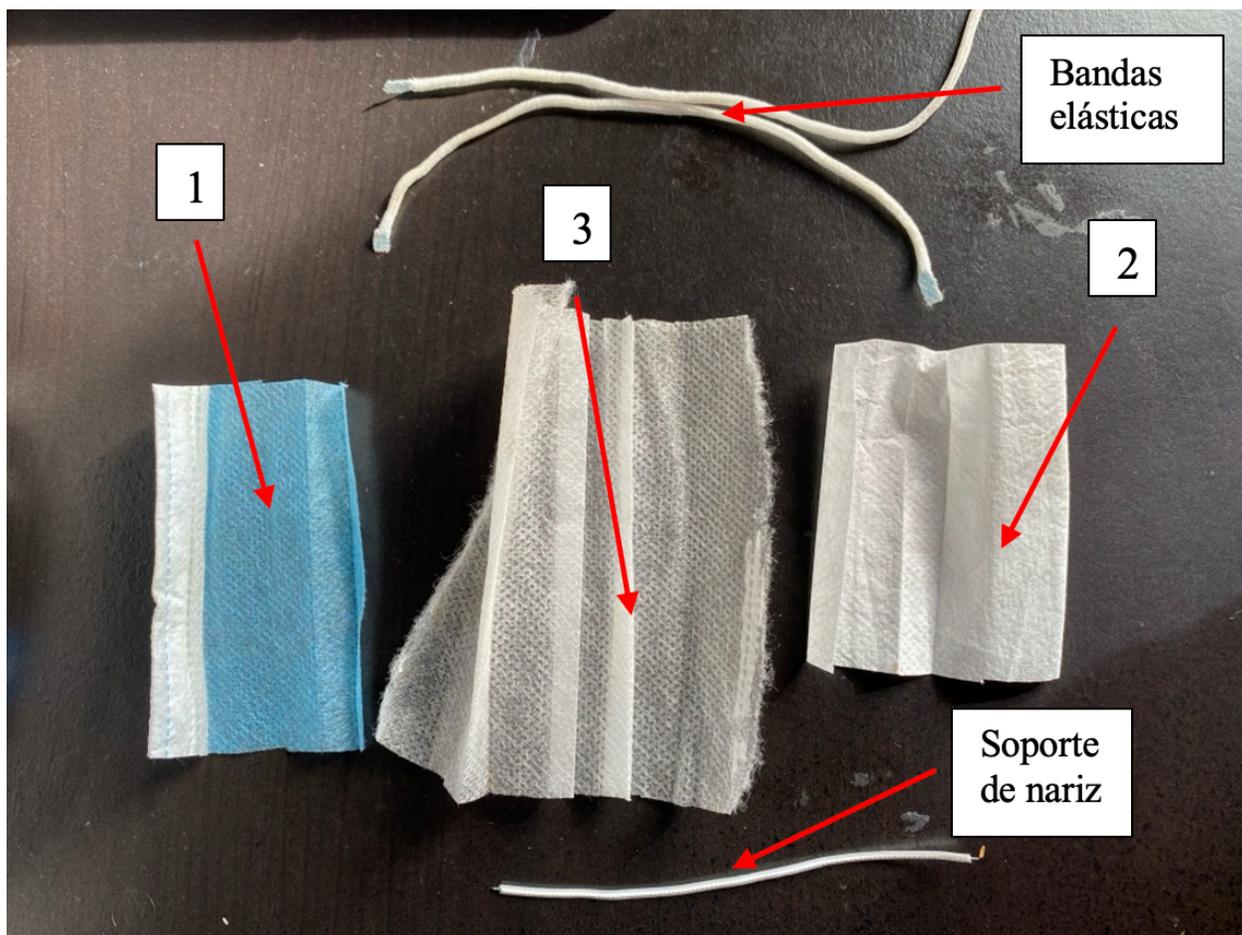
A. CARACTERIZACIÓN MASCARILLAS QUIRÚRGICAS

Ilustración 9. Certificado de análisis termogravimétrico por parte del laboratorio de Cementos Progresos (CETEC)

 <p>CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala. Tel: 2285-4178 cetec@cempro.com</p>				Orden de Trabajo (OT) 43449 Fecha de emisión 2023-10-04 Página 1 de 1 Área de laboratorio QC Fecha de recepción 2023-03-30	
Información de la muestra	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencia Las Margaritas Guatemala, Guatemala	
	Contacto	Loida Morales	Correo electrónico	lmorales3@cempro.com	Teléfono 2286 4100
Información de la muestra	Procedencia	Proyecto	Fecha de muestreo	-	
	Lugar de ensayo	Laboratorio CETEC			Muestreo realizado por: Cliente
	Proyecto	Pírolisis de mascarilla quirúrgica			Fecha de OT 2023-03-30
Fecha de ensayo 2023-04-10					
INFORME DE ENSAYO PÉRDIDA AL FUEGO ASTM C114					
TEMPERATURA DE CALCINACIÓN: 950°C					
No.	IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS				%
1	Tela de mascarilla				92.00
2	Tela de mascarilla				93.90
3	Elástico de mascarilla				99.70
4	Elástico de mascarilla				99.80
-Última Línea-					
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  Analista </div> <div style="text-align: center;">  Jefe de Laboratorio/Coordinador </div> </div>					
Observaciones:					
<small> CETEC NO se hace responsable de planes de muestreo y muestros definidos por el cliente. CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe. Este informe NO es un certificado de calidad. Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados de los ensayo(s) realizado(s). Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2285-4178 o al correo cetec@cempro.com. </small>					
FOR-001926					

Nota. junto al certificado del análisis termogravimétrico se proporcionaron los datos crudos en Excel para realizar las gráficas características de los análisis TGA. Dentro del certificado se muestra el porcentaje de la masa que se degrado durante el análisis TGA para cada corrida y componente evaluado de las mascarillas quirúrgicas. Los componentes que están descritos como tela de mascarilla incluyen cada uno de los filtros de la mascarilla y el soporte de nariz.

Ilustración 10. Identificación de los distintos componentes de las mascarillas quirúrgicas



Nota. La imagen anterior muestra todos los elementos de los cuales está hecha una mascarilla quirúrgica y la sección de los filtros de la mascarilla se clasifican según los siguientes números: 1. Primer capa de filtración, 2. Segunda capa de filtración y 3. Tercera capa de filtración.

Ilustración 11. Ficha técnica de mascarilla quirúrgica grupo



FICHA TÉCNICA – MASCARILLA QUIRURGICA

IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO			
Nombre:	Mascarilla Quirúrgica		
Marca:	T-SHIELD		
Material:	SPUNBOND 25 GSM – MELTBLOWN 25 GSM – SPUNBOND 25 GSM		
Color:	CELESTE		
Tallas:	17cm X 9,5 cm		
Presentación:	Caja x 50 unidades.		

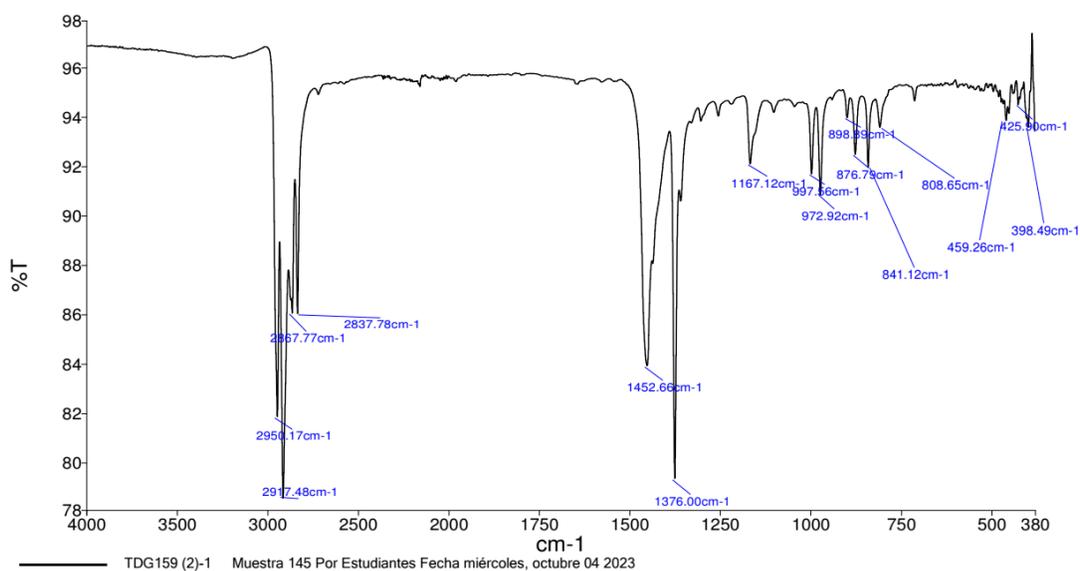
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Función:	<p>Evitar la proyección de gotitas de saliva o secreciones de las vías aéreas durante la espiración del usuario. En caso de utilización por parte del personal sanitario, las mascarillas quirúrgicas protegen al paciente y su entorno (aire, superficies, material, campo operatorio). En caso de utilización por parte del paciente portador de enfermedades contagiosas, evitan que el paciente contamine su entorno y el ambiente que lo rodea.</p> <p>Proteger al usuario de infecciones transmisibles por gotitas o de proyecciones de líquidos biológicos. En este último caso, las mascarillas quirúrgicas deben disponer de una película impermeable. También pueden venir equipadas con una visera para proteger los ojos.</p>
Látex:	NO CONTIENE
R.S.P. N°	02270-01-DM
R.E.	105/2020.
Resistencia Bacteriana	BFE > 95%
Sistema de Sellado	Por Ultrasonido
Vigencia:	5 años
Almacenamiento:	Lugar fresco y seco a temperatura entre 10° y 30° C.
Uso:	Producto descartable para un solo uso. No reutilizar.

CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO								
Anatómico:	Si: <input checked="" type="checkbox"/>	No: <input type="checkbox"/>	Meltblown filter:	Si: <input checked="" type="checkbox"/>	No: <input type="checkbox"/>	Resistente:	Si: <input checked="" type="checkbox"/>	No: <input type="checkbox"/>
Suave:	Si: <input checked="" type="checkbox"/>	No: <input type="checkbox"/>	Flexible:	Si: <input checked="" type="checkbox"/>	No: <input type="checkbox"/>	Elasticidad:	Si: <input checked="" type="checkbox"/>	No: <input type="checkbox"/>

- Mascarilla Quirúrgica de Tres pliegues con Triple Capa Hipoalergénica
- Textura suave para un uso cómodo
- Filtro Meltblown 25 GSM
- BFE > 95%
- Libre de latex
- Lazo de oreja 30% Spandex 70% Nylon

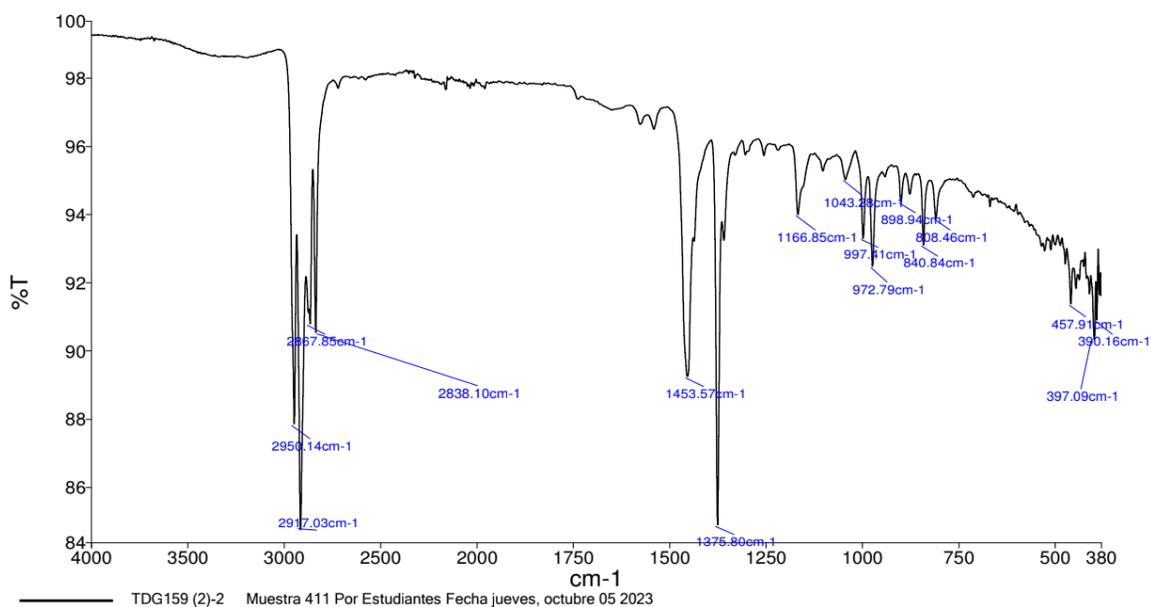
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL FILTRO			
PROPIEDADES MELTBLOWN 25 gr/m ²			
	UNIDADES	ESPECIFICACIÓN	VALORES
GRAMAJE	gr/m ²	Valor Nominal +/- 5%	25,1
RESISTENCIA MD	N/5cm	<30	14,3
ELONGACIÓN MD	%	<50	16,2
RESISTENCIA CD	N/5cm	<20	10,8
ELONGACION CD	%	<50	21,5
PERMEABILIDAD AL AIRE	L/m ² .S	>100	200

Figura 7. Espectro FTIR capa 1



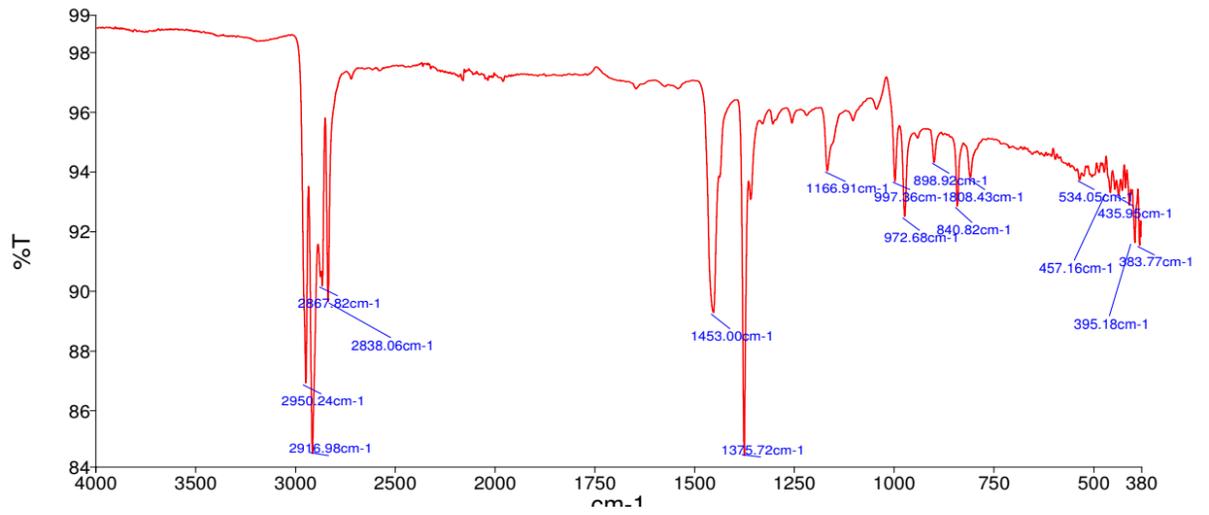
Nota. la figura anterior muestra el espectro del análisis FTIR de la capa de filtración 1, esto se llevó a cabo en el laboratorio de análisis avanzado en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 8. Espectro FTIR capa 2



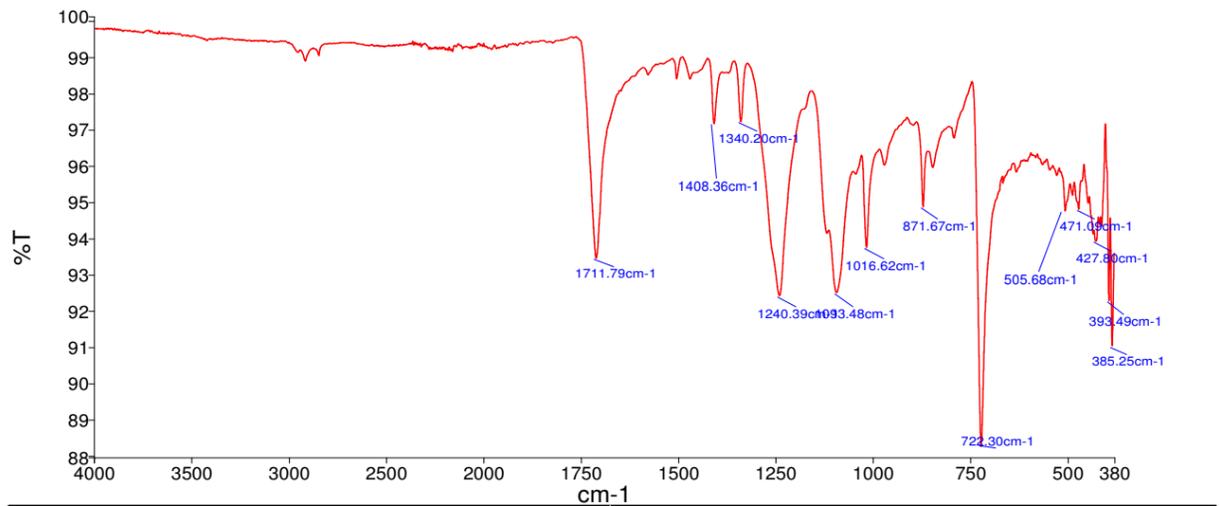
Nota. la figura anterior muestra el espectro del análisis FTIR de la capa de filtración 2, esto se llevó a cabo en el laboratorio de análisis avanzado en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 9. Espectro FTIR capa 3



Nota. la figura anterior muestra el espectro del análisis FTIR de la capa de filtración 3, esto se llevó a cabo en el laboratorio de análisis avanzado en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 10. Espectro FTIR bandas elásticas



Nota. la figura anterior muestra el espectro del análisis FTIR de las bandas elásticas, esto se llevó a cabo en el laboratorio de análisis avanzado en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

B. CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTOS LÍQUIDOS Y SÓLIDOS

Tabla 9. Clasificación de carbón por rangos

Class/group	Fixed carbon limits (dry, mineral-matter-free basis), %		Volatile matter limits (dry, mineral-matter-free basis), %		Gross calorific value limits (moist, mineral-matter-free basis)†				Agglomerating character
	Equal or greater than	Less than	Greater than	Equal or less than	MJ/kg		Btu/lb		
					Equal or greater than	Less than	Equal or greater than	Less than	
Anthracitic:									
Meta-anthracite	98	—	—	2	—	—	—	—	Nonagglomerating
Anthracite	92	98	2	8	—	—	—	—	
Semianthracite‡	86	92	8	14	—	—	—	—	
Bituminous:									
Low-volatile bituminous coal	78	86	14	22	—	—	—	—	Commonly agglomerating¶
Medium-volatile bituminous coal	69	78	22	31	—	—	—	—	
High-volatile A bituminous coal	—	69	31	—	32.6	—	14,000§	—	
High-volatile B bituminous coal	—	—	—	—	30.2	32.6	13,000§	14,000	
High-volatile C bituminous coal	—	—	—	—	26.7	30.2	11,500	13,000	
					24.4	26.7	10,500	11,500	Agglomerating
Subbituminous:									
Subbituminous A coal	—	—	—	—	24.4	26.7	10,500	11,500	Nonagglomerating
Subbituminous B coal	—	—	—	—	22.1	24.4	9,500	10,500	
Subbituminous C coal	—	—	—	—	19.3	22.1	8,300	9,500	
Lignitic:									
Lignite A	—	—	—	—	14.7	19.3	6,300	8,300	
Lignite B	—	—	—	—	—	14.7	—	6,300	

Nota. Se utilizó esta tabla para clasificar el producto sólido en base al valor obtenido del poder calorífico, la tabla se obtuvo de la séptima Edición del Perry: Manual del Ingeniero Químico.

Tabla 10. Lista de componentes del cromatograma GC/MS de residuos plásticos de polipropileno

Peak Number	Retention Time (min.)	Trace Mass (m/z)	Compound Name	Compound Formula	Molecular Weight	Probability %	CAS Number
1	1.60	41	1-Propene, 2-methyl-	C ₄ H ₈	56	23.7	115-11-7
2	1.91	43	Pentane	C ₅ H ₁₂	72	83.7	109-66-0
3	1.95	55	Cyclopropane, 1,2-dimethyl-, cis-	C ₅ H ₁₀	70	17.4	930-18-7
4	2.31	43	Pentane, 2-methyl-	C ₆ H ₁₄	86	34.2	107-83-5
5	2.48	41	1-Pentene, 2-methyl-	C ₆ H ₁₂	84	28.2	763-29-1
6	2.63	69	2-Pentene, 4-methyl-, (Z)-	C ₆ H ₁₂	84	19.0	691-38-3
7	2.94	67	Isopropenylcyclopropane	C ₆ H ₁₀	82	9.40	4663-22-3
8	2.99	67	1,3-Pentadiene, 2-methyl-, (E)-	C ₆ H ₁₀	82	9.06	926-54-5
9	3.05	56	1-Pentene, 2,4-dimethyl-	C ₇ H ₁₄	98	47.8	2213-32-3
10	3.11	55	2-Pentene, 3-ethyl-	C ₇ H ₁₄	98	8.42	816-79-5
11	3.14	81	2,4-Dimethyl 1,4-pentadiene	C ₇ H ₁₂	96	46.3	4161-65-3
12	3.28	41	Pentane, 2-bromo-2-methyl-	C ₆ H ₁₃ Br	164	5.93	4283-80-1
13	3.40	43	Hexane, 3-methyl-	C ₇ H ₁₆	100	65.0	589-34-4
14	3.52	43	2-Pentanone	C ₅ H ₁₀ O	86	67.9	107-87-9
15	3.56	56	1-Hexene, 2-methyl-	C ₇ H ₁₄	98	23.9	6094-02-6
16	4.74	43	Heptane, 4-methyl-	C ₈ H ₁₈	114	64.7	589-53-7
17	5.91	69	Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1 α ,3 α ,5 α)-	C ₉ H ₁₈	126	27.0	1795-27-3
18	5.99	43	2,4-Dimethyl-1-heptene	C ₉ H ₁₈	126	58.3	19549-87-2
19	6.34	69	Cyclohexane, 1,3,5-	C ₉ H ₁₈	126	28.2	1795-26-2

Nota. Esta figura se utilizó para comparar los componentes presentes el producto líquido de las mascarillas quirúrgicas con el de residuos de polipropileno para encontrar compuestos similares, esta lista se extrajo del documento: "Polypropylene waste plastic conversion into fuel oil by using thermal degradation with fractional process".

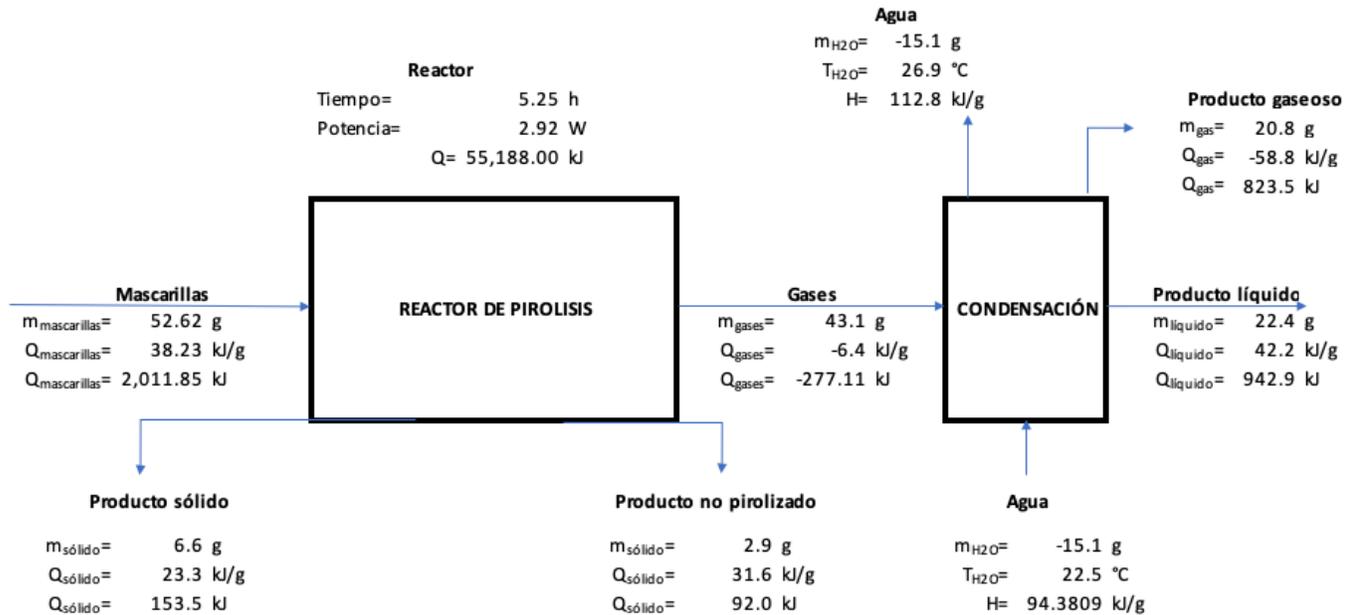
Tabla 11. Lista de componentes de degradación característicos de distintos tipos de polímeros

Polymer	Characteristic decomposition product(s)	Indicator ions (m/z ratio)	Retention time (min)
PS	Styrene	104, 78	5.835
	Styrene dimer: 3-butene-1,3-diylidibenzene	91, 130 , 193, 208	12.875
	Styrene trimer: 5-hexene-1,3,5-triyltribenzene	91, 117, 194, 312	16.765
PP	n-pentane	55, 72	2.105
	2-methyl-1-pentene	56, 69, 84	2.235
	2,4, 6-dimethyl-1-heptene	70, 83, 126	5.15
PET	benzene	78, 52	2.825
	Vinyl benzoate	105, 77, 148, 51	8.42
	BENZOIC ACID	105, 122, 77	9.095
	diphenyl	154, 131,76	10.525
	divinil terephthalate	175, 104,	11.77
	4-(vinylloxycarbonyl) benzoic acid	149, 121	12.105
	Ethan-1,2-diylidibenzoate	105, 77, 227	15.27
	2- (benzoyloxy)ethyl vinyl terephthalate	297, 149	17.445
	Ethan-1,2-diyl divinyl diterephthalate	364, 325, 296, 219	20.13
	Bis(2-(benzoyloxy)ethyl) terephthalate	105, 297, 149	29
PMMA	Methyl acrylate	55, 85	2.4
	Methyl methacrylate	69, 100, 89	3.405
	(Z)-trimethyl 4,6-dimethylhept-2-ene-2,4,6-tricarboxylate	121, 149	13.425
	(Z)-dimethyl 2,4-dimethylpent-2-enedioate	67, 95, 127, 111, 154	9.065
	dimethyl 2, 2-dimethyl-4-methylenepentanedioate	81, 101, 109, 125, 140	9.45
	C11H18O4	81, 95, 109, 123	10.055
PE	1-Nonene (C9)	83,97, 111	5.815
	1, 9-decadiene (C10)	67, 81, 95, 110,123	6.895
	1-decene (C10)	83, 97, 111, 140	6.97
	n-decane (C10)	71, 85, 98, 113, 142	7.06
	1-undecene (C11)	83, 97,111,126, 152	7.97
	3-tetradecene (nist) or 1-dodecene (C12)	83, 97, 111, 125	8.87
	1-tridecene (C13)	83, 97, 111,125	9.695
	1-tetradecane (C14)	83,97, 111,125,140	10.465
	1 pentadecene (C15)	83, 97,111	11.185
	1-hexadecene (C16)	-	11.865
	1-eicosene (C20)	83, 97,111	14.255
	C17	83, 97	12.51
	1-heptene (C7)	70, 83, 98	3.175
	C8	-	4.575
C6	-	2.27	
PVC	Benzene	78,52	2.855
	Toluene	91,65	4.165
	Indene	116, 119	7.640
	Styrene	104, 78	5.835

Nota. Esta figura se utilizó para determinar los compuestos característicos que resultan de la degradación de distintos polímeros como el polipropileno, polietileno, poliestireno entre otros. La figura se obtuvo del artículo: "Quantitative analysis of selected plastics in high commercial value Australian seafood by pyrolysis gas chromatography mass spectrometry".

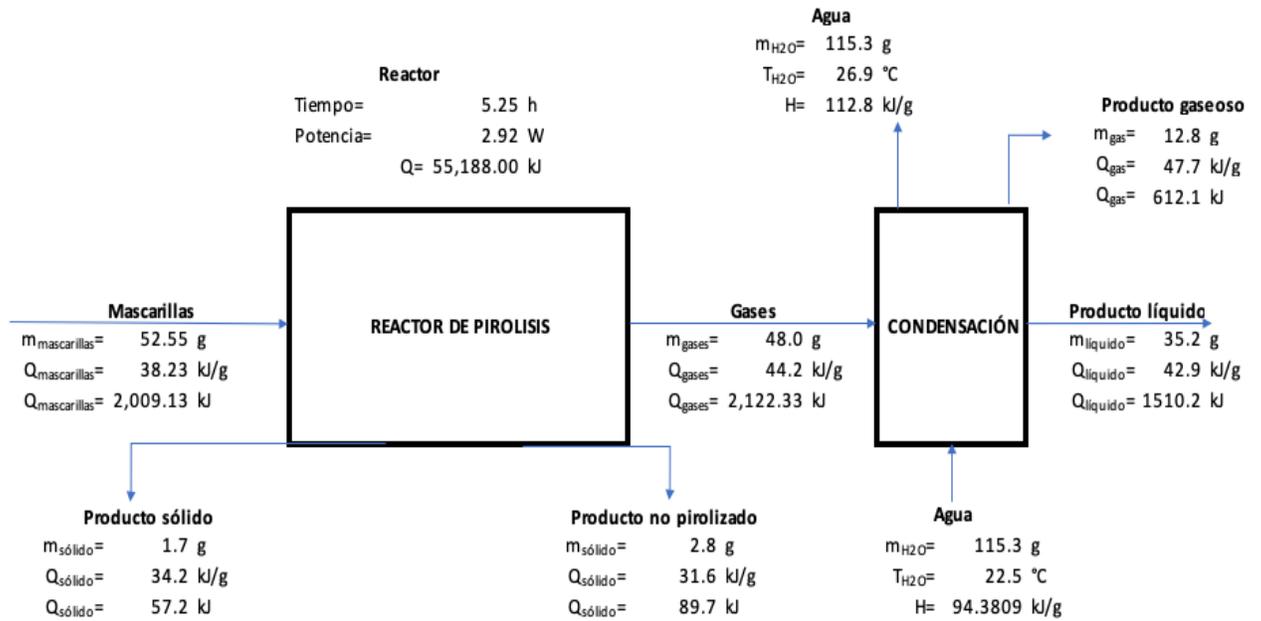
C. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA PARA EL PROCESO DE PIRÓLISIS

Figura 11. Balance de masa y energía para el sistema de pirólisis a 380°C



Nota. El poder calorífico aproximado del gas se obtuvo a partir de la literatura de “Pyrolysis of Face Mask Waste from the COVID-19 Pandemic”, por otro lado, el material no pirolizado se tomó como aluminio y se obtuvo el poder calorífico según ese material.

Figura 12. Balance de masa y energía para el sistema de pirólisis a 410°C



Nota. El poder calorífico aproximado del gas se obtuvo a partir de la literatura de “Pyrolysis of Face Mask Waste from the COVID-19 Pandemic”, por otro lado, el material no pirolizado se tomó como aluminio y se obtuvo el poder calorífico según ese material.

D. CÁLCULOS DE MUESTRA

Calculo 1: Porcentaje representativo de las bandas elásticas en una mascarilla quirúrgicas

$$\text{Porcentaje} = \frac{\text{masa bandas elásticas}}{\text{masa total de la mascarilla}} = \frac{2.2667 \text{ g}}{2.6620 \text{ g}} * 100\% = 81.39\%$$

Nota. Los valores se obtuvieron de la Tabla 23. Esta ecuación también se utilizó para determinar el porcentaje que representan los filtros y el soporte de nariz que se encuentran en la mascarilla quirúrgica.

Calculo 2: Determinación de la densidad para el producto de la pirólisis a 380°C

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{\text{masa del líquido}}{\text{volumen leído en la probeta}} = \frac{10.0122 \text{ g producto líquido}}{14.00 \text{ mL}} = 0.71 \text{ g/mL}$$

Nota. Los valores de la masa del líquido de la pirólisis se obtuvieron de la Tabla 39, esta ecuación también se utilizó para el cálculo de las densidades de los productos líquidos y sólidos obtenidos de la pirólisis a una temperatura de 410°C.

Calculo 3: Rendimiento del producto líquido a 380°C

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{masa producto líquido}}{\text{masa total de mascarillas en el reactor}} = \frac{24.3012 \text{ g}}{50.3202 \text{ g}} * 100\% = 48.2931\%$$

Nota. Los valores se obtuvieron del balance de masa promedio de la pirólisis de mascarillas quirúrgicas de la Figura 11. Esta ecuación se utilizó para obtener el rendimiento de los productos líquidos, sólidos y gaseosos de la pirólisis a las temperaturas de 380°C y 410°C.

Calculo 4: Determinación del agua utilizada en el condensador a partir de las temperaturas de entrada y salida para la pirólisis a 380°C

$$Q = mCp_{\text{agua}}\Delta T$$

$$m = \frac{Q}{Cp_{\text{agua}} * (T_2 - T_1)} = \frac{1869.71 \text{ kJ}}{4.184 \frac{\text{kJ}}{\text{g} * ^\circ\text{C}} (26.9 - 22.5)^\circ\text{C}} = 101.6 \text{ g de agua}$$

Q = Calor que se disipara de los gases que salen del reactor de pirólisis

m = masa de agua

C_p = calor específico del agua

ΔT = delta de temperaturas de entradas y salidas del agua

Nota. La ecuación para la determinación del agua utilizada en el condensador se obtuvo a partir de la ecuación de calor sensible del Perry: Manual del ingeniero químico 7ed. Los valores de calor se obtuvieron a través del balance de energía en las Figuras 11 y 12.

E. DATOS CALCULADOS

Tabla 12. Componentes seleccionados de la cromatografía de gases para el producto líquido del proceso de pirólisis a 380°C

No. de pico	Componente	Área	Porcentaje de coincidencia
14	2,4-dimetil-1-hepteno	43.45%	90
2	2-metil-1-pentano	15.99%	94
8	4-metilheptano	8.25%	95
1	pentano	7.03%	94
13	1,3,5-trimetilciclohexano	6.77%	91
22	2,6-dimetilnonano	5.71%	87
3	2,4-dimetil-1-penteno	5.40%	90
6	2,4-dimetil-1,3-pentadieno	2.16%	96
7	4-metil-2-heptano (trans)	1.87%	95
4	Benceno	1.80%	94
12	2,4-dimetilheptano	1.58%	95

Nota. La tabla presenta los componentes que se seleccionaron por su porcentaje de coincidencia (> 80%), además se corrigió el área representativa del cromatograma en base a los compuestos seleccionados. Los datos se obtuvieron de la Tabla 41.

Tabla 13. Componentes seleccionados de la cromatografía de gases para el producto líquido del proceso de pirólisis a 410°C

No. de pico	Componente	Área	Porcentaje de coincidencia
7	2,4-dimetil-1-hepteno	44.00%	90
2	4-metilheptano	10.31%	94
16	2,6-dimetilnonano	17.79%	81
6	1,3,5-trimetilciclohexano	15.68%	93
10	6-6-dimetilhepta-2,4-dieno	3.72%	81
28	4,6-dimetildodecano	3.13%	95
29	2,3,6,7-tetrametiloctano	2.70%	80
5	2,4-dimetilheptano	1.69%	95
1	4-metil-2-heptano (trans)	0.97%	95

Nota. La tabla presenta los componentes que se seleccionaron por su porcentaje de coincidencia (> 80%), además se corrigió el área representativa del cromatograma en base a los compuestos seleccionados. Los datos se obtuvieron de la Tabla 42.

Tabla 14. Masa y volumen utilizados para medir la densidad del producto líquido a 380°C

Temperatura	380°C	410°C
No. de muestra	Densidad (g/mL)	Densida (g/mL)
1	0.7152 ± 0.0072	0.7663 ± 0.0074
2	0.7258 ± 0.0073	0.7560 ± 0.0075
3	0.7395 ± 0.0073	0.7587 ± 0.0075

Nota. Datos obtenidos a una presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura 23°C.

Tabla 15. Masa y volumen utilizados para medir la densidad del producto sólido a 380°C

Temperatura	380°C	410°C
No. de muestra	densidad (g/mL)	densidad (g/mL)
1	1.47 ± 0.1111	0.93 ± 0.0909
2	1.27 ± 0.0141	1.22 ± 0.0909
3	1.05 ± 0.0141	1.09 ± 0.1111

Nota. Datos obtenidos a una presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura 23°C.

Tabla 16. Rendimiento de los productos y material no pirolizado de la pirólisis a 380°C

% Rendimiento líquido	% Rendimiento sólido	% Rendimiento gas	% Rendimiento material no pirolizado
48.2931 ± 2.21E-03 %	15.9242 ± 2.01E-03 %	28.2765 ± 2.07E-03 %	7.0194 ± 1.99E-03 %
37.5757 ± 1.96E-03 %	11.7969 ± 1.85E-03 %	46.0139 ± 2.02E-03 %	4.6135 ± 1.84E-03 %
42.0051 ± 2.04E-03 %	10.0775 ± 1.89E-03 %	42.82325 ± 2.05E-03 %	5.0849 ± 1.88E-03 %

Nota. El material no pirolizado se refiere a la tira de metal que se encuentra en el soporte de la mascarilla.

Tabla 17. Rendimiento de los productos y material no pirolizado de la pirólisis a 410°C

% Rendimiento líquido	% Rendimiento sólido	% Rendimiento gas	% Rendimiento material no pirolizado
62.5417 ± 2.25E-06 %	3.0601 ± 1.91E-03 %	28.2765 ± 1.99E-03 %	6.1217 ± 1.91E-03 %
69.8220 ± 2.29E-06 %	3.7734 ± 1.88E-03 %	21.0892 ± 1.92E-03 %	5.3153 ± 1.88E-03 %
68.5553 ± 2.33E-06 %	2.7003 ± 1.92E-03 %	23.9531 ± 1.98E-03 %	4.7913 ± 1.92E-03 %

Nota. El material no pirolizado se refiere a la tira de metal que se encuentra en el soporte de la mascarilla.

Tabla 18. Masa de productos y material no pirolizado de la pirólisis a 410°C

Masa producto líquido ± 0.1 (g)	Masa producto sólido ± 0.1 (g)	Masa producto gas ± 0.1 (g)	Masa material no pirolizado ± 0.1 (g)
32.7252	1.6012	14.7958	3.2032
37.2312	2.0121	11.2454	2.8343
35.6573	1.4045	12.4586	2.4921

Tabla 19. Prueba F para varianza de dos muestras para el producto líquido

Temperatura	380°C	410°C
Media	0.428177498	0.669218674
Varianza	0.002969336	0.001378252
Observaciones	3	3
Grados de libertad	2	2
F	2.154421269	
P(F<=f) una cola	0.317015362	
Valor crítico para F (una cola)	19	

Nota. Se realizó la prueba estadística con valor f de 0.05, debido a que el valor F es mayor a f se estableció que no hay suficiente evidencia estadística como para rechazar que las varianzas son iguales por lo tanto se acepta y se concluye que la varianza para ambos grupos es igual.

Tabla 20. Prueba F para varianza de dos muestras para el producto sólido

Temperatura	380°C	410°C
Media	0.123703704	0.031809386
Varianza	0.00101893	3.00405E-05
Observaciones	3	3
Grados de libertad	2	2
F	33.91859906	
P(F<=f) una cola	0.028638033	
Valor crítico para F (una cola)	19	

Nota. Se realizó la prueba estadística con valor f de 0.05, debido a que el valor F es menor a f se puede rechazar la hipótesis que las varianzas son iguales por lo tanto se concluye que la varianza para ambos grupos es no igual.

Tabla 21. Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales para el producto líquido

Temperatura	380°C	410°C
Media	0.123703704	0.031809386
Varianza	0.00101893	3.00405E-05
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0.000524485	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	4.914367735	
P(T<=t) una cola	0.003980733	
Valor crítico de t (una cola)	2.131846786	
P(T<=t) dos colas	0.007961466	
Valor crítico de t (dos colas)	2.776445105	

Nota. Se realizó la prueba estadística con valor t de prueba de 4.91, debido a que el valor de T es menor a t se puede rechazar la hipótesis de que las medias de ambos grupos son iguales.

Tabla 22. Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales para el producto líquido

Temperatura	380°C	410°C
Media	0.123703704	0.031809386
Varianza	0.00101893	3.00405E-05
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	4.914367735	
P(T<=t) una cola	0.019499969	
Valor crítico de t (una cola)	2.91998558	
P(T<=t) dos colas	0.038999938	
Valor crítico de t (dos colas)	4.30265273	

Nota. Se realizó la prueba estadística con valor t de prueba de 4.91, debido a que el valor de T es menor a t se puede rechazar la hipótesis de que las medias de ambos grupos son iguales.

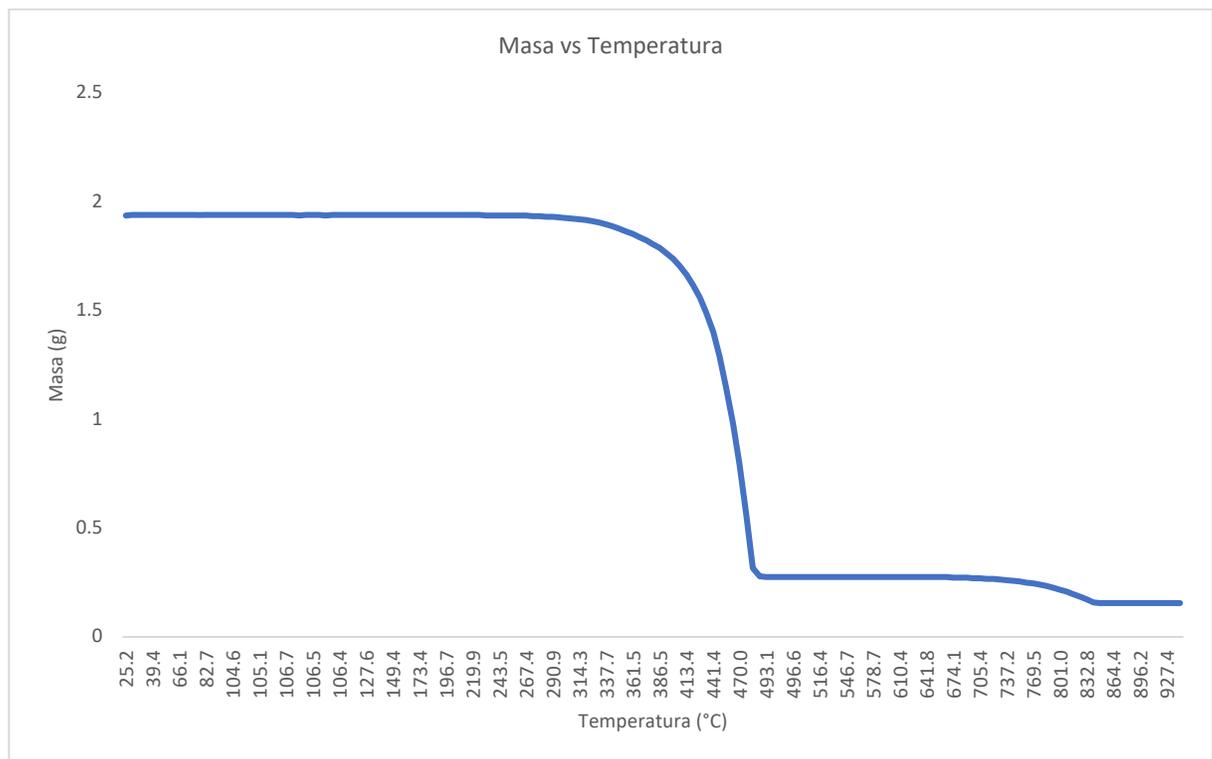
F. DATOS ORIGINALES

Tabla 23. Masa de una mascarilla quirúrgica y cada uno de sus componentes.

No. de corrida	Masa total mascarilla ± 0.0001 (kg)	Filtros ± 0.0001 (kg)	Elásticos ± 0.0001 (kg)	Pieza de soporte nariz ± 0.0001 (kg)
1	0.0026	0.0021	0.0003	0.0002
2	0.0028	0.0023	0.0003	0.0002
3	0.0026	0.0021	0.0003	0.0002

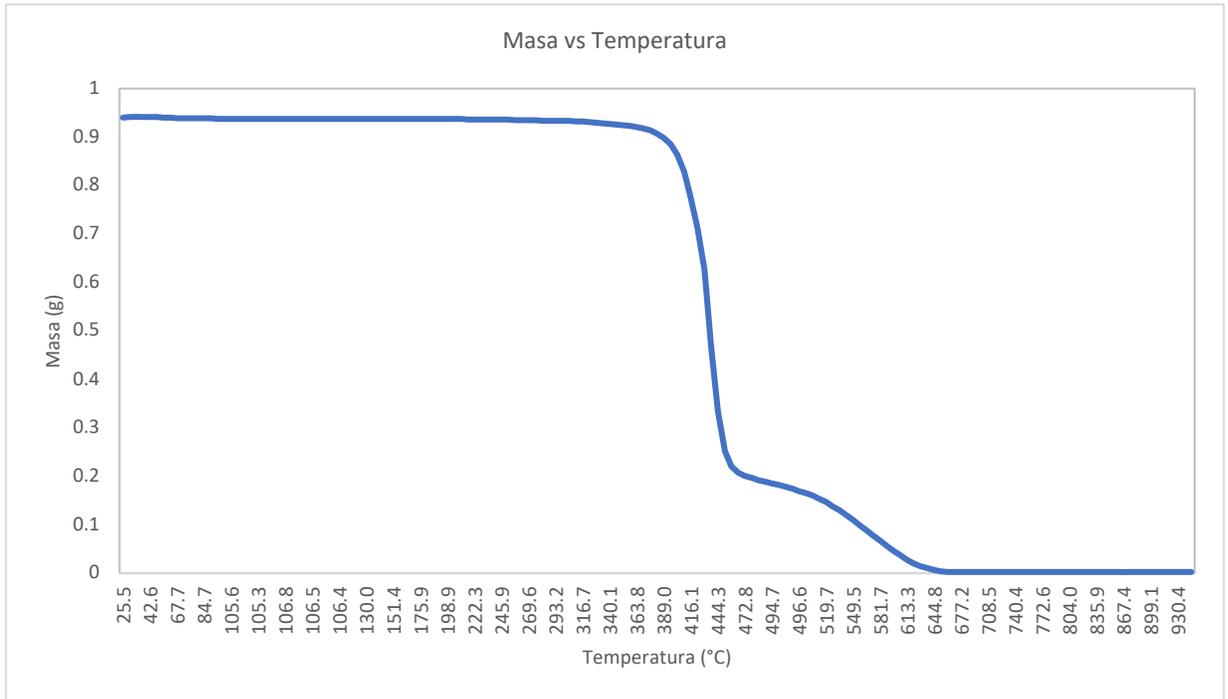
Nota. Datos obtenidos a una presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura 23°C. Se utilizó una balanza marca OHAUS.

Figura 13. comportamiento de la tela de mascarillas quirúrgicas con la temperatura en el análisis termogravimétrico.



Nota. El material que se analizó en el análisis termogravimétrico fueron los filtros y el soporte de la mascarilla quirúrgica.

Figura 14. Comportamiento del elástico de mascarillas quirúrgicas con la temperatura en el análisis termogravimétrico.



Nota. El material que se analizó en el análisis termogravimétrico fueron las bandas elásticas de las mascarillas quirúrgicas.

Tabla 24. Datos originales para la tasa de calentamiento a una temperatura de 380°C

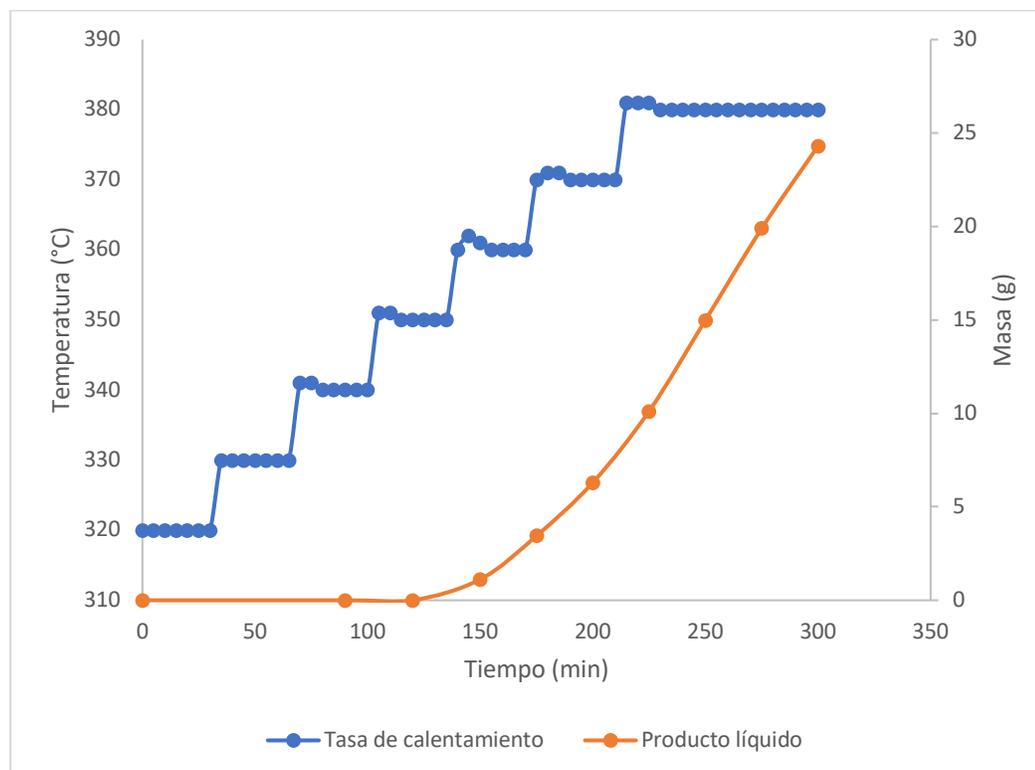
$T \pm 1$ (°C)	Tiempo ± 0.1 (min)	hora	$T \pm 1$ (°C)	Tiempo ± 0.1 (min)	hora
320	0.0	10:17	360	160.0	12:55
320	5.0	10:20	360	165.0	13:00
320	10.0	10:25	360	170.0	13:05
320	15.0	10:30	370	175.0	13:10
320	20.0	10:35	371	180.0	13:15
320	25.0	10:40	371	185.0	13:20
320	30.0	10:45	370	190.0	13:25
330	35.0	10:50	370	195.0	13:30
330	40.0	10:55	370	200.0	13:35
330	45.0	11:00	370	205.0	13:40
330	50.0	11:05	370	210.0	13:45
330	55.0	11:10	381	215.0	13:50
330	60.0	11:15	381	220.0	13:55
330	65.0	11:20	381	225.0	14:00
341	70.0	11:25	380	230.0	14:05
341	75.0	11:30	380	235.0	14:10
340	80.0	11:35	380	240.0	14:15
340	85.0	11:40	380	245.0	14:20
340	90.0	11:45	380	250.0	14:25
340	95.0	11:50	380	255.0	14:30
340	100.0	11:55	380	260.0	14:35
351	105.0	12:00	380	265.0	14:40
351	110.0	12:05	380	270.0	14:45
350	115.0	12:10	380	275.0	14:50
350	120.0	12:15	380	280.0	14:55
350	125.0	12:20	380	285.0	15:00
350	130.0	12:25	380	290.0	15:05
350	135.0	12:30	380	295.0	15:10
360	140.0	12:35	380	300.0	15:15
362	145.0	12:40	380	305.0	15:20
361	150.0	12:45	380	310.0	15:25
360	155.0	12:50	380	315.0	15:30

Tabla 25. Datos originales para la recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación de la primera corrida a 380°C

Tiempo ± 0.1 (min)	Masa producto líquido ± 0.0001 (g)	masa acumulada del producto líquido ± 0.0001 (g)
0.0	0.00	0.00
90.0	0.00	0.00
120.0	0.00	0.00
150.0	1.12	1.12
175.0	2.33	3.45
200.0	2.85	6.30
225.0	3.82	10.12
250.0	4.87	14.99
275.0	4.91	19.90
300.0	4.40	24.30

Nota. Los tiempos se empezaron a tomar cada 5 minutos desde que cayó la primera gota del producto líquido.

Figura 15. Recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación durante la primera corrida de pirólisis a una temperatura de 380°C



Nota. los datos se obtuvieron de las Tablas 23 y 24. Datos obtenidos a presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura de 23°C en el laboratorio de operaciones unitarias de UVG.

Tabla 26. Datos originales para la tasa de calentamiento de la segunda corrida a una temperatura de 380°C

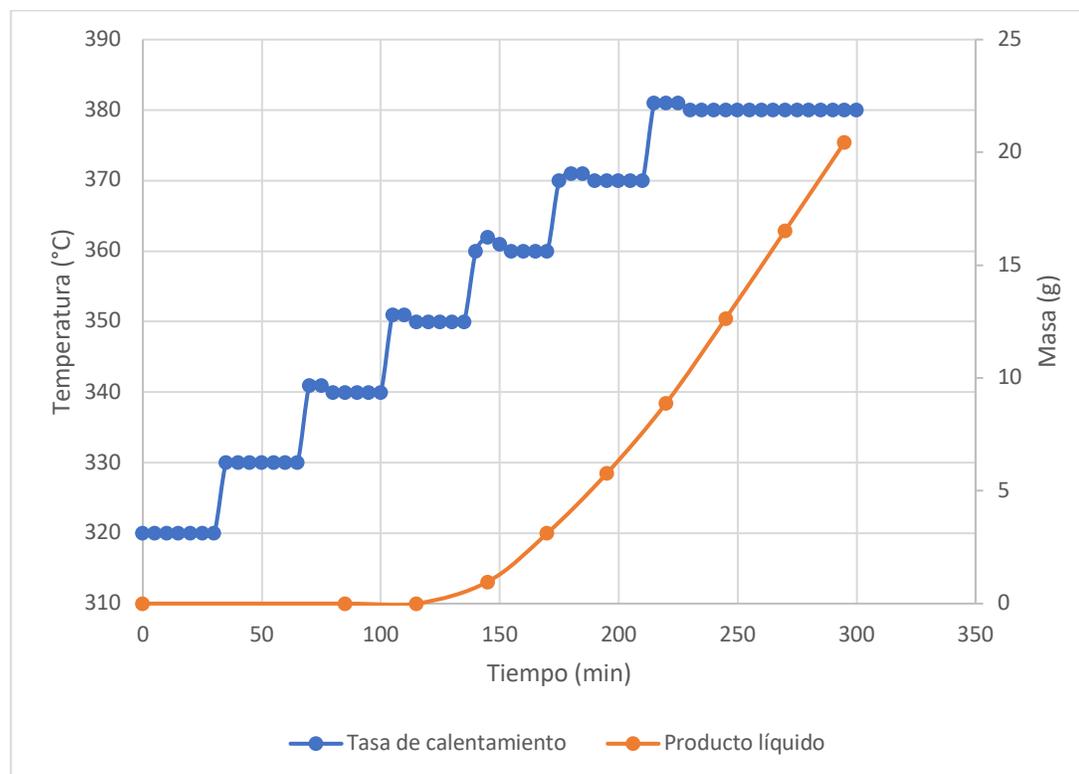
$T \pm 1$ (°C)	Tiempo ± 0.1 (min)	hora	$T \pm 1$ (°C)	Tiempo ± 0.1 (min)	hora
320	0.0	10:45	360	160.0	13:25
320	5.0	10:50	360	165.0	13:30
320	10.0	10:55	360	170.0	13:35
320	15.0	11:00	370	175.0	13:40
320	20.0	11:05	371	180.0	13:55
320	25.0	11:10	371	185.0	14:10
320	30.0	11:15	370	190.0	14:25
330	35.0	11:20	370	195.0	14:40
330	40.0	11:25	370	200.0	14:55
330	45.0	11:30	370	205.0	15:10
330	50.0	11:35	370	210.0	15:25
330	55.0	11:40	381	215.0	15:30
330	60.0	11:45	381	220.0	15:35
330	65.0	11:50	381	225.0	15:40
341	70.0	11:55	380	230.0	15:45
341	75.0	12:00	380	235.0	15:50
340	80.0	12:05	380	240.0	15:55
340	85.0	12:10	380	245.0	16:00
340	90.0	12:15	380	250.0	16:05
340	95.0	12:20	380	255.0	16:10
340	100.0	12:25	380	260.0	16:15
351	105.0	12:30	380	265.0	16:20
351	110.0	12:35	380	270.0	16:25
350	115.0	12:40	380	275.0	16:30
350	120.0	12:45	380	280.0	16:35
350	125.0	12:50	380	285.0	16:40
350	130.0	12:55	380	290.0	16:45
350	135.0	13:00	380	295.0	16:50
360	140.0	13:05	380	300.0	16:55
362	145.0	13:10	380	305.0	17:00
361	150.0	13:15	380	310.0	17:05
360	155.0	13:20	380	315.0	17:10

Tabla 27. Datos originales para la recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación de la segunda corrida a 380°C

Tiempo ± 0.1 (min)	Masa producto líquido ± 0.0001 (g)	masa acumulada del producto líquido ± 0.0001 (g)
0	0.0000	0.0000
85	0.0000	0.0000
115	0.0000	0.0000
145	0.9705	0.9705
170	2.1505	3.121
195	2.6502	5.7712
220	3.1202	8.8914
245	3.7512	12.6426
270	3.8905	16.5331
295	3.9201	20.4532

Nota. Los tiempos se empezaron a tomar cada 5 minutos desde que cayó la primera gota del producto líquido.

Figura 16. Recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación durante la primera corrida de pirólisis a una temperatura de 380°C



Nota. los datos se obtuvieron de las Tablas 25 y 26. Datos obtenidos a presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura de 23°C en el laboratorio de operaciones unitarias de UVG.

Tabla 28. Datos originales para la tasa de calentamiento de la tercera corrida a una temperatura de 380°C

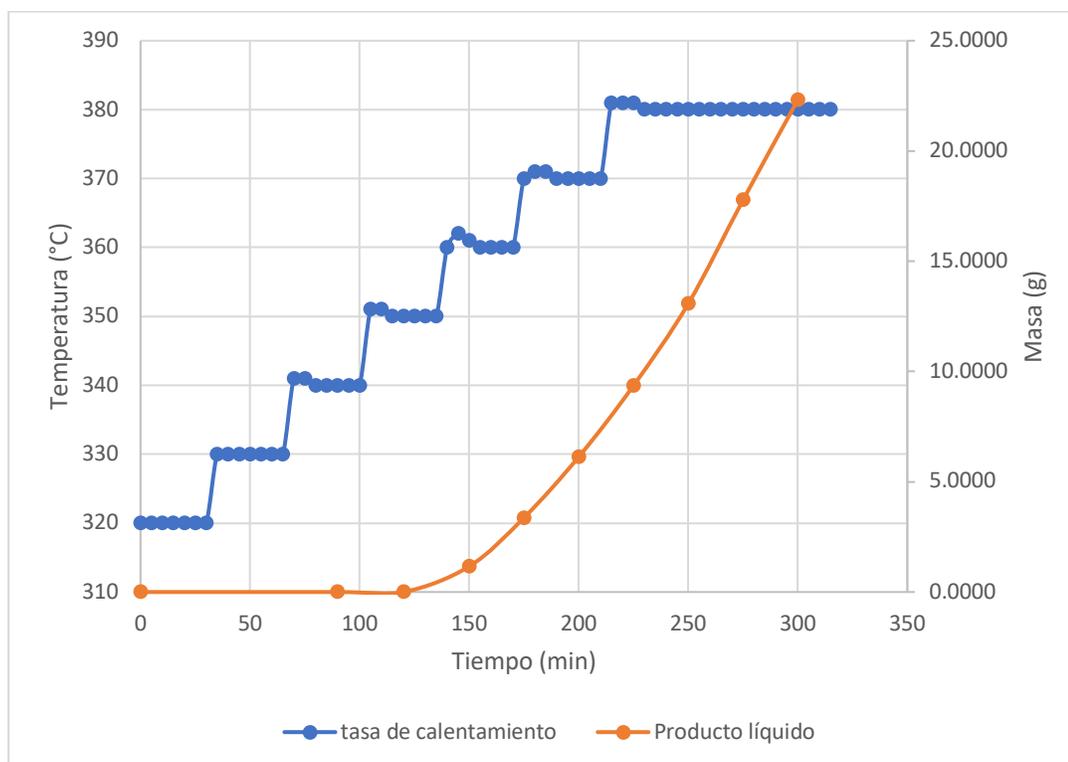
$T \pm 1$ (°C)	Tiempo ± 0.1 (min)	hora	$T \pm 1$ (°C)	Tiempo ± 0.1 (min)	hora
320	0.0	10:45	360	160.0	13:25
320	5.0	10:50	360	165.0	13:30
320	10.0	10:55	360	170.0	13:35
320	15.0	11:00	370	175.0	13:40
320	20.0	11:05	371	180.0	13:55
320	25.0	11:10	371	185.0	14:10
320	30.0	11:15	370	190.0	14:25
330	35.0	11:20	370	195.0	14:40
330	40.0	11:25	370	200.0	14:55
330	45.0	11:30	370	205.0	15:10
330	50.0	11:35	370	210.0	15:25
330	55.0	11:40	381	215.0	15:30
330	60.0	11:45	381	220.0	15:35
330	65.0	11:50	381	225.0	15:40
341	70.0	11:55	380	230.0	15:45
341	75.0	12:00	380	235.0	15:50
340	80.0	12:05	380	240.0	15:55
340	85.0	12:10	380	245.0	16:00
340	90.0	12:15	380	250.0	16:05
340	95.0	12:20	380	255.0	16:10
340	100.0	12:25	380	260.0	16:15
351	105.0	12:30	380	265.0	16:20
351	110.0	12:35	380	270.0	16:25
350	115.0	12:40	380	275.0	16:30
350	120.0	12:45	380	280.0	16:35
350	125.0	12:50	380	285.0	16:40
350	130.0	12:55	380	290.0	16:45
350	135.0	13:00	380	295.0	16:50
360	140.0	13:05	380	300.0	16:55
362	145.0	13:10	380	305.0	17:00
361	150.0	13:15	380	310.0	17:05
360	155.0	13:20	380	315.0	17:10

Tabla 29. Datos originales para la recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación de la tercera corrida a 380°C

Tiempo ± 0.1 (min)	Masa producto líquido ± 0.0001 (g)	masa acumulada del producto líquido ± 0.0001 (g)
0	0.0000	0.0000
90	0.0000	0.0000
120	0.0000	0.0000
150	1.1603	1.1603
175	2.2070	3.3673
200	2.7601	6.1274
225	3.2312	9.3586
250	3.7123	13.0709
275	4.7029	17.7738
300	4.5403	22.3141

Nota. Los tiempos se empezaron a tomar cada 5 minutos desde que cayó la primera gota del producto líquido.

Figura 17. Recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación durante la primera corrida de pirólisis a una temperatura de 380°C



Nota. los datos se obtuvieron de las Tablas 27 y 28. Datos obtenidos a presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura de 23°C en el laboratorio de operaciones unitarias de UVG.

Tabla 30. Datos originales para la tasa de calentamiento de la primera corrida a una temperatura de 410°C

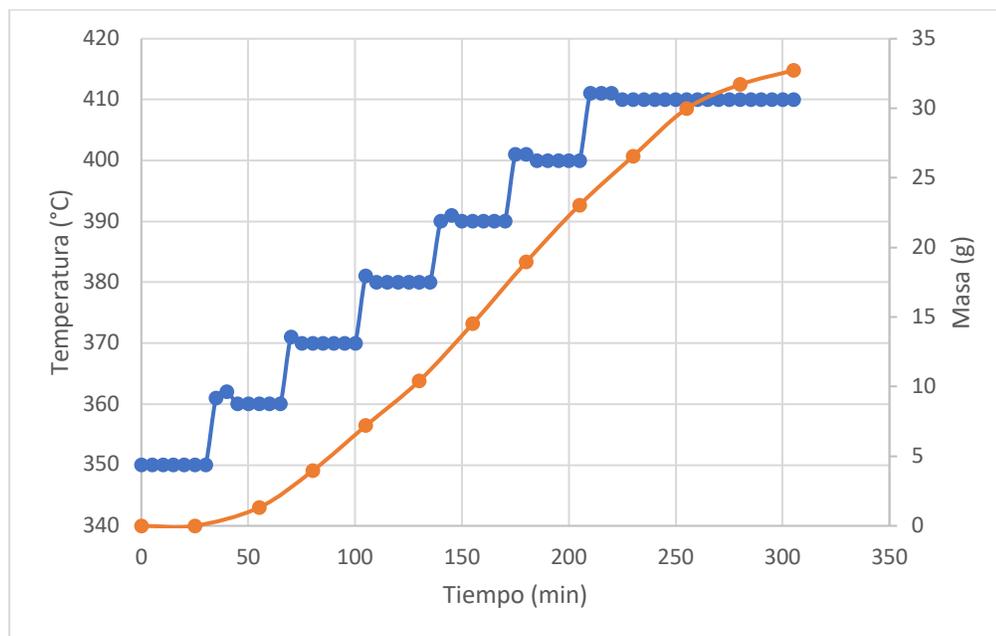
T ± 1 (°C)	Tiempo ± 0.1 (min)	hora	T ± 1 (°C)	Tiempo ± 0.1 (min)	hora
350	0.0	10:08	390	160.0	14:48
350	5.0	10:13	390	165.0	14:53
350	10.0	10:18	390	170.0	14:58
350	15.0	10:23	401	175.0	15:03
350	20.0	10:28	401	180.0	15:08
350	25.0	10:33	400	185.0	15:13
350	30.0	10:38	400	190.0	15:18
361	35.0	10:43	400	195.0	15:23
362	40.0	10:48	400	200.0	15:28
360	45.0	10:53	400	205.0	15:33
360	50.0	10:58	411	210.0	15:38
360	55.0	11:03	411	215.0	15:43
360	60.0	11:08	411	220.0	15:48
360	65.0	11:13	410	225.0	15:53
371	70.0	11:18	410	230.0	15:58
370	75.0	11:23	410	235.0	16:03
370	80.0	11:28	410	240.0	16:08
370	85.0	11:33	410	245.0	16:13
370	90.0	11:38	410	250.0	16:18
370	95.0	11:43	410	255.0	16:23
370	100.0	11:48	410	260.0	16:28
381	105.0	12:53	410	265.0	16:33
380	110.0	12:58	410	270.0	16:38
380	115.0	13:03	410	275.0	16:43
380	120.0	13:08	410	280.0	16:48
380	125.0	13:13	410	285.0	16:53
380	130.0	13:18	410	290.0	16:58
380	135.0	13:23	410	295.0	17:03
390	140.0	14:28	410	300.0	17:08
391	145.0	14:33	410	305.0	17:13
390	150.0	14:38	410	310.0	17:18
390	155.0	14:43	410	315.0	17:23

Tabla 31. Datos originales para la recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación de la primera corrida a 410°C

Tiempo ± 0.1 (min)	Masa producto líquido ± 0.0001 (g)	masa acumulada del producto líquido ± 0.0001 (g)
0	0.0000	0.0000
25	0.0000	0.0000
55	1.3102	1.3102
80	2.6311	3.9413
105	3.2503	7.1916
130	3.2212	10.4128
155	4.1121	14.5249
180	4.4231	18.948
205	4.1023	23.0503
230	3.5022	26.5525
255	3.4133	29.9658
280	1.7351	31.7009
305	1.0243	32.7252

Nota. Los tiempos se empezaron a tomar cada 5 minutos desde que cayó la primera gota del producto líquido.

Figura 18. Recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación durante la primera corrida de pirólisis a una temperatura de 410°C



Nota. los datos se obtuvieron de las Tablas 29 y 30. Datos obtenidos a presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura de 23°C en el laboratorio de operaciones unitarias de UVG.

Tabla 32. Datos originales para la tasa de calentamiento de la segunda corrida a una temperatura de 410°C

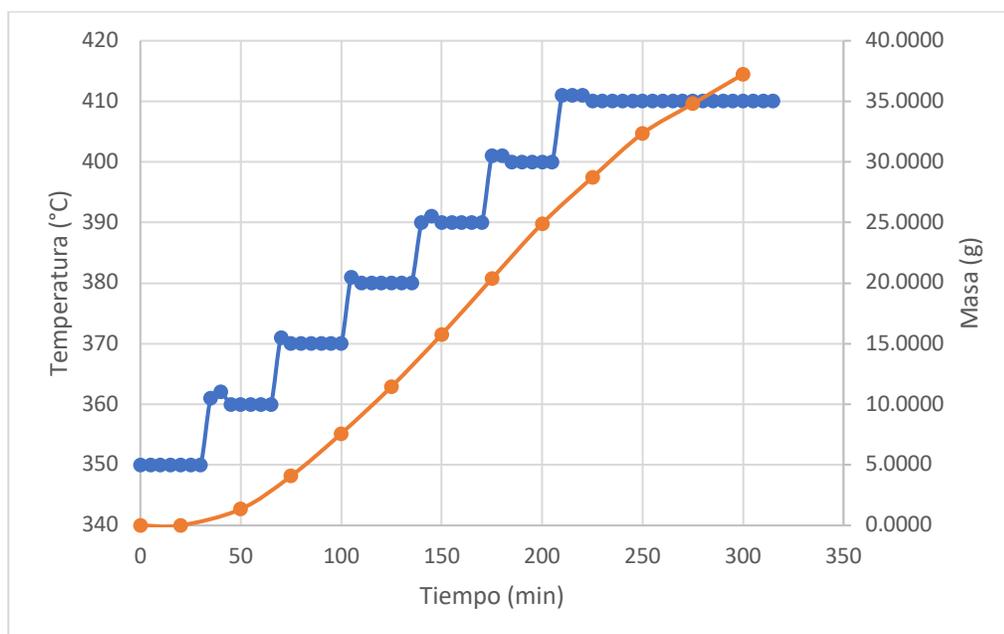
T ± 1 (°C)	Tiempo ± 0.1 (min)	hora	T ± 1 (°C)	Tiempo ± 0.1 (min)	hora
350	0.0	10:07	390	160.0	14:48
350	5.0	10:12	390	165.0	14:53
350	10.0	10:17	390	170.0	14:58
350	15.0	10:22	401	175.0	15:03
350	20.0	10:27	401	180.0	15:08
350	25.0	10:32	400	185.0	15:13
350	30.0	10:37	400	190.0	15:18
361	35.0	10:42	400	195.0	15:23
362	40.0	10:47	400	200.0	15:28
360	45.0	10:52	400	205.0	15:33
360	50.0	10:57	411	210.0	15:38
360	55.0	11:02	411	215.0	15:43
360	60.0	11:07	411	220.0	15:48
360	65.0	11:12	410	225.0	15:53
371	70.0	11:17	410	230.0	15:58
370	75.0	11:22	410	235.0	16:03
370	80.0	11:27	410	240.0	16:08
370	85.0	11:32	410	245.0	16:13
370	90.0	11:37	410	250.0	16:18
370	95.0	11:42	410	255.0	16:23
370	100.0	11:47	410	260.0	16:28
381	105.0	12:52	410	265.0	16:33
380	110.0	12:57	410	270.0	16:38
380	115.0	13:02	410	275.0	16:43
380	120.0	13:07	410	280.0	16:48
380	125.0	13:12	410	285.0	16:53
380	130.0	13:17	410	290.0	16:58
380	135.0	13:22	410	295.0	17:03
390	140.0	14:27	410	300.0	17:08
391	145.0	14:32	410	305.0	17:13
390	150.0	14:38	410	310.0	17:18
390	155.0	14:43	410	315.0	17:23

Tabla 33. Datos originales para la recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación de la segunda corrida a 410°C

Tiempo ± 0.1 (min)	Masa producto líquido ± 0.0001 (g)	masa acumulada del producto líquido ± 0.0001 (g)
0	0.0000	0.0000
20	0.0000	0.0000
50	1.3521	1.3521
75	2.7224	4.0745
100	3.5101	7.5846
125	3.8702	11.4548
150	4.312	15.7668
175	4.602	20.3688
200	4.5401	24.9089
225	3.8113	28.7202
250	3.6302	32.3504
275	2.4506	34.801
300	2.4302	37.2312

Nota. Los tiempos se empezaron a tomar cada 5 minutos desde que cayó la primera gota del producto líquido.

Figura 19. Recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación durante la segunda corrida de pirólisis a una temperatura de 410°C



Nota. los datos se obtuvieron de las Tablas 31 y 32. Datos obtenidos a presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura de 23°C en el laboratorio de operaciones unitarias de UVG.

Tabla 34. Datos originales para la tasa de calentamiento de la tercera corrida a una temperatura de 410°C

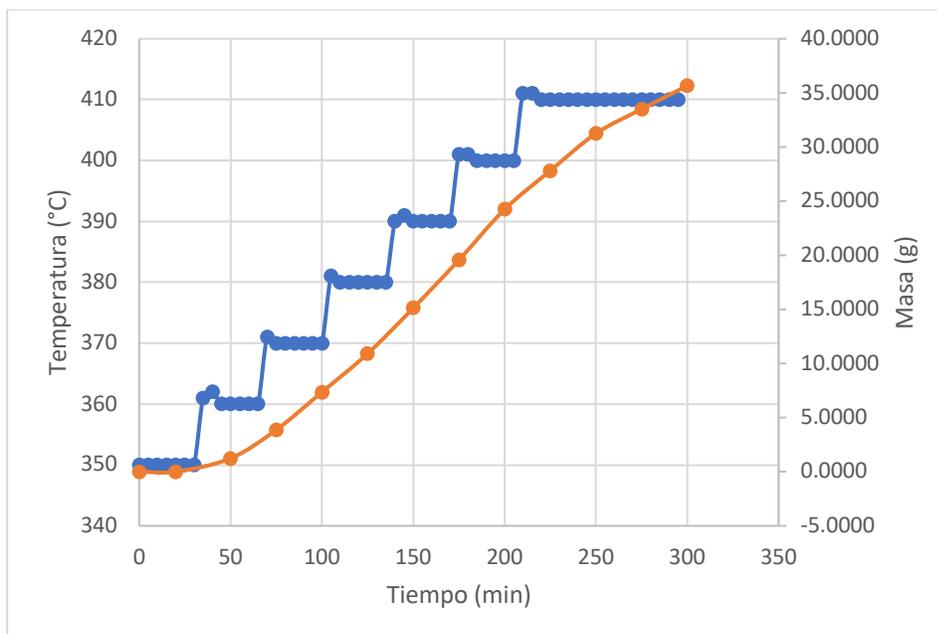
T (°C)	tiempo (min)	hora	T (°C)	tiempo (min)	hora
350	0.0	10:08	390	160.0	14:48
350	5.0	10:13	390	165.0	14:53
350	10.0	10:18	390	170.0	14:58
350	15.0	10:23	401	175.0	15:03
350	20.0	10:28	401	180.0	15:08
350	25.0	10:33	400	185.0	15:13
350	30.0	10:38	400	190.0	15:18
361	35.0	10:43	400	195.0	15:23
362	40.0	10:48	400	200.0	15:28
360	45.0	10:53	400	205.0	15:33
360	50.0	10:58	411	210.0	15:38
360	55.0	11:03	411	215.0	15:43
360	60.0	11:08	410	220.0	15:48
360	65.0	11:13	410	225.0	15:53
371	70.0	11:18	410	230.0	15:58
370	75.0	11:23	410	235.0	16:03
370	80.0	11:28	410	240.0	16:08
370	85.0	11:33	410	245.0	16:13
370	90.0	11:38	410	250.0	16:18
370	95.0	11:43	410	255.0	16:23
370	100.0	11:48	410	260.0	16:28
381	105.0	12:53	410	265.0	16:33
380	110.0	12:58	410	270.0	16:38
380	115.0	13:03	410	275.0	16:43
380	120.0	13:08	410	280.0	16:48
380	125.0	13:13	410	285.0	16:53
380	130.0	13:18	410	290.0	16:58
380	135.0	13:23	410	295.0	17:03
390	140.0	14:28	410	300.0	17:08
391	145.0	14:33	410	305.0	17:13
390	150.0	14:38	410	310.0	17:18
390	155.0	14:43	410	315.0	17:23

Tabla 35. Datos originales para la recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación de la tercera corrida a 410°C

Tiempo ± 0.1 (min)	Masa producto líquido ± 0.0001 (g)	masa acumulada del producto líquido ± 0.0001 (g)
0	0.0000	0.0000
20	0.0000	0.0000
50	1.2340	1.2340
75	2.6341	3.8681
100	3.4832	7.3513
125	3.5543	10.9056
150	4.2153	15.1209
175	4.4411	19.562
200	4.6734	24.2354
225	3.5742	27.8096
250	3.4352	31.2448
275	2.2563	33.5011
300	2.1562	35.6573

Nota. Los tiempos se empezaron a tomar cada 5 minutos desde que cayó la primera gota del producto líquido.

Figura 20. Recuperación del producto líquido a través del tiempo de operación durante la tercera corrida de pirólisis a una temperatura de 410°C



Nota. los datos se obtuvieron de las Tablas 33 y 34. Datos obtenidos a presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura de 23°C en el laboratorio de operaciones unitarias de UVG.

Tabla 36. Masa de productos y material no pirolizado de la pirólisis a 380°C

Masa inicial ± 0.1 (g)	Masa producto líquido ± 0.1 (g)	Masa producto sólido ± 0.1 (g)	Masa producto gas (g)	Masa material no pirolizado ± 0.1 (g)
50.3202	24.3012	8.0131	14.4737	3.5322
54.4320	20.4532	6.4213	25.0463	2.5112
53.1223	22.3141	5.3534	22.7536	2.7012

Nota. Material no pirolizado se refiere al alambre que se encuentra dentro de las láminas de plástico y se utilizar como soporte para la nariz.

Tabla 37. Masa de productos y material no pirolizado de la pirólisis a 410°C

Masa inicial ± 0.1 (g)	Masa producto líquido ± 0.1 (g)	Masa producto sólido ± 0.1 (g)	Masa producto gas (g)	Masa material no pirolizado ± 0.1 (g)
52.3254	32.7252	1.6012	14.7958	3.2032
53.3230	37.2312	2.0121	11.2454	2.8343
52.0125	35.6573	1.4045	12.4586	2.4921

Nota. Material no pirolizado se refiere al alambre que se encuentra dentro de las láminas de plástico y se utilizar como soporte para la nariz.

Tabla 38. Datos de masa y volumen para la determinación de la densidad del producto líquido a diferentes a temperaturas.

Temperatura	380°C			410°C			
	No. De muestra	masa ± 0.1 (g)	Volumen ± 0.01 (mL)	Volumen final ± 0.01 (mL)	masa ± 0.1 (g)	Volumen ± 0.01 (mL)	Volumen final ± 0.01 (mL)
	1	1.0213	18.50	19.60	1.0213	18.50	19.60
	2	1.3415	19.90	21.00	1.3415	19.90	21.00
	3	0.9832	19.50	20.40	0.9832	19.50	20.40

Nota. Datos obtenidos a una presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura 23°C. Se utilizó una probeta de 10 mL marca KIMAX y la balanza marca OHAUS.

Tabla 39. Datos de masa y volumen para la determinación de la densidad del producto sólido a diferentes a temperaturas.

Temperatura	380°C		410°C	
No. De muestra	masa ± 0.1 (g)	Volumen ± 0.01 (mL)	masa ± 0.1 (g)	Volumen ± 0.01 (mL)
1	10.0122	14.00	10.4212	13.60
2	10.0154	13.80	10.1302	13.40
3	10.1312	13.70	10.0913	13.30

Nota. Datos obtenidos a una presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura 23°C. Se utilizó una probeta de 10 mL marca KIMAX y la balanza marca OHAUS.

Tabla 40. Poder calorífico del producto líquido de la pirólisis a 380°C

No. de muestra	masa ± 0.1 (g)	Poder calorífico (J/g)
1	0.0974	41985.00
2	0.0981	42010.00
3	0.9654	42529.00

Nota. Los datos se obtuvieron en el laboratorio de operaciones unitarias de la UVG a una presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura 23°C.

Tabla 41. Poder calorífico del producto sólido de la pirólisis a 380°C

No. de muestra	masa ± 0.1 (g)	Poder calorífico (J/g)
1	0.0926	23699.00
2	0.0951	23454.00
3	0.0974	22648.00

Nota. Los datos se obtuvieron en el laboratorio de operaciones unitarias de la UVG a una presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura 23°C.

Tabla 42. Poder calorífico del producto líquido de la pirólisis a 410°C

No. de muestra	masa ± 0.1 (g)	Poder calorífico (J/g)
1	0.1072	42777.00
2	0.0963	43352.00
3	0.0954	42563.00

Nota. Los datos se obtuvieron en el laboratorio de operaciones unitarias de la UVG a una presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura 23°C.

Tabla 43. Poder calorífico del producto sólido de la pirólisis a 410°C

No. de muestra	masa \pm 0.1 (g)	Poder calorífico (J/g)
1	0.1002	33896.00
2	0.0944	43352.00
3	0.0932	42563.00

Nota. Los datos se obtuvieron en el laboratorio de operaciones unitarias de la UVG a una presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura 23°C.

Tabla 44. Poder calorífico de las mascarillas quirúrgicas

No. de muestra	masa \pm 0.1 (g)	Poder calorífico (J/g)
1	0.0783	38235.00
2	0.0892	37252.00
3	0.0834	39206.00

Los datos se obtuvieron en el laboratorio de operaciones unitarias de la UVG a una presión atmosférica de 0.98 atm y temperatura 23°C.

G. ANÁLISIS DE ERROR

Cálculo 5. Número de réplicas en el experimento.

$$N = \frac{(1.96)^2 * (0.95) * (0.05)}{(0.25)^2} = 2.92 \approx 3$$

Para este cálculo se utilizó la Ecuación 2, se determinó un valor estadístico en la tabla Z de 1.96 y una probabilidad de éxito de 95% con un error del 25%.

Cálculo 6. Determinación del poder calorífico promedio del producto líquido de la pirólisis a 380°C

$$\bar{X} = \frac{(\text{valor 1} + \text{valor 2} + \text{valor 3} \dots)}{\text{Número total de muestras}}$$

$$\bar{X} = \frac{(41985 + 42010 + 42529) * \frac{J}{g}}{3} = 42174.67 \frac{J}{g}$$

Los datos para este cálculo se obtuvieron de la tabla 40. Esta ecuación también se utilizó para determinar el valor promedio de todos los datos que se encuentran en la secciones de resultados y datos calculados.

Cálculo 7. Cálculo de muestra para la desviación estándar del poder calorífico del producto líquido de la pirólisis a 380°C.

$$S = \frac{\sqrt{(\bar{X} - \text{valor 1})^2 + (\bar{X} - \text{valor 2})^2 + (\bar{X} - \text{valor 3})^2 + \dots}}{N - 1}$$

$$S = \frac{\sqrt{(42174.67 - 41985.00)^2 + (42174.67 - 42010.00)^2 + (42174.67 - 42529.00)^2}}{2} = 307.12 \frac{J}{g}$$

\bar{X} = Valor promedio

S = Desviación estándar

N = Número total de muestras

Los datos para este cálculo se obtuvieron de la Tabla 40. Esta ecuación se utilizó para determinar la desviación estándar de los valores promedios que se presentan en las secciones de resultados y datos calculados.

Cálculo 8. Cálculo de muestra para el coeficiente de variación del poder calorífico del producto líquido obtenido de la pirólisis a 380°C

$$\bar{X} = \frac{307.12 \frac{J}{g}}{42,174.67 \frac{J}{g}} = 7.28 \times 10^{-3}$$

Los datos para este cálculo se obtuvieron de la Tabla 40. Esta ecuación se utilizó para determinar la desviación estándar de los valores promedios que se presentan en las secciones de resultados y datos calculados.

Cálculo 9. Cálculo de muestra para los intervalos de confianza del poder calorífico del producto líquido de la pirólisis a 380°C.

$$I.C = 42,174.67 \frac{J}{g} \pm 3.513 * \frac{307.12 \frac{J}{g}}{\sqrt{2}} = 42,174.67 \frac{J}{g} \pm 762.92 \frac{J}{g}$$

Los datos para este cálculo se obtuvieron de la Tabla 40. Esta ecuación se utilizó para determinar la desviación estándar de los valores promedios que se presentan en las secciones de resultados y datos calculados.

Cálculo 10. Cálculo de muestra la incertidumbre del rendimiento del producto líquido de la pirólisis a 380°C

$$\Delta \text{rendimiento} = 48.2931\% * \sqrt{\left(\frac{0.1 g}{24.3012 g}\right)^2 + \left(\frac{0.1 g}{50.3202 g}\right)^2} = 2.21 \times 10^{-3} \%$$

Los datos para este cálculo se obtuvieron de la Tabla 15. Esta ecuación se utilizó para determinar la desviación estándar de los valores promedios que se presentan en las secciones de resultados y datos calculados.

Figura 21. Cromatograma de la muestra del producto líquido obtenido de la pirólisis a 380°C

File :C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\230712-0006.D
 Operator : AdeM
 Acquired : 12 Jul 2023 17:06 using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
 Instrument : GC-MSD
 Sample Name: TDG 142-2
 Misc Info : IQ
 Vial Number: 6

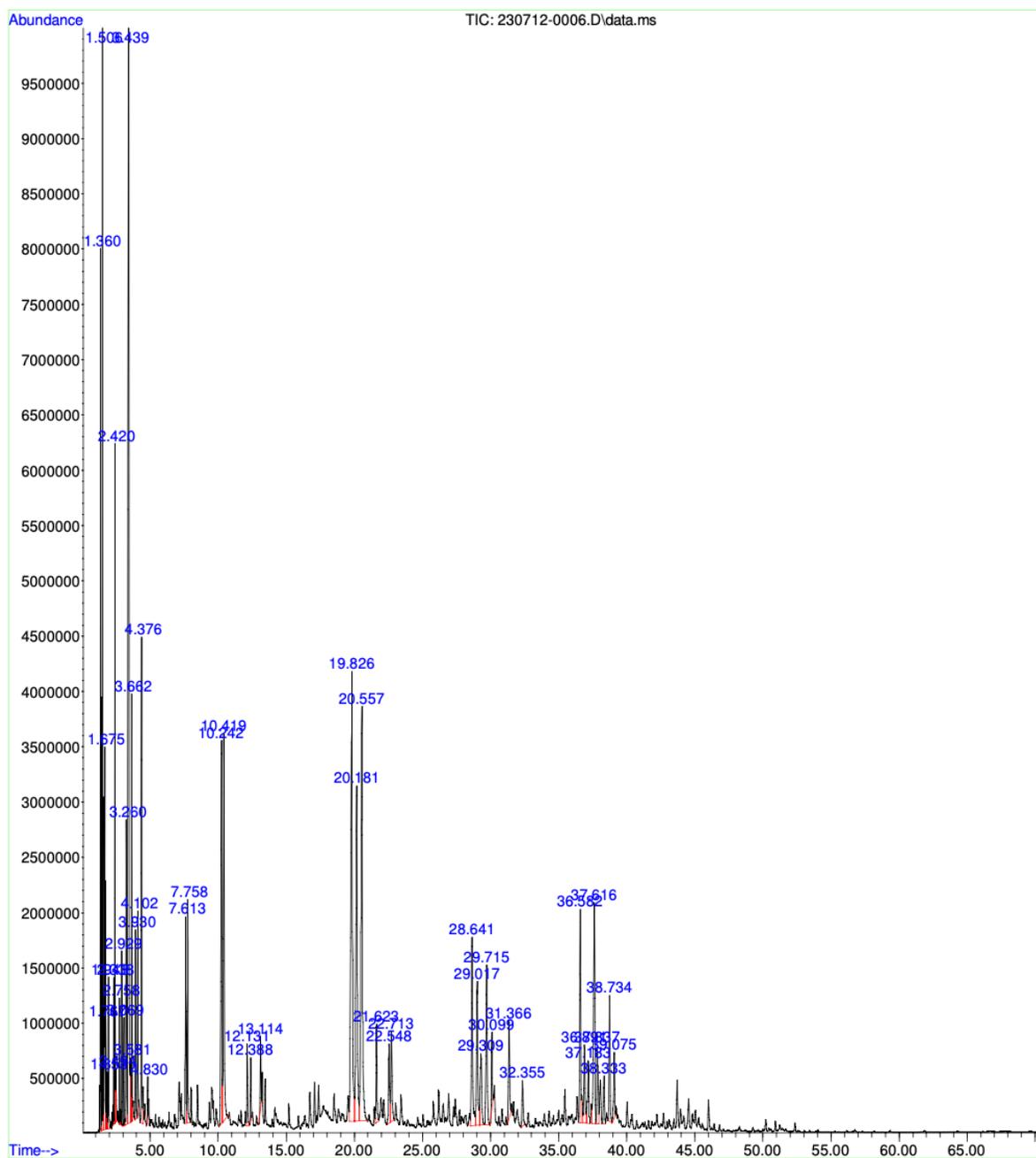


Tabla 45. Reporte del cromatograma de gases para la muestra del producto líquido obtenido de la pirólisis a 380°C

LIQA Library Search Report						
Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\ Data File : 230712-0006.D Title : Acq On : 12 Jul 2023 17:06 Operator : AdeM Sample : TDG 142-2 Misc : IQ ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1						
Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0						
Unknown Spectrum: Apex Integration Events: ChemStation Integrator - events.e						
PK#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	1.361	2.18	C:\Database\NIST05a.L Pentane Pentane Pentane	695 694 693	000109-66-0 000109-66-0 000109-66-0	94 91 91
2	1.506	4.96	C:\Database\NIST05a.L 1-Pentene, 2-methyl- 1-Pentene, 2-methyl- 1-Pentene, 2-methyl-	1452 1461 1462	000763-29-1 000763-29-1 000763-29-1	94 91 91
3	1.675	2.37	C:\Database\NIST05a.L 1-Pentene, 2,4-dimethyl- 5-Methyl-2-hexene,c&t 1-Pentene, 2,4-dimethyl-	3295 3275 3294	002213-32-3 003404-62-4 002213-32-3	90 87 80
4	1.766	0.56	C:\Database\NIST05a.L Benzene Benzene Benzene	998 1001 1002	000071-43-2 000071-43-2 000071-43-2	94 94 91
5	1.852	0.22	C:\Database\NIST05a.L (Z)-Hex-2-ene, 5-methyl- Cyclobutanone, 3,3-dimethyl- 1-Hexene, 2-methyl-	3287 3191 3262	013151-17-2 001192-33-2 006094-02-6	72 64 62
6	1.943	0.67	C:\Database\NIST05a.L 1,3-Pentadiene, 2,4-dimethyl- 1,3-Pentadiene, 2,4-dimethyl- 1,3-Pentadiene, 2,3-dimethyl-	2854 2858 2856	001000-86-8 001000-86-8 001113-56-0	96 95 95
7	2.339	0.58	C:\Database\NIST05a.L 2-Heptene, 4-methyl-, (E)- 4-Methyl-2-heptene 2-Methyl-2-heptene	6559 6479 6480	066225-17-0 003404-56-6 000627-97-4	95 80 58
8	2.421	2.56	C:\Database\NIST05a.L Heptane, 4-methyl- Heptane, 4-methyl- Hexane, 2,3-dimethyl-	7427 7431 7436	000589-53-7 000589-53-7 000584-94-1	95 94 90
9	2.493	0.42	C:\Database\NIST05a.L 1,3,5-Cycloheptatriene 5-Hexenal, 4-methylene- 1,4-Hexadiene, 2,5-dimethyl-	2413 5658 5832	000544-25-2 017844-21-2 000927-97-9	56 48 43
10	2.757	0.49	C:\Database\NIST05a.L 2,4-Hexadiene, 2,3-dimethyl- 1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene Cyclohexene, 3,5-dimethyl-	5836 10374 5822	005678-98-8 065378-76-9 000823-17-6	78 64 53
11	2.930	0.71	C:\Database\NIST05a.L Cyclopentane, 1-ethyl-1-methyl- 2-Pentene, 4-methyl-, (Z)- 1,1,4-Trimethylcyclohexane	6619 1484 11216	016747-50-5 000691-38-3 007094-27-1	43 35 35
12	3.067	0.49	C:\Database\NIST05a.L Heptane, 2,4-dimethyl-	12300	002213-23-2	95
ACIDOS GRAS...5 SCAN bio.M Thu Jul 13 08:56:58 2023						

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\
 Data File : 230712-0006.D
 Title :
 Acq On : 12 Jul 2023 17:06
 Operator : AdeM
 Sample : TDG 142-2
 Misc : IQ
 ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

PK#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12302	002213-23-2	94
			Heptane, 2,4-dimethyl-	12289	002213-23-2	91
13	3.262	2.10	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)-	11284	001795-27-3	91
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11224	001839-63-0	87
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11281	001795-26-2	64
14	3.440	13.48	C:\Database\NIST05a.L 2,4-Dimethyl-1-heptene	11183	019549-87-2	90
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	90
			Cyclopentane, 1,2,3-trimethyl-, (1. .alpha.,2.alpha.,3.alpha.)-	6656	002613-69-6	50
15	3.581	0.35	C:\Database\NIST05a.L 1,1-Dimethyl-4-methylenecyclohexan	10384	006007-96-1	87
			2-Methylbicyclo[3.2.1]octane	10344	1000215-28-0	60
			2,4-Dimethyl-1-heptene	11187	019549-87-2	59
16	3.662	2.02	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
17	3.931	0.99	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	62
18	4.104	0.96	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1,3-dimethyl-2-methyl ene-, cis-	10392	019781-47-6	86
			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10339	1000195-03-3	81
			1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene	10374	065378-76-9	81
19	4.377	2.78	C:\Database\NIST05a.L Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethy l-	17442	1000152-79-7	53
			3-Octene, 2,2-dimethyl-	17380	086869-76-3	47
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	46
20	4.831	0.20	C:\Database\NIST05a.L Cyclooctane-1,4-diol, cis	20098	073982-04-4	53
			2,4-Hexadiene, (E,E)-	1200	005194-51-4	49
			1,4-Hexadiene	1176	000592-45-0	47
21	7.615	1.66	C:\Database\NIST05a.L Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Hexane, 3,3-dimethyl-	7446	000563-16-6	72
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18540	007154-80-5	64
22	7.756	1.77	C:\Database\NIST05a.L Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\
 Data File : 230712-0006.D
 Title :
 Acq On : 12 Jul 2023 17:06
 Operator : AdeM
 Sample : TDG 142-2
 Misc : IQ
 ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Octane, 2,3,6,7-tetramethyl-	36467	052670-34-5	64
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18540	007154-80-5	64
23	10.244	4.50	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
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1409	000765-43-5	25
24	10.417	4.40	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Heptene, 4-methyl-	6500	004485-16-9	45
			2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	43
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
25	12.132	0.76	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	38
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	27
			Cyclohexane, methyl-	3269	000108-87-2	22
26	12.387	0.51	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	43
			Cyclopropane, 1,2,3-trimethyl-	1492	042984-19-0	27
			3,4-Dimethyl cyclohexanone	11039	005465-09-8	25
27	13.115	0.57	C:\Database\NIST05a.L			
			(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methan	27143	013702-56-2	50
			ol			
			1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	10383	067682-47-7	43
			1-Pentyn-1-ol, 4-methyl-	3147	053778-57-7	32
28	19.824	7.96	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	35064	255885-37-1	38
			Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1.	11279	001795-26-2	35
			alpha.,3.alpha.,5.beta.)-			
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
29	20.183	5.79	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	46
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	38
			Cyclohexane, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	17434	007045-67-2	35
30	20.556	6.94	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	42
			Cyanamide, dibutyl-	26627	002050-54-6	38
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11225	002234-75-5	30
31	21.625	1.11	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-,	17454	050876-31-8	46
			trans-			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-,	17447	050876-32-9	43
			cis-			
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	30
32	22.548	0.96	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Decene, 2,2-dimethyl-, (E)-	35053	055499-02-0	53
			3-Hexene, 2,2,5,5-tetramethyl-, (Z	17438	000692-47-7	49
)-			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-,	17447	050876-32-9	43

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\
 Data File : 230712-0006.D
 Title :
 Acq On : 12 Jul 2023 17:06
 Operator : AdeM
 Sample : TDG 142-2
 Misc : IQ
 ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			cis-			
33	22.712	1.22	C:\Database\NIST05a.L Cyclopentadecanone, 2-hydroxy- 1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E) Triallylsilane	85349 10383 25058	004727-18-8 067682-47-7 001116-62-7	53 38 35
34	28.639	2.62	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl- Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl- Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	11235 11237 25967	002234-75-5 002234-75-5 062238-33-9	49 47 43
35	29.017	2.11	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl- Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl- 1-Dodecyn-4-ol	11235 17435 44514	002234-75-5 007058-05-1 074646-36-9	46 38 35
36	29.308	1.34	C:\Database\NIST05a.L Cyclopentane, (2-methylbutyl)- Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl- 1-Hexene, 3,3-dimethyl-	17408 11235 6551	053366-38-4 002234-75-5 003404-77-1	47 46 38
37	29.717	2.30	C:\Database\NIST05a.L 1,3-Dimethyl-5-isobutylcyclohexane Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl- 1-Hexene, 3,3-dimethyl-	35077 17435 6551	013131-76-5 007058-05-1 003404-77-1	38 38 35
38	30.099	0.76	C:\Database\NIST05a.L 1-Dodecyn-4-ol 1-Hexene, 3,3-dimethyl- Cyclohexane, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	44514 6551 17436	074646-36-9 003404-77-1 061142-69-6	35 35 35
39	31.368	1.25	C:\Database\NIST05a.L n-Nonenylsuccinic anhydride Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)- Triallylsilane	74169 34921 25058	028928-97-4 098678-70-7 001116-62-7	64 50 46
40	32.355	0.56	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans- Cyclopropanecarboxylic acid, undec -2-enyl ester Cyclohexane, 3-ethyl-5-methyl-1-pr opyl-	17454 83853 35085	050876-31-8 1000299-38-1 1000151-39-5	43 38 38
41	36.581	2.46	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl- Cyclooctane, butyl- Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	25967 34973 17435	062238-33-9 016538-93-5 007058-05-1	43 35 35
42	36.890	1.08	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl- Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl- Cyclooctane, butyl-	25967 11235 34973	062238-33-9 002234-75-5 016538-93-5	43 43 35
43	37.181	0.93	C:\Database\NIST05a.L			

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\
 Data File : 230712-0006.D
 Title :
 Acq On : 12 Jul 2023 17:06
 Operator : AdeM
 Sample : TDG 142-2
 Misc : IQ
 ALS Vial : 6 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	43
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Cyclooctane, butyl-	34973	016538-93-5	35
44	37.618	3.41	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	30
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
45	37.836	1.15	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	38
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	38
			2-Octene, 2,3,7-trimethyl-	25961	033933-75-4	22
46	38.332	0.62	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	43
			Disulfide, di-tert-dodecyl	171863	027458-90-8	35
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	17435	007058-05-1	35
47	38.732	1.38	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4,5-tetraethyl-, (1.alpha.,2.alpha.,4.alpha.,5.alpha.)-	54564	061142-24-3	49
			Disulfide, di-tert-dodecyl	171863	027458-90-8	35
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	30
48	39.074	0.77	C:\Database\NIST05a.L			
			11-Dodecen-1-ol, 2,4,6-trimethyl-, (R,R,R)-	76048	027829-54-5	80
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1-one	24154	025183-82-8	64
			Cyclohexane, 3-ethyl-5-methyl-1-propyl-	35085	1000151-39-5	50

Figura 22. Cromatograma de la muestra del producto líquido obtenido de la pirólisis a 410°C

File : C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\230712-0005.D
 Operator : AdeM
 Acquired : 12 Jul 2023 15:49 using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA HP5 SCAN.M
 Instrument : GC-MSD
 Sample Name: TDG 142-1
 Misc Info : IQ
 Vial Number: 5

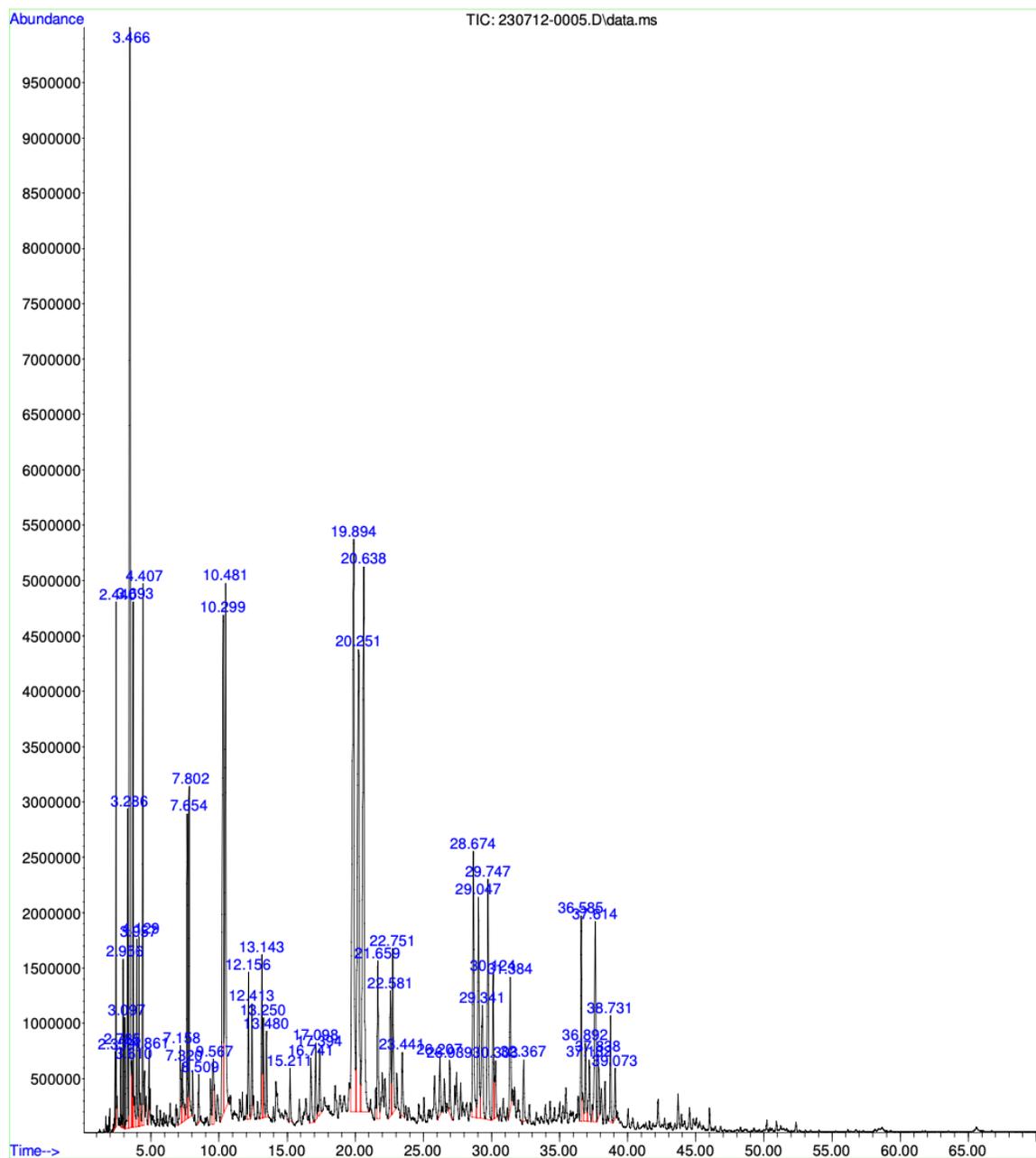


Tabla 46. Reporte del cromatograma de gases para la muestra del producto líquido obtenido de la pirólisis a 410°C

LIQA Library Search Report						
Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\ Data File : 230712-0005.D Title : Acq On : 12 Jul 2023 15:49 Operator : AdeM Sample : TDG 142-1 Misc : IQ ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1						
Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0						
Unknown Spectrum: Apex Integration Events: ChemStation Integrator - events.e						
Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	2.357	0.23	C:\Database\NIST05a.L 2-Heptene, 4-methyl-, (E)- 2-Methyl-2-heptene 2-Pentene, 4-methyl-	6559 6480 1449	066225-17-0 000627-97-4 004461-48-7	95 58 49
2	2.439	1.34	C:\Database\NIST05a.L Heptane, 4-methyl- Hexane, 2,3-dimethyl- Heptane, 4-methyl-	7431 7436 7432	000589-53-7 000584-94-1 000589-53-7	94 91 90
3	2.785	0.26	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexene, 3,5-dimethyl- 5,5-Dimethyl-1,3-hexadiene trans-3,5-Dimethylcyclohexene	5814 5820 5844	000823-17-6 001515-79-3 056021-63-7	60 60 55
4	2.958	0.54	C:\Database\NIST05a.L Cyclopentane, 1-ethyl-1-methyl- 2-Pentene, 4-methyl-, (Z)- Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	6619 1484 11224	016747-50-5 000691-38-3 001839-63-0	43 35 35
5	3.099	0.40	C:\Database\NIST05a.L Heptane, 2,4-dimethyl- Heptane, 2,4-dimethyl- Heptane, 2,4-dimethyl-	12300 12302 12289	002213-23-2 002213-23-2 002213-23-2	95 94 91
6	3.285	1.72	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)- Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl- Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11284 11224 11240	001795-27-3 001839-63-0 001839-63-0	93 93 87
7	3.467	10.41	C:\Database\NIST05a.L 2,4-Dimethyl-1-heptene 2,4-Dimethyl-1-heptene cis-3-Nonene	11183 11187 11148	019549-87-2 019549-87-2 020237-46-1	90 81 50
8	3.608	0.49	C:\Database\NIST05a.L 1,1-Dimethyl-4-methylenecyclohexan 2-Methylbicyclo[3.2.1]octane 2,4-Dimethyl-1-heptene	10384 10344 11187	006007-96-1 1000215-28-0 019549-87-2	87 60 59
9	3.694	1.99	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)- Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.alpha.)- Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	11279 11284 11224	001795-26-2 001795-27-3 001839-63-0	94 90 90
10	3.958	0.88	C:\Database\NIST05a.L 6,6-Dimethylhepta-2,4-diene 1,2,4,4-Tetramethylcyclopentene Cyclohexene, 3,3,5-trimethyl-	10339 10374 10361	1000195-03-3 065378-76-9 000503-45-7	81 72 68
11	4.127	0.82	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1,3-dimethyl-2-methyl ene-, cis- 6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	10392 10339	019781-47-6 1000195-03-3	86 81
ACIDOS GRAS...5 SCAN bio.M Thu Jul 13 08:53:00 2023						

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\
 Data File : 230712-0005.D
 Title :
 Acq On : 12 Jul 2023 15:49
 Operator : AdeM
 Sample : TDG 142-1
 Misc : IQ
 ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	10357	074779-65-0	76
12	4.409	2.54	C:\Database\NIST05a.L Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	17442	1000152-79-7	49
			1-Octene, 2,2-dimethyl-	17380	086869-76-3	47
			Ethanone, 1-cyclopropyl-	1408	000765-43-5	46
13	4.859	0.23	C:\Database\NIST05a.L 4-Methyl-1,3-pentadiene	1207	000926-56-7	47
			Cyclobutane, ethenyl-	1193	002597-49-1	43
			Cyclopentene, 3-methyl-	1202	001120-62-3	38
14	7.156	0.80	C:\Database\NIST05a.L 1-Octene, 3,3-dimethyl-	17377	074511-51-6	50
			1,1,4-Trimethylcyclohexane	11216	007094-27-1	47
			1-Pentene, 3,3-dimethyl-	3298	003404-73-7	43
15	7.320	0.53	C:\Database\NIST05a.L 1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	50
			1,1,4-Trimethylcyclohexane	11216	007094-27-1	47
			2-Pentene, 3-methyl-, (Z)-	1490	000922-62-3	43
16	7.656	2.06	C:\Database\NIST05a.L Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	81
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18540	007154-80-5	64
			Octane, 2,3,6,7-tetramethyl-	36467	052670-34-5	64
17	7.802	2.15	C:\Database\NIST05a.L Nonane, 2,6-dimethyl-	27252	017302-28-2	87
			Heptane, 3,3,5-trimethyl-	18540	007154-80-5	64
			Dodecane, 2,7,10-trimethyl-	66079	074645-98-0	59
18	8.507	0.39	C:\Database\NIST05a.L 3-Undecene, (E)-	25908	001002-68-2	68
			5-Undecene, (E)-	25921	000764-97-6	58
			1-Ethyl-2,2,6-trimethylcyclohexane	25974	071186-27-1	49
19	9.567	0.76	C:\Database\NIST05a.L Undecane, 5-methyl-	36445	001632-70-8	55
			Decane, 3,7-dimethyl-	36451	017312-54-8	55
			Undecane, 5-methyl-	36444	001632-70-8	49
20	10.299	5.63	C:\Database\NIST05a.L 2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	43
			3-Ethyl-4-methyl-2-pentene	6562	019780-68-8	35
			1-Butene, 3,3-dimethyl-	1480	000558-37-2	25
21	10.481	5.32	C:\Database\NIST05a.L 2-Undecene, 4-methyl-	34999	091695-32-8	46
			Ethanone, 1-cyclopentyl-	6341	006004-60-0	45
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, trans-	17454	050876-31-8	38
22	12.155	1.01	C:\Database\NIST05a.L 1-Hexene, 3,3,5-trimethyl-	11215	013427-43-5	46
			Heptane, 2-methyl-3-methylene-	11245	062187-11-5	41

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\
 Data File : 230712-0005.D
 Title :
 Acq On : 12 Jul 2023 15:49
 Operator : AdeM
 Sample : TDG 142-1
 Misc : IQ
 ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

PK#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			(S)-3-Ethyl-4-methylpentanol	13312	1000144-07-1	35
23	12.414	0.66	C:\Database\NIST05a.L Heptane, 2-methyl-3-methylene- 2-Pentene, 4-methyl- 2-Pentene, 4-methyl-, (E)-	11245 1449 1481	062187-11-5 004461-48-7 000674-76-0	43 25 25
24	13.142	1.27	C:\Database\NIST05a.L Cyclopropanecarboxaldehyde, 2-meth yl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-, trans -(+.-)- 1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E) Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-	33479 10383 34921	097231-35-1 067682-47-7 098678-70-7	45 43 42
25	13.251	0.81	C:\Database\NIST05a.L 1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E) 1-Dodecyn-4-ol Cyclopropanecarboxaldehyde, 2-meth yl-2-(4-methyl-3-pentenyl)-, trans -(+.-)-	10383 44514 33479	067682-47-7 074646-36-9 097231-35-1	47 43 42
26	13.479	0.59	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl- 1-Pentyn-3-ol, 3-methyl- 1-Pentyn-1-ol, 4-methyl-	25975 3151 3147	061142-70-9 000077-75-8 053778-57-7	40 35 35
27	15.212	0.41	C:\Database\NIST05a.L Zinc, bis[2-(1,1-dimethylethyl)-3, 3-dimethylcyclopropyl]-, [1.alpha. (1R*,2R*),2.beta.]- Cyclohexanecarboxylic acid, 4-prop yl-, 4-cyanophenyl ester, trans- Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	133356 106270 25977	074793-36-5 062439-33-2 061141-80-8	50 50 50
28	16.740	0.74	C:\Database\NIST05a.L Dodecane, 4,6-dimethyl- Octane, 2,3,6,7-tetramethyl- Nonane, 2,6-dimethyl-	55993 36467 27252	061141-72-8 052670-34-5 017302-28-2	95 80 76
29	17.099	0.64	C:\Database\NIST05a.L Octane, 2,3,6,7-tetramethyl- Nonane, 2,6-dimethyl- Dodecane, 4,6-dimethyl-	36467 27252 55992	052670-34-5 017302-28-2 061141-72-8	80 76 64
30	17.395	0.58	C:\Database\NIST05a.L Nonane, 2,6-dimethyl- Octane, 2,3,6,7-tetramethyl- Dodecane, 4,6-dimethyl-	27252 36467 55992	017302-28-2 052670-34-5 061141-72-8	81 80 80
31	19.892	9.94	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl- Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl- Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-, (1. alpha.,3.alpha.,5.beta.)-	11237 11225 11279	002234-75-5 002234-75-5 001795-26-2	43 38 35
32	20.252	7.39	C:\Database\NIST05a.L			

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\
 Data File : 230712-0005.D
 Title :
 Acq On : 12 Jul 2023 15:49
 Operator : AdeM
 Sample : TDG 142-1
 Misc : IQ
 ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1,1-dimethyl-2-propyl	25982	081983-71-3	49
			Octane, 4-methyl-	12279	002216-34-4	35
			Hexane, 2,3,4-trimethyl-	12311	000921-47-1	30
33	20.638	8.63	C:\Database\NIST05a.L			
			4-Isopropyl-1,3-cyclohexanedione	26500	062831-62-3	49
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11237	002234-75-5	41
			2-Heptene, 4-methyl-, (E)-	6559	066225-17-0	38
34	21.662	1.51	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
			Cyclohexane, 1,1,4,4-tetramethyl-	17429	002223-52-1	35
			Cyclohexane, 1,1,2-trimethyl-	11231	007094-26-0	30
35	22.580	1.18	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43
			3-Octene, 2,2-dimethyl-	17380	086869-76-3	38
			Cyclohexane, 1,1,2-trimethyl-	11231	007094-26-0	25
36	22.753	1.74	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	27
			cis-2,6-Dimethyl-2,6-octadiene	16346	002492-22-0	25
			4-Methyl-1,5-Heptadiene	5794	000998-94-7	22
37	23.440	0.68	C:\Database\NIST05a.L			
			11-Dodecen-1-ol, 2,4,6-trimethyl-, (R,R,R)-	76047	027829-54-5	59
			Cyclohexane, 1,1'-(1-methylethylid ene)bis-	63053	054934-90-6	47
			Cyclohexane, (1,2-dimethylbutyl)-	35073	061142-37-8	27
38	26.206	0.60	C:\Database\NIST05a.L			
			Tridecane, 4-methyl-	55977	026730-12-1	68
			Dodecane, 4,6-dimethyl-	55993	061141-72-8	64
			Decane, 2-methyl-	27250	006975-98-0	64
39	26.938	0.49	C:\Database\NIST05a.L			
			Decane, 2-methyl-	27250	006975-98-0	72
			Tridecane, 5-propyl-	76096	055045-11-9	72
			Nonane, 3-methyl-5-propyl-	46168	031081-18-2	64
40	28.676	3.05	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	46
			Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	25967	062238-33-9	46
			Cyclopentane, (2-methylbutyl)-	17408	053366-38-4	43
41	29.049	2.49	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	46
			Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25977	061141-80-8	35
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	35
42	29.340	1.64	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexane, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	17436	061142-69-6	35
			1-Hexene, 3,3-dimethyl-	6551	003404-77-1	35

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\
 Data File : 230712-0005.D
 Title :
 Acq On : 12 Jul 2023 15:49
 Operator : AdeM
 Sample : TDG 142-1
 Misc : IQ
 ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			3-Hexene, 2,2-dimethyl-, (E)-	6605	000690-93-7	30
43	29.749	2.73	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl- Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl- 1-Hexene, 3,3-dimethyl-	11235 25977 6551	002234-75-5 061141-80-8 003404-77-1	49 35 35
44	30.122	1.30	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl- 1-Hexene, 3,3-dimethyl- Cyclohexane, 2,4-diethyl-1-methyl-	11235 6551 25975	002234-75-5 003404-77-1 061142-70-9	46 35 30
45	30.304	0.72	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis- 1-Undecene, 7-methyl- 3-Ethyl-4-methyl-2-pentene	17447 34983 6563	050876-32-9 074630-42-5 019780-68-8	46 43 25
46	31.382	1.37	C:\Database\NIST05a.L Cyclopropanemethanol, 2-methyl-2-(4-methyl-3-pentenyl)- Triallylsilane 1,5-Heptadiene, 3,3-dimethyl-, (E)	34921 25058 10383	098678-70-7 001116-62-7 067682-47-7	50 46 43
47	32.365	0.54	C:\Database\NIST05a.L Triallylsilane Cyclohexane, 3-ethyl-5-methyl-1-pr opyl- Cyclopropanecarboxylic acid, undec -2-enyl ester	25058 35085 83853	001116-62-7 1000151-39-5 1000299-38-1	46 43 38
48	36.586	1.87	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl- Cyclooctane, butyl- Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25967 34973 25977	062238-33-9 016538-93-5 061141-80-8	43 35 30
49	36.890	0.82	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl- Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl- Cyclooctane, butyl-	25967 11237 34973	062238-33-9 002234-75-5 016538-93-5	43 35 35
50	37.182	0.69	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl- Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl- Cyclooctane, butyl-	11235 25967 34973	002234-75-5 062238-33-9 016538-93-5	50 43 35
51	37.614	2.36	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl- Cyclohexane, 1-ethyl-2,3-dimethyl- Cyclohexane, 1,2-diethyl-3-methyl-	25967 17435 25977	062238-33-9 007058-05-1 061141-80-8	43 35 30
52	37.837	0.71	C:\Database\NIST05a.L Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl- Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl- Triallylsilane	25967 11235 25058	062238-33-9 002234-75-5 001116-62-7	41 38 27
53	38.733	0.90	C:\Database\NIST05a.L			

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\
 Data File : 230712-0005.D
 Title :
 Acq On : 12 Jul 2023 15:49
 Operator : AdeM
 Sample : TDG 142-1
 Misc : IQ
 ALS Vial : 5 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

PK#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Cyclohexane, 1,2,4,5-tetraethyl-, (1.alpha.,2.alpha.,4.alpha.,5.alph a.)-	54564	061142-24-3	46
			Decane, 1,1'-oxybis-	123793	002456-28-2	43
			Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	11235	002234-75-5	38
54	39.074	0.45	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1- one	24154	025183-82-8	68
			4,8-Dimethyl-nona-3,8-dien-2-one	33403	1000190-70-5	50
			Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-, cis-	17447	050876-32-9	43

Figura 23. Cromatograma de la muestra del gas obtenido de la pirólisis a 410°C

File :C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\231025-0002.D
Operator : AdeM
Acquired : 25 Oct 2023 10:50 using AcqMethod Biogas.M
Instrument : GC-MSD
Sample Name: Muestra gas pirolisis
Misc Info : Mascarillas
Vial Number: 1

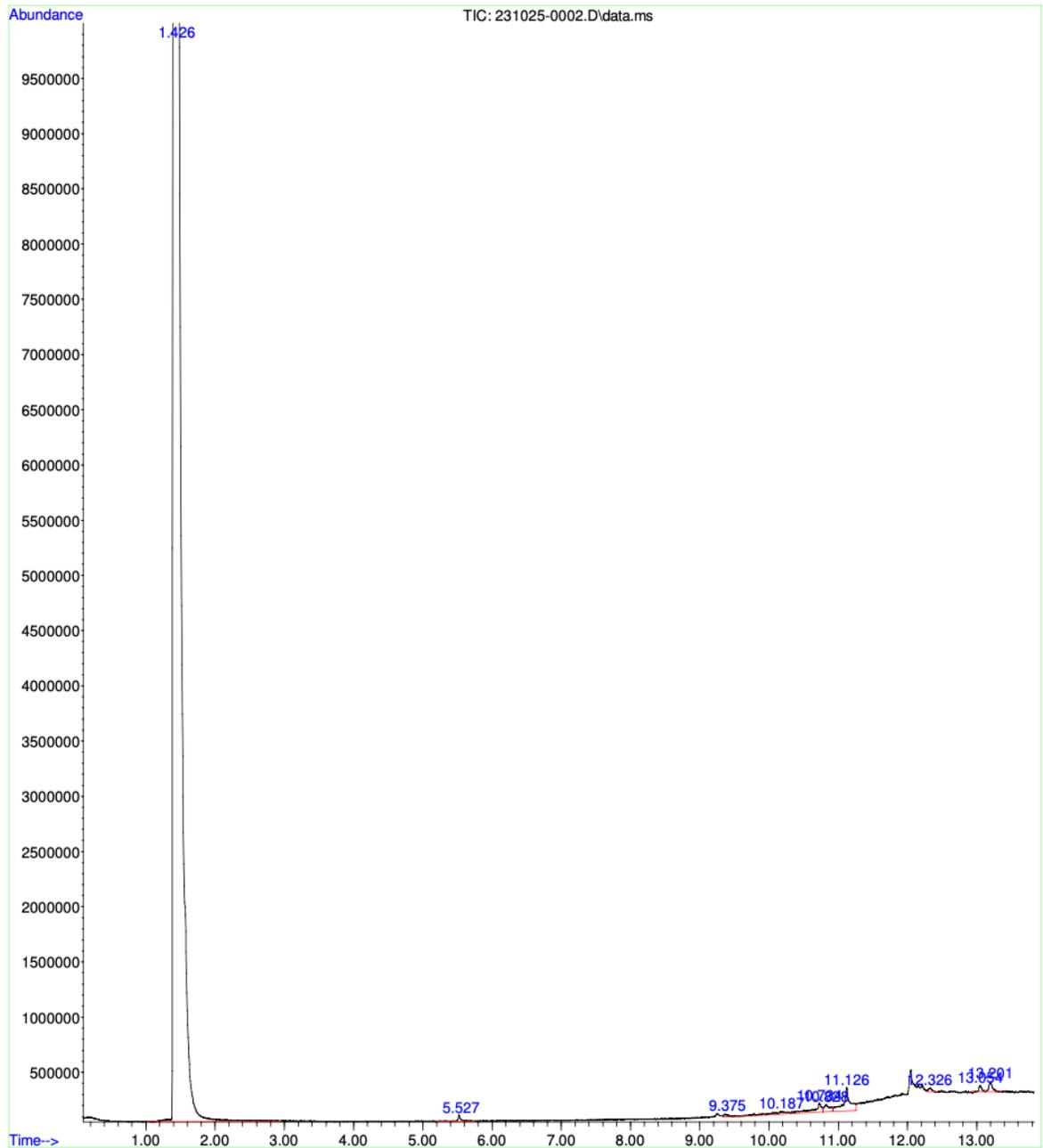


Tabla 47. Reporte del cromatograma de gases para la muestra del gas obtenido de la pirólisis a 410°C

LIQA Library Search Report						
Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\ Data File : 231025-0002.D Title : Acq On : 25 Oct 2023 10:50 (#1); 25-Oct-23, 10:50:41 (#2) Operator : AdeM Sample : Muestra gas pirolisis Misc : Mascarillas (Sig #1); (Sig #2) ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1						
Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0						
Unknown Spectrum: Apex Integration Events: ChemStation Integrator - autoint1.e						
PK#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	1.424	97.62	C:\Database\NIST05a.L Ketene Nitrogen Methane, diazo-	55 17 63	000463-51-4 007727-37-9 000334-88-3	1 1 1
2	5.528	0.11	C:\Database\NIST05a.L D-Limonene D-Limonene D-Limonene	15165 15162 15164	005989-27-5 005989-27-5 005989-27-5	91 91 86
3	9.375	0.06	C:\Database\NIST05a.L 2-Propenoic acid, 3-(4-methoxyphenyl)-, 2-ethylhexyl ester 2-Ethylhexyl trans-4-methoxycinnamate 2-Propenoic acid, 3-(4-methoxyphenyl)-, 2-ethylhexyl ester	118577 118568 118574	005466-77-3 083834-59-7 005466-77-3	94 81 72
4	10.189	0.27	C:\Database\NIST05a.L Ammonia Water	6 7	007664-41-7 007732-18-5	2 1
5	10.734	0.45	C:\Database\NIST05a.L Eicosane Nonadecane Octadecane, 2-methyl-	113489 104271 104275	000112-95-8 000629-92-5 001560-88-9	95 91 70
6	10.829	0.25	C:\Database\NIST05a.L 1,3,5-Triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester dl-Isocitric acid lactone	12366 161422 39160	000108-80-5 000103-23-1 004702-32-3	38 15 12
7	11.127	0.88	C:\Database\NIST05a.L Cyclononasiloxane, octadecamethyl-1,1,1,5,7,7,7-Heptamethyl-3,3-bis(trimethylsiloxy)tetrasiloxane Cyclononasiloxane, octadecamethyl-	189575 179156 189576	000556-71-8 038147-00-1 000556-71-8	56 52 28
8	12.329	0.06	C:\Database\NIST05a.L 1H-Indole, 5-methyl-2-phenyl- Benzo[h]quinoline, 2,4-dimethyl- 2-Ethylacridine	62237 62243 62222	013228-36-9 000605-67-4 055751-83-2	46 41 38
9	13.053	0.10	C:\Database\NIST05a.L Tricyclo[4.3.1.1(3,8)]undecane-1-carboxylic acid, methyl ester 1,2-Benzenedicarboxylic acid, dipropyl ester 5-Methyl-2-trimethylsilyloxy-acetophenone	62868 91873 72509	031083-60-0 000131-16-8 097389-69-0	38 35 30
10	13.199	0.20	C:\Database\NIST05a.L Octasiloxane, 1,1,3,3,5,5,7,7,9,9,11,11,13,13,15,15-hexadecamethyl-Tetrasiloxane, decamethyl-	187862 130463	019095-24-0 000141-62-8	64 30
AROMA FIBRA DBWAX.M Wed Oct 25 14:05:24 2023						
						Page: 1

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2023\
 Data File : 231025-0002.D
 Title :
 Acq On : 25 Oct 2023 10:50 (#1); 25-Oct-23, 10:50:41 (#2)
 Operator : AdeM
 Sample : Muestra gas pirolisis
 Misc : Mascarillas (Sig #1); (Sig #2)
 ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - autoint1.e

PK#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Acetic acid, [4-(1,1-dimethylethyl)phenoxy]-, methyl ester	72620	088530-52-3	30

Ilustración 12. Determinación del peso de las mascarillas quirúrgicas



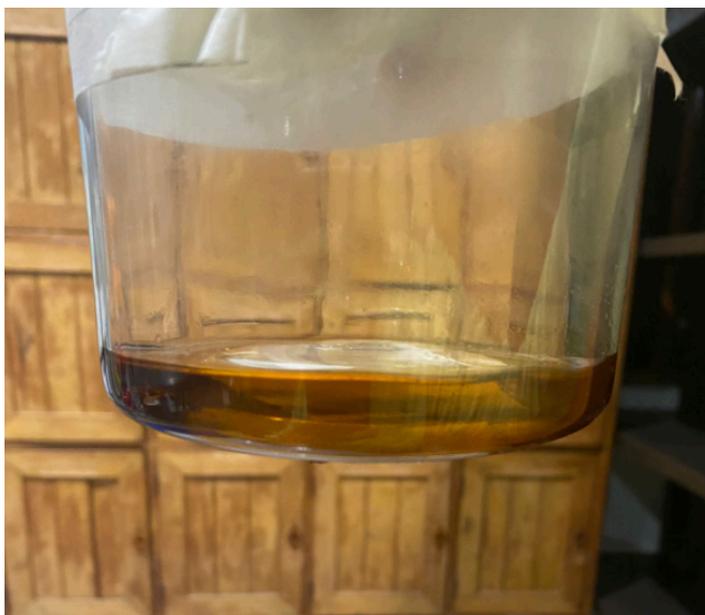
Nota. Determinación del peso de la mascarilla quirúrgica en la balanza ubicada en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 13. Sistema utilizado para la pirólisis de mascarillas quirúrgicas



Nota. Montaje del sistema de pirólisis y proceso de condensación en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración 14. Producto líquido de pirólisis a 380°C



Nota. Imagen del producto líquido obtenido de la pirólisis a una temperatura de 380°C en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración 15. Producto líquido de pirólisis a 410°C



Nota. Imagen del producto líquido obtenido de la pirólisis a una temperatura de 410°C en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración 16. Producto sólido de pirólisis a 410°C



Nota. Imagen del producto líquido obtenido de la pirólisis a una temperatura de 380°C en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración 17. Equipo de cromatografía de gases



Nota. Equipo de cromatografía de gases ubicado en el laboratorio de análisis avanzado ubicado en la Universidad del Valle de Guatemala.

GLOSARIO

Análisis termogravimétrico: Técnica que mide la variación de masa de un material en función de la temperatura.

Caracterización: Proceso de identificación y análisis de las propiedades y composición de un material.

Combustibles líquidos y sólidos: Productos resultantes de la pirólisis que pueden utilizarse como fuentes de energía.

Componentes de fase líquida: Los productos obtenidos en forma de líquido durante la pirólisis.

Cromatografía de gases: Técnica analítica que separa y cuantifica los componentes de una mezcla gaseosa.

Densidad: La masa por unidad de volumen de una sustancia.

Escala laboratorio: Investigación y experimentación llevada a cabo en un entorno de laboratorio a pequeña escala.

Mascarillas quirúrgicas: Dispositivos de protección facial utilizados en entornos médicos y en la prevención de enfermedades.

Pirólisis: Proceso térmico en el cual un material se descompone a altas temperaturas en ausencia de oxígeno.

Poder calorífico: La cantidad de energía liberada durante la combustión de un material.

Polímeros: Compuestos químicos compuestos por unidades repetitivas (monómeros).

Rendimientos máxicos: La cantidad de producto obtenido expresada como porcentaje de la masa inicial del material.

Residuos de mascarillas: Los desechos generados por las mascarillas después de su uso.

Variación de temperatura: Cambios en la temperatura durante el proceso de pirólisis.