

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



Propuesta de fabricación de briquetas a partir de bagazo de caña para la sustitución de madera como combustible doméstico

Trabajo de graduación presentado por Edgar Adolfo Ochoa Molina para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala

2021







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



Propuesta de fabricación de briquetas a partir de bagazo de caña para la sustitución de madera como combustible doméstico

Trabajo de graduación presentado por Edgar Adolfo Ochoa Molina para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala

2021



Vo. Bo.

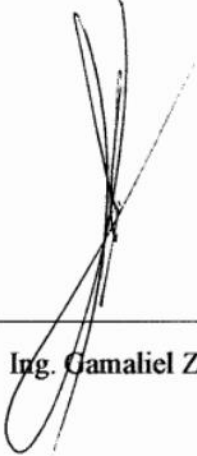
(f)



Ing. Allan Estuardo Cifuentes Iralda


Tribunal Examinador:

(f)



Ing. Gamaliel Zambrano

(f)



Ing. Luis Núñez

(f)



Ing. Allan Estuardo Cifuentes Iralda

Fecha de aprobación: Guatemala, 30 de abril de 2020





## PREFACIO

La realización del presente trabajo comenzó en la primera mitad del año 2020. Este comenzó como una idea de buscar soluciones renovables a la problemática del cambio climático. El tema investigado se limitó a utilizar bagazo de caña debido a la conveniencia de interés en los ingenios azucareros. El desarrollo de este conllevó a numerosas experimentaciones, así como la información recopilada de diversos autores en la misma línea de investigación.

Dicho trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo de amigos y familiares, en especial a mi padre, quien dio su apoyo incondicional en el alzamiento y ejecución del proyecto. De igual forma, se agradece al ingeniero Muñoz de Cengicaña, y a la Licenciada Melissa Morales e ingeniero Pablo García de Ingenio San Diego por el apoyo, consejos, paciencia y tiempo dedicado al estudio realizado y permitirme una estancia corta en los laboratorios de energía.

## CONTENIDO

PREFACIO.....	ix
LISTADO DE CUADROS .....	xii
LISTADO DE FIGURAS .....	xvii
RESUMEN.....	xxi
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. OBJETIVOS .....	3
A. GENERAL.....	3
B. ESPECÍFICOS.....	3
III. JUSTIFICACIÓN .....	4
IV. MARCO TEÓRICO.....	5
A. Energía.....	5
B. Cambio climático:.....	6
C. Desarrollo sostenible:.....	6
D. Energías renovables: .....	7
E. Biomasa: .....	8
F. Biomasa forestal .....	10
G. Biocombustibles sólidos .....	10
H. Mecanismo de aglomeración.....	13
I. Materiales aglomerantes. ....	15
J. Bagazo de caña como biomasa.....	16
K. Fabricación de briquetas .....	17
L. Tratamiento de la biomasa. ....	18
M. Operación de secado .....	19
N. Operación de molienda .....	21
O. Análisis estadístico: .....	21
V. ANTECEDENTES .....	25
VI. METODOLOGÍA .....	26
A. Equipo de trabajo .....	26
B. Obtención de materia prima. ....	26
C. Análisis de curva de secado de la biomasa.....	27
D. Reducción de tamaño de biomasa .....	28
E. Caracterización de forma y granulometría de bagazo de caña.....	28

F.	Fabricación de las briquetas .....	28
G.	Determinación de contenido de humedad. ....	29
H.	Determinación del contenido de cenizas. ....	29
I.	Determinación de la densidad. ....	29
J.	Poder calorífico superior. ....	30
K.	Análisis estadísticos .....	30
L.	Planteamiento de una línea de producción .....	30
VII.	RESULTADOS .....	32
A.	Características físicas de la materia prima empleada. ....	32
B.	Características fisicoquímicas de las briquetas y madera (control). ....	36
C.	Comparativo de combustibles. ....	41
D.	Planteamiento de planta piloto. ....	43
VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	50
IX.	CONCLUSIONES .....	57
X.	RECOMENDACIONES .....	58
XI.	REFERENCIAS.....	59
XII.	ANEXOS .....	62
A.	Datos originales .....	62
B.	Cálculos de muestra .....	88
C.	Análisis de error .....	111
D.	Datos calculados .....	116
E.	Imágenes del proceso experimental. ....	143
F.	Imágenes adicionales. ....	159

## LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1. Características físicas, químicas y fisicoquímicas de pellets y briquetas.....	12
Cuadro 2. Composición del bagazo de caña en México. ....	16
Cuadro 3. Tipos de molinos de acuerdo con tamaño de partícula final. ....	21
Cuadro 4. Humedad del bagazo de caña posterior al secado y almidón empleados. ....	33
Cuadro 5. Parámetros empleados y características de las briquetas elaboradas. ....	34
Cuadro 6. Intervalo de confianza al 95% del contenido de cenizas, en base seca, de las briquetas a distintas composiciones y de la madera analizada. ....	36
Cuadro 7. Intervalo de confianza de la densidad de las briquetas a distintas composiciones y presiones de compresión en el día 10.....	38
Cuadro 8. Intervalo de confianza de la densidad de la madera. ....	39
Cuadro 9. Intervalo de confianza al 95% de la humedad de las briquetas a 3 distintas composiciones en el día 10 de almacenamiento y madera analizada.....	39
Cuadro 10. Intervalo de confianza al 95% del PCS de las briquetas a 3 distintas composiciones y madera analizada.....	40
Cuadro 11. Cuadro comparativo de propiedades fisicoquímicas de las briquetas y la madera. ....	41
Cuadro 12. Observaciones en el ensayo de quemado de la madera y las briquetas a 10%, 15% y 20%. ..	42
Cuadro 13. Propuesta de equipos a emplear para la briquetación de bagazo.....	45
Cuadro 14. Parámetros de producción de las briquetas.....	47
Cuadro 15. Balance de masa de las corrientes propuestas en el diagrama de bloques y diagrama de flujo del proceso. ....	47
Cuadro 16. Dimensiones y condiciones de la cámara de secado para el secado por lotes de bagazo de caña. ....	49
Cuadro 17. Mediciones de pérdida de humedad en proceso de secado en deshidratador de bandejas a 60 °C de cuatro bandejas con muestra. ....	62
Cuadro 18. Tara y dimensiones de las 4 bandejas empleadas durante las mediciones de pérdida de humedad.....	63
Cuadro 19. Humedad final del bagazo de caña en la prueba de secado a 60 °C. ....	63
Cuadro 20. Tara y número de tamiz empleados en el análisis granulométrico de bagazo de caña. ....	64
Cuadro 21. Cantidad de muestra empleada en el bagazo de caña seco molido y no molido. ....	64
Cuadro 22. Masa retenida del análisis granulométrico de bagazo de caña seco no molido. ....	64
Cuadro 23. Masa retenida del análisis granulométrico de bagazo de caña seco molido. ....	65
Cuadro 24. Dimensiones de longitud larga (L), intermedia (I) y corta (C) de las fibras de bagazo retenidas en mesh 20. ....	66

Cuadro 25. Dimensiones de longitud larga (L), intermedia (I) y corta (C) de las fibras de bagazo retenidas en mesh 20. ....	67
Cuadro 26. Longitud de las fibras de bagazo no molido retenidas en distintos tamices.....	68
Cuadro 27. Longitud de las fibras de bagazo molido retenidas en distintos tamices.....	70
Continuación de Cuadro 27. ....	71
Cuadro 28. Mediciones de contenido de cenizas de almidón de maíz empleado en las briquetas.....	71
Cuadro 29. Mediciones de contenido de cenizas de bagazo de caña empleado en las briquetas. ....	71
Cuadro 30. Mediciones de contenido de cenizas de mezcla almidón/bagazo 10 % empleado en las briquetas.....	72
Cuadro 31. Mediciones de contenido de cenizas de mezcla almidón/bagazo 15 % empleado en las briquetas.....	72
Cuadro 32. Mediciones de contenido de cenizas de mezcla almidón/bagazo 20 % empleado en las briquetas.....	72
Cuadro 33. Mediciones de contenido de cenizas madera.....	73
Cuadro 34. Masa de las briquetas analizadas para densidad a distintas composiciones y presiones de compresión.....	73
Cuadro 35. Dimensiones de la briqueta al 10 % almidón/bagazo a una compresión de 10 MPa en 5 min. ....	74
Cuadro 36. Dimensiones de la briqueta al 10 % almidón/bagazo a una compresión de 20 MPa en 5 min. ....	75
Cuadro 37. Dimensiones de la briqueta al 10 % almidón/bagazo a una compresión de 30 MPa en 5 min. ....	76
Cuadro 38. Dimensiones de la briqueta al 15 % almidón/bagazo a una compresión de 10 MPa en 5 min. ....	77
Cuadro 39. Dimensiones de la briqueta al 15 % almidón/bagazo a una compresión de 20 MPa en 5 min. ....	78
Cuadro 40. Dimensiones de la briqueta al 15 % almidón/bagazo a una compresión de 30 MPa en 5 min. ....	79
Cuadro 41. Dimensiones de la briqueta al 20 % almidón/bagazo a una compresión de 10 MPa en 5 min. ....	80
Cuadro 42. Dimensiones de la briqueta al 20 % almidón/bagazo a una compresión de 20 MPa en 5 min. ....	81
Cuadro 43. Dimensiones de la briqueta al 20 % almidón/bagazo a una compresión de 30 MPa en 5 min. ....	82
Cuadro 44. Masa de la madera analizada para la determinación de su densidad. ....	83
Cuadro 45. Dimensiones de los trozos de madera analizada para la determinación de su densidad. ....	83
Cuadro 46. PCS de briquetas a distintas composiciones.....	83

Cuadro 47. PCS del almidón de maíz empleado en las briquetas.....	84
Cuadro 48. Mediciones de PCS de la madera analizada utilizando como ayudante aceite. ....	84
Cuadro 49. Masa de madera y aceite empleado para la determinación del PCS de la madera. ....	84
Cuadro 50. Humedades de materias empleadas en las briquetas y madera analizada.....	84
Cuadro 51. Humedad de las briquetas al día 10 de almacenamiento anaquel, medición realizada en Ingenio San Diego. ....	85
Cuadro 52. Temperaturas de la plancha de la estufa de biomasa en el ensayo de quema de 614.9 g de madera.....	85
Cuadro 53. Temperaturas de la plancha de la estufa de biomasa en el ensayo de quema de 592.0 g de briqueta al 10%.....	86
Cuadro 54. Temperaturas de la plancha de la estufa de biomasa en el ensayo de quema de 600.5 g de briqueta al 15%.....	86
Cuadro 55. Temperaturas de la plancha de la estufa de biomasa en el ensayo de quema de 606.5 g de briqueta al 20%.....	87
Cuadro 56. Consideraciones de diseño para la cámara de secado y el camión de bandejas. ....	103
Cuadro 57. Condiciones de masa de bagazo y humedad durante el secado a 60 °C de la bandeja 1. ....	116
Cuadro 58. Condiciones de masa de bagazo y humedad durante el secado a 60 °C de la bandeja 2. ....	117
Cuadro 59. Condiciones de masa de bagazo y humedad durante el secado a 60 °C de la bandeja 3. ....	118
Cuadro 60. Condiciones de masa de bagazo y humedad durante el secado a 60 °C de la bandeja 4. ....	119
Cuadro 61. Rapideces de secado en flux de masa ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) del bagazo de caña durante el secado a 60 °C de la bandeja 1. ....	120
Cuadro 62. Rapideces de secado en flux de masa ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) del bagazo de caña durante el secado a 60 °C de la bandeja 2. ....	121
Cuadro 63. Rapideces de secado en flux de masa ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) del bagazo de caña durante el secado a 60 °C de la bandeja 3. ....	122
Cuadro 64. Rapideces de secado en flux de masa ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) del bagazo de caña durante el secado a 60 °C de la bandeja 4. ....	123
Cuadro 65. Valores promedio de las bandejas analizadas para la curva de secado expresada como X (kg agua/kg SS) contra tiempo en minutos.....	124
Cuadro 66. Valores promedio de la rapidez de secado en flux de masa ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) y el contenido de humedad en base seca X (kg agua/kg Ss) para la curva de rapidez de secado a 60 °C del bagazo de caña. ....	126
Cuadro 67. Sólido retenido en el análisis granulométrico del bagazo de caña no molido. ....	128
Cuadro 68. Sólido retenido en el análisis granulométrico del bagazo de caña molido. ....	128
Cuadro 69. Sólido retenido acumulado en el análisis granulométrico del bagazo de caña no molido....	128
Cuadro 70. Sólido retenido acumulado en el análisis granulométrico del bagazo de caña molido.....	129

Cuadro 71. Sólido retenido en el análisis granulométrico del bagazo de caña no molido. ....	129
Cuadro 72. Sólido retenido en el análisis granulométrico del bagazo de caña molido. ....	129
Cuadro 73. Factores de forma (Elongación, Llanura y Corey) de las fibras de bagazo de caña sin moler retenidas en Tamiz con mesh 20. ....	131
Cuadro 74. Factores de forma (Elongación, Llanura y Corey) de las fibras de bagazo de caña molido retenidas en Tamiz con mesh 20. ....	132
Cuadro 75. Contenido de cenizas en base seca de la madera y almidón y bagazo de caña empleado. ...	135
Cuadro 76. Intervalo de confianza al 95 % del contenido de cenizas en base seca de la madera y el almidón de maíz empleado.....	135
Cuadro 77. Contenido de cenizas en base seca de las briquetas a distintas composiciones (10%, 15% y 20%).....	135
Cuadro 78. Intervalo de confianza al 95 % del contenido de cenizas en base seca de las briquetas a distintas composiciones (10%, 15% y 20%) y de la madera analizada.....	136
Cuadro 79. Cambio de densidad en el tiempo de las briquetas a distintas presiones de compresión a una composición de 10%. ....	136
Cuadro 80. Cambio de densidad en el tiempo de las briquetas a distintas presiones de compresión a una composición de 15%. ....	137
Cuadro 81. Cambio de densidad en el tiempo de las briquetas a distintas presiones de compresión a una composición de 20%. ....	138
Cuadro 82. Densidad de la madera analizada. ....	138
Cuadro 83. Intervalo de confianza al 95 % del contenido de cenizas de las 3 briquetas a distintas composiciones, bagazo de caña, madera analizada y almidón empleado. ....	139
Cuadro 84. Intervalo de confianza al 95% de la humedad de las briquetas a 3 distintas composiciones en el día 10 de almacenamiento, madera analizada y almidón de maíz empleado. ....	139
Cuadro 85. Intervalo de confianza al 95% del PCS de las briquetas a 3 distintas composiciones, madera analizada y almidón de maíz empleado. ....	140
Cuadro 86. Intervalo de confianza al 95% de la densidad de las briquetas a distintas composiciones y presiones de compresión en el día 10. ....	140
Cuadro 87. Intervalo de confianza de la densidad de la madera. ....	140
Cuadro 88. Valor P de la prueba de hipótesis de medias poblacionales del contenido de cenizas entre las briquetas a distintas composiciones y la madera analizada para un $\alpha$ de 0.05.....	141
Cuadro 89. Valor P de la prueba de hipótesis de medias poblacionales del contenido de humedad entre las briquetas a distintas composiciones en el día 10 de almacenamiento y la madera analizada para un $\alpha$ de 0.05.....	141
Cuadro 90. Valor P de la prueba de hipótesis de medias poblacionales del PCS entre las briquetas a distintas composiciones en el día 10 de almacenamiento y la madera analizada para un $\alpha$ de 0.05.....	141

Cuadro 91. Valor P de la prueba de hipótesis de medias poblacionales de la densidad entre las briquetas a distintas composiciones a 30 MPa de compresión en el día 10 de almacenamiento y la madera analizada para un $\alpha$ de 0.05.....	142
Cuadro 92. Temperaturas promedio de planta de estufa de biomasa para la quema madera y Briquetas a 10%, 15% y 20% .....	142



## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Inversión global para sistemas de energía, al año 2017. ....	5
Figura 2. Diecisiete objetivos de desarrollo sostenible. ....	7
Figura 3. Pellets.....	11
Figura 4. Briqueta.....	12
Figura 5. Diferentes mecanismos de enlace de procesos de aglomeración: a) puente de sinterización parcial; b) acción de ligantes endurecedores mediante reacción química; c) acción de ligante que forman puentes líquidos; d) fuerzas capilares; e) fuerzas moleculares y electrostáticas; f) enlaces de acoplamiento. ....	15
Figura 6. Características de prensas en elaboración de briquetas. ....	17
Figura 7. Prensa briquetadora MÜTEK, con flujo de trabajo de 30-550 kg/h.....	18
Figura 8. Curva de secado típica. ....	20
Figura 9. Curva típica de rapidez de secado. ....	20
Figura 10. Pasos para realizar para la prueba de hipótesis. ....	23
Figura 11. Valores de t a distintos niveles de probabilidad.....	24
Figura 12. Curva granulométrica de bagazo de caña empleada retirando fibras con tamaños mayores a 0.85 mm (mesh 20).....	32
Figura 13. Longitud de las fibras de bagazo de caña molido y tamizado (mesh 30, 45, 60). ....	32
Figura 14. Contenido de cenizas, en base seca, en relación con la composición de almidón/bagazo de caña en 10%, 15% y 20%. ....	36
Figura 15. Disminución de densidad en el tiempo de briquetas al 10 % de composición a 10, 20 y 30 MPa. ....	37
Figura 16. Disminución de densidad en el tiempo de briquetas al 15 % de composición a 10, 20 y 30 MPa. ....	37
Figura 17. Disminución de densidad en el tiempo de briquetas al 20 % de composición a 10, 20 y 30 MPa. ....	38
Figura 18. Contenido de humedad de las briquetas a 3 distintas composiciones en el día 10 de almacenamiento y de la madera analizada.....	39
Figura 19. PCS de las briquetas a 3 distintas composiciones.....	40
Figura 20. Ensayo de quemado, temperatura en la plancha de la estufa de biomasa en función del tiempo de la quema aproximada de 0.600 kg de biocombustible.....	41
Figura 21. Diagrama de caja negra del proceso de densificación de bagazo de caña. ....	43
Figura 22. Diagrama de bloques del proceso de densificación de bagazo de caña. ....	44

Figura 23. Diagrama de flujo del proceso de densificación de bagazo de caña con aglutinante almidón de maíz en seco. ....	46
Figura 24. Corrientes en operación de prensado, diagrama de bloques.....	93
Figura 25. Corrientes en operación de mezclado, diagrama de bloques. ....	95
Figura 26. Corrientes en operación de tamizado, diagrama de bloques. ....	97
Figura 27. Corrientes en operación de molienda, diagrama de bloque. ....	98
Figura 28. Corrientes en operación de almacenamiento de bagazo seco, diagrama de bloques.....	99
Figura 29. Corrientes en operación de secado por lotes, diagrama de bloques. ....	99
Figura 30. Esquema de secador de bandejas. ....	106
Figura 31. Resultados de prueba de hipótesis de medias poblacionales de la densidad de la madera y la briqueta al 10% presionada a 30 MPa en el día 10 de almacenamiento en anaquel. ....	114
Figura 32. Curva de secado expresada en contenido de humedad en el tiempo de bagazo de caña en un secador de bandejas a 60 °C. ....	125
Figura 33. Curva de secado expresado en flux masa de bagazo de caña en secador de bandejas a una temperatura de 60 °C. ....	127
Figura 34. Curva granulométrica de bagazo de caña para prueba con reducción de partícula y sin reducción de partícula utilizando tamices de tamaños de 20, 30, 45, 60, 80 y 100 mesh. ....	130
Figura 35. Factores de forma de Elongación, Llanura y Corey para las fibras de bagazo de caña sin moler (SM) retenidas en tamiz no. 20. ....	133
Figura 36. Factores de forma de Elongación, Llanura y Corey para las fibras de bagazo de caña molida (M) retenidas en tamiz no. 20. ....	133
Figura 37: Longitud de las fibras de bagazo de caña previo a la reducción de partícula. ....	134
Figura 38. Longitud de las fibras de bagazo de caña después de la reducción de partícula. ....	134
Figura 39. Bagazo de caña en la salida de masas de ingenio La Unión.....	143
Figura 40. Muestra de bagazo contenida en saco. ....	143
Figura 41. Saco de almidón de maíz empleado obtenido de la empresa ALDA. ....	143
Figura 42. Madera de empleada para los análisis. ....	144
Figura 43. Prototipo de prensa para densificación con capacidad de prensado a 10 MPa. ....	144
Figura 44. Molde y piezas auxiliares utilizadas para la densificación de biomasa en prensa. ....	144
Figura 45. Posición de piezas para extrusión de la briqueta contenida en el interior del molde. ....	145
Figura 46. Secador de bandeja CORBETT INDUSTRIES INC, empleado para el secado de bagazo de caña a 60 °C.....	145
Figura 47. Cámara de secado del secador de bandejas con el camión de bandejas. ....	145
Figura 48. Bandejas pequeñas empleadas para la medición de la curva de secado. ....	146
Figura 49. Llenado de bagazo de caña en las bandejas. ....	146

Figura 50. Tamizador Tyler RO TAP, modelo RX-29, empleado para el análisis granulométrico .....	146
Figura 51. Bagazo no molido retenido en tamiz no. 20, 30, 45, 60, 80, 100 y fondo. ....	147
Figura 52. Molino de discos empleado para la reducción de partícula. ....	147
Figura 53. Bagazo molido retenido en tamiz no. 20, 30, 45, 60, 80, 100 y fondo. ....	147
Figura 54. Fibras de bagazo retenidas tamiz no. 20. ....	148
Figura 55. Medición de fibra de bagazo para factores de forma utilizando vernier electrónico. ....	148
Figura 56. Mufla THERMOLYNE, modelo F6010, empleada para el análisis de cenizas. ....	148
Figura 57. Muestras de almidón de maíz y bagazo de caña para análisis de contenido de cenizas. ....	149
Figura 58. Muestras de madera para análisis de cenizas de contenido de cenizas. ....	149
Figura 59. Cenizas de las muestras de almidón de maíz y bagazo de caña. ....	149
Figura 60. Cenizas de la muestra de madera. ....	150
Figura 61. Cenizas de briquetas. ....	150
Figura 62. Balanza de humedad OHAUS, modelo MB 120, usada para la determinación del contenido de humedad. ....	150
Figura 63. Calorímetro IKA, modelo C 200, empleado para la determinación del PCS de la madera analizada. ....	151
Figura 64. Bomba calorimétrica y piezas auxiliares para el funcionamiento del calorímetro IKA. ....	151
Figura 65. Medición de masa de madera en el crisol del calorímetro IKA. ....	151
Figura 66. Fabricación de briquetas empleando prensa CARVER. ....	152
Figura 67. Briqueta pensada dentro de molde. ....	152
Figura 68. Briqueta extruida de molde. ....	152
Figura 69. Almacenamiento en anaquel de las briquetas fabricadas en composiciones 10, 15 y 20% a 10, 20 y 30 MPa. ....	153
Figura 70. Briquetas al 10% de composición a presiones de 10, 20 y 30 MPa (izquierda a derecha) en el día 10 de almacenamiento. ....	153
Figura 71. Briquetas al 15% de composición a presiones de 10, 20 y 30 MPa (izquierda a derecha) en el día 10 de almacenamiento. ....	153
Figura 72. Briquetas al 20% de composición a presiones de 10, 20 y 30 MPa (izquierda a derecha) en el día 10 de almacenamiento. ....	154
Figura 73. Madera cortada en forma de prisma triangular para la determinación de su densidad. ....	154
Figura 74. Muestras de briquetas utilizadas para el PCS y humedad en el día 10 de almacenamiento. .	154
Figura 75. Calorímetro Leco, modelo AC 500, empleado para la medición del PCS en Ingenio San Diego. ....	155
Figura 76. Estufa de biomasa empleada para el ensayo de quemado. ....	155
Figura 77. Madera alimentada a estufa de biomasa para ensayo de quemado (0.600 kg) .....	155

Figura 78. Combustión de la madera en estufa de biomasa. ....	156
Figura 79. Cenizas de madera al finalizar la combustión. ....	156
Figura 80. Briquetas alimentadas a estufa de biomasa para ensayo de quemado, por cada composición (0.600 kg) .....	156
Figura 81. Combustión de la briqueta al 10% en estufa de biomasa. ....	157
Figura 82. Combustión de la briqueta al 15% en estufa de biomasa. ....	157
Figura 83. Combustión de la briqueta al 20% en estufa de biomasa. ....	157
Figura 84. Cenizas de las briquetas al finalizar la combustión. ....	158
Figura 85. Efecto de no realizar molienda del bagazo de caña. ....	158
Figura 86. Briqueta con almidón y sin almidón. ....	158
Figura 87. Ficha técnica de Almidón de la empresa ALDA.....	159
Figura 88. Datos experimentales por el laboratorio de energía de Ingenio San Diego. ....	160

## RESUMEN

Para la propuesta de una planta de producción, es importante el realizar pruebas de laboratorio que permitan tener un mejor entendimiento del proceso y puedan ser escaladas a producciones mayores. El caso de la fabricación de biocombustibles sólidos no es diferente. A pesar de que existen diversos estudios sobre los biocombustibles sólidos y datos establecido de plantas de producción, la naturaleza de las materias primas a emplear puede resultar en desviaciones de los otros procesos conocidos.

En el siguiente documento, se presenta el proceso llevado a cabo desde escala laboratorio a una propuesta para un escalamiento a planta piloto de la producción de briquetas de bagazo de caña con almidón de maíz como agente aglutinante. Se mencionan las operaciones unitarias establecidas para el proceso, las cuales son: secado, almacenamiento, molienda, tamizado, mezclado, prensado y empaque del producto finalizado. De acuerdo con las operaciones identificadas se realizaron los diagramas de caja negra, de bloques y de flujo de procesos para ilustrar las operaciones y las relaciones existentes unas con otras con el fin de establecer las bases necesarias para la realización de plantas a escalas mayores.

Las briquetas propuestas fueron una combinación de la mezcla aglutinante/bagazo a 10%, 15% y 20%, en base húmeda, a presiones de compresión de 10, 20 y 30 MPa También se realizan mediciones de interés en los biocombustibles sólidos para las briquetas fabricadas, siendo estas pruebas su poder calorífico, contenido de cenizas, humedad, densidad, forma, apariencia, y llama generada en la combustión. Estas fueron comparadas con una muestra de madera comercial, proveniente de distintas especies de árboles, para evaluar si existe similitud alguna, con el propósito de evaluar si el biocombustible puede ser un sustituto de la madera. De acuerdo con los resultados, la briqueta generada a una composición del 10 y 15% a una compresión de 30 MPa tiene similitud con la madera en su densidad. Mientras tanto, el poder calorífico, humedad y cenizas no son similares. Por lo tanto, se eligió la mezcla de 15% a 30 MPa como la mejor combinación para el proceso de producción.

## I. INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo presenta la metodología para la fabricación de un material combustible de origen biológico denominado como biomasa, fabricado a partir de bagazo de caña de los ingenios azucareros, a escala laboratorio. En Guatemala, el uso de la madera es utilizado en diversas actividades, tales como para fabricación de muebles o tableros usados en construcciones, o utilizado como leña en sistemas de calefacción o como combustible. La madera es un material de origen orgánico, compuesta fundamentalmente por celulosa y lignina, y su obtención de origen natural. El uso de la madera como combustible en forma de leña siempre ha sido de interés para los pobladores guatemaltecos, y en los últimos años su consumo ha ido en aumento. Según el informe estadístico DGE del año 2016 (MEM, 2016), la producción de leña como fuente de combustible primario ha ido en aumento, encontrándose a 46,102.14 kBEP en el año 2016.

La madera al ser de origen natural puede ser considerado como una biomasa, es decir que es parte del conjunto de materia orgánica renovables de origen natural. El problema se encuentra en que existe una sobreexplotación de su extracción, y en muchas ocasiones se realizan talas ilegales de árboles para adquirir el mismo. Según un estudio realizado por varias instituciones de gobierno (INAP, CONAP, MAGA Y MARN) y dos instituciones de la academia (UVG y URL/IARNA), la cifra de cobertura forestal existente en el año 2010 (3,675,786 hectáreas), en contraste con la del año 2016 (3,574,244 hectáreas) hubo una disminución en la cobertura forestal del 0.9% (SIFGUA. 2019). En términos generales, fuentes de energía de biomasa pueden ser obtenidos de distintos orígenes tales como los residuos forestales, agrícolas y los residuos de distintas actividades industriales. La disponibilidad de estos depende de la región y de su zona climática. En Guatemala, existe mucho potencial para la obtención de biomasa de residuos agrícolas debido a toda la producción referente a este. Una ventaja que tiene el aprovechamiento de esta biomasa es que se encuentra en gran cantidad, y puede ser utilizada en quema directa o puede ser llevado por procesos bioquímicos para la obtención de nuevas sustancias que pueden valorizarse.

En cuanto a la quema directa de la biomasa, se cuenta con el inconveniente de la humedad presente en esta. Pequeñas cantidades de agua en el material disminuyen considerablemente el poder calorífico del mismo, por lo que es necesario retirar el agua presente en ellas para que sean convenientes para su quema directa. En muchos casos, los residuos agrícolas cuentan con una cantidad significativa de humedad, por lo que es necesario reducir el agua por medio de operaciones de secado. En el caso de Guatemala, existe mucha producción de material residual de las actividades agrícolas, las cuales pueden ser utilizadas como biomasa. En este trabajo, se presenta una alternativa de fuente de energía renovable, en la forma de briquetas de bagazo, que pueda ser usado para su quema directa. Para llevar a cabo estas briquetas, se requiere de

procesos de cambios físicos que involucran disminución de humedad por secado, y la compresión del material por medio de equipos que permiten altas compresiones (Kuyper y Ramírez, 2014).

Una de las ventajas de utilizar bagazo de caña para la fabricación de briquetas es su cantidad de materiales lignocelulósicos. Estos mejoran las propiedades mecánicas de los materiales. Entre los materiales presentes (Lignina, celulosa y hemicelulosa), la lignina es de mayor interés, ya que, al realizarse compresión en los materiales, se produce cohesión del material gracias a la lignina. En promedio, la madera tiene una concentración de 25% en su composición total (Kuyper y Ramírez, 2014). En comparación con el bagazo de caña, esta puede tener concentraciones de 23% en su composición, el cual es muy cercano a la de la madera (Flores, 2013).

## II. OBJETIVOS

### A. GENERAL

Proponer la fabricación a escala laboratorio de briquetas a partir de bagazo de caña como combustible doméstico para la sustitución de madera.

### B. ESPECÍFICOS

1. Obtener las briquetas de bagazo con características físicas similares a la madera experimentando con distintos parámetros físicos en la fabricación.
2. Evaluar características fisicoquímicas de la briqueta para comparar con un combustible doméstico.
3. Realizar un planteamiento de equipos para la producción de briquetas a escala piloto, empleando balances de masa y energía y los esquemas de proceso.



### III. JUSTIFICACIÓN

Los combustibles son altamente demandados para las distintas actividades industriales o actividades doméstica. En los usos domésticos, son utilizados para la cocina o calefacción del hogar en donde el principal combustible es la madera en áreas rurales. En algunas regiones del país, la extracción de la leña (madera utilizada como combustible) es principalmente de origen forestal. Dado su alto consumo, ha causado preocupación en su uso descontrolado por la tala indiscriminada de árboles, provocando deforestaciones no sostenibles. Por lo tanto, es necesario buscar alternativas de combustible que sean más sostenibles, y a su vez limpias y asequibles que no dependan de fuentes de bosques naturales.

En American Latina y el Caribe, se estima que 87 millones de personas (el 15% de la población) emplean biomasa de fuentes no sostenibles (leña y carbón vegetal) con fines de calefacción. En estas regiones se producen grandes cantidades de productos agrícolas que dejan residuos que pueden ser aprovechados como biomasa en forma sostenible (Cepal, 2019). En el caso de Guatemala, las oportunidades son numerosas para el aprovechamiento de desechos agrícolas, y su uso para la obtención de energías alternas y renovables que van de acuerdo con los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) para lograr un futuro sostenible y más responsable.

Una de la biomasa generada en grandes cantidades es el bagazo de caña de los ingenios azucareros del sur de Guatemala. En Ingenio La Unión se estima que, durante la zafra de 2019-2020, los excedentes bagazo de caña alcanzaron una cantidad de 80,000 toneladas que no fueron utilizadas para la generación de energía. El no quemar el bagazo excedente causa problemas en cuanto una posible combustión debido al calor generado por la descomposición de este y una pérdida de su poder calorífico como resultado de la misma descomposición. Dado las grandes cantidades, el almacenamiento para su uso posterior no suele ser efectivo.

Debido a su alta disponibilidad, existe una oportunidad para valorizar los excedentes de caña de los ingenios azucareros como biocombustible de alta densidad renovable y ecológico en forma de briquetas y buscar reducir el uso de madera proveniente de fuentes no renovables y contribuir por un futuro más sostenible y responsable con los recursos naturales.

## IV. MARCO TEÓRICO

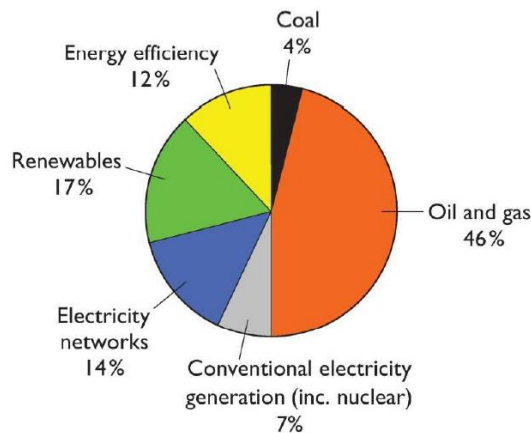
### A. Energía.

La energía es un fenómeno que aún no está comprendido en su totalidad y es difícil de definir. Sin embargo, el término energía tiene distintas acepciones y definiciones, todas relacionadas con ser una fuerza o que provoca actividad. El concepto cotidiano para la energía es más enfocado en el combustible para transporte y calefacción, electricidad para equipos electrodomésticos y luz, alimento para el consumo, entre otros. Es importante denotar que estas ideas no necesariamente denotan la definición de energía, en cambio son ejemplos de fuentes de energía. La energía se puede definir como “la capacidad de un cuerpo para efectuar trabajo”, y en general el trabajo son acciones que producen algún movimiento (Serway y Jewett, 2014).

La obtención de energía hoy en día es de gran importancia, no solamente para impulsar las distintas actividades naturales que permiten la vida en la Tierra, también juega un importante rol en el desarrollo y crecimiento humano. Como es natural de esperar, un crecimiento en la población implica un mayor consumo de energía para las distintas actividades humanas.

Según el Centro de Estudios de Energía, Política y Sociedad (CEEPYs, 2017), más del 80% de la energía que mueve al mundo es obtenida por el uso de combustibles fósiles. El carbón es uno de los combustibles más utilizados por países con grandes demandas energéticas. Según la Agencia Internacional de Energía (Internacional Agency of Energy-IAE), la mayor inversión global para sistemas de generación de energía sigue siendo dominada por las energías fósiles. Para el año 2017, las inversiones se muestran en la siguiente figura:

Figura 1. Inversión global para sistemas de energía, al año 2017.



## B. Cambio climático:

Dado que gran parte de las actividades realizadas hoy en día involucran una gran demanda de combustibles fósiles, causantes principales del aumento de los gases de efecto invernadero (GEI). Las actividades humanas están teniendo un grave efecto en el cambio climático, debido al aumento de los GEI, deforestaciones y desertificaciones y por la reducción de capa de ozono estratosférico por la liberación de gases CFC.

La concentración de los GEI ha variado enormemente a lo largo del tiempo por distintas causas naturales; sin embargo, las actividades humanas han causado un aumento considerable debido a la Revolución Industrial. Hoy en día, las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se encuentran por arriba de 400 ppm, mientras que la concentración fue de 290 ppm en el inicio de la era industrial. Estos cambios provocados en la atmósfera tienen impactos en los ecosistemas terrestres y acuáticos. Los impactos esperados son los siguientes:

- Bosques: Se prevén importantes cambios en distintos tipos de vegetación en aproximadamente 1/3 de la superficie mundial de bosques como consecuencia de cambios de temperatura y disponibilidad de agua.
- Desiertos: Las zonas semiáridas se desplazarán a ser zonas desérticas.
- Ecosistemas montañosos: La vegetación se desplazará a mayor altura.
- Ecosistemas costeros: Vulnerables al aumento del nivel del mar. Pueden tener reservas de agua dulce considerablemente reducidas.

De igual forma, el cambio climático tendrá efecto sobre las poblaciones humanas, principalmente a las poblaciones costeras ya que son más vulnerables a inundaciones y pérdida de tierras, las cuales son de gran importancia para el cultivo de alimentos (Creus, 2014).

## C. Desarrollo sostenible:

El cambio climático ya es una realidad que hoy en día se vive, por lo que es de gran importancia buscar nuevas formas de sostener las actividades humanas sin causar grandes impactos negativos al medio ambiente. El desarrollo sostenible busca satisfacer las necesidades presentes de la población sin comprometer la capacidad de regeneración de los recursos para las necesidades de las generaciones futuras (ONU, 2002). Ya que el incremento de consumo

energético es uno de los causantes principales en la degradación del planeta, es clave buscar alternativas estratégicas para reducir las emisiones de GEI y el consecuente cambio climático.

Los objetivos del desarrollo sostenible son un llamado mundial para poner fin a la pobreza, proteger al planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para el año 2030. Esta meta consta de 17 objetivos como se muestra en la siguiente figura (ONU. 2020). Haciendo un mejor uso de los recursos naturales para un mejor aprovechamiento energético cumple con los objetivos 7 y 13.

Figura 2. Diecisiete objetivos de desarrollo sostenible.



#### D. Energías renovables:

Las energías renovables son aquellas energías que se regeneran de manera natural y que son prácticamente inagotables en el tiempo. Por lo tanto, estas energías son obtenidas por recursos naturales renovables, y son considerados como tal si su tasa de crecimiento es mayor o igual a la de extracción. En el origen, todos los recursos renovables encuentran su origen en el sol, con excepción a la energía geotérmica, la principal fuente de energía de la Tierra que activa los flujos de viento y agua y activa el crecimiento de la vegetación de los suelos.

Las energías renovables comprenden las siguientes:

- Biomasa.
- Geotérmica
- Eólica.
- Hidráulica.
- Oceánica.
- Mareomotriz.

- Energía térmica.
- Fusión Nuclear
- Solar.

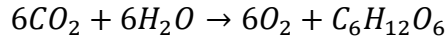
Las energías renovables han sido reconocidas desde tiempos muy antiguos cuando el hombre aprendió a utilizar la energía del viento como propulsión de los barcos de vela. Se conoce del aprovechamiento de la energía hidráulica desde el año 1000 a de C. con el uso de molinos de molienda de cereales movidos por corrientes de ríos. La energía solar empezó a ser aprovechada a finales del siglo pasado.

La problemática que impulsó el interés en el uso de las energías renovables es debido a los efectos del cambio climático por las altas emisiones de gases a la atmósfera. El llamado efecto invernadero impide que los rayos infrarrojos del sol, una vez entran a la Tierra, logren escapar. En consecuencia, los rayos infrarrojos causan un calentamiento de la Tierra. sin embargo, este es un fenómeno natural y necesario para mantener la temperatura adecuado, pero este efecto ha sido potenciado por el hombre al quemar grandes cantidades de combustible fósiles (petróleo, carbón, entre otros), lo que ha provocado un incremento en la temperatura por las altas cantidades de gases de efecto invernadero (Creus. 2014).

#### E. Biomasa:

Guatemala es un país que cuenta con una cantidad elevada de recursos renovables de energía, los cuales han sido poco aprovechados. La biomasa abarca un conjunto grande y heterogéneo de materias orgánicas de origen vegetal, animal o artificial de la misma. En el contexto energético, el término de la biomasa se emplea para denominar una fuente de energía renovable basada en el aprovechamiento de los productos orgánicos formados por vías biológicas en periodos de tiempo cortos o de productos derivados de esta (Creus. 2014).

Las energías renovables, con excepción de la mareomotriz y la geotérmica, tienen su origen en el sol. Se estima que el sol radia a la Tierra una energía de  $1.37 \text{ kW/m}^2$ , y el área circular que presenta la Tierra hacia el sol es de  $1.27 \times 10^{14} \text{ m}^2$  resulta una potencia transmitida a la Tierra de  $1.7399 \times 10^{18} \text{ kJ/año}$ . En la biomasa, el contenido energético de la biomasa principalmente procede de la energía solar fijada por los seres autótrofos por medio del proceso fotosintético (también conocido como la función clorofílica) (Creus. 2014):

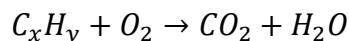


A través de la fotosíntesis, sintetizan tejido vegetal fabricando anualmente  $140 \times 10^{14}$  t (toneladas métricas) equivalentes a  $2.425 \times 10^{18}$  kJ/año =  $5.8 \times 10^{10}$  tem (tonelada equivalente de petróleo). Por otro lado, las plantas ocupan en la zona terrestre un 29% de la superficie total de la Tierra, y durante un año las plantas logran almacenar un 0.0011% de la energía emitida por el sol a la Tierra (Creus. 2014).

La producción de biomasa cumple con el concepto de desarrollo sostenible, por lo que existe interés por conseguir un mejor desarrollo en el aprovechamiento y desarrollo en la energía proveniente de la biomasa en competencia con el petróleo. La biomasa no logra competir en cuanto a la calidad energética contra los combustibles fósiles. Un kilogramo de biomasa genera cerca de 3500 kcal, mientras que un litro de gasolina puede proporcionar 10000 kcal (Creus. 2014).

El contenido energético de la biomasa se mide en función de su poder calorífico del producto energético obtenido durante su tratamiento, o bien en función con el poder calorífico del recurso. El contenido energético de los residuos ganaderos, o purines, es medido por el biogás generado (Creus. 2014).

La forma más utilizada para la obtención de energía a partir de la biomasa es por medio de la ruptura de los enlaces de los compuestos orgánicos en el proceso de la combustión, dando como principales productos el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y agua ( $H_2O$ ).



Dado la naturaleza de una reacción de combustión a ser exotérmica, la energía obtenida de este proceso es energía térmica que puede ser utilizada para distintas aplicaciones tales como producción de energía eléctrica, calefacción, cocción de alimentos, entre otras (Creus. 2014).

Como se mencionó, el uso de la energía proveniente de la biomasa cumple con el desarrollo sostenible, a pesar de que durante su uso emita GEI a la atmósfera. Esto es debido a que la biomasa constituye un factor de reducción de las emisiones mundiales de  $CO_2$  ya que el proceso de combustión no afecta al aporte de  $CO_2$  al ambiente, puesto a que las plantas y los árboles al crecer captaron el  $CO_2$  del ambiente que posteriormente liberan al mismo, y el aumento neto de  $CO_2$  a la atmósfera es nulo, y por lo tanto tiene cumplimiento con los acuerdos de Kyoto. Asimismo, el uso

de combustibles provenientes de la biomasa contiene niveles mucho menores de polucionantes como NO<sub>x</sub> y Sox. La madera, al ser quemada, también entrega emisiones más bajas de SO<sub>2</sub> que el carbón u otros combustibles fósiles, y contribuye a una mejora en la lluvia ácida (Creus. 2014).

La bioenergía procedente de la madera, residuos agrícolas y estiércol continúa siendo la fuente principal de energía de las zonas en vía de desarrollo. En algunos casos, también es el recurso económico más importante de las zonas (Creus. 2014).

#### F. Biomasa forestal

Existen tres fuentes básicas de biomasa forestal: residuos de cultivos agrícolas (paja de trigo y cebada, cáscaras de nuez, cáscaras de coco, bagazo de caña, entre otros.), biomasa forestal y los residuos de los bosques destinados a la fabricación de madera y pasta de papel (Creus. 2014).

Los residuos obtenidos de la industria de la madera son una importante fuente de biomasa. Se considera que, de cada árbol cortado para la producción de madera, solamente el 20% es aprovechado comercialmente. Se estima que un 40% es dejado en el campo en forma de ramas, raíces y hojas, y el 40% restante en el proceso de las aserradoras produciendo el residuo como el serrín, astillas y corteza. El serrín se utiliza principalmente como combustible directo en quemadores o calderas para producir vapor, sin embargo, es poco aprovechado debido al alto costo de transporte y a poca densidad bruta que tiene el material (Creus. 2014).

Las actividades de las agriculturas generan cantidades considerables de desechos, en donde se estima que más del 60% es de desechos dejados en el campo. Mientras que los desechos generados después del procesamiento se encuentran entre el 20 y 40%. Ejemplos de este es el café, residuos de arroz y caña de azúcar (Creus. 2014).

#### G. Biocombustibles sólidos

Son los productos derivados de la biomasa sólida que son susceptibles a ser utilizados en procesos de conversión energética al quemarse. Dentro de los biocombustibles sólidos, los más importantes son los de tipo primario, constituido por materiales lignocelulósicas procedentes del sector agrícola forestal y de las industrias de transformación que producen residuos de dicha naturaleza.

Generalmente, los biocombustibles sólidos son usados tanto para uso industrial (producción de energía eléctrica) como no industrial (cocina o calefacción para hogares). Las formas más utilizadas de biocombustibles sólidos son astillas, pellets y briquetas (Tojes, 2015).

Las astillas corresponden a la biomasa forestal que ha sido llevada a un proceso de molienda, formando así astillas.

Los pellets son cilindros pequeños con dimensiones entre 7 y 20 mm de diámetro y 25 a 60 mm de largo. Se preparan mediante prensas de granulación, análogas a las utilizadas para la fabricación de piensos compuestos. La compactación puede conseguirse con o sin la adición de agentes aglomerantes. Un factor importante en la fabricación de pellets es el contenido de humedad y el tamaño de partícula, las cuales deben de ser reducidas (Tojes, 2015).

Figura 3. Pellets.



(Tojes, 2015).

Por otro lado, las briquetas son cilindros más grandes en comparación a los pellets. Suelen tener dimensiones de 50 a 130 mm de diámetro y longitud muy variable, entre 5 a 30 mm o más. También existen briquetas con forma de bloques, sin embargo, es menos popular a la forma cilíndrica. En comparación al pellet, tienen densidades más elevadas (pueden de 1 a 1.3 g/cm<sup>3</sup>). Estas son fabricadas por medio de prensas, en las que el material es sometido a altas presiones y se calienta. Es común agregar agentes aglomerantes para asegurar la cohesión del material puesto que tienden a romperse si no se agrega (Ordóñez, 2015).



Figura 4. Briqueta.



(Ordóñez, 2015).

Para los pellets y briquetas, los parámetros físicos y químicos que influyen en el comportamiento energético son de alto interés. Esto se mencionan en el cuadro siguiente.

Cuadro 1. Características físicas, químicas y fisicoquímicas de pellets y briquetas.

Física	Forma y tamaño
	Cenizas
	Aspecto (color, brillo)
	Densidad
	Humedad
	Dureza
Químicas	Composición química elemental
	Composición química por compuesto
	Poderes caloríficos
Fisico-químicas	Coefficiente de conductividad térmica
	Combustibilidad e inflamabilidad
	Temperatura máxima de llama
	Densidad energética
	Potencia calorífica
	Tiempos de combustión

(Tojes, 2015).

## H. Mecanismo de aglomeración

En la aglomeración de material particulado, el mecanismo toma varios aspectos químicos y físicos que causan la adhesión y el enlace entre superficies de las partículas sólidas a nivel microscópico. Para permitir que esto ocurra, existe la posibilidad de añadir agentes que actúen como adhesivos o ligantes y aplicar altas presiones sobre ellos. El tamaño de la partícula, la estructura del granulo formado, la cantidad de humedad, la tensión superficial y la presión y temperatura aplicada determinan la magnitud de las fuerzas interparticulares (García, 2010).

Rumpf (1962) definió cinco posibles mecanismos que son los responsables de las fuerzas que actúan en el aglomerado. Estas incluyen:

- Puentes sólidos.
- Fuerzas de atracción por el empleo de ligantes viscosos.
- Puente líquidos y fuerzas capilares.
- Fuerzas de atracción entre partículas sólidas.
- Enlaces de acoplamiento.

Los puentes sólidos se derivan del material depositado entre las partículas aglomeradas. Su desarrollo se lleva a cabo mediante difusión de moléculas de una partícula a otra a través de fusión parcial en los puntos de contacto donde se desarrollan las presiones más elevadas, en especial a altas temperaturas. También pueden surgir debido a reacciones químicas, cristalización de sustancias disueltas, endurecimiento de ligantes o solidificación de componentes fundidos (García, 2010). La representación de este tipo de enlace se puede observar en la Figura 5, apartados a) y b).

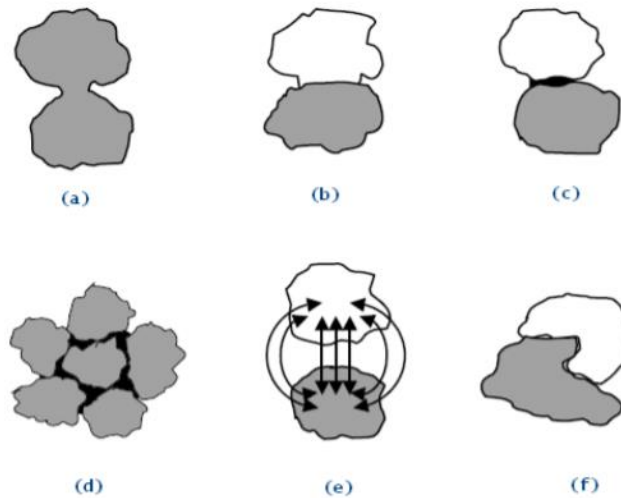
En las fuerzas de adhesión y cohesión por ligantes viscosos, los sólidos se mantienen unidos debido al uso de aglomerante altamente viscosos y las capas de adsorción que generan (García, 2010).

En los puentes líquidos, la fuerza de adhesión entre las partículas es función de la tensión superficial del sistema líquido/aire (si se trata de una gota de líquido) o de la presión capilar. La disponibilidad de suficiente humedad para producir una fina capa que rodee las partículas discretas contribuye a su enlace disminuyendo de manera eficiente la distancia entre partículas e incrementando el área de contacto (García, 2010). La representación de este tipo de enlace se puede ver en la Figura 5 en los apartados c) y d).

Las fuerzas de atracción de partículas sólidas son de carácter superficial y favorecen la estabilidad del aglomerado mediante un incremento en la relación superficie/masa. Aquí, las fuerzas de van der Waals resultan de interacciones ente dipolos nivel molecular y actúan a distancias muy cortas. Por otro lado, las fuerzas electrostáticas son de menor intensidad y se derivan de cambios en las superficies de las partículas ya que su comportamiento depende de la composición. Dado que la rugosidad de los picos en las partículas de menor tamaño es menor en valor absoluto, la probabilidad de adhesión es mucho mayor en materiales pulverizados de menor tamaño de partícula (García, 2010). La representación de este tipo de enlace se puede ver en la Figura 5 en el apartado e).

En los enlaces de acoplamiento, las partículas de un material pueden acoplarse unas en torno a otras formando una estructura cerrada, que estará favorecida en los casos en lo que la morfología de las partículas favorezca dicho acoplamiento. Así las partículas que tengan forma de fibras o plaquetas serán más propensas a este tipo de enlace cuya primera consecuencia es la disminución de la densidad aparente (García, 2010). La representación de este tipo de enlace se puede ver en la Figura 5 en el apartado f).

Figura 5. Diferentes mecanismos de enlace de procesos de aglomeración: a) puente de sinterización parcial; b) acción de ligantes endurecedores mediante reacción química; c) acción de ligante que forman puentes líquidos; d) fuerzas capilares; e) fuerzas moleculares y electrostáticas; f) enlaces de acoplamiento.



(García, 2010).

## I. Materiales aglomerantes.

Los materiales aglomerantes son materiales de gran importancia durante el proceso de fabricación de briquetas o pellets de biomasa, pues estos son los que permiten que los materiales se queden unidos al aplicar calor y altas presiones. En la madera y otros residuos agrícolas, existe un componente aglomerante llamado lignina. Este es un polímero entrecruzado y muy complejo, constituida por unidades de fenilpropano, que se encuentran unidas por al menos diez tipos de enlaces C-O y C-C. En la madera, se encuentra en una proporción cercana al 25%. Para materiales que carecen de este compuesto, es necesario agregar agentes aglomerantes y mezclarlos de forma homogénea con la biomasa. Estos materiales pueden ser provenientes tanto de recursos renovables y no renovables. En algunos casos se utilizan aceites de automóvil quemado, resinas o ceras, otros pueden ser incluso alimentos, o pueden ser químicos orgánicos.

Algunos ejemplos más utilizados son la brea disuelta, yuquilla, agua con maizena, mezclas de fenoles y formaldehido, linaza, entre otros (Contreras, *et al.* 2006) (Archila. 2015). De acuerdo con Garcia (2010), otros agentes aglutinantes orgánicos pueden ser lignosulfonatos, distintos

almidones, melaza, alginatos, serrín, carboximetilcelulosa, polietilenglicol, gomas, cassaeinatos y brewex, En la clasificación inorgánica pueden ser silicatos, alúmina, arcilla, hidróxido sódico, sílice, cemento portland, bentonita, yeso, cal y cemento sorel. Sin embargo, para su uso como aglutinante de material combustible, no son recomendados los aglutinantes inorgánicos debido a que aporta contaminantes en el producto final que puedan ser o no ser tóxicos o corrosivos.

#### J. Bagazo de caña como biomasa.

La caña de azúcar se cultiva prácticamente en todas las regiones tropicales y subtropicales de la Tierra. La cosecha de la planta se realiza cada año, pero su alta capacidad de rebote permite varias cosechas sucesivas desde la siembra inicial. Esta planta, logra aprovechar el recurso tropical más abundante, la luz solar. Para la agroindustria azucarera, la sacarosa presente en la caña de azúcar tiene un alto valor comercial, por lo que se encuentra en grandes producciones (Marcelo, *et al.* 2016).

Una vez la caña de azúcar es procesada para la extracción de la sacarosa, se obtiene un producto de residuo denominado bagazo. Este es un residuo fibroso, considerado como un material leñoso. Esta constituido principalmente por agua, fibra celulosa y una pequeña cantidad de sólidos solubles. Su composición varía dependiendo del tipo de caña. Por medio de análisis termogravimétrico, Feria, J y (2013) colaboradores determinaron la composición del bagazo de caña de azúcar en México:

Cuadro 2. Composición del bagazo de caña en México.

Componente	C <sub>io</sub> %
Lignina	23
Celulosa	50
Hemicelulosa	35

En comparación con la madera, el bagazo de caña contiene una composición de lignina muy similar, siendo la de la madera cercana a 25%.

## K. Fabricación de briquetas

Las briquetas son útiles para contener los residuos forestales y agrícolas en recursos con mayor densidad. Los principales materiales más adecuados para aglomerarse en briquetas son serrín, y toda clase de desechos agrícolas tales como cáscara de arroz, corteza de cacao y café, entre otros. Los agentes aglomerantes pueden ser externos, o estar presentes en la misma biomasa a aglomerar. Por lo tanto, para obtener materiales compactos la mezcla de estos materiales es de gran importancia para asegurar que no presente deformaciones a lo largo del tiempo (Creus. 2014).

La compactación del material se realiza a altas presiones, con el uso de una prensa de pistón o un extrusor de tornillo. Precalentando la biomasa antes de la compactación mejora el proceso de cohesión del material, en temperaturas alrededor de 250 °C a 300 °C, sin embargo, es necesario instalar campanas extractoras por los gases que se desprenden a tales temperaturas (Creus. 2014). Por otro lado, en ciertos materiales el calor de fricción generado en las superficies favorece la torrefacción superficial, que se caracteriza por un tostado que mantiene en cohesión la superficie de la briketa.

La humedad es un factor importante en el proceso de compactación, ya que el agua actúa como un agente termoplástico que mejora la cohesión durante el proceso de prensado (Ortiz, 2008). A continuación, se presenta un cuadro comparativo entre los equipos de compresión.

Figura 6. Características de prensas en elaboración de briquetas.

<b>Características</b>	<b>Prensa Pistón</b>	<b>Extrusor Tornillo</b>
Humedad óptima del material	10-15 %	8-9 %
Consumo de energía	50 kWh/Ton	60 kWh/Ton
Densidad de briquetas	1-1,2 kg/dm <sup>3</sup>	1-1,4 kg/dm <sup>3</sup>
Combustibilidad	No muy buena	Muy buena
Carbonización a carbón vegetal	-----	Buen carbón vegetal
Aplicación a gasificadores (gas pobre)	No apropiado	Apropiado
Homogeneidad en las briquetas	No homogénea	Homogénea

Una de las grandes ventajas de la fabricación de briquetas es el aumento de la densidad del material, ya que presenta un gran problema en el tema de transporte y manejo/almacenamiento del material, en donde es posible duplicar o triplicar la densidad del sólido (Ortiz, 2008).

En la actualidad, la fabricación de briquetas de biomasa densificadas se divide en dos: las de alta compresión (> 100 MPa) y que trabajan a humedades menores a 6 % con partículas muy finas, y las de bajas presiones (de 10 MPa a 50 MPa) y suele trabajarse en húmedo (Ordóñez. 2015). La siguiente figura es un ejemplo de maquinaria empleada para la fabricación de briquetas.

Figura 7. Prensa briquetadora MÜTEK, con flujo de trabajo de 30-550 kg/h.



(rtres. 2019)

#### L. Tratamiento de la biomasa.

Generalmente, al fabricar briquetas, la biomasa a prensar debe de tener un tamaño de 6-8 mm con un 10% a 20% de polvos y con un contenido de humedad que no exceda un contenido de humedad del 10%. Debido a la gran cantidad de biomasa que puede ser empleada para la fabricación de briquetas, suele necesitar un pretratamiento para asegurar condiciones adecuadas para el prensado. El proceso de tratamiento puede involucrar un secado (no mayor a 200 °C) para reducir excesivas cantidades de humedad, reducción de tamaño (por molienda) y precalentamiento de la biomasa para ayudar a ablandar la estructura de la biomasa y reducir el desgaste en la prensadora (FAO. 2014), (Ortiz. 2008)

Dependiendo del tipo de biomasa generalmente se requieren de las siguientes operaciones unitarias, involucrando los siguientes pasos:

- Tamizado – Secado – Precalentamiento – Densificación – Enfriamiento - Empaque.
- Tamizado – Molienda – Precalentamiento – Densificación – Enfriamiento – Empaque.
- Secado – Molienda – Precalentamiento – Densificación – Enfriamiento – Empaque.

## M. Operación de secado

El secado se refiere a la operación de retirar agua (u otro líquido) en forma de humedad en una sustancia por evaporación, y comúnmente se utiliza una corriente de gas caliente para arrastrar la humedad. La presión de vapor que ejercer la humedad en un sólido depende de la naturaleza de la humedad, la naturaleza del sólido y la temperatura. Por lo tanto, un sólido bien puede ganar o perder humedad hasta que la presión de vapor entre en equilibrio con el ambiente en el que se encuentra.

Las operaciones de secado pueden clasificarse ampliamente según sean por lotes o continuas, y que dependerán del tipo de sustancias que se está secando. En las operaciones por lotes, generalmente se tienen procesos en semilotes, en donde cierta cantidad de una sustancia es expuesta a una corriente de aire caliente que fluye continuamente. Por otro lado, en las operaciones continuas, tanto la sustancia a secar y el gas de secado fluyen continuamente a través del equipo (Treybal, 2007).

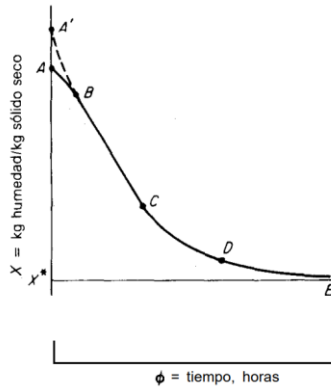
La operación de secado por lotes es una operación que suele ser cara, por lo que se limita a operaciones de pequeña escala, plantas pilotos o trabajos de investigación. Los secadores directos por lotes son aquellos que utilizan aire caliente que transfiere calor a la sustancia para que se de la evaporación. Los secadores que utilizan este método de calentamiento son numerosos. Algunos ejemplos son los siguientes: secadores de platos o de anaqueles, secadores de doble camión, secador de circulación transversal, entre otros. En los secadores de platos o los de doble camión (bandejas), los sólidos son cargados sobre platos, o mallas para sólidos granulares, los cuales son cargados y sometidos a una cámara de secado. Por otro lado, los secadores indirectos realizan el secado sin la necesidad de aire para evaporar la humedad, calentando el sólido por conducción o por exposición a radiación infrarroja. En estos se pueden mencionar los siguientes secadores: Secadores de anaqueles al vacío, secadores de charola con agitación, secadores giratorio al vacío, entre otros.

Para fijar horarios de secado y determinar tamaños de los equipos, es necesario conocer el tiempo necesario que se requerirá para secar una sustancia a partir de un contenido de humedad a otro en condiciones específicas. Debido a que el mecanismo de secado es muy desconocido, es preferible respaldarse de mediciones experimentales. Una de las mediciones más importantes en el estudio del secado es la realización de una curva de secado al someter una muestra de sólido en



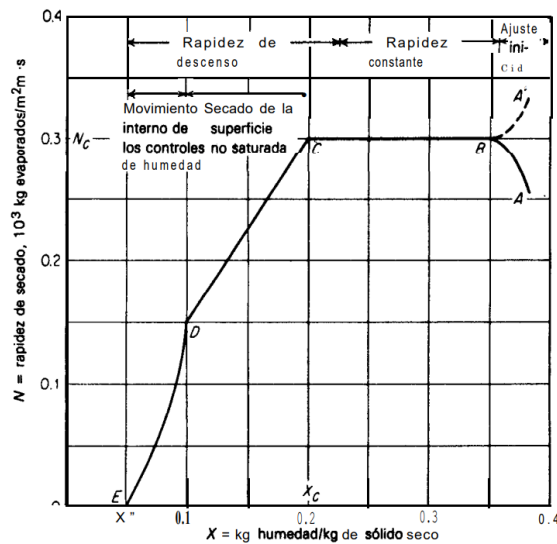
una corriente de aire caliente para medir su pérdida de humedad en el tiempo. La exposición de la muestra a aire de temperatura, humedad, y velocidad constante constituye el secado en condiciones constantes de secado (Treybal. 2007).

Figura 8. Curva de secado típica.



La determinación del tiempo de secado de un lote a las mismas condiciones a las que se realizó la curva de secado puede obtenerse simplemente con leer las diferencias de humedades. Los datos en la curva de secado pueden llevarse a rapidez de secado como un flux de masa  $N$  (kg humedad evaporada/ $m^2 \cdot s$ ) y graficada contra el contenido de humedad en base seca (Treybal. 2007).

Figura 9. Curva típica de rapidez de secado.



Los datos obtenidos de la curva de rapidez de secado pueden ser útiles incluso para la determinación del tamaño de equipo de secado continuos. En estos, puede observarse regiones constantes de rapidez de secado ( $N_c$ ) hasta una humedad crítica ( $X_c$ ) en la que existe un decrecimiento de la rapidez de secado (Treybal. 2007)

#### N. Operación de molienda

Las operaciones unitarias que reducen el tamaño de partícula son procesos industriales muy importante, que en general se aplican para sólidos como rocas, carbón, cemento, plástico, granos, entre otras. Generalmente, los equipos para la reducción de partículas se llaman molinos que pueden procesar hasta pocos kg/h en operaciones de baja escala hasta cientos de ton/h. Los equipos que muelen grandes sólidos son denominados como “crushers”, mientras que para sólidos más pequeños se le llama “mill” o molino. En cuanto a los molinos, consumen altas cantidades de energía, y son susceptibles a desgaste mecánico por erosión de partículas pequeñas. El siguiente cuadro se presenta una clasificación de molinos en función del tamaño de partícula.

Cuadro 3. Tipos de molinos de acuerdo con tamaño de partícula final.

<b>Rango de reducción de tamaño</b>	<b>Nombre del equipo</b>	<b>Tipo de equipo.</b>
Grueso e intermedio	Crushers	De rodillos
		De martillo
Intermedio y fino	Molinos o “grinders”	De disco
		De rodillos
Fino y ultrafino	“Grinders” ultrafinos	De martillo
		De bolas

#### O. Análisis estadístico:

La **media** de una medición es la ubicación más importante de una variable, ya que proporciona una medida central de los datos. La media se denota con el símbolo  $\bar{x}$  para una muestra. Para el valor de la primera observación, suele denotarse como  $x_1$ , y para la segunda  $x_2$  y así consecutivamente. La media se calcula de la siguiente manera (Anderson, *et al.* 2012).

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Donde  $x_i$  es la  $i$ -ésima observación y “ $n$ ” es el número de observaciones realizadas.

La **varianza** es una medida de la variabilidad que utiliza todos los datos. Se basa en la diferencia

entre el valor de cada observación ( $x_i$ ) y la media. La diferencia entre cada  $x_i$  y la media se llama desviación respecto a la media. Si se desea calcular la varianza, se debe de elevar al cuadrado. La varianza se calcula de la siguiente manera (Anderson, *et al.* 2012).

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

La **desviación estándar** se define como la raíz cuadrada positiva de la varianza. Esta se mide en las mismas unidades que los datos originales; por esta razón la desviación estándar se compara más fácilmente con la media y con otros estadísticos que se miden en las mismas unidades que los datos originales. Se calcula de la manera siguiente (Anderson, *et al.* 2012).

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

En las **pruebas de hipótesis** se empieza por realizar supuesto tentativo acerca de parámetro poblacional. A este se le denomina hipótesis nula ( $H_0$ ). Después se define la hipótesis alternativa ( $H_a$ ), la cual es la contradicción de la hipótesis nula. En el procedimiento de prueba de hipótesis se usan datos de una muestra para probar dos afirmaciones contrarias. Una prueba de hipótesis evalúa dos afirmaciones mutuamente excluyentes sobre una población para determinar qué afirmación es mejor admitida por los datos de la muestra (Anderson, *et al.* 2012).

Las pruebas de hipótesis asumen las siguientes formas:

$$\begin{array}{lll} H_0: \mu \geq \mu_0 & H_0: \mu \leq \mu_0 & H_0: \mu = \mu_0 \\ H_a: \mu < \mu_0 & H_a: \mu > \mu_0 & H_a: \mu \neq \mu_0 \end{array}$$

A las dos primeras formas se le conocen como pruebas de una cola y a la tercera, como prueba de dos colas.

Para emplear la prueba de hipótesis, debe de emplearse un estadístico de prueba, ya sea “z” o “t”, dependiendo del número de ensayos realizados. Se utiliza “z” cuando los ensayos realizados son mayores o iguales a 30, y “t” cuando son menores a 30. Para poder aceptar o rechazar la hipótesis nula, se utiliza ya sea el método del valor-p o el método del valor crítico. A continuación, se presenta el procedimiento para aplicar una prueba de hipótesis.

Figura 10. Pasos para realizar para la prueba de hipótesis.

PASOS EN LAS PRUEBAS DE HIPÓTESIS

**Paso 1.** Establecer la hipótesis nula y la hipótesis alternativa.  
**Paso 2.** Especificar el nivel de significancia.  
**Paso 3.** Recabar los datos muestrales y calcular el valor del estadístico de prueba.

*Método del valor-p*

**Paso 4.** Emplear el valor del estadístico de prueba para calcular el valor-p.  
**Paso 5.** Rechazar  $H_0$  si el valor-p  $\leq \alpha$ .

*Método del valor crítico*

**Paso 4.** Utilizar el nivel de significancia para determinar el valor crítico y la regla de rechazo.  
**Paso 5.** Emplear el valor del estadístico de prueba y la regla de rechazo para determinar si  $H_0$  es rechazada.

(Anderson, *et al.* 2012).

El **intervalo de confianza de media poblacional** es utilizado para determinar experimentalmente dentro cual intervalo se espera que se encuentre la media poblacional de un conjunto de datos con cierto grado de probabilidad. Habitualmente se utiliza un grado de confianza al 95%, La amplitud del intervalo de confianza se calcula a partir de la desviación estándar muestral del conjunto de datos. Cuando la desviación estándar poblacional no es conocida o la desviación estándar muestral no es una buena estimación de la poblacional, el intervalo de confianza es (Skoog, *et al.* 2015):

$$IC \text{ para } \mu = \bar{x} \pm \frac{t * s}{\sqrt{N}}$$

Dónde  $t$  es un estadístico que depende de los grados de libertad y la confianza a la que se realiza el cálculo y  $N$  es el número de mediciones. La siguiente tabla muestra los valores  $t$ .

Figura 11. Valores de  $t$  a distintos niveles de probabilidad.

Grados de libertad	80%	90%	95%	99%	99.9%
1	3.08	6.31	12.7	63.7	637
2	1.89	2.92	4.30	9.92	31.6
3	1.64	2.35	3.18	5.84	12.9
4	1.53	2.13	2.78	4.60	8.61
5	1.48	2.02	2.57	4.03	6.87
6	1.44	1.94	2.45	3.71	5.96
7	1.42	1.90	2.36	3.50	5.41
8	1.40	1.86	2.31	3.36	5.04
9	1.38	1.83	2.26	3.25	4.78
10	1.37	1.81	2.23	3.17	4.59
15	1.34	1.75	2.13	2.95	4.07
20	1.32	1.73	2.09	2.84	3.85
40	1.30	1.68	2.02	2.70	3.55
60	1.30	1.67	2.00	2.62	3.46
$\infty$	1.28	1.64	1.96	2.58	3.29

(Skoog, *et al.* 2015).

## V. ANTECEDENTES

Ordóñez (2015) analizó las propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas de los combustibles sólidos densificados formulados. Esto a partir de pino, carbón activado reciclado y aglomerados mediante una solución acuosa de almidón de yuca cocida. Con el fin de encontrar correlaciones que describan dichas propiedades en función del porcentaje de carbón activado en la formulación. A partir de sus resultados, obtuvo la correlación de la propiedad de densidad, humedad, contenido de cenizas y el índice e friabilidad para las formulaciones propuestas.

Boarini (2006) realizó una investigación bibliográfica del proceso de densificación de materiales y prototipos de prensas para experimentar mezclas de aglutinante a distintas presiones utilizando bagazo de caña como materia prima, con el fin de buscar nuevas alternativas de combustibles de fuentes renovables. Por otro lado, realizó la estimación de costo para la fabricación de briquetas a escala industrial y a escala artesanal.

Balseca y colaboradores (2018) estudian la elaboración de briquetas a partir de residuos de café con el fin de verificar si es considerado como biocombustibles mediante su poder calorífico. Implementaron un diseño y construcción de una prensa briquetadora para compactar los residuos de café. De igual forma, realizaron estudios de características químicas, energéticas y físicas de las briquetas pertenecientes a la caracterización de la biomasa. Además, realizaron pruebas de incineración tanto a las briquetas como a muestras de carbón vegetal. Finalmente comparan el poder calorífico de las briquetas con otros biocombustibles sólidos para verificar si pueden ser sustituto de otras fuentes de energía en calefacción o asaderos.

Sánchez (2017) Realizó una recopilación de normas y estándares europeos para biocombustibles sólidos, estudios de factibilidad y demanda de biocombustibles en España y un planteamiento de planta de producción con sus respectivos balances de masa y energía con una descripción detallada del proceso.

## VI. METODOLOGÍA

### A. Equipo de trabajo

1. Tamices y vibrador de tamices.
2. Molino de discos
3. Secador de bandejas
4. Cronómetro
5. Barómetro
6. Higrómetro
7. Balanza electrónica (precisión 0.1 g y 0.01 kg)
8. Balanza analítica (Precisión 0.0001 g)
9. Balanza de humedad OHAUS
10. Calorímetro
11. Mufla
12. Crisol o porcelana
13. Bernier.
14. Estufa de biomasa
15. Prensa
16. Molde para briqueta

### B. Obtención de materia prima.

1. Para la obtención de la materia prima, bagazo de caña para este estudio, se debe de seleccionar bagazo fresco para asegurar la mejor representación de bagazo sin que presente alteraciones por factores ambientales. Por lo tanto, se decidió obtener la muestra de la línea de salida de los molinos en el proceso de extracción de jugo en el Ingenio La Unión.
2. La muestra fue obtenida durante la época de producción Zafra 2020/21, llenando dos sacos, buscando tener más de 10 kg en cada uno de ellos.
3. Los sacos fueron protegidos por un segundo saco, y almacenados en cajas plásticas bajo sombra para su uso en días posteriores.
4. La producción de bagazo total por Zafra y bagazo excedente de la Zafra anterior fue proporcionada por la empresa.

5. El material aglutinante seleccionado, almidón de maíz, fue obtenido por la empresa ALDA, quién distribuye almidón de maíz para usos industriales. De igual forma que el bagazo, fue almacenado para deterioro por el ambiente.

### C. Análisis de curva de secado de la biomasa.

1. Se homogenizó el bagazo de los sacos antes de iniciar la medición, agitando y revolviendo el contenido.
2. Para el secado, se utilizó el secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias del a Universidad del Valle de Guatemala. De acuerdo con Villalba y Arzola (2019), se ajustó el secador a una temperatura de 60 °C antes de iniciar el secado.
3. Se procedió a llenar 4 bandejas con el contenido de la masa conocida de un saco, de forma que la masa fuera equivalente en cada una de ellas, procurando que el grosor no superase 1 pulgada y que fuera poroso, de forma que el secado no fuera interrumpido en el interior.
4. En cada bandeja, se colocó 1 bandeja pequeña con tara conocida para realizar mediciones una curva de secad como masa en función del tiempo. En estas bandejas, se colocaron cantidades similares de masa inicial por unidad de área. Las cuatro bandejas con su contenido fueron medidas en los mismos tiempos de secado.
5. Durante el secado del bagazo, se realizaron mediciones de condiciones de temperatura y humedad ambiental y en la salida del secador y la velocidad de la corriente interna de aire en la cámara de secado.
6. El secado fue realizado a 60 °C para evitar el deterioro del bagazo de caña por altas temperaturas. El secador de bandejas fue encendido y configurado a dicha temperatura, y se esperó a que el mismo alcanzara la temperatura antes de introducir el carro de bandejas al secado.
7. El secado se detuvo al obtener pérdidas de humedad muy pequeñas o nulas, indicando un equilibrio de humedad en las condiciones internas de la cámara de secado. Se determinó su masa y se almacenó para protegerlo de la humedad del ambiente.
8. El contenido de las bandejas pequeñas fue sometido a una prueba de humedad en la balanza de humedad OHAUS, a una temperatura de 70 °C por calentamiento de lámpara de halógeno, para determinar su humedad residual.
9. Con los datos obtenidos, se obtiene la curva de humedad y condiciones de secado por lote.



#### D. Reducción de tamaño de biomasa

1. Antes de la reducción de partícula, se determinó la masa de bagazo a alimentar para determinar la cantidad de masa perdida como resultado de emisiones de polvo por la reducción en un molino.
2. La reducción de partícula fue realizada utilizando un molino de discos. El molino fue encendido y la alimentación fue realizada lentamente para evitar que el bagazo se atascase en la tolva de alimentación.
3. El bagazo molido fue recuperado y su masa fue determinada.

#### E. Caracterización de forma y granulometría de bagazo de caña.

1. Se realizaron análisis granulométricos al bagazo de caña seco, antes y después de la reducción de partícula, utilizando el vibrador de tamices con tamaños 20, 30, 45, 60, 80 y 100 mesh, un tamaño de muestra de 100 g y mediciones en cuadruplicado.
2. Con los datos obtenidos de cada análisis granulométrico, se realizó una curva granulométrica para explicar la distribución de las fibras en el contenido molido y no molido de bagazo de caña-
3. También se realizó una caracterización del sólido explicado por factores de forma debido a la irregularidad de las fibras. Para ello se separó el contenido retenido en los distintos tamices y se realizó un análisis de forma a las partículas que muestren forma distinta a polvo tomando 50 mediciones seleccionadas de forma aleatoria en cada sección retenida de bagazo. Los factores de forma empleados fueron obtenidos por Bagheri *et al.* (2015).

#### F. Fabricación de las briquetas

1. De acuerdo con distintas recopilaciones bibliográficas, se establecieron mezclas con aglutinante de 10, 15 y 20 % p/p de aglutinante en base húmeda. El material aglutinante seleccionado fue almidón de maíz, Obtenido de la empresa ALDA.
2. Se diseñó un molde resistente con diámetro equivalente a presentaciones comerciales. Dicho molde fue adaptado para permitir su uso en una prensa del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad y permitir la extracción de la briqueta.
3. De acuerdo con las mezclas indicadas de bagazo/almidón, se introdujo 50 g de mezcla y se procedió a realizar la compactación con la prensa hidráulica. Cada briqueta realizada fue compactada presiones distintas de 10, 20 y 30 MPa en un tiempo de 5 min. Se procedió a hacer un mínimo de 4 briquetas por cada mezcla para la realización de análisis estadístico de la densidad de la briqueta hasta cumplir con la combinación de mezclas y presiones establecidas.

4. Se realizaron más briquetas para determinación de propiedades fisicoquímicas como el poder calorífico, el contenido de cenizas y la humedad, y para un ensayo de quemado de las briquetas en una estufa de biomasa.
5. De acuerdo con la masa medida de la briqueta, se determinó las pérdidas en el proceso de prensado restando la masa medida en la mezcla.

#### G. Determinación de contenido de humedad.

1. Utilizando la balanza de humedad OHAUS con lámpara de halógeno, se realizaron pruebas para la determinación de humedad en las briquetas. Para cada mezcla, se realizaron mediciones en triplicado o cuadruplicado, para análisis estadístico, tomando pequeños fragmentos de las briquetas.
2. Los parámetros utilizados para el secado fueron ajustados en la balanza, a una temperatura de 60 °C, con 3 gramos de muestra y un criterio de desconexión de pérdida de masa: 1 mg/90 s
3. Los datos fueron importados de la base de datos de la balanza de humedad.
4. Se realizó el mismo procedimiento para la determinación de la humedad para una muestra de madera comercial y el almidón de maíz empleado, utilizando la misma configuración exceptuando la temperatura de secado para la madera, siendo de 80 °C.

#### H. Determinación del contenido de cenizas.

1. La determinación de cenizas en las briquetas fue realizada utilizando una mufla para la calcinación de la muestra. Para cada mezcla, se realizaron mediciones en triplicado o cuadruplicado, para análisis estadístico, tomando pequeños fragmentos de las briquetas.
2. Se midió cerca de 0.1000 g de muestra por cada corrida, utilizando porcelanas previamente secadas a 300 °C por 30 minutos y taradas.
3. Las muestras fueron introducidas a la mufla a una temperatura de 500 °C por 3 horas. Al finalizar, las muestras eran retiradas y se dejaron llegar a su temperatura ambiente.
4. Se midió la masa de las cenizas resultantes y se determinó su contenido de cenizas en base seca para cada briqueta.
5. Se realizó el mismo procedimiento para la determinación de cenizas en base seca de la muestra de madera comercial y el almidón de maíz empleado.

#### I. Determinación de la densidad.

1. En el momento en que se realizaron las briquetas mencionadas en “Fabricación de las briquetas”, se determinó la masa de las briquetas con una precisión de 0.0001 g.

2. Se determinó el volumen de la briqueta tomando su geometría como la de un cono truncado, utilizando un vernier para la medición.
3. La densidad fue calculada y registrada en el tiempo como día 0 para todas las briquetas.
4. La densidad de la briqueta fue monitoreada en un lapso de 10 días, realizando mediciones en el día 1, 5 y 10 a partir del día 0.
5. La densidad de la muestra de madera comercial fue determinada por su relación masa volumen, determinando su masa con una precisión de 0.0001 g y determinando su volumen al asimilar su geometría a la de un cono truncado, utilizando un vernier para la medición. De igual forma, se realizó un cuadruplicado o triplicado para el análisis estadístico.

#### J. Poder calorífico superior.

1. El PCS de las briquetas y el almidón de maíz empleado fue determinado de acuerdo con la norma ASTM D5865 realizado en Ingenio San Diego, realizando triplicado para análisis estadístico.
2. El poder calor superior de la madera fue determinado en el calorímetro IKA del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad. La configuración fue establecida de acuerdo con el manual de usuario. Se utilizó aceite como ayudante en la combustión, con poder calorífico conocido, para la determinación del poder calorífico de la madera, utilizando cerca de 0.5000 g de muestra, realizando un cuadruplicado para análisis estadístico.

#### K. Análisis estadísticos

1. Se determinó el intervalo de confianza al 95 % de las siguientes pruebas: Contenido de humedad para las briquetas en distintas mezclas, de la madera, bagazo y almidón de maíz empleado; Contenido de cenizas de las briquetas a distintas mezclas, de la madera, bagazo y almidón de maíz empleado; densidad de las briquetas en el día 10 de las mezclas a 30 MPa de compresión, y de la madera; Poder calorífico superior para las briquetas en distintas mezclas, de la madera, bagazo y almidón de maíz empleado.
2. Se realizó una prueba de hipótesis de medias de dos poblaciones con 95 % de confianza entre las briquetas y la madera de las siguientes pruebas: Contenido de humedad, contenido de cenizas, densidad (día 10 y 30 MPa de compresión para las briquetas) y poder calorífico.

#### L. Planteamiento de una línea de producción

1. De al proceso identificado durante la experimentación, se propuso las operaciones necesarias y las entradas y salidas para la elaboración de diagrama de caja negra y diagrama de bloques.

2. Se estableció una producción para escala piloto por medio de escalamiento de escala laboratorio según los experimentado. Se definió condiciones y parámetros de procesos de acuerdo con los análisis estadísticos que se asemejaran más a la madera analizada.
3. Se realizó el balance de masa del proceso productivo a escala piloto y balance de energía para la demanda energética en el proceso de secado.
4. Se estableció el diagrama de flujo representativo del proceso de producción de briquetas.

## VII. RESULTADOS

### A. Características físicas de la materia prima empleada.

Figura 12. Curva granulométrica de bagazo de caña empleada retirando fibras con tamaños mayores a 0.85 mm (mesh 20).

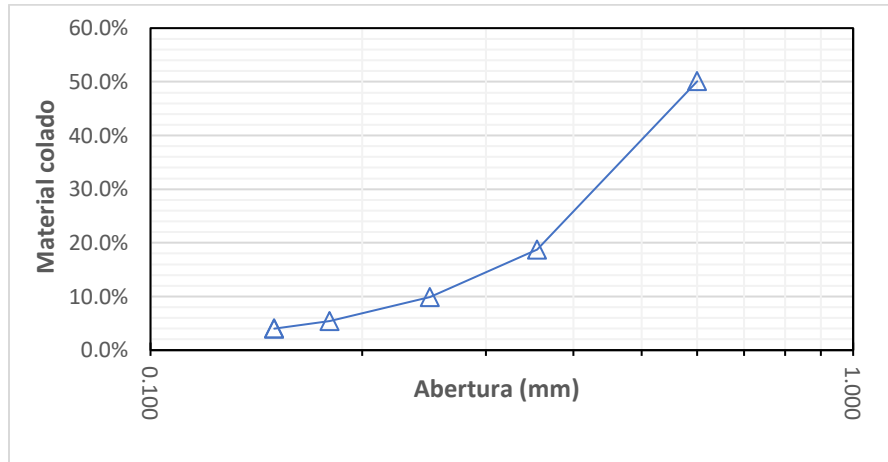
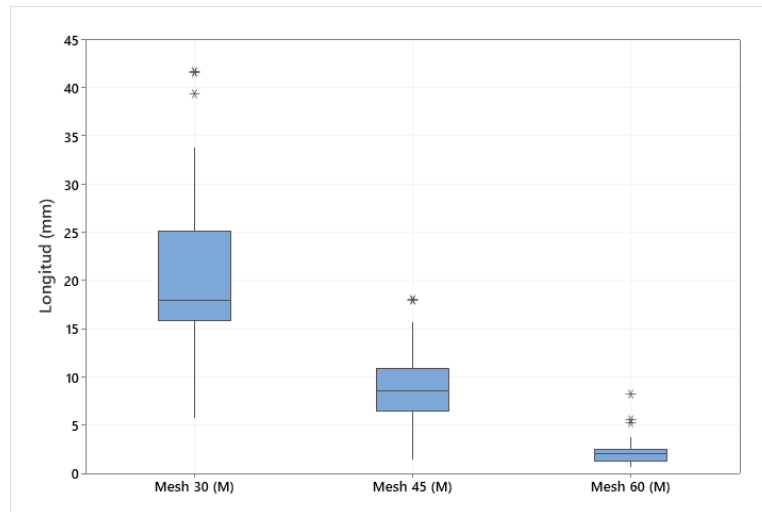






Figura 13. Longitud de las fibras de bagazo de caña molido y tamizado (mesh 30, 45, 60).








Cuadro 4. Humedad del bagazo de caña posterior al secado y almidón empleados.

Materia Prima	Promedio (% humedad)	Límite superior (% humedad)	Límite inferior (% humedad)
Bagazo de caña	7.73%	8.10%	7.36%
Almidón de maíz	9.19%	9.61%	8.77%

Cuadro 5. Parámetros empleados y características de las briquetas elaboradas.

No.	Briqueta	Composición (bagazo/almidón % p/p)	Geometría de la briqueta	Método de compresión	Tiempo compresión (min)	Presión aplicada (MPa)	Características/ Observaciones
1		10	Cilindro truncado	Prensa hidráulica con molde cilíndrico.	5	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta deformación</li> <li>- Suelta sólidos con facilidad.</li> <li>- Riesgo de fracturarse en la extrusión del molde.</li> </ul>
2		10	Cilindro truncado	Prensa hidráulica con molde cilíndrico.	5	20	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deformación leve</li> <li>- Más firme y compacta.</li> <li>- Fibras grandes tienden a soltarse.</li> <li>- Sin complicaciones en extrusión del molde.</li> </ul>
3		10	Cilindro truncado	Prensa hidráulica con molde cilíndrico.	5	30	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deformación leve.</li> <li>- Partes del almidón se separaron en la briqueta por segregación.</li> <li>- Presenta regiones frágiles.</li> </ul>
4		15	Cilindro truncado	Prensa hidráulica con molde cilíndrico.	5	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta deformación.</li> <li>- Muy frágil y suelta sólidos con facilidad.</li> <li>- Riesgo de fracturarse en la extrusión del molde.</li> </ul>

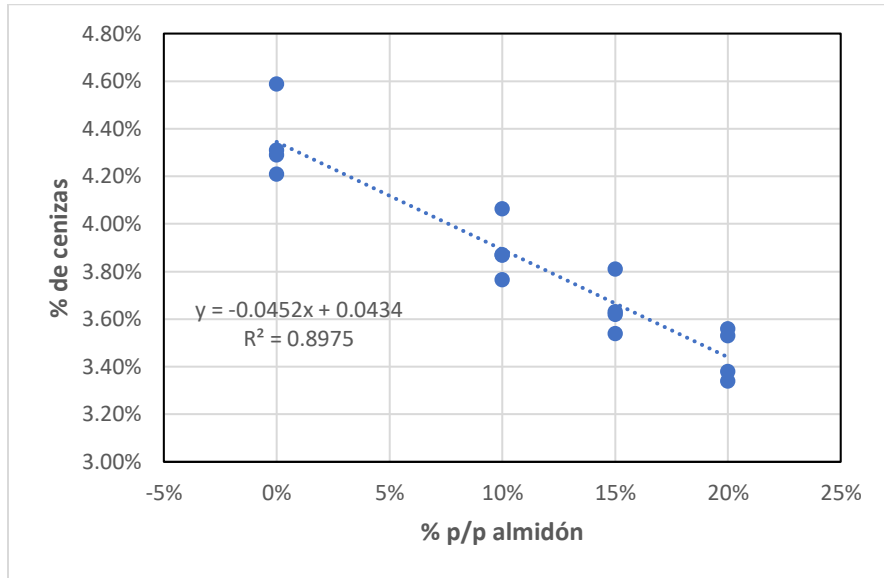
Continuación del cuadro 5.

No.	Briqueta	Composición (bagazo/almidón % p/p)	Geometría de la briqueta	Método de compresión	Tiempo compresión (min)	Presión aplicada (MPa)	Características/ Observaciones
5		15	Cilindro truncado	Prensa hidráulica con molde cilíndrico.	5	20	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deformación leve.</li> <li>- Las fibras se encuentran bien unidas.</li> <li>- Sin complicaciones en la extrusión del molde.</li> </ul>
6		15	Cilindro truncado	Prensa hidráulica con molde cilíndrico.	5	30	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deformación leve.</li> <li>- Aspecto muy similar a cilindro recto.</li> <li>- Fibras se encuentran bien unidas.</li> </ul>
7		20	Cilindro truncado	Prensa hidráulica con molde cilíndrico.	5	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta deformación.</li> <li>- Demasiado frágil, suelta gran cantidad de sólidos.</li> <li>- Alto riesgo de fracturarse en extrusión.</li> </ul>
8		20	Cilindro truncado	Prensa hidráulica con molde cilíndrico.	5	20	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deformación leve.</li> <li>- Las fibras se encuentran bien unidas.</li> <li>- Sin complicaciones en la extrusión del molde.</li> <li>- Acumulaciones de almidón</li> </ul>
9		20	Cilindro truncado	Prensa hidráulica con molde cilíndrico.	5	20	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deformación leve.</li> <li>- Las fibras se encuentran bien unidas.</li> <li>- Sin complicaciones en la extrusión del molde.</li> <li>- Acumulaciones de almidón.</li> </ul>



B. Características fisicoquímicas de las briquetas y madera (control).

Figura 14. Contenido de cenizas, en base seca, en relación con la composición de almidón/bagazo de caña en 10%, 15% y 20%.



Cuadro 6. Intervalo de confianza al 95% del contenido de cenizas, en base seca, de las briquetas a distintas composiciones y de la madera analizada.

Combustible	Promedio (% p/p)	Límite superior (% p/p)	Límite inferior (% p/p)
Briqueta 10 %	4.22%	4.44 %	4.01 %
Briqueta 15 %	3.97%	4.16 %	3.77 %
Briqueta 20 %	3.75%	3.94 %	3.57 %
Madera	0.62%	0.98%	0.25%

Figura 15. Disminución de densidad en el tiempo de briquetas al 10 % de composición a 10, 20 y 30 MPa.

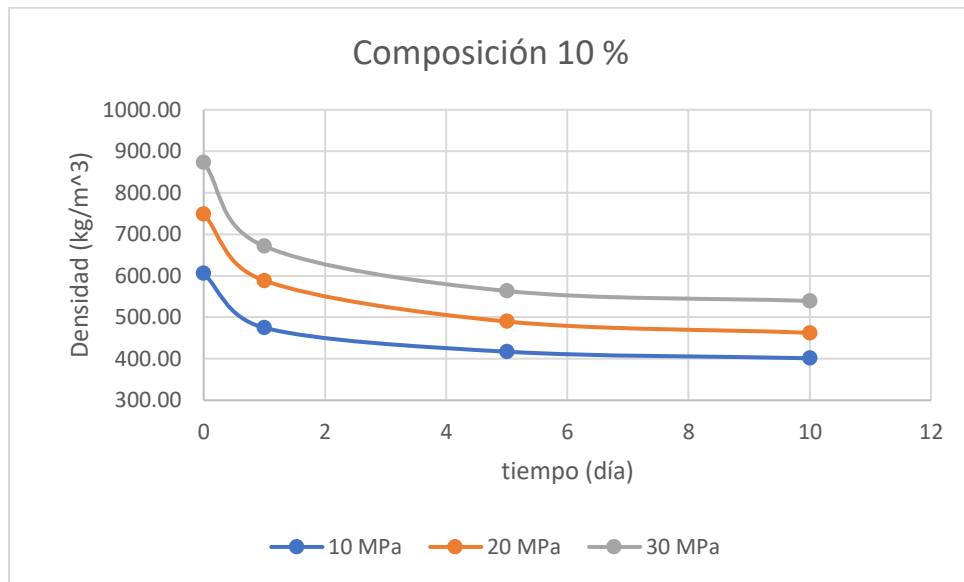


Figura 16. Disminución de densidad en el tiempo de briquetas al 15 % de composición a 10, 20 y 30 MPa.

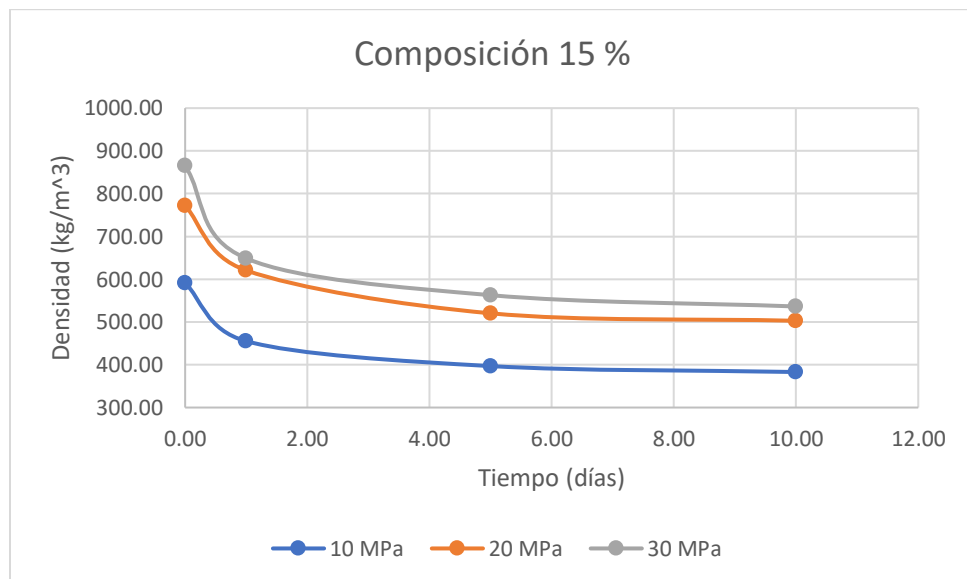
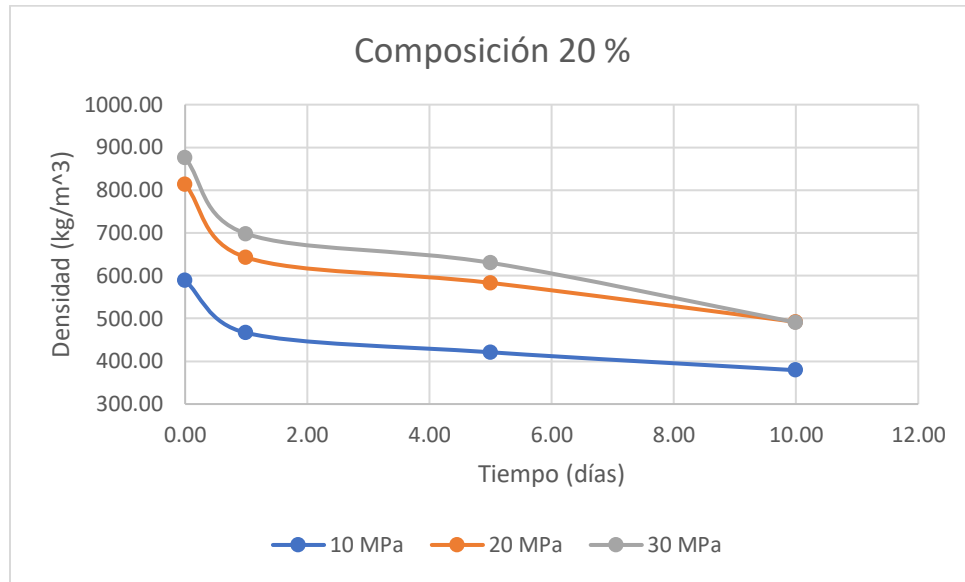


Figura 17. Disminución de densidad en el tiempo de briquetas al 20 % de composición a 10, 20 y 30 MPa.



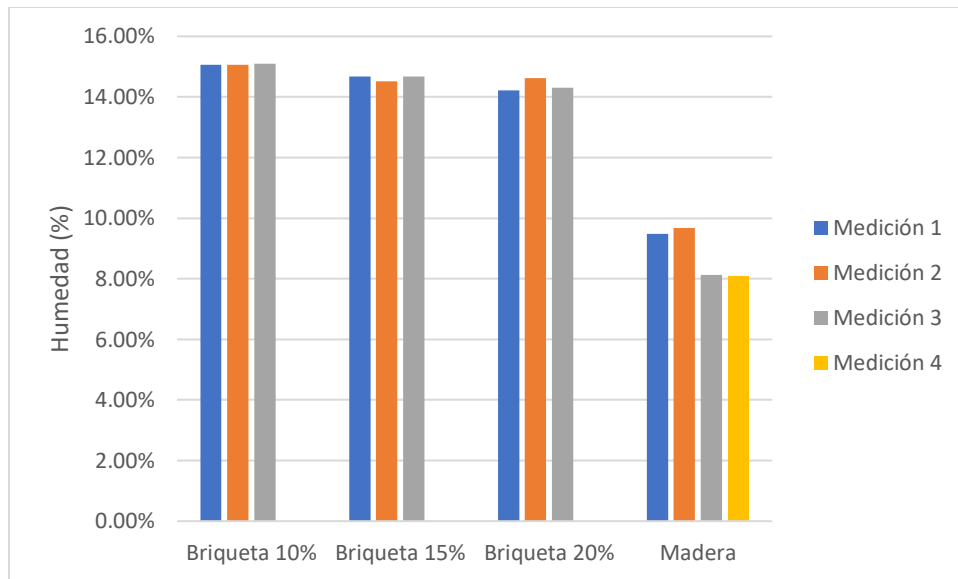
Cuadro 7. Intervalo de confianza de la densidad de las briquetas a distintas composiciones y presiones de compresión en el día 10.

Composición	MPa	Promedio (kg/m <sup>3</sup> )	límite superior (kg/m <sup>3</sup> )	límite inferior (kg/m <sup>3</sup> )
10%	10	401.23	412.32	390.15
	20	462.55	475.00	450.11
	30	539.29	558.44	520.14
15%	10	383.03	405.18	360.88
	20	502.76	510.30	495.22
	30	536.25	561.94	510.55
20%	10	379.05	411.12	346.98
	20	491.92	508.08	475.76
	30	536.25	590.70	481.79

Cuadro 8. Intervalo de confianza de la densidad de la madera.

ítem	Promedio (kg/m <sup>3</sup> )	Límite superior (kg/m <sup>3</sup> )	Límite inferior (kg/m <sup>3</sup> )
Madera	543.63	578.55	508.72

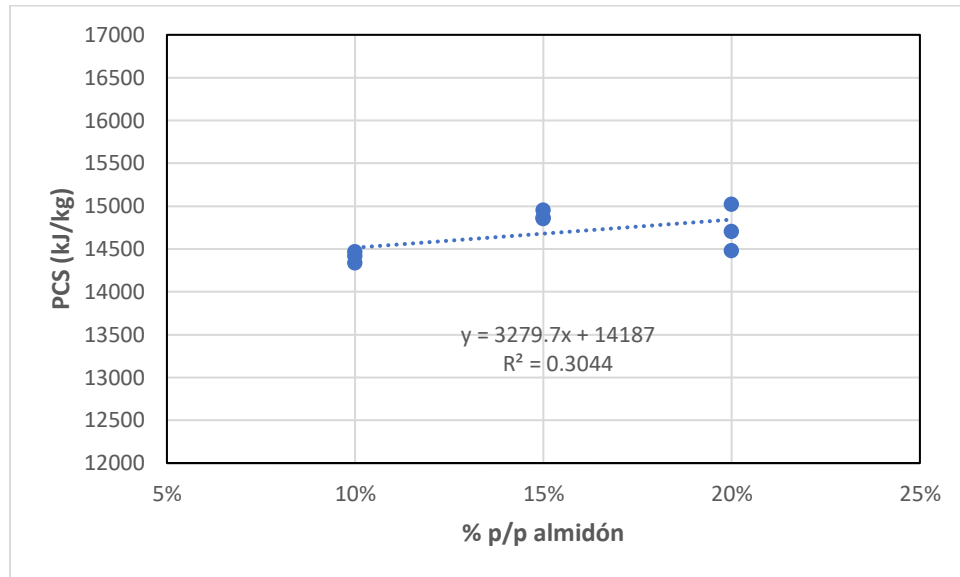
Figura 18. Contenido de humedad de las briquetas a 3 distintas composiciones en el día 10 de almacenamiento y de la madera analizada.



Cuadro 9. Intervalo de confianza al 95% de la humedad de las briquetas a 3 distintas composiciones en el día 10 de almacenamiento y madera analizada.

ítem	Promedio (% humedad)	Límite superior (% humedad)	Límite inferior (% humedad)
Briqueta 10 %	15.08%	15.12%	15.04%
Briqueta 15 %	14.62%	14.84%	14.40%
Briqueta 20 %	14.38%	14.90%	13.86%
Madera	8.84%	10.21%	7.47%

Figura 19. PCS de las briquetas a 3 distintas composiciones.



Cuadro 10. Intervalo de confianza al 95% del PCS de las briquetas a 3 distintas composiciones y madera analizada.

Combustible	Promedio (kJ/kg)	Límite superior (kJ/kg)	Límite inferior (kJ/kg)
Briqueta 10 %	14408	14575	14241
Briqueta 15 %	14893	15029	14758
Briqueta 20 %	14736	15410	14062
Madera	17869	18608	17130

C. Comparativo de combustibles.

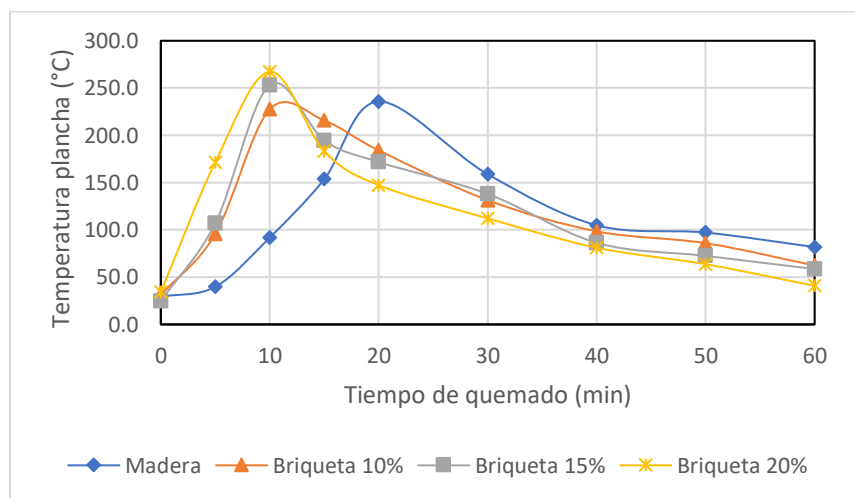
Cuadro 11. Cuadro comparativo de propiedades fisicoquímicas de las briquetas y la madera.

Combustible	Cenizas (% p/p)		**Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		Humedad (% p/p)		PCS (kJ/kg)	
	Valor	*Similitud	Valor	*Similitud	Valor	*Similitud	Valor	*Similitud
Briqueta 10%	4.44, 4.01	No	558.44, 520.14	Sí	15.12, 15.04	No	14575, 14241	No
Briqueta 15%	4.16, 3.77	No	564.94, 510.55	Sí	14.84, 14.40	No	15029, 14758	No
Briqueta 20%	3.94, 3.57	No	590.70, 481.79	No	14.90, 13.86	No	15410, 14062	No
Madera	0.98, 0.25	NA	578.55, 508.72	NA	10.21, 7.47	NA	18608, 17130	NA





\* De acuerdo con la prueba de hipótesis planteada.

\*\*Briquetas fabricadas a 30 MPa.

Figura 20. Ensayo de quemado, temperatura en la plancha de la estufa de biomasa en función del tiempo de la quema aproximada de 0.600 kg de biocombustible.



Cuadro 12. Observaciones en el ensayo de quemado de la madera y las briquetas a 10%, 15% y 20%.

Combustible	Imagen	Observaciones
Madera		<p>Encendido de la madera fue rápido, no requirió de ayudantes en el encendido de la combustión. producía grandes cantidades de humo saliendo de la chimenea. Su llama perduró por más tiempo, pero a temperaturas menos elevadas. Tomó más tiempo que los demás para alcanzar temperatura elevadas</p>
Briqueta 10%		<p>Dificultad en el encendido. Requirió una pequeña cantidad de un ayudante de encendido a base de alcohol. Al iniciar la combustión, se propagó con facilidad a las otras briquetas. Sus gases de combustión no presentaban humos. Las briquetas se fracturaron en cilindros más pequeños. Alcanzó una temperatura máxima muy similar a la de la madera. Las cenizas fueron similares a la de la madera.</p>
Briqueta 15%		<p>Dificultad en el encendido. Requirió una pequeña cantidad de un ayudante de encendido a base de alcohol. Al iniciar la combustión, se propago con facilidad. La llama generada fue más viva que la briqueta al 10%. Sus gases de combustión no presentaban humos. Las briquetas se fracturaron en cilindros más pequeños. Obtuvo un pico ligeramente mayor a la briqueta 10%. Las cenizas fueron similares</p>
Briqueta 20%		<p>Dificultad en el encendido. Requirió una pequeña cantidad de un ayudante de encendido a base de alcohol. Al iniciar la combustión, se propagó con facilidad a las otras briquetas. Sus gases de combustión no presentaban humos. Las briquetas se fracturaron en cilindros más pequeños. El aspecto de la llama generada fue similar a la briqueta 15%. Alcanzó un pico de temperatura más alto de todos. Las cenizas fueron similares.</p>

D. Planteamiento de planta piloto.

Figura 21. Diagrama de caja negra del proceso de densificación de bagazo de caña.

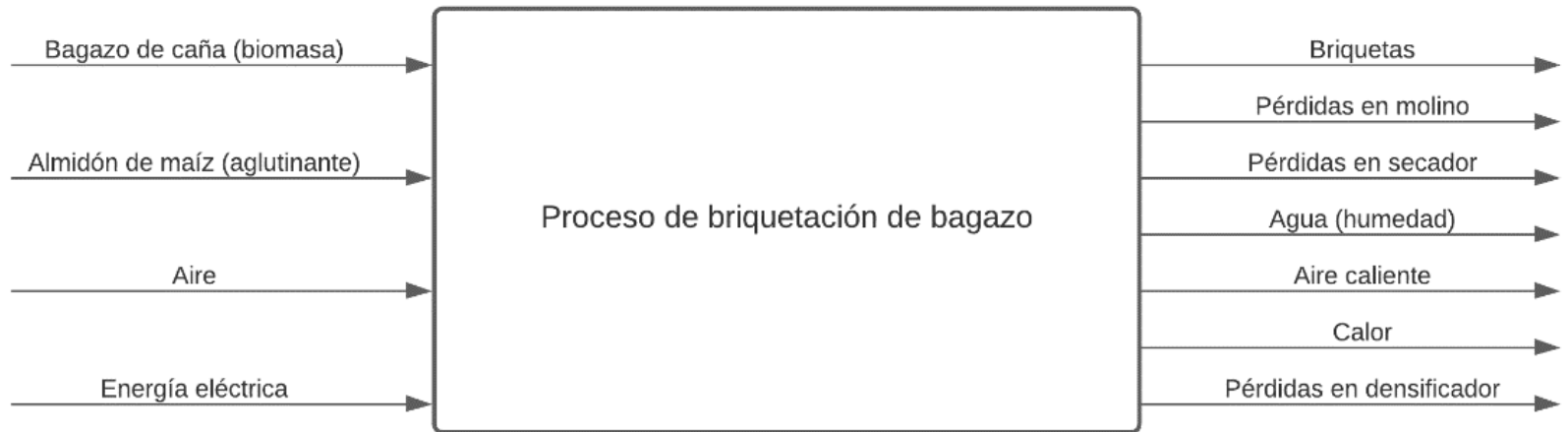
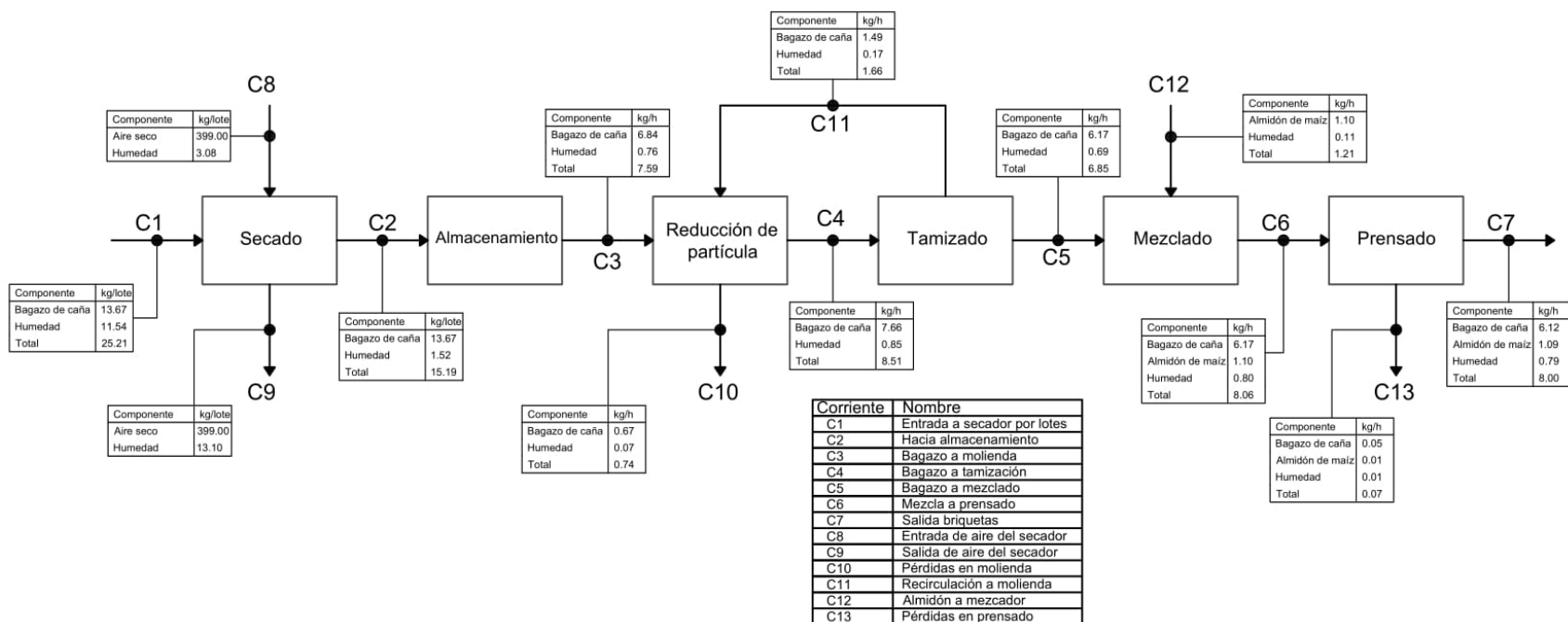



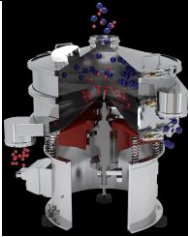






Figura 22. Diagrama de bloques del proceso de densificación de bagazo de caña.



Cuadro 13. Propuesta de equipos a emplear para la briquetación de bagazo.

Operación unitaria	Equipo	Imagen	Condiciones	Justificación
Secado	Secador de bandejas	 (elaboración propia)	Temperatura aire 60 °C, flujo de aire de 2.4 m/s. Capacidad para procesar 25.21 kg de sólido por lote.	Secador empleado para procesos a escala piloto, con el que puede replicarse las condiciones utilizadas en la experimentación.
Almacenamiento	Silo	 (Silos Cordoba, 2020)	Capacidad de retención de 50.42 kg de bagazo de caña.	Almacenamiento “buffer” del bagazo utilizado para retener bagazo seco de un proceso por lotes, y alimentar en forma semicontinua.
Molienda	Molino de cuchillas	 (Veyco, 2020)	Capacidad de procesar 7.59 kg/h de bagazo de caña.	Reducción de partícula, adecuado para la obtención de partículas finas o intermedias.
Tamización	Tamizador vibratorio circular	 (Filtru, 2020)	Capacidad para procesar 8.51 kg/h de bagazo de caña con capacidad de recirculación. Malla no 20 (escala Tyler)	Separación de tamaño de partícula de forma continua con la posibilidad de intercambiar tamices y desviar retenido para ser recirculado.
Mezclado	Mezclador de cintas	 (Veyco, 2020)	Capacidad para procesar 6.85 kg/h.	Mezclador adecuado para la mezcla de sólidos granulados o polvos.
Prensado	Prensa de tornillo	 (Archila, 2015)	Capacidad para procesar 8.06 kg/h. Presión de compresión de 30 MPa	Puede funcionar de forma continua, a distintas velocidades de producción de acuerdo con el tamaño del equipo.



Cuadro 14. Parámetros de producción de las briquetas.

Parámetro	Valor	Unidad
Humedad bagazo	8.10-8.77	% p/p
Humedad almidón	9.61-8.77	% p/p
Composición almidón/bagazo	15	%
Presión aplicada	30	MPa
Tamaño de fibra (diámetro)	>0.850	mm
Tamaño de fibra (largo)	>35	mm
Cantidad de polvos de biomasa	>10	% p/p

Cuadro 15. Balance de masa de las corrientes propuestas en el diagrama de bloques y diagrama de flujo del proceso.

Número de corriente		C1		C2		C3		C4		C5	
Nombre de corriente		Entrada a secador por lotes		Hacia almacenamiento		Bagazo a molienda		Bagazo a tamización		Bagazo a mezclado	
#	Componente	kg/Lote	% p/p	kg/Lote	% p/p	kg/h	% p/p	kg/h	% p/p	kg/h	% p/p
1	Bagazo de caña	13.67	54.23%	13.67	90.00%	6.84	90.00%	7.66	90.00%	6.17	90.00%
2	Almidón	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
3	Humedad	11.54	45.78%	1.52	10.00%	0.76	10.00%	0.85	10.00%	0.69	10.00%
4	Aire	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
5	Total	25.21	100.00%	15.19	100.00%	7.59	100.00%	8.51	100.00%	6.85	100.00%

Continuación de Cuadro 15.

Número de corriente		C6		C7		C8		C9		C10	
Nombre de corriente		Mezcla a prensado		Salida briquetas		entrada de aire del secador		Salida de aire del secador		Pérdidas en molienda	
#	Componente	kg/h	% p/p	kg/h	% p/p	kg/Lote	% p/p	kg/Lote	% p/p	kg/h	% p/p
1	Bagazo de caña	6.17	76.50%	6.12	76.50%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.67	90.00%
2	Almidón	1.10	13.62%	1.09	13.62%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
3	Humedad	0.80	9.88%	0.79	9.88%	3.08	0.77%	13.10	3.18%	0.07	10.00%
4	Aire	0.00	0.00%	0.00	0.00%	399.00	99.23%	399.00	96.82%	0.00	0.00%
5	Total	8.06	100.00%	8.00	100.00%	402.08	100.00%	412.10	100.00%	0.74	100.00%

Continuación de Cuadro 15.

Número de corriente		C11		C12		C13	
Nombre de corriente		Recirculación hacia molienda		Almidón hacia mezclado		Pérdidas en prensado	
#	Componente	kg/h	% p/p	kg/h	% p/p	kg/h	% p/p
1	Bagazo de caña	1.49	90.00%	0.00	0.00%	0.05	76.50%
2	Almidón	0.00	0.00%	1.10	90.81%	0.01	13.62%
3	Humedad	0.17	10.00%	0.11	9.19%	0.01	9.88%
4	Aire	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
5	Total	1.66	100.00%	1.21	100.00%	0.07	100.00%

Cuadro 16. Dimensiones y condiciones de la cámara de secado para el secado por lotes de bagazo de caña.

Descripción	Valor	Unidad
Carga de sólido por unidad de área	2.54	kg/m <sup>2</sup>
Tiempo de secado*	150 (2.5)	min (h)
Horas producción al día	6	h/día
Lotes de secado al día	3	Lote/día
Capacidad por lote	25.21	kg/lote
Cantidad de bandejas	6	---
Área de cada bandeja	1.65	m <sup>2</sup>
Longitud bandeja	1.35	m
Ancho bandeja	1.22	m
Altura entre bandeja	0.30	m
Grosor bandeja	2.00	mm
Longitud cámara de secado	1.49	m
Ancho cámara de secado	1.34	m
Altura cámara de secado	1.58	m
Volumen cámara de secado	3.16	m <sup>3</sup>
Energía eléctrica que suministrar por lote	16.67	kWh
Velocidad de aire entre bandejas	2.4	m/s
Masa de aire a suministrar	159.6	kg/lote
Reciclaje de aire	99.1	%

\*Obtenido por lectura de diferencia de humedades en la curva de secado, Figura 32

## VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de realizar un planteamiento de escalamiento a planta piloto de una línea de producción de briquetas utilizando biomasa diferente a madera, se realizó un proceso a escala laboratorio que incluye las operaciones necesarias para la obtención de briquetas utilizando bagazo de caña como materia prima. Dado a que se buscaba obtener briquetas con características físicas, químicas y fisicoquímicas similares a la de la madera, se seleccionó una muestra de madera comercial usada como combustible doméstico como un control en el análisis con el fin de determinar si existe similitud.

Como primer paso, se realizó una recolección de bagazo de caña fresco y fue secado en los días posteriores. Dicho secado fue considerado como la primera operación unitaria debido a que el bagazo de caña es muy propenso a ataques bacterianos por los azúcares residuales. La curva de secado (Figura 32) fue determinada a una temperatura de secado a 60 °C, recomendado por los autores Villalba y Arzola (2019), dado que el uso de temperaturas superiores puede afectar la estructura de las fibras de bagazo y retirar gran cantidad de materiales volátiles en el sólido. Por otro lado, el bagazo de caña contiene altas cantidades de polvos, provenientes de los procesos de extracción de azúcar en los ingenios azucareros. Estos polvos pueden presentar riesgo de explosiones, por lo que el uso de temperaturas bajas en el secado genera menor riesgo.

La curva de secado obtenida para el bagazo de caña fue obtenida experimentalmente, a condiciones de humedades de aire del lugar, velocidad de viento dentro de la cámara de aire y configuración de camión de bandejas las cuales fueron consideradas en las estimaciones para un secador de bandejas para la producción a escala piloto. Esta presenta una menor velocidad, principalmente en la región de secado constante, en comparación a otros autores, que puede ser debido a la carga aplicada por bandeja, siendo esta aproximadamente de 2.54 kg/m<sup>2</sup>. Por otro lado, como se mencionó, los polvos presentes o material finamente particulado en las bandejas puede que impidiera el paso libre del aire y, por lo tanto, impidiendo el secado de la humedad libre en el inicio del secado, retardando el tiempo necesario para realizar el secado. Sin embargo, dado que se pretende realizar el secado de bagazo a condiciones similares a las obtenidas en la experimentación, la curva de secado generada presenta una muy buena estimación para determinar el tiempo necesario de secado para una demanda definida a

las mismas condiciones. La lectura del tiempo necesario se obtiene simplemente al leer la diferencia de humedades en el inicio y la humedad deseada.

La Figura 33 presenta la curva de rapidez de secado expresada en flux de masa (N) contra la humedad en base seca (X). En esta, se observan los períodos de rapidez de secado constante y decreciente. Para las condiciones a las que fue realizado el secado, la rapidez de secado constante ( $N_c$ ) tiene un valor de  $9.93 \times 10^{-5}$  kg/m<sup>2</sup> s, el cual se mantiene hasta alcanzar el contenido crítico de humedad ( $X_c$ ), esto a 0.435, y se presenta una disminución aún mayor al sobrepasar los puntos  $N_d$  y  $X_d$  en el gráfico. La curva de secado fue elaborada antes de llegar a la humedad en equilibrio, debido a que no fue considerado necesario reducir su humedad a valores menores a 6% (base húmeda).

De acuerdo con diversos autores en la fabricación de briquetas, el uso de biomasa con tamaño de fibras altas ocasiona menores enlaces en el proceso de prensado. Esta afirmación fue demostrada con el tamaño de partícula original del bagazo de caña utilizado. Como lo muestra la Figura 85 en anexos, las briquetas en las que se utiliza el bagazo de caña sin reducción de partícula tienden a expandirse y a romperse con alta facilidad, incluso horas después de ser aglomeradas. De acuerdo con el análisis granulométrico realizado al bagazo de caña, se retiene un  $40.3 \pm 0.07\%$  de bagazo en el tamiz no. 20 (abertura 0.850 mm). La molienda de bagazo con molino de discos resultó en una significativa reducción de partícula no utilizable, resultando en la retención de 19.5% de bagazo retenido en tamiz. 20. Las figuras 35 a 38 muestra la comparación en la reducción de partícula entre el bagazo molido y no molido. Sin embargo, emplear un proceso de reducción presento pérdidas de bagazo en forma de polvo en la operación del molino, llegando a ser cerca de un 8.0% del material alimentado. La generación de polvos suspendidos en el aire puede presentar riesgos similares a los encontrados en el secado, por lo que se deben de tomar consideraciones contra ambientes peligrosos en la operación a escala piloto o industrial.

Las caracterizaciones de forma de las fibras previo y posterior a la reducción de partícula fueron presentadas como factores de forma, para las retenidas en tamiz no. 20, y longitudes para las retenidas en tamices posteriores. Los factores de forma propuestos por Bagheri y colaboradores (2014), fueron utilizados para describir las fibras con formas inusuales ya que no pueden describirse con formas cilíndricas como aquellas retenidas en los



tamices posteriores. Los tamices no. 80 en adelante fueron considerados como polvos, debido a que se presentan como partículas que se suspende fácilmente en el aire al entrar en movimiento, llegando a valores de 9.6 % en el bagazo molido.

De acuerdo con los diagramas de caja y bigotes, el proceso de molienda utilizando el molino de discos tiene poco efecto en las fibras que sobrepasan el tamiz no. 20. Sin embargo, tiene efectos significativos en todas las fibras que son retenidas en el tamiz no. 20. Por lo tanto, Podría considerarse una separación del material previo a la molienda para solo alimentar aquellas fibras que requieran de la disminución de partículas. La Figura 13 explica de mejor la forma de las fibras tamizadas. Dado que la curva granulométrica solamente indica la dimensión más pequeña del sólido. Por lo tanto, es necesario definir el largo de las fibras retenidas en los tamices para tener un mejor entendimiento del sólido. Las partículas retenidas en los tamices 80 en adelante fueron considerados como polvos o partículas esféricas, dado que sus dimensiones pueden ser explicadas únicamente con un diámetro.

Tras la realización de las briquetas empleando una prensa de 10 toneladas de fuerza, se registró la masa perdida en dicho proceso, llegando a valores del 1.0% o menos, las cuales fueron tomadas en cuenta para el balance de materia posterior. Las condiciones analizadas 3 distintas presiones (10, 20 y 30 MPa) a 5 minutos de compresión según lo recomienda Boarini (2006), utilizando almidón de maíz como aglutinante y bagazo de caña molido y tamizado, retirando contenido retenido del tamiz no. 20. Las briquetas fabricadas fueron puestas en anaquel por 10 días para determinar su pérdida de densidad con el tiempo y así determinar la densidad final del producto.

De acuerdo con el Cuadro 5, se observa que las briquetas fabricadas a presiones de 20 y 30 MPa no presentan deformaciones elevadas y tienden a ser más rígidas y a soltar menor material particulado al manipularlas. Por otro lado, se observa que un 20% en la composición de almidón en la mezcla tiene un efecto negativo en la integridad y aspecto de la briqueta final. Sin embargo, al comparar la composición de 10% y 15% a presiones aplicadas de 30 MPa, se encuentra que la composición de 15% presenta mejores resultados, por lo que no es posible afirmar que a menor composición se logran mejores resultados. Esto puede ser debido a que el mezclado a 20% mostró complicaciones, en donde el almidón segregaba con facilidad, resultando en regiones de la briqueta con alto contenido de almidón. Esto es debido al tamaño

de las fibras de bagazo son mucho mayores al almidón, y a que la mezcla fue realizada en seco, y no empleando agua para mejorar su adherencia.

La determinación de contenido de cenizas en base seca de las briquetas demostró tener un contenido alto de ceniza, que es debido al bagazo de caña como tal. Un alto contenido de cenizas puede resultar en efectos negativos para la vida útil de caldera o estufas, dado que los minerales en las cenizas pueden resultar ser corrosivos. La madera, por otro lado, presenta bajos contenidos de cenizas, con valores de 0.98% a 0.25% de acuerdo con el intervalo de confianza. De acuerdo con la prueba de hipótesis, la hipótesis nula es rechazada a favor de la hipótesis alternativa, que establece que las medias poblacionales del contenido de cenizas no son iguales, con diferencias cercanas al 3.0%.

Como se observa en las figuras 15 a 17. Todas las combinaciones de briquetas presentan una alta expansión en su forma cilíndrica tras transcurrir el primer día en anaquel. Dichas expansiones pueden deberse a diversos factores que afectan los enlaces internos de la briqueta, como puede ser la humedad, temperatura, manipulación, entre otros. En el día 10, se observa que la expansión de las briquetas ha llegado a su equilibrio. La madera, por otro lado, no presenta dicho problema de pérdida de densidad, teniendo una densidad constante en un intervalo de 578.55 a 508.72 kg/m<sup>3</sup> de acuerdo con el intervalo de confianza. La prueba de hipótesis fue empleada para las muestras de briquetas llevadas a 30 MPa de compresión, dado que presentan valores cercanos a la densidad de la madera. El análisis indica que no es posible rechazar la hipótesis nula, por lo que las mezclas de briqueta de 10% y 15% no presentan diferencia significativa en las medias poblacionales contra la madera. La mezcla de 20% tuvo una respuesta atípica a la esperada ya que es la muestra que presenta mayor aglutinante, que pudo tener un efecto contrario al no permitir enlaces con el bagazo, sino consigo mismo, dando como resultado un enlace más débil.

El PCS de las briquetas (almacenadas) aumenta según la mezcla almidón-bagazo aumenta debido a que el almidón presenta un mayor poder calorífico de acuerdo con el Cuadro 10. Sin embargo, ninguna de las mezclas presenta valores de PCS suficientemente elevados. La prueba de hipótesis afirma el supuesto, ya que en todas las mezclas se rechaza la hipótesis nula a favor de la hipótesis nula.

Por último, la humedad de las briquetas en el día 10 de almacenamiento mostraron un aumento, tomando valores entre 13% a 16% en base húmeda. Un aumento en la humedad afecta directamente al PCS, reduciendo su energía útil al ser utilizado como combustible. Sin embargo, tales valores de humedad son comunes encontrarlos en briquetas fabricadas por vías húmedas. La madera, por otro lado, contiene una humedad en equilibrio en un intervalo de 10.21% a 7.47%. La prueba de hipótesis indica la hipótesis nula se rechaza a favor de la alternativa, por lo que las medias poblacionales de las humedades no son iguales a la madera.

El ensayo de quemado de briquetas y madera en estufa de biomasa, Figura 76, mostró variaciones entre el grupo de briquetas y la madera. En este, la madera generó la misma temperatura que la briketa al 10% sobre la plancha de la estufa de biomasa. Por otro lado, la madera presentó altos contenidos de humos en la salida de la chimenea. Esto fue debido a falta de oxígeno en la combustión de la madera. Por otro lado, las briquetas no presentaron cantidades elevadas de humos en su combustión, únicamente en el encendido. Sin embargo, la llama de la briketa perduro menor tiempo que la madera.

Con las observaciones durante la fase experimental, se propuso un diagrama de caja negra para establecer las entradas y salidas involucradas en el proceso de densificación de bagazo de caña en forma de briquetas. Para establecer los balances de materia, se propuso un diagrama de bloques que indica de mejor las operaciones necesarias y su relación, en donde se consideraron las siguientes operaciones unitarias: secado, almacenamiento, molienda, tamizado, mezclado y prensado. Se consideró un secado por lotes, debido a que se adapta mejor a una planta escala piloto en comparación a los secadores rotatorios. Dado que la operación de secado es por lotes, se consideró un almacenamiento del bagazo en silo o tolvas para alimentar al proceso posterior. Por lo tanto, el resto de las operaciones se consideraron como semicontinuas. En el resto de operaciones, se propuso el uso de distintos equipos como lo muestra el Cuadro 13, de acuerdo a las exigencias de cantidad y al material a tratar.

En el proceso de secado, no se asumió las pérdidas por arrastre de polvos en el aire de secado. Se tomaron en cuenta las pérdidas en las operaciones de molienda y prensado de la biomasa, y una recirculación de material de tamaño de partícula superior al tamaño de tamiz de 1 mm (19.5% de material alimentado). Se consideró un mezclado en seco del bagazo de caña y el aglutinante. La producción a escala laboratorio es de 0.2 kg/h, por lo que se escaló a

una cantidad de 8 kg/h utilizando un radio de escalamiento de 40 de un intervalo de 10-100 para productos sólidos de acuerdo con Bisio y Kabel (1985).

El diagrama de flujo del proceso fue realizado para dar un mejor entendimiento de los equipos necesarios para las operaciones propuestas en el diagrama de bloques, para el cual se utilizaron los equipos propuestos en el Cuadro 13 para su representación pictográfica. Además, propone el uso de bandas transportadoras para el movimiento de los sólidos entre operaciones y uso de equipos auxiliares como elevador de cangilones para alimentar al silo de almacenamiento y ventiladores para controlar el flujo hacia el secador de bandejas.

El balance de masa se presenta en flujos de bagazo, almidón, agua y aire empleado, y su composición en cada una de las corrientes presentadas en los diagramas bloque y flujo. Las condiciones de fabricación de la briqueta fueron definidas de acuerdo con aquellos parámetros que permitieran la mejor similitud de propiedades fisicoquímicas al control, la madera analizada. La mezcla para utilizar fue definida como 15% debido a que es la mezcla que presenta las mejores características de densidad, cenizas y PCS. El análisis fue realizado en retroceso, iniciando por la salida de briquetas fabricadas para determinar los flujos a tratar en las operaciones, en especial la de secado para determinar el tamaño de los lotes y estimar tamaño y demanda energética del secador de bandejas.

De acuerdo con el balance de materia, se propuso una estimación inicial del tamaño, características y condiciones a las que debe de operar el secador de bandejas para lograr el secado de bagazo a una humedad establecida de 10%. El dimensionamiento de tamaños y espacios dentro de la cámara de secado y camión de bandejas fueron escaladas conservando las características originales del secador de bandejas utilizado del laboratorio de operaciones unitarias para replicar el comportamiento de secado para la demanda establecida en la escala piloto. De igual forma, los parámetros como temperatura de aire de secado, condiciones ambientales y velocidad de aire de secado en la cámara se determinaron por mediciones experimentales. Para esto, las condiciones ambientales a las que fue determinado la curva de secado fueron las siguientes: presión atmosférica 0.991 bar, humedad relativa 37.80 % y temperatura ambiente de 23.8 °C. Dado que las condiciones ambientales pueden alterarse, es posible que existan variaciones con el comportamiento de secado en la escala piloto. De acuerdo cómo se estableció en la Figura 33, el valor  $N_c$  determinado fue considerado como

constante para el análisis de la operación de secado, permitiendo la determinación de alimentación de aire necesario y energía a suministrar para lograr el secado. Sin embargo, dado que el análisis realizado toma como suposición un valor  $Nc$  constante en un secado adiabático, se espera que la estimación pueda ser distinta.

## IX. CONCLUSIONES

- El tamaño de partícula empleados en la fabricación de briqueta se encuentra en un intervalo de 20 a 2 mm de longitud, y diámetro menor a 1 mm, los cuales demostraron una buena aglomeración a lo largo del tiempo.
- El contenido de ceniza, humedad y PCS resultaron no ser similares a la madera analizada, de acuerdo con la prueba de hipótesis realizada al 95 % de confianza. Por otro lado, las mezclas de 10 y 15% llevadas a 30 MPa de compresión sí presentaron similitud en cuanto a la densidad.
- El uso de la mezcla al 15% de almidón en base húmeda presenta las mejores características dado que su densidad se asemeja a la de la madera y presenta mejor PCS y menor contenido de cenizas en comparación a la mezcla 10%.
- Las operaciones unitarias identificadas para la producción de briquetas de bagazo a escala laboratorio son el secado del bagazo, almacenamiento, molienda, tamizado, mezclado con aglutinante y prensado, junto con una propuesta de equipos a utilizar para cumplir dichas operaciones.
- Se estableció los tiempos de secado de bagazo de caña por medio de una curva de secado a las siguientes condiciones: temperatura de aire de secado a 60 °C, capacidad superficie de secado de bagazo a 2.54 kg/m<sup>2</sup>, velocidad de aire dentro de cámara de secado a 2.4 m/s.
- Se propuso una estimación del tamaño y condiciones de operación para un secador de bandejas de acuerdo con el balance de materia, y se determinó el consumo energético por lote de secado, siendo de aproximadamente 16.67 kWh. Sin embargo, se asumió un proceso adiabático y con condiciones constantes, por lo que el valor real de consumo puede variar.

## X. RECOMENDACIONES

- Evaluar el efecto de aplicar aglutinante de almidón en aspersion en el proceso de secado en la densidad final de la briqueta.
- Debido al PCS obtenido, realizar un análisis del efecto del PCS utilizando otras fuentes de biomasa o de mezclas de biomasa para la fabricación de briquetas.
- Considerar un secado continuo por secador rotatorio con los gases de combustión de una fracción de bagazo seco para reducir costos energéticos.
- Realizar un análisis de propiedades de dureza de la briqueta fabricada por pruebas de resistencia a la deformación axial y radial, para las distintas mezclas y condiciones de presión evaluadas en el documento.
- Realizar un análisis económico de las actividades de densificación de biomasa a escala piloto y determinar tiempos de recuperación de inversión para la maquinaria a emplear.
- Realizar estudios que permitan analizar y correlacionar la velocidad de combustión para cada formulación y el calor útil entregado.
- Considerar utilizar empaque que proteja a las briquetas de la expansión y humidificación de estas a estar sometidas a condiciones ambiente.
- Evaluar utilizar el desperdicio seco de la caña de azúcar en los campos de cosecha, conocido como “Rack”, y su efecto en el contenido de cenizas y PCS final.
- Considerar una forma de briqueta que permita una mejor aireación para la combustión de este como son los cilindros huecos.
- Considerar el proceso de torrefacción en las briquetas generadas para obtener un producto con mayor PCS y mayor dureza, y evaluar el efecto de la cantidad de aglutinante en la briqueta.

## XI. REFERENCIAS

- Archila, L. (2006). *Máquina para fabricación de briquetas de aserrín para aserradero Lorenzi*. (Tesis de pregrado). Universidad Rafael Landívar, Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- Bagheri, C; Bonadonna, C; Manzella, I; Volanthen, P. (2015). *On the characterization of size and shape of irregular particles*. Elsevier. 270. 141-1453.
- Balseca, O; López, S; Viteri, E; López, A; Hernández, E. (2018). *Elaboración, caracterización y posibles aplicaciones de briquetas de residuos de café (borra) como biocombustible sólido*. Polo del conocimiento. 3 (21). 420-452.
- Bisio, A y Kable, R.L. (1985). *Scaleup of Chemical Processes. Conversion from Laboratory Scale Test to Successful Commercial Size Design*. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, 1985.
- CEEPYS. (2017). *Matriz energética*. Extraído de <http://ceepys.org.ar/matriz-energetica/>.
- Cepal. (abril 2019). ODS 7. *Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos en América Latina y el Caribe*.
- Contreras, W; Owen, M; Cloquell, V; Contreras, Y; y Garay, D. (2006). *Diseño de tableros de partículas de caña brava y adhesivo fenol-formaldehído*. Revista forestal Latinoamericana, no. 39, p 39+.
- Creus, A. (2014). *Energías Renovables*. 2ª edición. Editorial Ediciones de la U. Impreso en Bogotá, Colombia. 436 páginas.
- FAO. (2014). *Bioingeniería y seguridad alimentaria, evaluación rápida (BEFS RA), BRIQUETAS*. Extraído de <http://www.fao.org/publications/card/es/c/f186e885-81ac-471f-b35e-09ba5ef87cc3/>
- Feria, J; Villalobos, R; Muñoz, J; Flores, E. (2013). *Composición del bagazo de caña por análisis termogravimétrico*. Memorias CIM. Instituto politécnico nacional, Dept. Desarrollo tecnológico.
- Filtra. Filtra. (2020). *Zeus – Tamizador circular*. Extraído de <http://filtra.com/tamizadora-circular-vibratoria-zeus/>



García, P. (mayo 2010). *Avances en aglomeración y compactación de partículas*. (Tesis doctoral). Universidad de Santiago de Compostela. Santiago.

Herramientas de ingeniería (sin fecha). *Diagrama y calculadora de parámetros psicométricos online*. Extraído de <https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/psicrometricos/psicrometricos.html>

Herramientas de ingeniería. (sin fecha). *Variación de la densidad del aire húmedo con la temperatura*. Extraído de <https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/DensidadAire/DensidadAire.html>

Kuyper, V y Ramírez, S. (2014). *Fuentes de energía, Renovables y no Renovables*. Editorial Alfaomega.

Marcelo, M; Bizzo, W; y Alamo, M. (2016). *Evaluación del potencial energético de los residuos de la caña de azúcar en el Perú*. XXIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente.

Mata, J. (2015). *Optimización de metodologías para la caracterización de biocombustibles sólidos procedentes de la industria del olivar*. (Tesis doctoral). Universidad de Córdoba.

MEM. (2016). *Informe estadístico DGE 2016*. Extraído de <http://www.mem.gob.gt/energia/informe-estadistico-dge-2016/>.

ONU. (2002). *Informe de la cumbre mundial sobre el desarrollo sostenible*. Extraído de <https://undocs.org/es/A/CONF.199/20>

ONU. (2020). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Extraído de <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>

Ordóñez, O. (noviembre 2015). *Evaluación de la influencia de la formulación de combustibles sólidos densificados de aserrín de pino blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl) reciclado de carbón activado y almidón de yuca (*Manihot esculenta*) sobre propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas de los combustibles sólidos densificados en general*. (Tesis pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Ortiz, L. (2008). *Producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en España*. *E.U.I.T forestal*. 5. 107-123.

Rtres. (2019). *Briquetadora MPP*. Extraído de <https://www.rtres.es/producto/briquetadora/>.

Ruiz, L. (2016). *Diseño de un secador de bandejas para la deshidratación de plátano en la parroquia Veracruz del Cantón Pastaza*. (Tesis de pregrado). Escuela superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador.

Sánchez, M. (2017). *Planta de producción de pellets*. (Tesis de pregrado). Universidad de Sevilla. Sevilla.

Serway, R; Jewett, J. (2015). *Física para ciencias e ingeniería*. 9ª edición.

SIFGUA. (2019). *Cobertura forestal*. Extraído de <http://www.sifgua.org.gt/Cobertura.aspx>.

Silos Cordoba. (2020). *Construction of a pilot plant of silos in Rabanales 21*. Extraído de <https://siloscordoba.com/blog/innovation/construction-of-a-pilot-plant-of-silos-in-rabanales-21/>

Tojes, J. (junio 2015). *Caracterización energética del densificado de aserrín como un biocombustible, pellet, utilizando tres diferentes aglutinantes: arcilla, almidón y yeso*. (Tesis pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Veyco. (2020). *Mezcladores de cintas SERIE MRB*. Extraído de <https://molinosmezcladoras.com.mx/mezcladoras-de-cintas.html>

Veyco. (2020). *Molino de cuchillas SERIE MCV*. Extraído de <https://molinosmezcladoras.com.mx/molinos-de-cuchillas.html>

Villalba, J y Arzola, N. (2019). *Estudio experimental sobre el secado de caña de azúcar panelera*. *Scientia et Technica*, Vol 24, no. 01. Pg 25-34.

## XII. ANEXOS

### A. Datos originales

Cuadro 17. Mediciones de pérdida de humedad en proceso de secado en deshidratador de bandejas a 60 °C de cuatro bandejas con muestra.

Tiempo (min)	Tara bandeja + bagazo			
	Bandeja # 1 (±0.1 g)	Bandeja #2 (±0.1 g)	Bandeja #3 (±0.1 g)	Bandeja #4 (±0.1 g)
0	29.4	30.4	31.0	29.6
9	28.3	29.1	30.0	28.4
18	27.0	27.9	28.8	27.3
28	25.6	26.6	27.6	26.1
38	24.2	25.3	26.4	24.9
48	22.7	24.0	25.2	23.6
60	21.2	22.7	24.0	22.5
72	20.1	21.7	23.0	21.6
80	19.5	21.3	22.5	21.1
97	18.8	20.3	21.4	20.3
112	18.7	19.7	21.0	19.8
125	18.6	19.2	20.7	19.5
135	18.5	19.2	20.5	19.4
152	18.5	19.1	20.1	19.1
170	18.4	19.1	19.8	18.9
196	18.3	19.0	19.5	18.7
213	18.2	18.9	19.5	18.5
230	18.2	18.9	19.4	18.4

Cuadro 18. Tara y dimensiones de las 4 bandejas empleadas durante las mediciones de pérdida de humedad.

	Bandeja # 1	Bandeja # 2	Bandeja # 3	Bandeja # 4
Tara ( $\pm 0.1$ g)	2.3	2.4	2.4	2.4
Arista A ( $\pm 0.01$ mm)	104.32	101.51	104.38	110.20
Arista B ( $\pm 0.01$ mm)	102.56	103.60	105.52	103.71

Las bandejas empleadas para las mediciones fueron de material de cedazo con una apertura menor a 2.00 mm, como se muestran en la Figura 45. La biomasa puesta en medición fue tratada para retirar polvos, mesh 80 en adelante, para evitar pérdida de masa por polvos arrastrados por las corrientes de aire dentro del secador.

Cuadro 19. Humedad final del bagazo de caña en la prueba de secado a 60 °C.

Muestra de bagazo	Contenido de humedad ( $\pm 0.12$ %)
Bandeja 1	6.27
Bandeja 2	6.50
Bandeja 3	6.84
Bandeja 4	6.58

Obtenidas con la balanza de humedad a 70 °C con criterio de apagado de 90 mg/s y 3 gramos de muestra.

Cuadro 20. Tara y número de tamiz empleados en el análisis granulométrico de bagazo de caña.

No. de tamiz	Tara de tamiz ( $\pm 0.1$ g)
20	382.7
30	368.9
45	330.4
60	329.7
80	338.1
100	323.7
Fondo	463.5

Cuadro 21. Cantidad de muestra empleada en el bagazo de caña seco molido y no molido.

# Corrida	Bagazo molido ( $\pm 0.1$ g)	Bagazo no molido ( $\pm 0.1$ g)
1	100.0	100.0
2	100.3	101.1
3	100.3	100.7
4	100.8	98.6

Cuadro 22. Masa retenida del análisis granulométrico de bagazo de caña seco no molido.

No. de tamiz	Tara tamiz + bagazo seco no molido			
	Corrida 1 ( $\pm 0.1$ g)	Corrida 2 ( $\pm 0.1$ g)	Corrida 3 ( $\pm 0.1$ g)	Corrida 4 ( $\pm 0.1$ g)
20	428.7	426.5	421.3	415.9
30	388.8	388.9	389.1	389.1
45	350.0	352.9	352.8	353.8
60	334.8	331.8	337.3	338.0
80	340.8	341.8	342.7	343.3
100	324.3	325.2	325.0	325.0
Fondo	467.6	470.0	470.0	469.2

Cuadro 23. Masa retenida del análisis granulométrico de bagazo de caña seco molido.

No. de tamiz	Tara tamiz + bagazo seco no molido			
	Corrida 1 (± 0.1 g)	Corrida 2 (± 0.1 g)	Corrida 3 (± 0.1 g)	Corrida 4 (± 0.1 g)
20	608.1	603.4	609.3	606.1
30	394.7	392.8	394.7	396.0
45	360.8	363.5	360.8	362.8
60	338.4	341.4	337.5	337.5
80	342.5	343.6	342.5	342.5
100	325.7	324.9	325.7	324.5
Fondo	466.9	467.6	466.9	468.2

Cuadro 24. Dimensiones de longitud larga (L), intermedia (I) y corta (C) de las fibras de bagazo retenidas en mesh 20.

No.	L ( $\pm 0.01$ mm)	I ( $\pm 0.01$ mm)	C ( $\pm 0.01$ mm)
1	38.65	6.08	1.54
2	27.2	3.59	1.77
3	26.14	2.81	1.59
4	31.8	1.83	0.55
5	22.6	1.52	0.75
6	24.28	2.87	0.73
7	38.68	1.78	0.48
8	45.06	5.64	2.23
9	19.01	1.44	0.33
10	34.41	0.9	0.41
11	19.74	2.35	0.8
12	39.26	1.32	0.24
13	20.35	2.08	0.6
14	21.22	1.3	0.43
15	31.71	1.29	0.55
16	19.39	1.17	0.25
17	34.32	1.52	1.12
18	24.87	2.15	0.65
19	24.16	1.74	0.62
20	13.56	2.3	2.21
21	21.45	1.51	0.44
22	21.53	1.76	0.54
23	21.26	1.3	0.46
24	13.34	2.1	0.74
25	24.96	1.02	0.31
26	13.33	1.9	0.36
27	11.98	2.47	0.64
28	20.5	0.81	0.37
29	18.69	1.68	0.29

Continuación de Cuadro 24.

No.	L ( $\pm 0.01$ mm)	I ( $\pm 0.01$ mm)	C ( $\pm 0.01$ mm)
30	21.58	1.14	0.55
31	42.76	3.13	0.63
32	37.75	2.43	0.62
33	29.5	3.16	1.35
34	44.8	1.16	0.16
35	30.38	2.32	0.98

Cuadro 25. Dimensiones de longitud larga (L), intermedia (I) y corta (C) de las fibras de bagazo retenidas en mesh 20.

No.	L ( $\pm 0.01$ mm)	I ( $\pm 0.01$ mm)	C ( $\pm 0.01$ mm)
1	24.19	2.21	0.49
2	14.77	1.28	0.4
3	32.44	2.57	0.55
4	28.96	1.03	0.29
5	31.73	1.07	0.59
6	27.65	1.28	0.28
7	15.19	1.29	0.67
8	23.3	1.95	0.3
9	28.57	1.97	0.9
10	30.51	2.41	0.13
11	53.78	3.04	0.46
12	17.7	1.45	0.39
13	31.38	0.84	0.43
14	25.97	1.06	0.43
15	28.8	0.98	0.21
16	14.51	2.98	0.64
17	21.5	2.44	0.33
18	10.98	2.35	0.51
19	15.2	1.38	0.17



Continuación de Cuadro 25.

No.	L ( $\pm 0.01$ mm)	I ( $\pm 0.01$ mm)	C ( $\pm 0.01$ mm)
20	10.58	1.3	0.22
21	10.34	2.1	0.29
22	19.54	1.48	0.48
23	14.71	2.51	0.81
24	28.63	1.45	0.22
25	31.47	1.46	0.41
26	27.12	1.28	0.31
27	10.35	1.15	0.3
28	21.17	1.4	0.43
29	23.53	1.93	0.47
30	14.69	1.17	0.26
31	11.68	1.58	0.45
32	13.62	1.33	0.3
33	16.67	0.77	0.18
34	14.59	1.56	0.24
35	20.95	0.94	0.58

Cuadro 26. Longitud de las fibras de bagazo no molido retenidas en distintos tamices.

No.	Tamiz 30 (0.01 mm)	Tamiz 45 (0.01 mm)	Tamiz 60 (0.01 mm)
1	33.13	16.50	1.34
2	10.86	13.64	1.18
3	17.35	13.22	3.67
4	13.95	6.07	0.74
5	23.65	6.77	1.35
6	18.25	7.96	1.68
7	18.06	10.13	1.93
8	23.06	1.09	2.10
9	32.85	13.90	1.00
10	19.21	8.13	3.11
11	21.99	9.66	2.70

Continuación de Cuadro 26.

No.	Tamiz 30 (0.01 mm)	Tamiz 45 (0.01 mm)	Tamiz 60 (0.01 mm)
12	28.70	6.82	0.65
13	18.28	13.12	0.60
14	17.11	5.23	1.73
15	33.74	17.65	1.57
16	21.54	8.86	0.40
17	28.43	11.75	3.91
18	24.99	7.43	2.07
19	14.50	4.89	4.50
20	22.99	12.15	0.57
21	29.94	5.48	1.69
22	23.25	5.79	0.60
23	26.08	4.78	0.75
24	25.75	1.52	1.54
25	33.58	11.52	1.12
26	20.25	5.28	1.79
27	24.01	8.80	3.84
28	25.79	8.33	2.32
29	18.61	5.51	7.78
30	16.00	3.82	3.91
31	21.05	0.90	2.25
32	20.69	4.03	1.56
33	10.00	14.27	1.54
34	6.53	8.95	0.62
35	9.15	5.22	0.88

Cuadro 27. Longitud de las fibras de bagazo molido retenidas en distintos tamices.

No.	Tamiz 30 (0.01 mm)	Tamiz 45 (0.01 mm)	Tamiz 60 (0.01 mm)
1	27.51	11.61	2.62
2	22.66	6.75	0.56
3	17.34	10.12	5.57
4	17.90	10.06	2.00
5	29.19	17.89	5.22
6	41.63	8.30	1.00
7	12.59	11.95	1.43
8	16.38	15.67	0.63
9	41.60	3.89	2.20
10	20.15	8.37	2.53
11	8.56	9.46	2.88
12	5.70	8.46	2.33
13	7.49	10.68	1.52
14	28.04	8.52	0.87
15	31.11	1.42	8.16
16	19.79	10.85	1.23
17	15.88	7.37	1.16
18	19.21	9.19	2.49
19	16.94	18.05	0.94
20	15.88	6.40	2.55
21	11.02	10.16	2.13
22	39.41	6.18	1.81
23	16.04	11.89	2.41
24	17.75	8.63	2.94
25	33.86	15.27	1.75
26	16.75	8.52	0.60
27	25.13	6.41	1.34
28	23.08	4.56	2.08
29	17.90	11.24	1.66
30	12.08	4.72	3.84

Continuación de Cuadro 27.

No.	Tamiz 30 (0.01 mm)	Tamiz 45 (0.01 mm)	Tamiz 60 (0.01 mm)
31	15.61	8.27	1.27
32	22.78	4.85	1.07
33	20.07	4.31	2.25
34	15.79	7.63	2.51
35	17.68	9.55	1.44

Cuadro 28. Mediciones de contenido de cenizas de almidón de maíz empleado en las briquetas.

Corrida	Porcelana ( $\pm 0.0001$ g)	Masa inicial muestra ( $\pm 0.0001$ g)	Masa final ( $\pm 0.0001$ g)
1	101.3821	1.0058	101.3845
2	82.6867	1.0178	82.6900
3	83.3335	1.0039	83.3353
4	82.5309	1.0096	82.5338

Cuadro 29. Mediciones de contenido de cenizas de bagazo de caña empleado en las briquetas.

Corrida	Porcelana ( $\pm 0.0001$ g)	Masa inicial muestra ( $\pm 0.0001$ g)	Masa final ( $\pm 0.0001$ g)
1	80.1623	1.0053	80.2054
2	82.1561	1.0068	82.1995
3	80.057	1.0091	80.1033
4	82.0417	1.0550	82.0861

Cuadro 30. Mediciones de contenido de cenizas de mezcla almidón/bagazo 10 %  
 empleado en las briquetas.

Corrida	Porcelana (±0.0001 g)	Masa inicial muestra (±0.0001 g)	Masa final (±0.0001 g)
1	82.5427	1.0025	82.5815
2	101.0747	1.0006	101.11340
3	83.2166	0.9962	83.2541
4	82.4237	1.0018	82.4644

Cuadro 31. Mediciones de contenido de cenizas de mezcla almidón/bagazo 15 %  
 empleado en las briquetas.

Corrida	Porcelana (±0.0001 g)	Masa inicial muestra (±0.0001 g)	Masa final (±0.0001 g)
1	103.4606	0.9997	103.495989
2	79.0107	1.0017	79.0470617
3	83.7095	1.0021	83.74768
4	81.4289	1.02	81.465824

Cuadro 32. Mediciones de contenido de cenizas de mezcla almidón/bagazo 20 %  
 empleado en las briquetas.

Corrida	Porcelana (±0.0001 g)	Masa inicial muestra (±0.0001 g)	Masa final (±0.0001 g)
1	101.052	1.0024	101.087685
2	80.0461	1.0017	80.0795568
3	83.7043	1.0035	83.7382183
4	82.4204	1.0004	82.4557141

Cuadro 33. Mediciones de contenido de cenizas madera.

Corrida	Porcelana ( $\pm 0.0001$ g)	Masa inicial muestra ( $\pm 0.0001$ g)	Masa final ( $\pm 0.0001$ g)
1	83.8054	0.3536	83.8085
2	79.1298	0.3238	79.1312
3	103.4843	0.3209	103.4858
4	81.5411	0.3555	81.5428

Cuadro 34. Masa de las briquetas analizadas para densidad a distintas composiciones y presiones de compresión.

Presión	Corrida	10 % ( $\pm 0.0001$ g)	15 % ( $\pm 0.0001$ g)	20 % ( $\pm 0.0001$ g)
10 MPa	1	49.9053	50.2245	49.7248
	2	49.8454	50.1634	49.5288
	3	49.9091	50.2428	48.5470
	4	49.7060	49.9992	49.9500
20 MPa	1	49.3892	49.5601	50.1778
	2	49.8376	50.0299	49.8066
	3	49.8133	50.0822	49.9386
	4	49.6705	49.9307	49.7257
30 MPa	1	49.8791	49.7297	50.0209
	2	49.5405	50.1206	50.1619
	3	49.6761	49.7457	50.0198
	4	49.6493	49.8288	49.9906

Cuadro 35. Dimensiones de la briqueta al 10 % almidón/bagazo a una compresión de 10 MPa en 5 min.

Día	Diámetro ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 1 ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 2 ( $\pm 0.01$ mm)
0	54.34	37.08	33.92
	54.35	36.73	36.4
	54.35	35.37	35.36
	54.35	35.42	33.67
1	54.94	45.29	41.50
	54.97	46.07	44.32
	55.00	46.57	43.65
	54.99	46.31	40.23
5	55.18	50.72	48.47
	55.13	52.05	49.45
	55.34	49.27	48.42
	55.21	52.33	48.65
10	55.51	51.36	50.04
	55.45	52.47	52.00
	55.78	50.14	50.03
	55.46	53.12	50.99

Cuadro 36. Dimensiones de la briqueta al 10 % almidón/bagazo a una compresión de 20 MPa en 5 min.

Día	Diámetro ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 1 ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 2 ( $\pm 0.01$ mm)
0	54.35	30.97	27.79
	54.41	30.68	29.22
	54.27	28.40	28.02
	54.17	26.23	28.18
1	55.07	38.51	33.00
	54.80	36.94	33.63
	54.94	39.27	34.42
	54.69	36.43	33.52
5	55.37	43.36	40.13
	55.30	43.07	40.67
	55.09	43.05	40.43
	55.20	47.83	40.19
10	55.61	43.77	44.36
	55.24	43.25	44.51
	55.45	45.11	44.97
	55.52	45.92	43.90



Cuadro 37. Dimensiones de la briqueta al 10 % almidón/bagazo a una compresión de 30 MPa en 5 min.

Día	Diámetro ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 1 ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 2 ( $\pm 0.01$ mm)
0	54.42	25.24	24.15
	54.11	25.88	22.29
	54.16	26.08	23.69
	54.18	26.72	23.16
1	54.68	31.10	29.85
	54.96	31.99	29.91
	54.80	29.38	33.43
	54.82	36.09	29.37
5	55.22	37.08	35.51
	55.06	37.32	33.82
	55.41	37.59	36.28
	55.34	41.18	35.70
10	55.55	40.15	35.92
	55.44	40.21	33.85
	55.47	41.45	36.85
	55.26	41.42	35.71

Cuadro 38. Dimensiones de la briqueta al 15 % almidón/bagazo a una compresión de 10 MPa en 5 min.

Día	Diámetro ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 1 ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 2 ( $\pm 0.01$ mm)
0	54.49	35.42	34.40
	53.95	37.20	35.49
	54.25	37.58	36.96
	54.43	39.37	37.19
1	55.11	43.64	40.94
	54.92	46.62	55.25
	54.87	46.68	46.24
	54.87	48.31	45.72
5	55.75	49.85	48.84
	55.36	53.42	52.48
	55.62	53.62	51.94
	55.28	55.01	53.14
10	55.85	50.92	52.11
	55.57	55.34	54.08
	55.92	53.35	51.57
	56.20	55.30	54.80

Cuadro 39. Dimensiones de la briqueta al 15 % almidón/bagazo a una compresión de 20 MPa en 5 min.

Día	Diámetro ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 1 ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 2 ( $\pm 0.01$ mm)
0	54.31	29.15	25.57
	54.64	28.03	27.07
	54.20	29.87	27.97
	54.21	28.10	27.41
1	54.85	32.87	30.22
	55.10	36.11	32.71
	54.79	36.53	34.34
	54.73	36.15	33.63
5	55.08	41.59	37.24
	55.03	41.79	38.73
	55.12	42.20	39.59
	54.94	42.45	38.91
10	55.43	42.50	38.11
	55.65	43.00	39.09
	55.29	43.57	39.57
	55.87	42.74	38.96

Cuadro 40. Dimensiones de la briqueta al 15 % almidón/bagazo a una compresión de 30 MPa en 5 min.

Día	Diámetro ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 1 ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 2 ( $\pm 0.01$ mm)
0	54.05	25.96	24.96
	54.14	25.54	24.84
	53.69	26.23	25.30
	53.98	25.13	23.71
1	54.96	34.45	31.53
	55.07	34.10	32.17
	54.86	33.64	31.57
	54.70	32.63	29.84
5	55.11	39.21	37.04
	55.97	38.03	37.44
	55.03	36.87	34.55
	55.14	36.83	35.34
10	55.33	40.86	38.81
	56.02	38.86	38.11
	55.26	38.36	36.19
	56.18	37.39	36.93

Cuadro 41. Dimensiones de la briqueta al 20 % almidón/bagazo a una compresión de 10 MPa en 5 min.

Día	Diámetro ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 1 ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 2 ( $\pm 0.01$ mm)
0	54.70	37.55	37.44
	54.32	37.32	35.32
	54.52	35.38	34.78
	54.24	34.56	36.36
1	55.15	44.71	44.47
	54.64	42.31	45.03
	56.13	44.33	44.55
	55.04	46.19	42.41
5	55.35	47.27	47.27
	55.71	50.27	45.17
	58.64	49.02	45.39
	55.12	49.27	45.80
10	55.79	52.31	50.68
	56.20	55.50	52.03
	58.36	53.03	49.49
	55.38	53.86	50.93

Cuadro 42. Dimensiones de la briqueta al 20 % almidón/bagazo a una compresión de 20 MPa en 5 min.

Día	Diámetro ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 1 ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 2 ( $\pm 0.01$ mm)
0	53.68	27.82	26.29
	54.26	28.72	28.51
	54.32	27.84	26.68
	51.18	27.73	26.52
1	54.62	34.29	30.19
	54.88	34.33	32.59
	54.81	33.71	33.28
	54.71	33.79	31.73
5	54.80	38.37	32.09
	54.96	38.57	36.95
	55.29	36.36	34.82
	54.81	36.66	34.93
10	55.62	44.65	39.57
	55.69	40.54	40.40
	55.98	41.97	40.60
	55.44	44.07	41.66

Cuadro 43. Dimensiones de la briqueta al 20 % almidón/bagazo a una compresión de 30 MPa en 5 min.

Día	Diámetro ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 1 ( $\pm 0.01$ mm)	Altura 2 ( $\pm 0.01$ mm)
0	54.28	26.47	23.84
	53.89	25.15	24.06
	54.17	24.22	24.24
	54.04	25.98	25.14
1	54.81	29.94	28.45
	54.62	33.09	30.17
	54.81	32.48	29.04
	54.87	30.90	29.49
5	54.94	33.97	30.82
	55.01	37.07	34.93
	54.76	34.40	30.15
	55.03	34.70	32.53
10	55.55	40.69	36.74
	55.64	45.64	42.67
	56.01	44.64	43.79
	55.45	42.72	39.48

La masa de las briquetas al inicio fue considerada como constante durante los 10 días de medición de la densidad. La geometría de la briqueta medida fue tomada como un cilindro truncado debido a las imperfecciones del molde empleado y proceso de densificación.

Cuadro 44. Masa de la madera analizada para la determinación de su densidad.

Corrida	Masa ( $\pm 0.0001$ g)
1	7.2367
2	36.4013
3	21.6867
4	38.1452

Cuadro 45. Dimensiones de los trozos de madera analizada para la determinación de su densidad.

Corrida	Base ( $\pm 0.01$ mm)	Altura ( $\pm 0.01$ mm)	Profundidad ( $\pm 0.01$ mm)
1	17.04	36.95	44.19
2	65.47	61.38	31.96
3	35.13	33.56	69.36
4	64.71	63.63	33.26

Cuadro 46. PCS de briquetas a distintas composiciones.

Composición	Corrida	BTU/lb	kJ/kg
Briqueta 10 %	1	6163	14335
	2	6220	14468
	3	6200	14421
Briqueta 15 %	1	6387	14856
	2	6392	14868
	3	6430	14956
Briqueta 20 %	1	6322	14705
	2	6226	14482
	3	6458	15021



Cuadro 47. PCS del almidón de maíz empleado en las briquetas.

Corrida	BTU/lb	kJ/kg
1	6456	15017
2	6384	14849
3	6232	14496

Cuadro 48. Mediciones de PCS de la madera analizada utilizando como ayudante aceite.

Corrida	PCS Aceite (kJ/kg)	PCS madera + aceite (kJ/kg)
1	39342	34475
2	38526	33889
3	38817	34108
4	39189	33505

Cuadro 49. Masa de madera y aceite empleado para la determinación del PCS de la madera.

Corrida	Madera ( $\pm 0.0001$ g)	Aceite ( $\pm 0.0001$ g)
1	0.0839	0.2983
2	0.0841	0.2649
3	0.0812	0.2744
4	0.0848	0.2499

Cuadro 50. Humedades de materias empleadas en las briquetas y madera analizada.

Corrida	Bagazo seco ( $\pm 0.12$ %)	Almidón ( $\pm 0.12$ %)	Madera ( $\pm 0.12$ %)
1	8.00	8.99	9.48
2	7.50	9.58	9.68
3	7.84	9.08	8.12
4	7.58	9.12	8.07

Cuadro 51. Humedad de las briquetas al día 10 de almacenamiento anaquel, medición realizada en Ingenio San Diego.

Corrida	Briqueta 10% (± 0.12 %)	Briqueta 15% (± 0.12 %)	Briqueta 20% (± 0.12 %)
1	15.07%	14.67%	14.22 %
2	15.07%	14.52%	14.62%
3	15.10%	14.67%	14.31%

Cuadro 52 Temperaturas de la plancha de la estufa de biomasa en el ensayo de quema de 614.9 g de madera.

Tiempo (min)	Temperatura de plancha utilizando madera (± 0.01 °C)			
	1	2	3	4
0	25.9	28.7	34.1	28.5
5	40.4	37.7	45.2	36.0
10	80.3	92.0	109.2	86.2
15	163.4	135.4	144.1	171.4
20	223.4	235.4	244.1	240.0
30	183.9	164.9	151.1	135.4
40	120.3	92.6	105.2	101.4
50	98.5	120.0	88.3	81.7
60	92.1	81.6	75.7	78.0

Cuadro 53. Temperaturas de la plancha de la estufa de biomasa en el ensayo de quema de 592.0 g de briqueta al 10%

Tiempo (min)	Temperatura de plancha utilizando briqueta al 10% ( $\pm 0.01$ °C)			
	1	2	3	4
0	37.0	26.2	33.7	27.7
5	93.5	95.6	104.5	89.3
10	230.9	223.7	230.8	224.6
15	225.9	193.7	218.8	224.6
20	225.0	181.7	175.1	154.5
30	143.6	120.5	123.9	137.5
40	108.4	89.0	82.2	114.3
50	93.7	84.7	78.1	87.2
60	63.9	65.4	61.8	58.3

Cuadro 54. Temperaturas de la plancha de la estufa de biomasa en el ensayo de quema de 600.5 g de briqueta al 15%.

Tiempo (min)	Temperatura de plancha utilizando briqueta al 15% ( $\pm 0.01$ °C)			
	1	2	3	4
0	26.7	23.2	28.3	21.4
5	80.2	85.6	116.3	146.2
10	234.8	181.6	304.1	292.7
15	229.0	125.0	219.3	205.5
20	217.3	135.9	147.9	185.8
30	161.3	127.8	131.4	131.7
40	80.0	92.1	100.4	72.9
50	67.0	78.8	84.9	59.3
60	53.9	65.4	69.4	45.7

Cuadro 55. Temperaturas de la plancha de la estufa de biomasa en el ensayo de quema de 606.5 g de briqueta al 20%.

Tiempo (min)	Temperatura de plancha utilizando briqueta al 20% ( $\pm 0.01$ °C)			
	1	2	3	4
0	38.8	24.5	35.2	37.7
5	170.7	174.2	163.7	177.4
10	270.2	269.8	265.0	264.2
15	193.4	162.8	182.6	194.3
20	147.3	160.1	145.7	135.9
30	110.6	118.3	103.9	115.9
40	92.1	80.1	75.2	77.0
50	53.3	81.2	59.0	61.1
60	41.1	54.8	34.8	32.8

## B. Cálculos de muestra

Cálculo 1. Determinación de contenido de humedad en base seca, X, en la prueba de secado.

La bandeja 1 en el momento 0 min:

$$\text{masa} - \text{tara} = \text{bagazo húmedo}$$

$$29.4g - 2.3g = 27.1 g = 0.0271 kg$$

Con la humedad residual y masa final de bagazo de la bandeja, se determina la masa seca.

$$(1 - w_B)m_B = (1 - 0.0627) * 0.0159 kg = 0.01490 kg$$

La masa de humedad.

$$\text{bagazo húmedo} - \text{bagazo seco} = (0.0271 - 0.01490)kg = 0.0122kg$$

El contenido de humedad en base seca.

$$\frac{\text{humedad}}{\text{bagazo seco}} = \frac{0.0122kg}{0.01490kg} = 0.818 \frac{kg \text{ humedad}}{kg \text{ sólido seco}}$$

Se repite el cálculo para las demás mediciones y de las repeticiones realizadas.

Cálculo 2. Determinación de la rapidez de secado, flux masa, en la prueba de secado.

Se determina la pérdida de humedad y el cambio de tiempo en segundos.

$$\text{Pérdida humedad} = (0.0122 - 0.0111)kg = 0.0011 kg$$

$$\Delta \text{ tiempo} = (9 - 0) \text{ min} \left( \frac{60s}{1 \text{ min}} \right) = 540 s$$

De acuerdo con las dimensiones de la bandeja 1, la rapidez de secado N, flux masa, se determina de la siguiente forma.

$$N = \frac{\text{Pérdida humedad}}{2 * \text{área superficial} * \Delta \text{tiempo}}$$

$$N = \frac{0.0011 \text{ kg}}{2 * (0.10430 * 0.10250) \text{ m}^2 * 540 \text{ s}} = 9.53 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}}$$

Se toma dos veces el área superficial debido a que tiene contacto con el aire se secado por la superficie superior e inferior. Para graficar la rapidez de secado N, se determina un contenido de humedad X promedio entre los dos instantes analizados.

$$X_{av} = \frac{(0.818 + 0.745)}{2} = 0.782 \frac{\text{kg humedad}}{\text{kg sólido seco}}$$

Se repite el cálculo para las demás mediciones y de las repeticiones realizadas.

Cálculo 3. Promedio de contenido de humedad y rapidez de secado de las 4 bandejas analizadas.

Para el contenido de humedad X, se toma el valor del mismo instante de cada bandeja analizada.

$$\frac{0.818 + 0.815 + 0.806 + 0.820}{4} = 0.815 \frac{\text{kg humedad}}{\text{kg sólido seco}}$$

Se realiza el mismo cálculo para la rapidez de secado y para los valores de todos los instantes de tiempo.

Cálculo 4. Determinación del contenido retenido del bagazo de caña no molido en el análisis granulométrico.

El contenido retenido es el porcentaje de masa que no logra atravesar cierta apertura. La retención se determina de la siguiente forma.

$$\text{Retenido}_{20} = \frac{\text{masa retenida}}{\text{masa total}} * 100\%$$

La masa retenida se obtiene al retirar la tara del tamiz del peso medido. Para el tamiz no. 20.

$$\frac{(428.7 - 382.7)g}{100.0 g} * 100\% = 46.0\%$$

Se repite el cálculo para las demás corridas y tamices y para el análisis granulométrico del bagazo de caña molido.

Cálculo 5. Determinación del contenido retenido acumulado del bagazo de caña no molido en el análisis granulométrico.

El contenido retenido acumulado es el porcentaje de masa del retenido más la sumatoria del contenido acumulado en los tamices anteriores. Para el primer tamiz no existe contenido retenido anterior. Para el tamiz no. 30.

$$Acumulado_{30} = Acumulado_{20} + Retenido_{30}$$

$$Acumulado_{30} = 46.0 \% + 19.9 \% = 65.9 \%$$

Se repite el cálculo para las demás corridas y tamices y para el análisis granulométrico del bagazo de caña molido.

Cálculo 6. Determinación del contenido colado del bagazo de caña no molido en el análisis granulométrico.

El contenido acumulado es el porcentaje de masa no retenida acumulada. Por lo tanto.

$$Colado_{20} = (100 \% - Acumulado_{20})$$

$$Colado_{20} = (100\% - 46.0\%) = 54.0\%$$

Se repite el cálculo para las demás corridas y tamices y para el análisis granulométrico del bagazo de caña molido.

Cálculo 7. Determinación de los factores de forma para fibras de bagazo retenidas en el tamiz no. 20.

Para los factores de forma, L, I y C corresponden a la longitud larga, intermedia y corta de la fibra medida.

Para el factor de elongación de la primera medición.

$$e = \frac{I}{L}$$
$$e = \frac{6.08 \text{ mm}}{38.65 \text{ mm}} = 0.1573$$

Para el factor de llanura de la primera medición.

$$f = \frac{C}{I}$$
$$f = \frac{1.54 \text{ mm}}{6.08 \text{ mm}} = 0.2533$$

Para el factor de forma de Corey

$$F_{cr} = \frac{S}{\sqrt{LI}} = \frac{1.54 \text{ mm}}{\sqrt{(38.65 \text{ mm})(6.08 \text{ mm})}} = 0.1005$$

Se repite el cálculo para las demás mediciones y para el bagazo de caña molido.

Cálculo 8. Determinación de contenido de cenizas.

Para el bagazo de caña empleado en las briquetas, se determina la masa de cenizas residuales al finalizar la calcinación. Para la corrida 1.

$$\text{masa final} - \text{tara} = \text{cenizas}$$

$$\text{Cenizas} = (101.3845 - 101.3821)g = 0.0024 \text{ g}$$

De acuerdo con la humedad del bagazo, se retira la masa de humedad para obtener el contenido de cenizas en base seca.



$$Cenizas \% = \frac{cenizas}{(1 - w_B) * masa\ inicial} * 100\%$$

$$Cenizas \% = \frac{0.0024\ g}{(1 - 0.0773) * 1.0058\ g} * 100\% = 4.65\%$$

Se repite el cálculo para las demás repeticiones y análisis en los materiales de almidón, madera y briquetas a distintas composiciones.

Cálculo 9. Determinación de la densidad de las briquetas a distintas composiciones y presión de compresión.

De acuerdo con la geometría de la briketa estudiada, presenta una forma de cilindro truncado, en donde h1 representa la altura mayor y h2 la altura menor. La masa de la briketa fue tomada como constante, por lo tanto, no se tomó en consideración la ganancia de masa por humidificación o pérdida de masa por polvos.

Para la briketa al 10 % de composición y 10 MPa de compresión en el día 0.

$$densidad = \frac{masa}{volumen}$$

El volumen se calcula de la siguiente forma.

$$\begin{aligned} volumen &= \pi * \left(\frac{diámetro}{2}\right)^2 * \left(\frac{h_1 + h_2}{2}\right) \\ volumen &= \pi * \left(\frac{54.34\ mm}{2}\right)^2 * \left(\frac{37.08 + 33.92}{2}\right) mm * \left(\frac{1\ cm}{10\ mm}\right)^3 \\ &= 82.3299\ cm^3 \end{aligned}$$

Entonces, la densidad es.

$$densidad = \frac{49.9053}{82.33\ cm^3} = 0.60616\ \frac{g}{cm^3} = 606.16\ \frac{kg}{m^3}$$

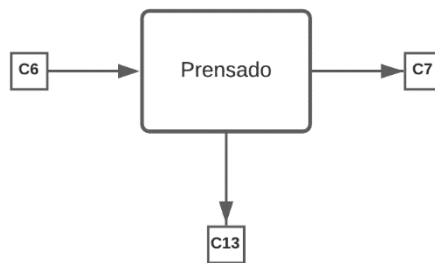
Se repite el cálculo para las demás mediciones de densidad de briquetas a lo largo del tiempo.

### Balances de materia

De acuerdo con las operaciones establecidas para el proceso de producción, tomando un flujo de briquetas producidas de 40 kg/h, se procede a determinar las corrientes  $C_1$  a  $C_{12}$  empezando por el proceso de prensado de los materiales de bagazo en base seca, almidón en base seca y humedad debido a agua contenida en ambos sólidos. En todos los balances se asumió que no hay acumulaciones ni reacciones químicas ni cambios de humedad debido al ambiente.

#### Cálculo 10. Balance de operación de prensado:

Figura 24. Corrientes en operación de prensado, diagrama de bloques.



Se identifican la siguiente entrada  $C_6$  y las salidas  $C_7$  y  $C_{13}$ . El balance de masa general:

$$C_6 = C_7 + C_{13}$$

El valor  $C_7$  es el valor conocido de la cantidad de briquetas a producir, siendo de 8 kg/h. De acuerdo con datos obtenidos en las pruebas de laboratorio en el prensado, se tienen pérdidas aproximadas de 0.80 % de la alimentación. Por lo tanto, se definen la siguiente ecuación:

$$C_6 = (1 - 0.08) * C_7$$

Conociendo el valor de  $C_7$ .

$$C_6 = (1 - 0.08) * 8.00 \frac{kg}{h} = 8.06 \frac{kg}{h}$$

De acuerdo con el balance general del prensado, se resuelve para encontrar el valor de  $C_{13}$  con las corrientes conocidas.

$$C_{13} = C_6 - C_7 = (8.06 - 8.00) \frac{kg}{h} = 0.06 \frac{kg}{h}$$

Considerando que la composición de las briquetas es del 15 % p/p de almidón y 85 % p/p de bagazo de caña (considerando el sólido húmedo), y la humedad del bagazo y almidón de 10.00 % y 9.19 %, respectivamente, se determina las cantidades de sólidos en base seca y la humedad de cada corriente. Por lo tanto, se definen las siguientes ecuaciones.

$$B_x = C_x * (0.85) * (1 - w_B)$$

$$A_x = C_x * (0.15) * (1 - w_A)$$

$$W_x = C_x * [(0.85) * (w_B) + (0.15) * (w_A)]$$

En donde:

- $B_x$  es el flujo másico de bagazo en base seca (kg/h).
- $A_x$  es el flujo másico de almidón en base seca (Kg/h).
- $C_x$  es el flujo másico total de la corriente (kg/h).
- $w_B$  es la humedad en el bagazo.
- $w_A$  es la humedad en el almidón.
- $W_x$  es el flujo másico de humedad (kg/h)

Entonces, para la corriente  $C_7$ .

$$B_7 = 8.00 \frac{kg}{h} * (0.85) * (1 - 0.10) = 6.12 \frac{kg}{h}$$

$$A_7 = 8.00 \frac{kg}{h} * (0.15) * (1 - 0.0919) = 1.09 \frac{kg}{h}$$

$$W_7 = 8 \frac{kg}{h} * [(0.85) * (0.10) + (0.15) * (0.0919)] = 0.79 \frac{kg}{h}$$

El mismo cálculo se emplea para la corriente C<sub>13</sub>.

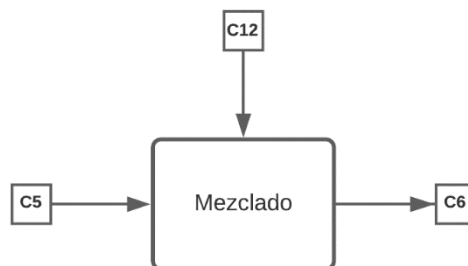
El contenido de humedad de la mezcla puede ser determinado como la razón entre la humedad y el flujo másico total de la corriente. Este valor es el mismo para las corrientes que contengan una mezcla de almidón/bagazo a la misma composición.

$$w_m = \frac{W_7}{C_7}$$

$$w_m = \frac{0.79 \frac{kg}{h}}{8.00 \frac{kg}{h}} = 0.0988$$

### Cálculo 11. Balance de operación de mezclado:

Figura 25. Corrientes en operación de mezclado, diagrama de bloques.



Se identifica la entrada C<sub>5</sub> y C<sub>12</sub>, bagazo tamizado y alimentación de almidón, y la salida C<sub>6</sub>, mezcla de almidón/bagazo al 15%. El balance de masa general:

$$C_5 + C_{12} = C_6$$

El valor C<sub>6</sub> fue determinado en el balance anterior. Dado que la corriente C<sub>5</sub> no contiene almidón, se establece un balance para el almidón en base seca:

$$A_5 + A_{12} = A_6$$

$$A_{12} = A_6$$

$$A_{12} = 1.10 \frac{kg}{h}$$

Conociendo la humedad  $w_A$  del sólido:

$$C_{12} = \frac{A_{12}}{(1 - w_A)} = \frac{1.10 \frac{kg}{h}}{(1 - 0.0919)} = 1.21 \frac{kg}{h}$$

El flujo de humedad se determina al multiplicar la corriente  $C_{12}$  por la humedad  $w_A$ .

$$W_{12} = w_A * C_{12}$$

$$W_{12} = 0.0919 * 1.21 \frac{kg}{h} = 0.11 \frac{kg}{h}$$

Reordenando el balance de masa general y sustituyendo para resolver  $C_5$ :

$$C_5 = C_6 - C_{12}$$

$$C_5 = 8.06 \frac{kg}{h} - 1.21 \frac{kg}{h} = 6.85 \frac{kg}{h}$$

La corriente  $C_5$  se compone por bagazo. De acuerdo con la humedad conocida  $w_B$  de 0.10:

$$B_5 = (1 - w_B) * C_5$$

$$B_5 = (1 - 0.10) * 6.85 \frac{kg}{h} = 6.17 \frac{kg}{h}$$

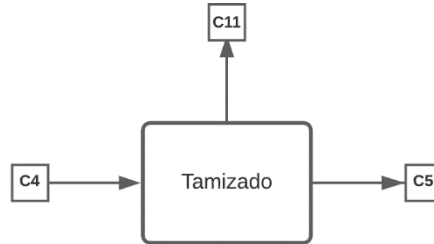
La humedad  $W_5$ :

$$W_5 = w_B * C_5$$

$$W_5 = 0.10 * 6.85 \frac{kg}{h} = 0.69 \frac{kg}{h}$$

### Cálculo 12. Balance de operación de tamizado:

Figura 26. Corrientes en operación de tamizado, diagrama de bloques.



Se identifica la entrada  $C_4$ , bagazo molido, y las salidas  $C_5$  y  $C_{11}$ , bagazo tamizado y bagazo con tamaño de partícula inadecuado. El balance de masa general:

$$C_4 = C_5 + C_{11}$$

La corriente  $C_5$  es conocida. De acuerdo con el análisis granulométrico, existe un 15.64% de material no colado de la alimentación. Para la corriente conocida:

$$C_5 = (1 - 0.1564)C_4$$

$$C_4 = \frac{C_5}{(1 - 0.1564)}$$

$$C_4 = \frac{6.85 \frac{kg}{h}}{(1 - 0.1564)} = 8.51 \frac{kg}{h}$$

El flujo másico de la corriente  $C_{10}$  se determina por el balance general:

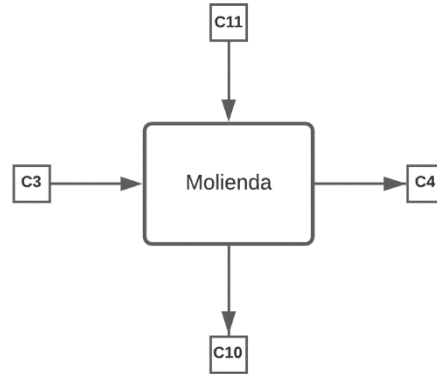
$$C_{11} = C_4 - C_5$$

$$C_{11} = 8.51 \frac{kg}{h} - 6.85 \frac{kg}{h} = 1.66 \frac{kg}{h}$$

La humedad  $w_B$  es la misma para todas las corrientes, 10.0%, por lo que puede encontrarse los valores  $W_x$  y  $B_x$  de ambas corrientes.

### Cálculo 13. Balance de operación de molienda:

Figura 27. Corrientes en operación de molienda, diagrama de bloque.



Se identifica las entradas  $C_3$  y  $C_{11}$ , bagazo sin moler y realimentación de bagazo, y las salidas  $C_4$  y  $C_{10}$ , bagazo molido y pérdidas por polvos al ambiente. La entrada  $C_{11}$  se conoce al igual que la salida  $C_4$ . El balance de masa general:

$$C_3 + C_{11} = C_4 + C_{10}$$

Las pérdidas por emisión de polvo son cercanas al 8.00 % de la entrada total. Por lo tanto, el resto debe salir en la corriente  $C_4$ :

$$C_4 = (1 - 0.0800) * (C_{11} + C_3)$$

$$C_3 = \left( \frac{C_4}{1 - 0.0800} \right) - C_{11}$$

$$C_3 = \left( \frac{8.51 \frac{kg}{h}}{1 - 0.0800} \right) - 1.66 \frac{kg}{h} = 7.59 \frac{kg}{h}$$

La corriente  $C_{10}$  se calcula como el producto de la corriente  $C_3$  por las pérdidas por emisión de polvo, 8.00 %.

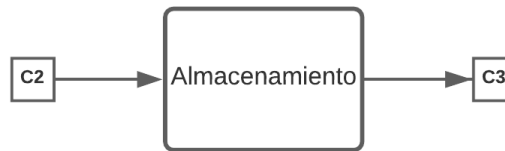
$$C_{10} = 0.0800 * C_3$$

$$C_{10} = 0.0800 * 7.59 \frac{kg}{h} = 0.74 \frac{kg}{h}$$

La humedad  $w_B$  es la misma para todas las corrientes, 10.0%, por lo que puede encontrarse los valores  $W_x$  y  $B_x$  de ambas corrientes.

**Cálculo 14. Balance de operación de almacenamiento:**

Figura 28. Corrientes en operación de almacenamiento de bagazo seco, diagrama de bloques.



Se identifica solamente la entrada  $C_2$  y la salida  $C_3$  de bagazo de caña seco. Dado que la operación de secado es por lotes, las cantidades  $C_2$  y  $C_3$  no son iguales. De acuerdo a los cálculos realizados para el secado, la corriente  $C_2$ .

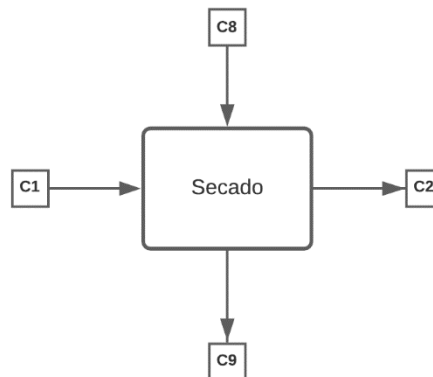
$$C_2 = 15.19 \frac{kg}{lote}$$

$$B_2 = 13.67 \frac{kg}{lote}$$

$$W_2 = 1.52 \frac{kg}{lote}$$

**Cálculo 15. Balance de operación de secado:**

Figura 29. Corrientes en operación de secado por lotes, diagrama de bloques.





Se identifican las entradas  $C_1$  y  $C_8$ , bagazo húmedo sin moler y aire de secado a 60 °C. Las salidas  $C_2$  y  $C_9$ , bagazo seco a una humedad  $w_B$  de 10.0% y salida de aire de secado húmedo. La operación de secado se realiza por lotes que cumpla con la demanda  $C_3$  de bagazo seco por cada 3 horas de operación. Por lo tanto, el secador debe de retirar suficiente bagazo seco para mantener la producción sin interrupciones, por lo que se realizará una corrección al finalizar el balance. Mientras tanto, se asumirá  $C_2$  igual a la cantidad  $C_3$  hasta realizar la corrección.

El balance general es.

$$C_1 + C_8 = C_2 + C_9$$

Dado que el secado se realizará por lotes, no es adecuado calcular la cantidad de aire de secado como una corriente continua. El balance de masa es para el bagazo seco es.

$$B_1 = B_2$$

$$B_1 = 6.83 \frac{kg}{h}$$

La humedad final del secado debe ser del 10%, mientras que la alimentación del bagazo al secador es de 45.78%. La cantidad  $W_1$  se calcula de la siguiente forma.

$$W_1 = \frac{w_{B*}}{(1 - w_{B*})} * (B_1)$$

$$W_1 = \frac{0.4578}{(1 - 0.4578)} * (6.83 \text{ kg}) = 5.77 \frac{kg}{h}$$

El flujo total de bagazo húmedo a alimentar es.

$$C_1 = B_1 + W_1$$

$$C_1 = (6.83 + 5.77) \frac{kg}{h} = 12.60 \frac{kg}{h}$$

Dado que el tiempo necesario para secar la masa en un secador de bandejas a 60 °C a las condiciones establecidas es de 150 min para alcanzar una humedad de 10 %, se traduce la operación semicontinua a operación por lotes, asumiendo que se secan 3 lotes al día para cubrir la demanda diaria de 6 horas de producción por día. Por lo tanto, la capacidad de cada lote se calcula.

$$\text{Capacidad lote} = C_1 * \left( \frac{6 \text{ h producción}}{3 \text{ lotes}} \right)$$

$$\text{Capacidad lote} = \left( 12.60 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \left( \frac{6 \text{ h producción}}{3 \text{ lotes}} \right) = 25.21 \frac{\text{kg}}{\text{lote}}$$

La humedad por lote en la entrada 1 es.

$$W_1 = \text{capacidad por lote} * 0.4578$$

$$W_1 = 26.69 \frac{\text{kg}}{\text{lote}} * 0.4578 = 11.54 \frac{\text{kg humedad}}{\text{lote}}$$

El bagazo seco en la entrada 1 es

$$B_1 = \text{capacidad por lote} * (1 - 0.4578)$$

$$B_1 = 25.21 \frac{\text{kg}}{\text{lote}} * (1 - 0.4578) = 13.67 \text{ kg} \frac{\text{bagazo seco}}{\text{lote}}$$

El bagazo seco en la salida 2 es el mismo que de la entrada 1. La humedad en la salida 2 es.

$$W_2 = B_1 * \left( \frac{0.1}{1 - 0.1} \right)$$

$$W_2 = 13.67 \text{ kg} \frac{\text{bagazo seco}}{\text{lote}} * \left( \frac{0.1}{1 - 0.1} \right) = 1.61 \frac{\text{kg humedad}}{\text{lote}}$$

La humedad retirada es.

$$W_8 = W_1 - W_2 + W_7$$

$$W_8 = 12.21 \frac{\text{kg humedad}}{\text{lote}} - 1.61 \frac{\text{kg humedad}}{\text{lote}} + W_7$$

De acuerdo con cálculo realizado para la recirculación de aire (cálculo x), se requiere un flujo másico de 0.0443 kg aire seco/s a una humedad  $Y_o$  de 0.00772 kg agua/kg aire seco de alimentación durante todo un lote de secado. Debido a que el tiempo necesario para secar un lote es de 150 min, el flujo de aire seco es.

$$G_s * \left( \frac{60 s}{1 min} \right) * \left( \frac{150 min}{1 lote} \right)$$

$$0.0443 \frac{kg}{s} * \left( \frac{60 s}{1 min} \right) * \left( \frac{150 min}{1 lote} \right) = 399.00 \frac{kg \text{ aire seco}}{lote}$$

El flujo total de aire de entrada es

$$C_8 = G_s * (1 + Y_o)$$

$$C_8 = 399.00 \frac{kg \text{ aire seco}}{lote} * (1 + 0.00772) = 402.08 \frac{kg \text{ aire}}{lote}$$

El flujo de humedad es.

$$W_8 = C_8 - G_s$$

$$W_8 = 402.08 \frac{kg}{lote} - 399.00 \frac{kg}{lote} = 3.26 \frac{kg \text{ humedad}}{lote}$$

El flujo total para la salida  $C_9$  es.

$$C_9 = C_8 + W_8$$

$$C_9 = 402.08 \frac{kg \text{ aire}}{lote} + 3.26 \frac{kg \text{ humedad}}{lote}$$

Ya que se conoce  $W_9$ .

$$W_9 = W_1 - W_2 + W_8$$

$$W_9 = (11.51 - 1.52 + 3.08) \frac{kg \text{ humedad}}{lote} = 13.10 \frac{kg \text{ humedad}}{lote}$$

Cálculo 16. Dimensionamiento de la cámara de secado.

Se tomaron las siguientes consideraciones para el dimensionamiento de la cámara del secador y el camión de bandejas. Se excluye los materiales específicos para la construcción. Las consideraciones iniciales se detallan a continuación:

Cuadro 56. Consideraciones de diseño para la cámara de secado y el camión de bandejas.

Descripción	Valor	Unidad
Carga de sólido por unidad de área	2.54	kg/m <sup>2</sup>
Tiempo de secado	150	min
	2.5	h
Horas producción al día	6	h/día
Lotes de secado al día	3	Lote/día
Capacidad por lote	25.21	kg/lote
Cantidad de bandejas	6	---
Altura de petril en bandeja	0.03	m
Grosor de bandeja	0.002	m
Espacio entre bandejas	0.20	m

Las ecuaciones para el diseño mencionado fueron tomadas de diversos autores que se citan en la bibliografía del documento (Ruiz, 2016).

Empezando por el área total necesaria para sostener

$$Atb = \frac{L}{\frac{L_s}{A}}$$

$$Atb = \frac{(25.21 \text{ kg})}{\left(2.54 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right)} = 9.91 \text{ m}^2$$

Donde:

- Atb es el área total de las bandejas (m<sup>2</sup>)
- L es la capacidad por lote (kg)

- $L_s/A$  es la carga del sólido por unidad de área ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

El área de superficie para una bandeja:

$$Ab = \frac{Atb}{nb}$$
$$Ab = \frac{9.91\text{m}^2}{6} = 1.65$$

Donde:

- $Ab$  es el área superficial por bandeja para sostener el sólido ( $\text{m}^2$ )
- $Atb$  es el área total de las bandejas ( $\text{m}^2$ )
- $nb$  es el número de bandejas propuesto.

Para una bandeja rectangular con área de  $1.65 \text{ m}^2$ , se tomará una relación 0.9 ancho/largo, por lo tanto

- Ancho: 1.22 m
- Longitud: 1.35

La longitud de la cámara de secado se toma como la longitud de la bandeja + un 10% de la misma.

$$lc = 1.1 * lb$$

$$lc = 1.1 * 1.35 \text{ m} = 1.49 \text{ m}$$

El ancho de la cámara de secado se toma como el ancho de la bandeja + un 10% de la misma.

$$ac = 1.1 * ab$$

$$lc = 1.1 * 1.22 m = 1.34 m$$

La altura de la cámara de secado toma en cuenta las bandejas totales y su espacio de separación entre ellas.

$$hc = nb * hb + (nb + 1) * esp$$

$$hc = 6 * 0.03 m + (6 + 1) * 0.20m = 1.58 m$$

Donde:

- hc es la altura de la cámara de secado (m)
- nb es el número de bandejas
- hb es la altura de la bandeja (m)
- esp es el espacio entre bandejas (m)

El volumen de la cámara de secado es.

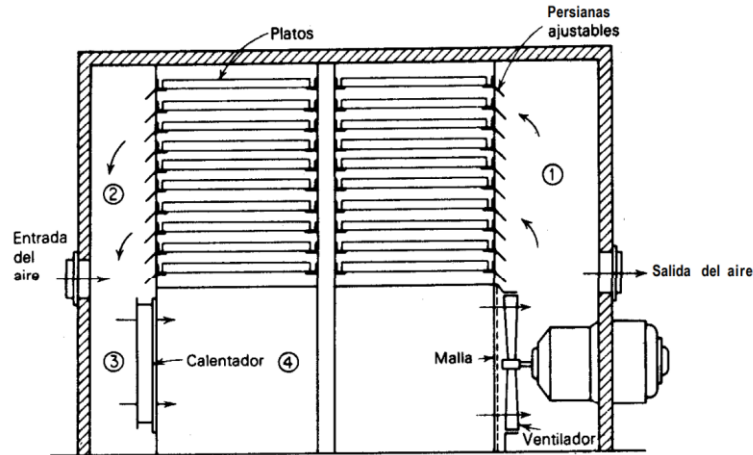
$$Vc = hc * lc * ac$$

$$Vc = 1.58 m * 1.49 m * 1.34 m = 3.15 m^3$$

Cálculo 17. Determinación del porcentaje de recirculación de aire en el secador de bandejas propuesto.

Para el secador con camión de 6 bandejas a las dimensiones establecidas, se tiene las condiciones de aire medidas durante la prueba de secado. Las condiciones a las que se llevó el secado fueron medidas durante la prueba de la curva de secado. La Figura 30 esquematiza el secador propuesto y los puntos estudiados durante el secado.

Figura 30. Esquema de secador de bandejas.



(Treybal, 2007).

En la posición 1 del diagrama, se cuenta con aire a 60 °C con una HR de 37.8% a una presión atmosférica de 0.991 bar. Por lo tanto, se determina una humedad absoluta  $Y_1$  utilizando una calculadora de humedad absoluta (Herramientas de ingeniería, sin fecha)

$$Y_1 = 0.05211 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire seco}}$$

El volumen húmedo se determina con la siguiente ecuación (Treybal, 2007)

$$V_{h1} = (0.00283 + 0.00456 * Y') * t_G + (2502300 * Y')$$

$$V_{h1} = (0.00283 + 0.00456 * 0.05211) * 60 + (2502300 * 0.05211) = 1.022 \frac{m^3}{kg}$$

Donde

- $V_h$  es el volumen húmedo del gas ( $m^3/kg$ )
- $Y'$  es la humedad en base seca del aire ( $kg \text{ agua}/kg \text{ aire seco}$ )
- $t_G$  es la temperatura de bulbo seco del aire ( $^{\circ}C$ )

Debido a la presión diferente a la que se realizó la prueba, una corrección por presión

$$V_{h*} = V_{h1} * \left( \frac{1.01325 \text{ bar}}{P_{\text{medición}}} \right)$$

$$V_{h*} = V_{h1} * \left( \frac{1.01325 \text{ bar}}{0.991 \text{ bar}} \right) = 1.045 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Donde:

- $V_h$  es el volumen húmedo del gas a 1 atm de presión ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )
- $V_{h*}$  es el volumen húmedo del gas corregido a la presión de trabajo ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )
- $P_{\text{medición}}$  es la presión de trabajo (bar)

Dado que el largo de las bandejas deberá de estar en posición paralela a la corriente de aire, el área libre para el flujo de aire esta dado por la longitud de la bandeja y la altura que separa cada una de ellas. Como son 6 bandejas dentro del secador, el área libre total es 7 veces el área libre por bandeja.

$$\text{área libre entre bandejas} = lb * hb * (nb + 1)$$

$$\text{área libre entre bandejas} = 1.35 \text{ m} * 0.20 \text{ m} * (nb + 1) = 1.90 \text{ m}^2$$

La velocidad promedio de aire dentro del secador de bandejas durante la prueba de secado es de 2.7 m/s. El flujo volumétrico entre bandejas es.

$$Q_G = 2.7 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 1.9 \text{ m}^2 = 5.12 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Expresando como flujo másico de gas seco en la posición 1.

$$G_{s1} = \frac{Q_G}{V_{h*}} = \frac{5.12 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1.045 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 4.90 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{s}}$$

El flux de secado de agua  $N_c$  es constante y el máximo alcanzado durante el secado, se tomará dicho valor para determinar el reciclaje de aire. De acuerdo con la



Figura 33, el valor  $N_c$  es  $0.0000993 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . El área de superficie de contacto con el aire (2 veces el de la bandeja) es de  $3.30 \text{ m}^2$ . La rapidez de secado de las 6 bandejas es.

$$S_{agua} = 3.30\text{m}^2 * 0.0000993 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} * 6 = 0.00197 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Esta rapidez de secado es la que se encuentra en el punto 2, momento en el que el flujo de aire sale del contacto con las bandejas y la biomasa. La humedad en este punto es.

$$Y_2 = Y_1 + \left( \frac{S_{agua}}{G_{s1}} \right)$$

$$Y_2 = 0.05211 + \left( \frac{0.00197}{4.90} \right) = 0.0525 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}}$$

Las condiciones del aire en la entrada de la cámara de calentamiento y el aire descargado (punto 3 y 4) debe de ser iguales a la de la condición  $Y_1$  (punto 1), en la alimentación de aire hacia las bandejas.

En la entrada de la cámara de calentamiento hay una mezcla de aire de reposición exterior para reemplazar el aire descargado, en el cual se supone una mezcla completa. El aire de reposición tiene una temperatura de  $23.8 \text{ }^\circ\text{C}$  y una HR de  $41.2\%$ . Por lo tanto, tiene una humedad absoluta de.

$$Y_o = 0.00772 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}}$$

El flujo de masa de aire seco en el punto 4 y el aire descargado deben de ser iguales al punto 1, con un balance de masa.

$$G_s(Y_1 - Y_o) = S_{agua}$$

$$G_s = \frac{S_{agua}}{(Y_1 - Y_o)} = \frac{0.00197 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{(0.05211 - 0.00772)} = 0.0443 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{s}}$$

Este valor corresponde a la cantidad de aire seco que entra y sale del secador

El flujo de aire en el punto 3 y 4 es.

$$G_{s-4,3} = G_s + G_{s-1}$$

$$G_{s-4,3} = 0.0443 \frac{kg}{s} + 4.90 \frac{kg}{s} = 4.945 \frac{kg \text{ aire seco}}{s}$$

En el calentador, el volumen húmedo es igual al alimentado a las bandejas.

$$V_{h4} = V_{h1} = 1.045 \frac{m^3}{kg}$$

El flujo volumétrico a través del ventilador es.

$$\text{Flujo ventilador} = \frac{G_{s-4,3}}{V_{h4}} = \frac{4.945 \frac{kg \text{ aire seco}}{s}}{1.045 \frac{m^3}{kg \text{ aire seco}}} = 4.732 \frac{m^3}{s}$$

Finalmente, el porcentaje de aire recirculado para mantener las condiciones de secado a la rapidez de secado propuesta es.

$$\text{Recilcado} = \left( \frac{G_{s-1}}{G_{s-4,3}} \right) * 100\%$$

$$\text{Recirculado} = \left( \frac{4.900 \frac{kg \text{ aire seco}}{s}}{4.945 \frac{kg \text{ aire seco}}{s}} \right) * 100\% = 99.10\%$$

Cálculo 18. Balance de energía del secador de bandejas.

Con la carta psicométrica del sistema aire-agua ajustada a la presión de trabajo (Herramientas de ingeniería, sin fecha), se encuentra la temperatura de saturación del aire en el punto 1 y 2.

$$Y_1 = 0.05211 ; t_1 = 42.90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Y_2 = 0.0529 ; t_2 = 41.88 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Debido a la similitud de temperaturas, se asume la temperatura de bulbo húmedo de ambos puntos como 42.90 °C. Por lo tanto, la entalpía del aire en ambos puntos es de.

$$H_{G1} = H_{G2} = 194.0 \frac{kJ}{kg}$$

La entalpía del aire fresco a 23.8 °C y HR 41.2%.

$$H_{Go} = 43.6 \frac{kJ}{kg}$$

Suponiendo un mezclado completo, la entalpía del aire en el punto 3, mediante balance de entalpía

$$H_{G3} * G_{s-3} = (H_{G1} * G_{s-1}) + (H_{Go} * G_s)$$

$$H_{G3} = \frac{(H_{G1} * G_{s-1}) + (H_{Go} * G_s)}{G_{s-3}}$$

$$H_{G3} = \frac{\left(194 \frac{kJ}{kg} * 4.900 \frac{kg}{s}\right) + \left(43.6 \frac{kJ}{kg} * 0.0443 \frac{kg}{s}\right)}{4.945 \frac{kg}{s}} = 192.65 \frac{kJ}{kg}$$

El calentador debe de aplicar calentamiento al aire hasta elevar su temperatura a 60 °C. De acuerdo con la entalpía en el punto 3 y 1, se debe de aplicar la siguiente cantidad de energía.

$$Calor\ a\ aplicar = G_{s-3}(H_1 - H_3)$$

$$Calor\ a\ aplicar = 4.945 \frac{kg}{s} \left(194.0 \frac{kJ}{kg} - 192.65 \frac{kJ}{kg}\right) = 6.67 \frac{kJ}{s} (kW)$$

Para 2.5 horas de operación.

$$6.67\ kW * 2.5\ h = 16.67\ kWh$$

Debido a que se despreciaron las pérdidas de calor en el cálculo, el calentador debe de consumir una mayor cantidad de energía para lograr el calentamiento de aire a 60 °C.

El cálculo presentado no considera la energía utilizada para llevar la temperatura ambiente a la de trabajo a 60 °C en el arranque del equipo.

### C. Análisis de error

Cálculo 19. Determinación de la desviación estándar, o incertidumbre, de datos calculados como una suma o resta.

De acuerdo con Skoog y colaboradores (2015), la desviación estándar generada por la suma o resta de datos experimentales es.

$$s_y = \sqrt{(s_a)^2 + (s_b)^2 + (s_c)^2 + \dots + (s_n)^2}$$

Donde:

- $s_y$  es la desviación estándar o incertidumbre.
- $s_{a,b,c,n}$  es la desviación estándar o incertidumbre de las distintas mediciones.

Para la determinación de bagazo en la bandeja 1 al restar la tara en la prueba de secado.

$$s_y = \sqrt{(0.1g)^2 + (0.1g)^2} = \pm 0.141g$$

Dado que la masa de bagazo fue determinada en kg.

$$\pm 0.141 g * \left( \frac{1 kg}{1000 g} \right) = \pm 1.4 \times 10^{-4} kg$$

Se repite el cálculo para todos los cálculos de suma o resta en los que se utilicen datos experimentales.

Calculo 20. Determinación de la desviación estándar, o incertidumbre, de datos calculados como un producto o división.

De acuerdo con Skoog y colaboradores (2015), la desviación estándar generada por la multiplicación o división de datos experimentales es.

$$s_y = y * \sqrt{\left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{s_c}{c}\right)^2 + \dots + \left(\frac{s_n}{n}\right)^2}$$

Donde:

- $s_y$  es la desviación estándar o incertidumbre.
- $s_{a,b,c,n}$  es la desviación estándar o incertidumbre de las distintas mediciones.
- $a, b, c, \dots, n$  es el valor de las distintas mediciones.
- $y$  es el valor obtenido del cálculo realizado de la multiplicación y/o división

Para la determinación de la corrida 1 de densidad de madera.

$$s_y = 520.19 \frac{kg}{m^3} * \sqrt{\left(\frac{0.0001 g}{7.2367 g}\right)^2 + \left(\frac{0.01 mm}{36.95 mm}\right)^2 + \left(\frac{0.01 mm}{36.95 mm}\right)^2 + \left(\frac{0.01 mm}{44.19 mm}\right)^2}$$

$$s_y = \pm 0.036 \frac{kg}{m^3}$$

Se repite el cálculo para todos los cálculos de multiplicación o división en los que se utilicen datos experimentales.

Cálculo 21. Intervalo de confianza al 95% para medias poblacionales.

De acuerdo con Skoog y colaboradores (2015), el intervalo de confianza al 95% para medias de pruebas repetidas es.

$$IC\ 95\% \mu = \bar{x} \pm \frac{t * s}{\sqrt{N}}$$

Donde:

- $\bar{x}$  es la media muestral del conjunto de datos.
- $t$  es un estadístico que depende de los grados de libertad y el nivel de confianza

- $s$  es la desviación estándar muestral.
- $N$  es el número de muestras.

Para una confianza al 95% y grados de libertad de 3 ( $N-1$ ), el valor de  $t$  es 3.18 (Figura 13).

Tomando como ejemplo el contenido de cenizas de la madera, la media es.

$$\bar{x} = \frac{(0.96\% + 0.47\% + 0.51\% + 0.52\%)}{4} = 0.62\%$$

La desviación estándar.

$$s = \sqrt{\frac{(0.96\% - 0.62\%)^2 + (0.47\% - 0.62\%)^2 + (0.51\% - 0.62\%)^2 + (0.52\% - 0.62\%)^2}{4}} = 0.23\%$$

Por lo tanto.

$$IC\ 95\% \mu = 0.62\% \pm \frac{3.18 * 0.23\%}{\sqrt{4}} = 0.62 \pm 0.37\%$$

Todos los intervalos de confianza fueron calculados utilizando el software Microsoft Excel, con la herramienta de análisis de datos. Se repite el cálculo para los datos que requieran de un intervalo de confianza al 95%.

Cálculo 22. Prueba de hipótesis para medias poblacionales.

En la prueba de hipótesis de medias poblacionales, se tomaron comparaciones de las medias de los parámetros de densidad, humedad, cenizas y PCS entre la madera analizada y las mezclas de las briquetas de bagazo. Por lo tanto, se establecen la siguiente hipótesis nula ( $H_0$ ) e hipótesis alternativa ( $H_A$ ).

$$H_0: \mu_{madera} = \mu_{briqueta}$$

$$H_A: \mu_{madera} \neq \mu_{briqueta}$$

Para todos los análisis se empleó una confianza del 95%, por lo que el valor de  $\alpha$  es 0.05. El análisis de la prueba de hipótesis fue realizado utilizando el software Minitab, asumiendo que no hubo igualdad de varianzas. De acuerdo con el análisis para la prueba de densidad de madera y de la briqueta al 10% con 30 MPa de presión en el día 10.

Figura 31. Resultados de prueba de hipótesis de medias poblacionales de la densidad de la madera y la briqueta al 10% presionada a 30 MPa en el día 10 de almacenamiento en anaquel.

### Método

$\mu_1$ : media de población de Madera  
 $\mu_2$ : media de población de Briqueta 10%  
 Diferencia:  $\mu_1 - \mu_2$

*No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.*

### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
Madera	4	543.6	21.9	11
Briqueta 10%	4	539.3	12.0	6.0

### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
4.3	(-30.4; 39.1)

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$   
 Hipótesis alterna  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
0.35	4	0.746

Para la prueba de hipótesis, se rechaza la hipótesis nula si el valor P es menor a  $\alpha$ , se rechaza la hipótesis nula a favor de la hipótesis alternativa. Por lo tanto, para la prueba el valor P es mayor a  $\alpha$  y se concluye que “no existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula” y se puede tomar la media de ambas como iguales. Se realizó

el mismo análisis para las demás medias poblacionales de la madera contra las briquetas de las distintas propiedades indicadas.



D. Datos calculados

Cuadro 57. Condiciones de masa de bagazo y humedad durante el secado a 60 °C de la bandeja 1.

Tiempo (min)	Bagazo (kg)	±	Humedad (kg)	±	Humedad (%)	±	X (kg agua/kg Ss)	±
0	0.0271	1.4E-04	1.22E-02	3.4E-04	45.0%	1.29%	0.818	2.9E-02
9	0.026	1.4E-04	1.11E-02	3.4E-04	42.7%	1.35%	0.745	2.8E-02
18	0.0247	1.4E-04	9.80E-03	3.4E-04	39.7%	1.41%	0.657	2.7E-02
28	0.0233	1.4E-04	8.40E-03	3.4E-04	36.0%	1.50%	0.563	2.6E-02
38	0.0219	1.4E-04	7.00E-03	3.4E-04	31.9%	1.59%	0.469	2.5E-02
48	0.0204	1.4E-04	5.50E-03	3.4E-04	26.9%	1.70%	0.369	2.4E-02
60	0.0189	1.4E-04	4.00E-03	3.4E-04	21.1%	1.83%	0.268	2.4E-02
72	0.0178	1.4E-04	2.90E-03	3.4E-04	16.3%	1.94%	0.194	2.4E-02
80	0.0172	1.4E-04	2.30E-03	3.4E-04	13.4%	2.01%	0.154	2.3E-02
97	0.0165	1.4E-04	1.60E-03	3.4E-04	9.7%	2.09%	0.107	2.3E-02
112	0.0164	1.4E-04	1.50E-03	3.4E-04	9.1%	2.10%	0.100	2.3E-02
125	0.0163	1.4E-04	1.40E-03	3.4E-04	8.6%	2.12%	0.094	2.3E-02
135	0.0162	1.4E-04	1.30E-03	3.4E-04	8.0%	2.13%	0.087	2.3E-02
152	0.0162	1.4E-04	1.30E-03	3.4E-04	8.0%	2.13%	0.087	2.3E-02
170	0.0161	1.4E-04	1.20E-03	3.4E-04	7.4%	2.14%	0.080	2.3E-02
196	0.016	1.4E-04	1.10E-03	3.4E-04	6.9%	2.16%	0.074	2.3E-02
213	0.0159	1.4E-04	9.97E-04	3.4E-04	6.3%	2.17%	0.067	2.3E-02
230	0.0159	1.4E-04	9.97E-04	3.4E-04	6.27%	2.17%	0.067	2.3E-02

Cuadro 58. Condiciones de masa de bagazo y humedad durante el secado a 60 °C de la bandeja 2.

Tiempo (min)	Bagazo (kg)	±	Humedad (kg)	±	Humedad (%)	±	X (kg agua/kg Ss)	±
0	0.028	1.4E-04	0.013	3.4E-04	44.9%	1.25%	0.815	2.8E-02
9	0.0267	1.4E-04	0.011	3.4E-04	42.2%	1.31%	0.731	2.7E-02
18	0.0255	1.4E-04	0.010	3.4E-04	39.5%	1.37%	0.653	2.6E-02
28	0.0242	1.4E-04	0.009	3.4E-04	36.3%	1.44%	0.569	2.5E-02
38	0.0229	1.4E-04	0.007	3.4E-04	32.6%	1.52%	0.484	2.4E-02
48	0.0216	1.4E-04	0.006	3.4E-04	28.6%	1.61%	0.400	2.4E-02
60	0.0203	1.4E-04	0.005	3.4E-04	24.0%	1.70%	0.316	2.3E-02
72	0.0193	1.4E-04	0.004	3.4E-04	20.1%	1.79%	0.251	2.3E-02
80	0.0189	1.4E-04	0.003	3.4E-04	18.4%	1.83%	0.225	2.3E-02
97	0.0179	1.4E-04	0.002	3.4E-04	13.8%	1.93%	0.160	2.3E-02
112	0.0173	1.4E-04	0.002	3.4E-04	10.8%	1.99%	0.121	2.2E-02
125	0.0168	1.4E-04	0.001	3.4E-04	8.2%	2.05%	0.089	2.2E-02
135	0.0168	1.4E-04	0.001	3.4E-04	8.2%	2.05%	0.089	2.2E-02
152	0.0167	1.4E-04	0.001	3.4E-04	7.6%	2.06%	0.082	2.2E-02
170	0.0167	1.4E-04	0.001	3.4E-04	7.6%	2.06%	0.082	2.2E-02
196	0.0166	1.4E-04	0.001	3.4E-04	7.1%	2.08%	0.076	2.2E-02
213	0.0165	1.4E-04	0.001	3.4E-04	6.5%	2.09%	0.070	2.2E-02
230	0.0165	1.4E-04	0.001	3.4E-04	6.5%	2.09%	0.070	2.2E-02

Cuadro 59. Condiciones de masa de bagazo y humedad durante el secado a 60 °C de la bandeja 3.

Tiempo (min)	Bagazo (kg)	±	Humedad (kg)	±	Humedad (%)	±	X (kg agua/kg Ss)	±
0	0.0286	1.4E-04	0.0128	3.4E-04	44.6%	1.20%	0.806	2.6E-02
9	0.0276	1.4E-04	0.0118	3.4E-04	42.6%	1.25%	0.743	2.6E-02
18	0.0264	1.4E-04	0.0106	3.4E-04	40.0%	1.30%	0.667	2.5E-02
28	0.0252	1.4E-04	0.0094	3.4E-04	37.2%	1.36%	0.591	2.4E-02
38	0.0240	1.4E-04	0.0082	3.4E-04	34.0%	1.42%	0.515	2.4E-02
48	0.0228	1.4E-04	0.0070	3.4E-04	30.5%	1.50%	0.440	2.3E-02
60	0.0216	1.4E-04	0.0058	3.4E-04	26.7%	1.58%	0.364	2.3E-02
72	0.0206	1.4E-04	0.0048	3.4E-04	23.1%	1.65%	0.301	2.2E-02
80	0.0201	1.4E-04	0.0043	3.4E-04	21.2%	1.69%	0.269	2.2E-02
97	0.0190	1.4E-04	0.0032	3.4E-04	16.6%	1.79%	0.200	2.2E-02
112	0.0186	1.4E-04	0.0028	3.4E-04	14.9%	1.82%	0.174	2.2E-02
125	0.0183	1.4E-04	0.0025	3.4E-04	13.5%	1.85%	0.156	2.2E-02
135	0.0181	1.4E-04	0.0023	3.4E-04	12.5%	1.87%	0.143	2.2E-02
152	0.0177	1.4E-04	0.0019	3.4E-04	10.5%	1.91%	0.118	2.1E-02
170	0.0174	1.4E-04	0.0016	3.4E-04	9.0%	1.95%	0.099	2.1E-02
196	0.0171	1.4E-04	0.0013	3.4E-04	7.4%	1.98%	0.080	2.1E-02
213	0.0171	1.4E-04	0.0013	3.4E-04	7.4%	1.98%	0.080	2.1E-02
230	0.0170	1.4E-04	0.0012	3.4E-04	6.8%	1.99%	0.073	2.1E-02

Cuadro 60. Condiciones de masa de bagazo y humedad durante el secado a 60 °C de la bandeja 4.

Tiempo (min)	Bagazo (kg)	±	Humedad (kg)	±	Humedad (%)	±	X (kg agua/kg Ss)	±
0	0.0272	1.4E-04	0.0123	3.3E-04	45.0%	1.25%	0.820	2.8E-02
9	0.0260	1.4E-04	0.0111	3.3E-04	42.5%	1.31%	0.739	2.7E-02
18	0.0249	1.4E-04	0.0100	3.3E-04	40.0%	1.36%	0.666	2.6E-02
28	0.0237	1.4E-04	0.0088	3.3E-04	36.9%	1.43%	0.586	2.5E-02
38	0.0225	1.4E-04	0.0076	3.3E-04	33.6%	1.50%	0.505	2.5E-02
48	0.0212	1.4E-04	0.0063	3.3E-04	29.5%	1.59%	0.418	2.4E-02
60	0.0201	1.4E-04	0.0052	3.3E-04	25.6%	1.67%	0.345	2.3E-02
72	0.0192	1.4E-04	0.0043	3.3E-04	22.2%	1.75%	0.285	2.3E-02
80	0.0187	1.4E-04	0.0038	3.3E-04	20.1%	1.79%	0.251	2.3E-02
97	0.0179	1.4E-04	0.0030	3.3E-04	16.5%	1.87%	0.198	2.3E-02
112	0.0174	1.4E-04	0.0025	3.3E-04	14.1%	1.92%	0.164	2.3E-02
125	0.0171	1.4E-04	0.0022	3.3E-04	12.6%	1.96%	0.144	2.3E-02
135	0.0170	1.4E-04	0.0021	3.3E-04	12.1%	1.97%	0.137	2.3E-02
152	0.0167	1.4E-04	0.0018	3.3E-04	10.5%	2.00%	0.117	2.2E-02
170	0.0165	1.4E-04	0.0016	3.3E-04	9.4%	2.03%	0.104	2.2E-02
196	0.0163	1.4E-04	0.0014	3.3E-04	8.3%	2.05%	0.091	2.2E-02
213	0.0161	1.4E-04	0.0012	3.3E-04	7.2%	2.08%	0.077	2.2E-02
230	0.0160	1.4E-04	0.0011	3.3E-04	6.58%	2.09%	0.070	2.2E-02

Cuadro 61. Rapideces de secado en flux de masa (kg/m<sup>2</sup>\*s) del bagazo de caña durante el secado a 60 °C de la bandeja 1.

$\Delta$ tiempo (s)	$\pm$	Perdida humedad (kg)	$\pm$	Flux masa (kg/m <sup>2</sup> *s)	$\pm$	X prom (kg agua/kg Ss)	$\pm$
540	0.1	1.10E-03	4.9E-04	9.53E-05	4.2E-05	0.782	2.0E-02
540	0.1	1.30E-03	4.9E-04	1.13E-04	4.2E-05	0.701	2.0E-02
600	0.1	1.40E-03	4.9E-04	1.09E-04	3.8E-05	0.610	1.9E-02
600	0.1	1.40E-03	4.9E-04	1.09E-04	3.8E-05	0.516	1.8E-02
600	0.1	1.50E-03	4.9E-04	1.17E-04	3.8E-05	0.419	1.8E-02
720	0.1	1.50E-03	4.9E-04	9.74E-05	3.2E-05	0.319	1.8E-02
720	0.1	1.10E-03	4.9E-04	7.15E-05	3.2E-05	0.231	1.7E-02
480	0.1	6.00E-04	4.9E-04	5.85E-05	4.8E-05	0.174	1.7E-02
1020	0.1	7.00E-04	4.9E-04	3.21E-05	2.2E-05	0.131	1.7E-02
900	0.1	1.00E-04	4.9E-04	5.20E-06	2.5E-05	0.104	1.6E-02
780	0.1	1.00E-04	4.9E-04	6.00E-06	2.9E-05	0.097	1.6E-02
600	0.1	1.00E-04	4.9E-04	7.79E-06	3.8E-05	0.090	1.6E-02
1020	0.1	0.00E+00	4.9E-04	0.00E+00	0.0	0.087	1.6E-02
1080	0.1	1.00E-04	4.9E-04	4.33E-06	2.1E-05	0.084	1.6E-02
1560	0.1	1.00E-04	4.9E-04	3.00E-06	1.5E-05	0.077	1.6E-02
1020	0.1	1.00E-04	4.9E-04	4.59E-06	2.2E-05	0.070	1.6E-02
1020	0.1	0.00E+00	4.9E-04	0.00E+00	0.0	0.067	1.6E-02

Cuadro 62. Rapideces de secado en flux de masa (kg/m<sup>2</sup>\*s) del bagazo de caña durante el secado a 60 °C de la bandeja 2.

$\Delta$ tiempo (s)	$\pm$	Perdida humedad (kg)	$\pm$	Flux masa (kg/m <sup>2</sup> *s)	$\pm$	X prom (kg agua/kg Ss)	$\pm$
540	0.1	1.30E-03	4.9E-04	1.14E-04	4.3E-05	0.773	1.9E-02
540	0.1	1.20E-03	4.9E-04	1.06E-04	4.3E-05	0.692	1.9E-02
600	0.1	1.30E-03	4.9E-04	1.03E-04	3.9E-05	0.611	1.8E-02
600	0.1	1.30E-03	4.9E-04	1.03E-04	3.9E-05	0.526	1.8E-02
600	0.1	1.30E-03	4.9E-04	1.03E-04	3.9E-05	0.442	1.7E-02
720	0.1	1.30E-03	4.9E-04	8.59E-05	3.2E-05	0.358	1.7E-02
720	0.1	1.00E-03	4.9E-04	6.60E-05	3.2E-05	0.283	1.7E-02
480	0.1	4.00E-04	4.9E-04	3.96E-05	4.8E-05	0.238	1.6E-02
1020	0.1	1.00E-03	4.9E-04	4.66E-05	2.3E-05	0.193	1.7E-02
900	0.1	6.00E-04	4.9E-04	3.17E-05	2.6E-05	0.141	1.6E-02
780	0.1	5.00E-04	4.9E-04	3.05E-05	3.0E-05	0.105	1.6E-02
600	0.1	0.00E+00	4.9E-04	0.00E+00	0	0.089	1.6E-02
1020	0.1	1.00E-04	4.9E-04	4.66E-06	2.3E-05	0.086	1.6E-02
1080	0.1	0.00E+00	4.9E-04	0.00E+00	0	0.082	1.6E-02
1560	0.1	1.00E-04	4.9E-04	3.05E-06	1.5E-05	0.079	1.6E-02
1020	0.1	1.00E-04	4.9E-04	4.66E-06	2.3E-05	0.073	1.6E-02
1020	0.1	0.00E+00	4.9E-04	0.00E+00	0	0.070	1.6E-02

Cuadro 63. Rapideces de secado en flux de masa (kg/m<sup>2</sup>\*s) del bagazo de caña durante el secado a 60 °C de la bandeja 3.

$\Delta$ tiempo (s)	$\pm$	Perdida humedad (kg)	$\pm$	Flux masa (kg/m <sup>2</sup> *s)	$\pm$	X prom (kg agua/kg Ss)	$\pm$
540	0.1	1.00E-03	4.8E-04	8.41E-05	4.0E-05	0.774	1.9E-02
540	0.1	1.20E-03	4.8E-04	1.01E-04	4.0E-05	0.705	1.8E-02
600	0.1	1.20E-03	4.8E-04	9.09E-05	3.6E-05	0.629	1.7E-02
600	0.1	1.20E-03	4.8E-04	9.09E-05	3.6E-05	0.553	1.7E-02
600	0.1	1.20E-03	4.8E-04	9.09E-05	3.6E-05	0.478	1.7E-02
720	0.1	1.20E-03	4.8E-04	7.57E-05	3.0E-05	0.402	1.6E-02
720	0.1	1.00E-03	4.8E-04	6.31E-05	3.0E-05	0.332	1.6E-02
480	0.1	5.00E-04	4.8E-04	4.73E-05	4.5E-05	0.285	1.6E-02
1020	0.1	1.10E-03	4.8E-04	4.90E-05	2.1E-05	0.234	1.6E-02
900	0.1	4.00E-04	4.8E-04	2.02E-05	2.4E-05	0.187	1.5E-02
780	0.1	3.00E-04	4.8E-04	1.75E-05	2.8E-05	0.165	1.5E-02
600	0.1	2.00E-04	4.8E-04	1.51E-05	3.6E-05	0.149	1.5E-02
1020	0.1	4.00E-04	4.8E-04	1.78E-05	2.1E-05	0.130	1.5E-02
1080	0.1	3.00E-04	4.8E-04	1.26E-05	2.0E-05	0.108	1.5E-02
1560	0.1	3.00E-04	4.8E-04	8.74E-06	1.4E-05	0.089	1.5E-02
1020	0.1	0.00E+00	4.8E-04	0.00E+00	0	0.080	1.5E-02
1020	0.1	1.00E-04	4.8E-04	4.45E-06	2.1E-05	0.077	1.5E-02

Cuadro 64. Rapideces de secado en flux de masa (kg/m<sup>2</sup>\*s) del bagazo de caña durante el secado a 60 °C de la bandeja 4.

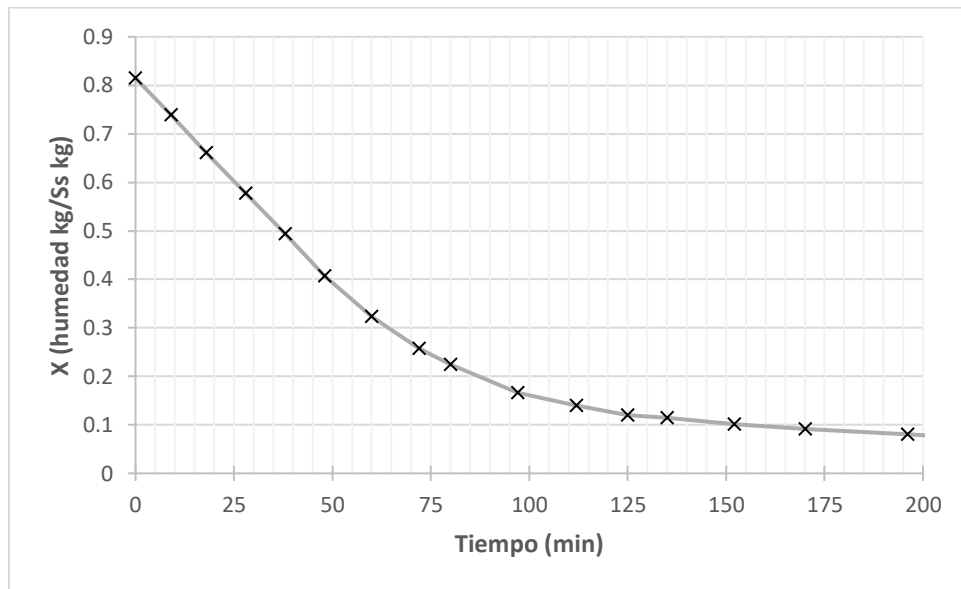
$\Delta$ tiempo (s)	$\pm$	Perdida humedad (kg)	$\pm$	Flux masa N (kg/m <sup>2</sup> *s)	$\pm$	X prom (kg agua/kg Ss)	$\pm$
540	0.1	1.20E-03	4.7E-04	9.72E-05	3.8E-05	0.780	1.9E-02
540	0.1	1.10E-03	4.7E-04	8.91E-05	3.8E-05	0.703	1.9E-02
600	0.1	1.20E-03	4.7E-04	8.75E-05	3.4E-05	0.626	1.8E-02
600	0.1	1.20E-03	4.7E-04	8.75E-05	3.4E-05	0.545	1.8E-02
600	0.1	1.30E-03	4.7E-04	9.48E-05	3.4E-05	0.462	1.7E-02
720	0.1	1.10E-03	4.7E-04	6.68E-05	2.9E-05	0.382	1.7E-02
720	0.1	9.00E-04	4.7E-04	5.47E-05	2.9E-05	0.315	1.7E-02
480	0.1	5.00E-04	4.7E-04	4.56E-05	4.3E-05	0.268	1.6E-02
1020	0.1	8.00E-04	4.7E-04	3.43E-05	2.0E-05	0.224	1.6E-02
900	0.1	5.00E-04	4.7E-04	2.43E-05	2.3E-05	0.181	1.6E-02
780	0.1	3.00E-04	4.7E-04	1.68E-05	2.7E-05	0.154	1.6E-02
600	0.1	1.00E-04	4.7E-04	7.29E-06	3.4E-05	0.141	1.6E-02
1020	0.1	3.00E-04	4.7E-04	1.29E-05	2.0E-05	0.127	1.6E-02
1080	0.1	2.00E-04	4.7E-04	8.10E-06	1.9E-05	0.111	1.6E-02
1560	0.1	2.00E-04	4.7E-04	5.61E-06	1.3E-05	0.097	1.6E-02
1020	0.1	2.00E-04	4.7E-04	8.58E-06	2.0E-05	0.084	1.6E-02
1020	0.1	1.00E-04	4.7E-04	4.29E-06	2.0E-05	0.074	1.6E-02



Cuadro 65. Valores promedio de las bandejas analizadas para la curva de secado expresada como X (kg agua/kg SS) contra tiempo en minutos.

Tiempo (min)	X (agua kg/Ss kg)	±
0	0.815	1.4E-02
9	0.739	1.3E-02
18	0.661	1.3E-02
28	0.577	1.3E-02
38	0.494	1.2E-02
48	0.407	1.2E-02
60	0.323	1.2E-02
72	0.258	1.1E-02
80	0.225	1.1E-02
97	0.166	1.1E-02
112	0.140	1.1E-02
125	0.121	1.1E-02
135	0.114	1.1E-02
152	0.101	1.1E-02
170	0.091	1.1E-02
196	0.080	1.1E-02
213	0.073	1.1E-02
230	0.070	1.1E-02

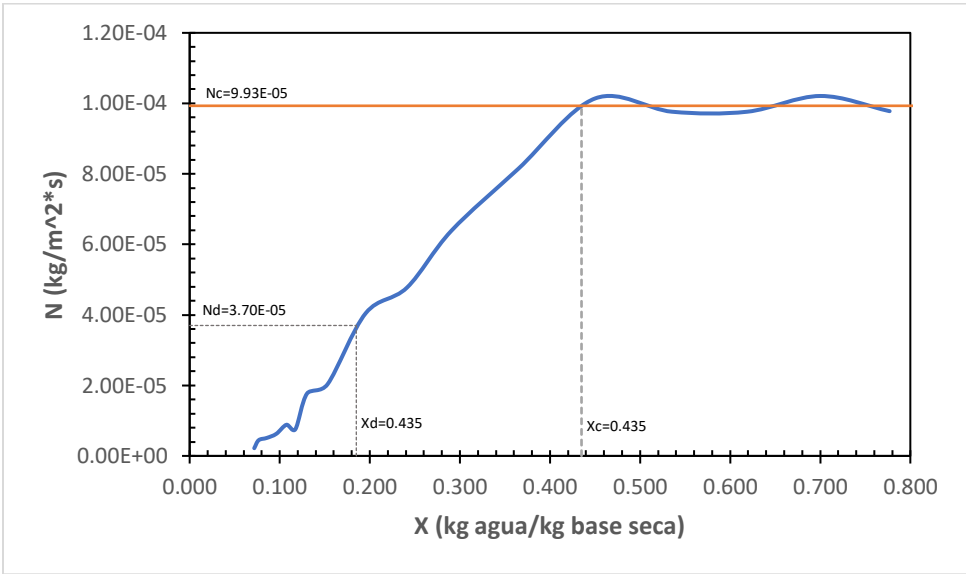
Figura 32. Curva de secado expresada en contenido de humedad en el tiempo de bagazo de caña en un secador de bandejas a 60 °C.



Cuadro 66. Valores promedio de la rapidez de secado en flux de masa ( $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ) y el contenido de humedad en base seca X ( $\text{kg}$  agua/ $\text{kg}$  Ss) para la curva de rapidez de secado a  $60^\circ\text{C}$  del bagazo de caña.

Flux masa N ( $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ )	$\pm$	X (agua $\text{kg}/\text{Ss}$ $\text{kg}$ )	$\pm$
9.78E-05	2.0E-05	0.777	9.7E-03
1.02E-04	2.0E-05	0.700	9.4E-03
9.76E-05	1.8E-05	0.619	9.1E-03
9.76E-05	1.8E-05	0.535	8.8E-03
1.01E-04	1.8E-05	0.450	8.6E-03
8.15E-05	1.5E-05	0.365	8.5E-03
6.38E-05	1.5E-05	0.290	8.3E-03
4.77E-05	2.3E-05	0.241	8.1E-03
4.05E-05	1.1E-05	0.196	8.3E-03
2.03E-05	1.2E-05	0.153	8.1E-03
1.77E-05	1.4E-05	0.130	8.0E-03
7.56E-06	1.6E-05	0.117	7.9E-03
8.84E-06	9.3E-06	0.108	8.0E-03
6.26E-06	8.7E-06	0.096	8.0E-03
5.10E-06	7.1E-06	0.086	8.0E-03
4.46E-06	9.4E-06	0.077	7.9E-03
2.19E-06	7.4E-06	0.072	7.9E-03

Figura 33. Curva de secado expresado en flux masa de bagazo de caña en secador de bandejas a una temperatura de 60 °C.



Cuadro 67. Sólido retenido en el análisis granulométrico del bagazo de caña no molido.

Apertura (mm)	Retenido bagazo no molido									
	Corrida 1	±	Corrida 2	±	Corrida 3	±	Corrida 4	±	Promedio	±
0.850	46.0%	0.15%	43.4%	0.15%	38.3%	0.15%	33.7%	0.15%	40.3%	0.07%
0.600	19.9%	0.14%	19.8%	0.14%	20.1%	0.14%	20.7%	0.14%	20.1%	0.07%
0.355	19.6%	0.14%	22.3%	0.14%	22.2%	0.14%	23.7%	0.15%	22.0%	0.07%
0.250	5.1%	0.14%	2.1%	0.14%	7.5%	0.14%	8.4%	0.14%	5.8%	0.07%
0.180	2.7%	0.14%	3.7%	0.14%	4.6%	0.14%	5.3%	0.14%	4.1%	0.07%
0.150	0.6%	0.14%	1.5%	0.14%	1.3%	0.14%	1.3%	0.14%	1.2%	0.07%
0.000	4.1%	0.14%	6.4%	0.14%	5.9%	0.14%	5.8%	0.14%	5.5%	0.07%
<b>Total</b>	<b>98.0%</b>	<b>0.38%</b>	<b>99.1%</b>	<b>0.37%</b>	<b>99.9%</b>	<b>0.37%</b>	<b>98.9%</b>	<b>0.38%</b>	<b>99.0%</b>	<b>0.19%</b>

Cuadro 68. Sólido retenido en el análisis granulométrico del bagazo de caña molido.

Apertura (mm)	Retenido bagazo molido									
	Corrida 1	±	Corrida 2	±	Corrida 3	±	Corrida 4	±	Promedio	±
0.850	20.9%	0.14%	16.2%	0.14%	22.0%	0.14%	18.8%	0.14%	19.5%	0.07%
0.600	30.7%	0.14%	28.7%	0.14%	30.6%	0.14%	31.7%	0.14%	30.4%	0.07%
0.355	30.3%	0.14%	32.9%	0.14%	30.2%	0.14%	32.0%	0.14%	31.4%	0.07%
0.250	8.6%	0.14%	11.6%	0.14%	7.7%	0.14%	7.6%	0.14%	8.9%	0.07%
0.180	4.2%	0.14%	5.3%	0.14%	4.2%	0.14%	4.2%	0.14%	4.5%	0.07%
0.150	1.9%	0.14%	1.1%	0.14%	1.9%	0.14%	0.7%	0.14%	1.4%	0.07%
0.000	3.3%	0.14%	4.0%	0.14%	3.3%	0.14%	4.6%	0.14%	3.8%	0.07%
<b>Total</b>	<b>99.9%</b>	<b>0.38%</b>	<b>99.7%</b>	<b>0.38%</b>	<b>99.9%</b>	<b>0.38%</b>	<b>99.6%</b>	<b>0.37%</b>	<b>99.8%</b>	<b>0.19%</b>

Cuadro 69. Sólido retenido acumulado en el análisis granulométrico del bagazo de caña no molido.

Apertura (mm)	Retenido acumulado de bagazo no molido									
	Corrida 1	±	Corrida 2	±	Corrida 3	±	Corrida 4	±	Promedio	±
0.850	46.0%	0.15%	43.4%	0.15%	38.3%	0.15%	33.7%	0.15%	40.3%	0.07%
0.600	65.9%	0.21%	63.2%	0.20%	58.4%	0.14%	54.4%	0.14%	60.5%	0.09%
0.355	85.5%	0.25%	85.4%	0.25%	80.6%	0.14%	78.1%	0.15%	82.4%	0.10%
0.250	90.6%	0.29%	87.5%	0.28%	88.2%	0.14%	86.5%	0.14%	88.2%	0.11%
0.180	93.3%	0.32%	91.2%	0.32%	92.8%	0.14%	91.8%	0.14%	92.3%	0.12%
0.150	93.9%	0.35%	92.7%	0.35%	94.0%	0.14%	93.1%	0.14%	93.4%	0.13%
0.000	98.0%	0.38%	99.1%	0.37%	99.9%	0.14%	98.9%	0.14%	99.0%	0.14%

Cuadro 70. Sólido retenido acumulado en el análisis granulométrico del bagazo de caña molido.

Apertura (mm)	Retenido acumulado de bagazo molido									
	Corrida 1	±	Corrida 2	±	Corrida 3	±	Corrida 4	±	Promedio	±
0.850	20.9%	0.14%	16.2%	0.14%	22.0%	0.14%	18.8%	0.14%	19.5%	0.07%
0.600	51.6%	0.20%	44.9%	0.20%	52.6%	0.14%	50.5%	0.14%	49.9%	0.09%
0.355	81.9%	0.25%	77.8%	0.25%	82.9%	0.14%	82.5%	0.14%	81.3%	0.10%
0.250	90.5%	0.29%	89.3%	0.29%	90.5%	0.14%	90.2%	0.14%	90.1%	0.11%
0.180	94.7%	0.32%	94.6%	0.32%	94.7%	0.14%	94.3%	0.14%	94.6%	0.12%
0.150	96.6%	0.35%	95.7%	0.35%	96.6%	0.14%	95.0%	0.14%	96.0%	0.13%
0.000	99.9%	0.38%	99.7%	0.38%	99.9%	0.14%	99.6%	0.14%	99.8%	0.14%

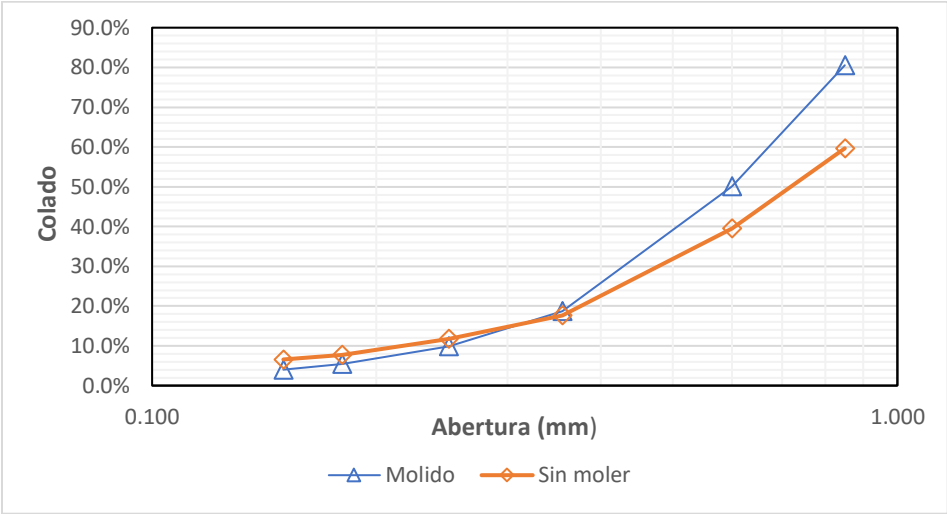
Cuadro 71. Sólido retenido en el análisis granulométrico del bagazo de caña no molido.

Apertura (mm)	Retenido acumulado de bagazo no molido									
	Corrida 1	±	Corrida 2	±	Corrida 3	±	Corrida 4	±	Promedio	±
0.850	54.0%	0.15%	56.6%	0.15%	61.7%	0.15%	66.3%	0.15%	59.7%	0.07%
0.600	34.1%	0.21%	36.8%	0.20%	41.6%	0.14%	45.6%	0.14%	39.5%	0.09%
0.355	14.5%	0.25%	14.6%	0.25%	19.4%	0.14%	21.9%	0.15%	17.6%	0.10%
0.250	9.4%	0.29%	12.5%	0.28%	11.8%	0.14%	13.5%	0.14%	11.8%	0.11%
0.180	6.7%	0.32%	8.8%	0.32%	7.2%	0.14%	8.2%	0.14%	7.7%	0.12%
0.150	6.1%	0.35%	7.3%	0.35%	6.0%	0.14%	6.9%	0.14%	6.6%	0.13%
0.000	2.0%	0.38%	0.9%	0.37%	0.1%	0.14%	1.1%	0.14%	1.0%	0.14%

Cuadro 72. Sólido retenido en el análisis granulométrico del bagazo de caña molido.

Apertura (mm)	Retenido acumulado de bagazo molido									
	Corrida 1	±	Corrida 2	±	Corrida 3	±	Corrida 4	±	Promedio	±
0.850	79.1%	0.14%	83.8%	0.14%	78.0%	0.14%	81.3%	0.14%	46.1%	0.07%
0.600	48.4%	0.20%	55.1%	0.20%	47.4%	0.14%	49.5%	0.14%	28.7%	0.09%
0.355	18.1%	0.25%	22.2%	0.25%	17.1%	0.14%	17.5%	0.14%	10.8%	0.10%
0.250	9.5%	0.29%	10.7%	0.29%	9.5%	0.14%	9.8%	0.14%	5.7%	0.11%
0.180	5.3%	0.32%	5.4%	0.32%	5.3%	0.14%	5.7%	0.14%	3.2%	0.12%
0.150	3.4%	0.35%	4.3%	0.35%	3.4%	0.14%	5.0%	0.14%	2.4%	0.13%
0.000	0.1%	0.38%	0.3%	0.38%	0.1%	0.14%	0.4%	0.14%	0.3%	0.14%

Figura 34. Curva granulométrica de bagazo de caña para prueba con reducción de partícula y sin reducción de partícula utilizando tamices de tamaños de 20, 30, 45, 60, 80 y 100 mesh..



Cuadro 73. Factores de forma (Elongación, Llanura y Corey) de las fibras de bagazo de caña sin moler retenidas en Tamiz con mesh 20.

No.	Bagazo de caña sin moler, mesh > 20					
	Elongación	±	Llanura	±	Corey	±
1	0.1573	2.6E-04	0.2533	1.7E-03	0.1005	6.7E-04
2	0.1320	3.7E-04	0.4930	3.1E-03	0.1791	1.1E-03
3	0.1075	3.8E-04	0.5658	4.1E-03	0.1855	1.3E-03
4	0.0575	3.1E-04	0.3005	5.7E-03	0.0721	1.4E-03
5	0.0673	4.4E-04	0.4934	7.3E-03	0.1280	1.9E-03
6	0.1182	4.1E-04	0.2544	3.6E-03	0.0874	1.2E-03
7	0.0460	2.6E-04	0.2697	5.8E-03	0.0578	1.2E-03
8	0.1252	2.2E-04	0.3954	1.9E-03	0.1399	6.8E-04
9	0.0757	5.3E-04	0.2292	7.1E-03	0.0631	2.0E-03
10	0.0262	2.9E-04	0.4556	1.2E-02	0.0737	2.0E-03
11	0.1190	5.1E-04	0.3404	4.5E-03	0.1175	1.6E-03
12	0.0336	2.5E-04	0.1818	7.7E-03	0.0333	1.4E-03
13	0.1022	4.9E-04	0.2885	5.0E-03	0.0922	1.6E-03
14	0.0613	4.7E-04	0.3308	8.1E-03	0.0819	2.0E-03
15	0.0407	3.2E-04	0.4264	8.4E-03	0.0860	1.7E-03
16	0.0603	5.2E-04	0.2137	8.7E-03	0.0525	2.1E-03
17	0.0443	2.9E-04	0.7368	8.2E-03	0.1551	1.7E-03
18	0.0864	4.0E-04	0.3023	4.9E-03	0.0889	1.4E-03
19	0.0720	4.1E-04	0.3563	6.1E-03	0.0956	1.6E-03
20	0.1696	7.5E-04	0.9609	6.0E-03	0.3957	2.5E-03
21	0.0704	4.7E-04	0.2914	6.9E-03	0.0773	1.8E-03
22	0.0817	4.7E-04	0.3068	5.9E-03	0.0877	1.7E-03
23	0.0611	4.7E-04	0.3538	8.2E-03	0.0875	2.0E-03
24	0.1574	7.6E-04	0.3524	5.0E-03	0.1398	2.0E-03
25	0.0409	4.0E-04	0.3039	1.0E-02	0.0614	2.1E-03
26	0.1425	7.6E-04	0.1895	5.4E-03	0.0715	2.0E-03
27	0.2062	8.5E-04	0.2591	4.2E-03	0.1177	1.9E-03
28	0.0395	4.9E-04	0.4568	1.4E-02	0.0908	2.7E-03
29	0.0899	5.4E-04	0.1726	6.0E-03	0.0518	1.8E-03
30	0.0528	4.6E-04	0.4825	9.7E-03	0.1109	2.2E-03
31	0.0732	2.3E-04	0.2013	3.3E-03	0.0545	8.8E-04
32	0.0644	2.7E-04	0.2551	4.2E-03	0.0647	1.1E-03
33	0.1071	3.4E-04	0.4272	3.4E-03	0.1398	1.1E-03
34	0.0259	2.2E-04	0.1379	8.7E-03	0.0222	1.4E-03
35	0.0764	3.3E-04	0.4224	4.7E-03	0.1167	1.3E-03



Cuadro 74. Factores de forma (Elongación, Llanura y Corey) de las fibras de bagazo de caña molido retenidas en Tamiz con mesh 20.

No.	Bagazo de caña sin moler, mesh > 20					
	Elongación	±	Llanura	±	Corey	±
1	0.0914	4.2E-04	0.2217	4.6E-03	0.0670	1.4E-03
2	0.0867	6.8E-04	0.3125	8.2E-03	0.0920	2.4E-03
3	0.0792	3.1E-04	0.2140	4.0E-03	0.0602	1.1E-03
4	0.0356	3.5E-04	0.2816	1.0E-02	0.0531	1.9E-03
5	0.0337	3.2E-04	0.5514	1.1E-02	0.1013	2.0E-03
6	0.0463	3.6E-04	0.2188	8.0E-03	0.0471	1.7E-03
7	0.0849	6.6E-04	0.5194	8.7E-03	0.1514	2.5E-03
8	0.0837	4.3E-04	0.1538	5.2E-03	0.0445	1.5E-03
9	0.0690	3.5E-04	0.4569	5.6E-03	0.1200	1.5E-03
10	0.0790	3.3E-04	0.0539	4.2E-03	0.0152	1.2E-03
11	0.0565	1.9E-04	0.1513	3.3E-03	0.0360	7.9E-04
12	0.0819	5.7E-04	0.2690	7.1E-03	0.0770	2.0E-03
13	0.0268	3.2E-04	0.5119	1.3E-02	0.0838	2.2E-03
14	0.0408	3.9E-04	0.4057	1.0E-02	0.0820	2.1E-03
15	0.0340	3.5E-04	0.2143	1.0E-02	0.0395	1.9E-03
16	0.2054	7.0E-04	0.2148	3.4E-03	0.0973	1.6E-03
17	0.1135	4.7E-04	0.1352	4.1E-03	0.0456	1.4E-03
18	0.2140	9.3E-04	0.2170	4.4E-03	0.1004	2.0E-03
19	0.0908	6.6E-04	0.1232	7.3E-03	0.0371	2.2E-03
20	0.1229	9.5E-04	0.1692	7.8E-03	0.0593	2.7E-03
21	0.2031	9.9E-04	0.1381	4.8E-03	0.0622	2.2E-03
22	0.0757	5.1E-04	0.3243	7.1E-03	0.0893	2.0E-03
23	0.1706	6.9E-04	0.3227	4.2E-03	0.1333	1.7E-03
24	0.0506	3.5E-04	0.1517	7.0E-03	0.0341	1.6E-03
25	0.0464	3.2E-04	0.2808	7.1E-03	0.0605	1.5E-03
26	0.0472	3.7E-04	0.2422	8.0E-03	0.0526	1.7E-03
27	0.1111	9.7E-04	0.2609	9.0E-03	0.0870	3.0E-03
28	0.0661	4.7E-04	0.3071	7.5E-03	0.0790	1.9E-03
29	0.0820	4.3E-04	0.2435	5.3E-03	0.0697	1.5E-03
30	0.0796	6.8E-04	0.2222	8.8E-03	0.0627	2.5E-03
31	0.1353	8.6E-04	0.2848	6.6E-03	0.1048	2.4E-03
32	0.0977	7.4E-04	0.2256	7.7E-03	0.0705	2.4E-03
33	0.0462	6.0E-04	0.2338	1.3E-02	0.0502	2.9E-03
34	0.1069	6.9E-04	0.1538	6.5E-03	0.0503	2.1E-03
35	0.0449	4.8E-04	0.6170	1.3E-02	0.1307	2.6E-03

Figura 35. Factores de forma de Elongación, Llanura y Corey para las fibras de bagazo de caña sin moler (SM) retenidas en tamiz no. 20.

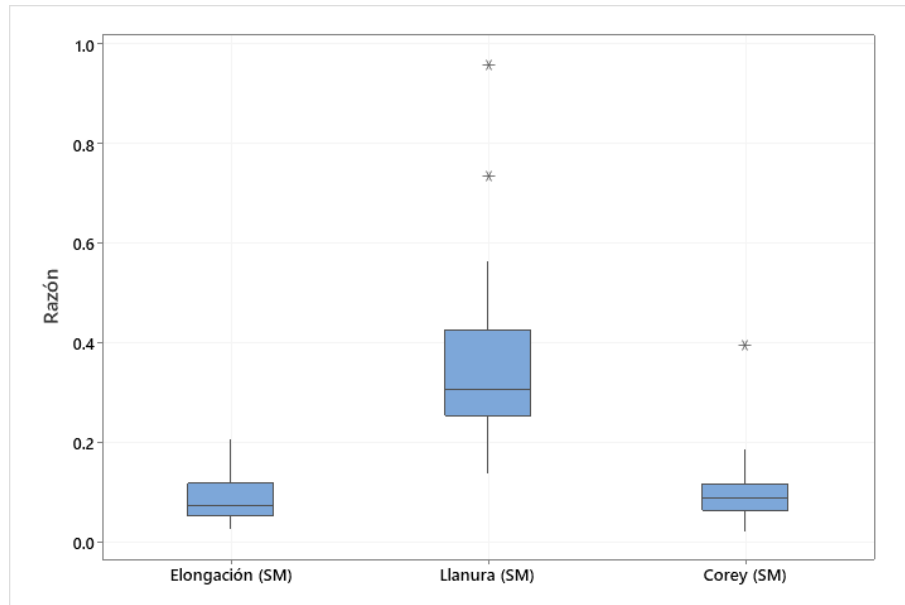


Figura 36. Factores de forma de Elongación, Llanura y Corey para las fibras de bagazo de caña molida (M) retenidas en tamiz no. 20.

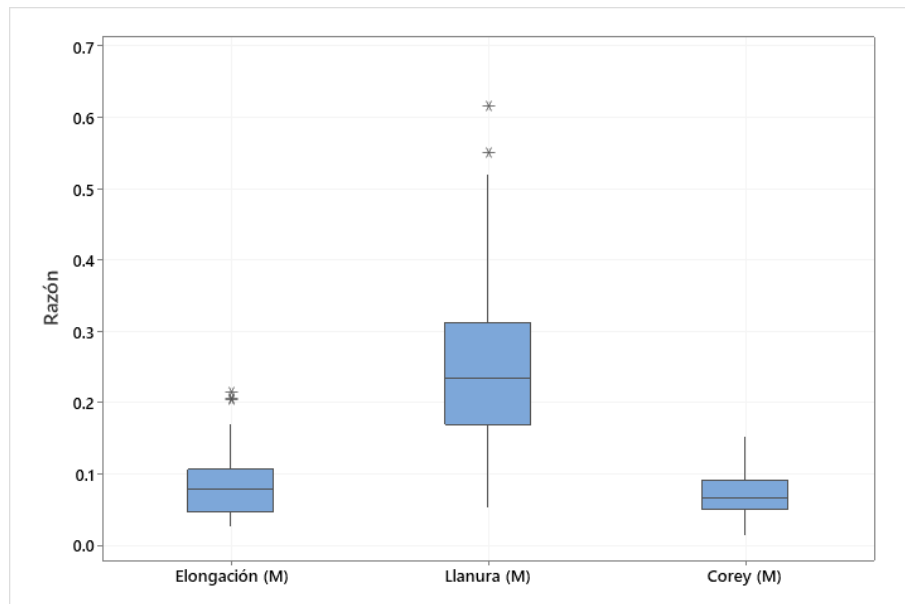


Figura 37: Longitud de las fibras de bagazo de caña previo a la reducción de partícula.

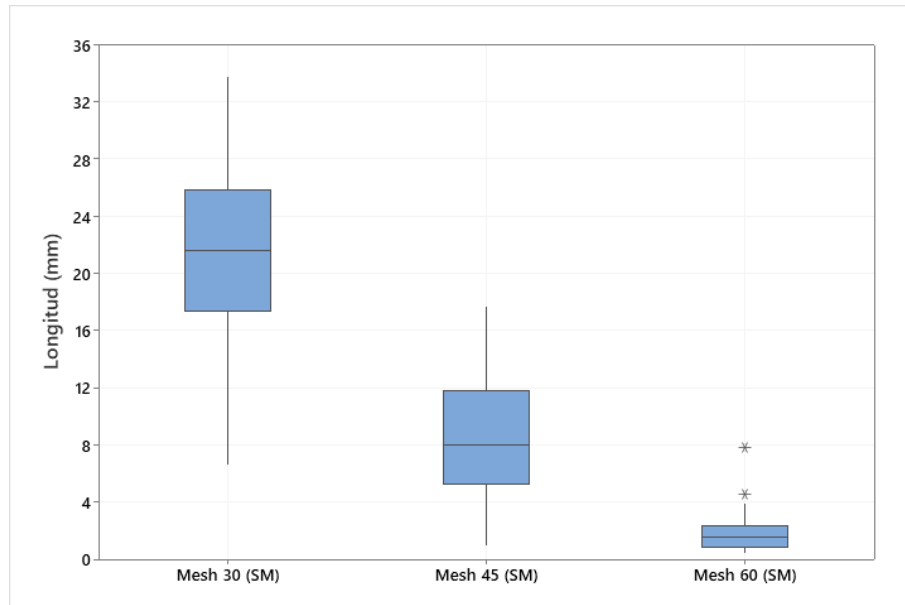
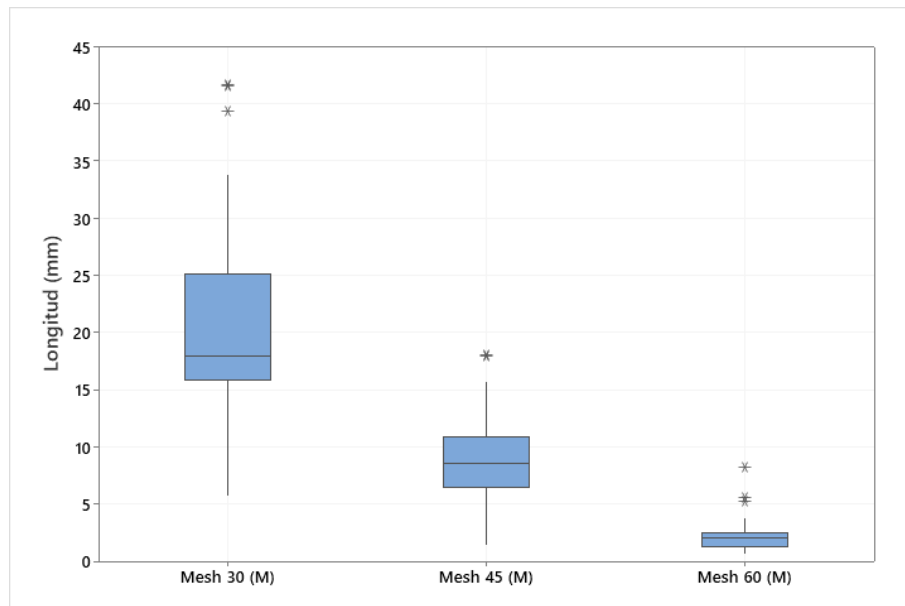


Figura 38. Longitud de las fibras de bagazo de caña después de la reducción de partícula.



Cuadro 75. Contenido de cenizas en base seca de la madera y almidón y bagazo de caña empleado.

Corrida	Cenizas (Madera)	±	Cenizas (Almidón)	±	Cenizas (Bagazo)	±
1	0.96%	0.04%	0.26%	0.02%	4.65%	0.02%
2	0.47%	0.05%	0.36%	0.02%	4.67%	0.02%
3	0.51%	0.05%	0.20%	0.02%	4.97%	0.02%
4	0.52%	0.04%	0.32%	0.02%	4.56%	0.02%

Cuadro 76. Intervalo de confianza al 95 % del contenido de cenizas en base seca de la madera y el almidón de maíz empleado.

Sustancia	% ceniza límite superior	% ceniza límite inferior
Madera	0.98 %	0.25 %
Almidón	0.39 %	0.17 %
Bagazo	5.00 %	4.43 %

Cuadro 77. Contenido de cenizas en base seca de las briquetas a distintas composiciones (10%, 15% y 20%)

Corrida	Cenizas (Briqueta 10%)	±	Cenizas (Briqueta 10%)	±	Cenizas (Briqueta 20%)	±
1	4.20%	0.02%	3.85%	0.02%	3.87%	0.02%
2	4.20%	0.02%	3.94%	0.02%	3.63%	0.02%
3	4.09%	0.02%	4.14%	0.02%	3.67%	0.02%
4	4.41%	0.02%	3.93%	0.02%	3.84%	0.02%

Cuadro 78. Intervalo de confianza al 95 % del contenido de cenizas en base seca de las briquetas a distintas composiciones (10%, 15% y 20%) y de la madera analizada.

Biomasa	% ceniza		% ceniza	
	Promedio	límite superior	límite inferior	
10 %	4.22%	4.44 %	4.01 %	
15 %	3.97%	4.16 %	3.77 %	
20 %	3.75%	3.94 %	3.57 %	

Cuadro 79. Cambio de densidad en el tiempo de las briquetas a distintas presiones de compresión a una composición de 10%.

Tiempo (día)	Densidad briqueta 10 % (kg/m <sup>3</sup> )					
	10 Mpa	±	20 Mpa	±	30 Mpa	±
0	606.16	0.20	724.59	0.26	868.37	0.34
	587.58	0.19	715.67	0.25	894.48	0.35
	608.30	0.20	763.37	0.28	866.49	0.33
	620.20	0.21	792.21	0.29	863.47	0.33
1	485.11	0.15	579.93	0.19	696.99	0.24
	464.72	0.14	598.85	0.20	674.71	0.23
	465.68	0.14	570.29	0.18	670.65	0.23
	483.69	0.15	604.55	0.20	642.69	0.22
5	420.78	0.12	491.35	0.15	573.84	0.18
	411.46	0.12	495.58	0.15	584.94	0.19
	424.81	0.12	500.68	0.15	557.75	0.18
	411.22	0.12	471.61	0.14	536.98	0.17
10	406.73	0.12	461.47	0.14	541.10	0.17
	395.16	0.11	473.91	0.14	554.20	0.18
	407.78	0.12	457.99	0.14	525.06	0.16
	395.27	0.11	456.84	0.14	536.79	0.17

Cuadro 80. Cambio de densidad en el tiempo de las briquetas a distintas presiones de compresión a una composición de 15%.

Tiempo (día)	Densidad briqueta 15 % (kg/m <sup>3</sup> )					
	10 Mpa	±	20 Mpa	±	30 Mpa	±
0	616.94	0.20	781.93	0.29	851.29	0.32
	603.77	0.20	774.46	0.28	864.29	0.33
	583.21	0.19	750.58	0.27	852.80	0.32
	561.34	0.18	779.43	0.28	891.62	0.35
1	497.88	0.15	664.90	0.23	635.40	0.21
	415.74	0.12	609.75	0.20	635.05	0.21
	457.34	0.14	599.46	0.20	645.46	0.22
	449.75	0.13	608.31	0.20	678.85	0.23
5	416.96	0.12	527.71	0.17	546.83	0.17
	393.59	0.11	522.48	0.16	539.85	0.17
	391.79	0.11	513.22	0.16	585.70	0.19
	385.25	0.11	517.75	0.16	578.27	0.19
10	397.97	0.11	509.56	0.16	519.21	0.16
	378.05	0.11	501.13	0.15	528.38	0.16
	389.96	0.11	501.79	0.15	556.45	0.18
	366.14	0.10	498.57	0.15	540.94	0.17

Cuadro 81. Cambio de densidad en el tiempo de las briquetas a distintas presiones de compresión a una composición de 20%.

Tiempo (día)	Densidad briqueta 20 % (kg/m <sup>3</sup> )					
	10 Mpa	±	20 Mpa	±	30 Mpa	±
0	564.33	0.18	819.50	0.30	859.33	0.33
	588.44	0.19	752.74	0.27	893.81	0.35
	592.79	0.19	790.50	0.29	895.74	0.35
	609.63	0.20	891.09	0.34	852.72	0.32
1	466.83	0.14	664.24	0.23	726.16	0.26
	483.69	0.15	629.28	0.21	676.83	0.23
	441.48	0.13	631.90	0.21	689.20	0.24
	473.90	0.14	645.67	0.22	700.15	0.24
5	437.18	0.13	603.88	0.20	651.34	0.22
	425.80	0.13	556.00	0.18	586.27	0.19
	380.80	0.11	584.42	0.19	658.05	0.22
	440.37	0.13	588.77	0.19	625.27	0.21
10	395.01	0.11	490.43	0.15	533.11	0.17
	371.36	0.11	505.25	0.16	467.23	0.14
	354.05	0.10	491.46	0.15	459.15	0.14
	395.78	0.11	480.55	0.15	503.68	0.15

Cuadro 82. Densidad de la madera analizada.

Corrida	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	±
1	520.19	3.6E-01
2	566.85	2.2E-01
3	530.41	2.3E-01
4	557.08	2.1E-01

Cuadro 83. Intervalo de confianza al 95 % del contenido de cenizas de las 3 briquetas a distintas composiciones, bagazo de caña, madera analizada y almidón empleado.

ítem	Promedio (% cenizas)	Límite superior (% cenizas)	Límite inferior (% cenizas)
Briqueta 10 %	4.22%	4.44 %	4.01 %
Briqueta 15 %	3.97%	4.16 %	3.77 %
Briqueta 20 %	3.75%	3.94 %	3.57 %
Bagazo de caña	4.71%	5.00%	4.43%
Madera	0.62%	0.98%	0.25%
Almidón de maíz	0.28%	0.39%	0.17%

Cuadro 84. Intervalo de confianza al 95% de la humedad de las briquetas a 3 distintas composiciones en el día 10 de almacenamiento, madera analizada y almidón de maíz empleado.

ítem	Promedio (% humedad)	Límite superior (% humedad)	Límite inferior (% humedad)
Briqueta 10 %	15.08%	15.12%	15.04%
Briqueta 15 %	14.62%	14.84%	14.40%
Briqueta 20 %	14.38%	14.90%	13.86%
Madera	8.84%	10.21%	7.47%
Almidón de maíz	9.19%	9.61%	8.77%
Bagazo de caña	7.73%	8.10%	7.36%



Cuadro 85. Intervalo de confianza al 95% del PCS de las briquetas a 3 distintas composiciones, madera analizada y almidón de maíz empleado.

ítem	Promedio (kJ/kg)	Límite superior (kJ/kg)	Límite inferior (kJ/kg)
Briqueta 10 %	14408	14575	14241
Briqueta 15 %	14893	15029	14758
Briqueta 20 %	14736	15410	14062
Madera	17869	18608	17130
Almidón de maíz	14787	15448	14126

Cuadro 86. Intervalo de confianza al 95% de la densidad de las briquetas a distintas composiciones y presiones de compresión en el día 10.

Composición	MPa	Promedio (kg/m <sup>3</sup> )	límite superior (kg/m <sup>3</sup> )	límite inferior (kg/m <sup>3</sup> )
10%	10	401.23	412.32	390.15
	20	462.55	475.00	450.11
	30	539.29	558.44	520.14
15%	10	383.03	405.18	360.88
	20	502.76	510.30	495.22
	30	536.25	561.94	510.55
20%	10	379.05	411.12	346.98
	20	491.92	508.08	475.76
	30	536.25	590.70	481.79

Cuadro 87. Intervalo de confianza de la densidad de la madera.

ítem	Promedio (kg/m <sup>2</sup> )	PCS límite superior (kg/m <sup>2</sup> )	PCS límite inferior (kg/m <sup>2</sup> )
Madera	543.63	578.55	508.72

Cuadro 88. Valor P de la prueba de hipótesis de medias poblacionales del contenido de cenizas entre las briquetas a distintas composiciones y la madera analizada para un  $\alpha$  de 0.05

Combinación	Valor P	¿Rechaza H <sub>0</sub> ?
Madera-Briqueta 10%	0.000	Sí
Madera-Briqueta 15%	0.000	Sí
Madera-Briqueta 20%	0.000	Sí

Cuadro 89. Valor P de la prueba de hipótesis de medias poblacionales del contenido de humedad entre las briquetas a distintas composiciones en el día 10 de almacenamiento y la madera analizada para un  $\alpha$  de 0.05

Combinación	Valor P	¿Rechaza H <sub>0</sub> ?
Madera-Briqueta 10%	0.001	Sí
Madera-Briqueta 15%	0.001	Sí
Madera-Briqueta 20%	0.001	Sí

Cuadro 90. Valor P de la prueba de hipótesis de medias poblacionales del PCS entre las briquetas a distintas composiciones en el día 10 de almacenamiento y la madera analizada para un  $\alpha$  de 0.05

Combinación	Valor P	¿Rechaza H <sub>0</sub> ?
Madera-Briqueta 10%	0.001	Sí
Madera-Briqueta 15%	0.001	Sí
Madera-Briqueta 20%	0.000	Sí

Cuadro 91. Valor P de la prueba de hipótesis de medias poblacionales de la densidad entre las briquetas a distintas composiciones a 30 MPa de compresión en el día 10 de almacenamiento y la madera analizada para un  $\alpha$  de 0.05

Combinación	Valor P	¿Rechaza $H_0$ ?
Madera-Briqueta 10%	0.746	No
Madera-Briqueta 15%	0.611	No
Madera-Briqueta 20%	0.048	Sí

Cuadro 92. Temperaturas promedio de planta de estufa de biomasa para la quema madera y Briquetas a 10%, 15% y 20%

Tiempo (min)	Madera ( $\pm 0.02$ °C)	Briqueta 10% ( $\pm 0.02$ °C)	Briqueta 15% ( $\pm 0.02$ °C)	Briqueta 20% ( $\pm 0.02$ °C)
0	29.3	31.2	24.9	34.1
5	39.8	95.7	107.1	171.5
10	91.9	227.5	253.3	267.3
15	153.6	215.8	194.7	183.3
20	235.7	184.1	171.7	147.3
30	158.8	131.4	138.1	112.2
40	104.9	98.5	86.4	81.1
50	97.1	85.9	72.5	63.7
60	81.9	62.4	58.6	40.9

E. Imágenes del proceso experimental.

Figura 39. Bagazo de caña en la salida de masas de ingenio La Unión.



Figura 40. Muestra de bagazo contenida en saco.



Figura 41. Saco de almidón de maíz empleado obtenido de la empresa ALDA.



Figura 42. Madera de empleada para los análisis.



Figura 43. Prototipo de prensa para densificación con capacidad de prensado a 10 MPa.



Figura 44. Molde y piezas auxiliares utilizadas para la densificación de biomasa en prensa.



Figura 45. Posición de piezas para extrusión de la briqueta contenida en el interior del molde.



Figura 46. Secador de bandeja CORBETT INDUSTRIES INC, empleado para el secado de bagazo de caña a 60 °C.



Figura 47. Cámara de secado del secador de bandejas con el camión de bandejas.



Figura 48. Bandejas pequeñas empleadas para la medición de la curva de secado.



Figura 49. Llenado de bagazo de caña en las bandejas.



Figura 50. Tamizador Tyler RO TAP, modelo RX-29, empleado para el análisis granulométrico



Figura 51. Bagazo no molido retenido en tamiz no. 20, 30, 45, 60, 80, 100 y fondo.



Figura 52. Molino de discos empleado para la reducción de partícula.



Figura 53. Bagazo molido retenido en tamiz no. 20, 30, 45, 60, 80, 100 y fondo.





Figura 54. Fibras de bagazo retenidas tamiz no. 20.



Figura 55. Medición de fibra de bagazo para factores de forma utilizando vernier electrónico.



Figura 56. Mufla THERMOLYNE, modelo F6010, empleada para el análisis de cenizas.

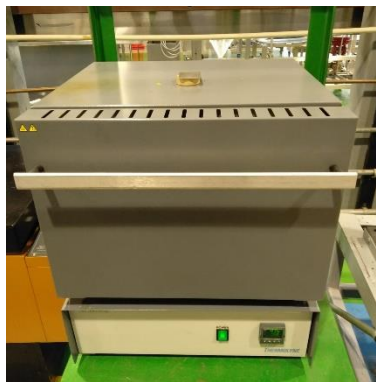


Figura 57. Muestras de almidón de maíz y bagazo de caña para análisis de contenido de cenizas.



Figura 58. Muestras de madera para análisis de cenizas de contenido de cenizas.



Figura 59. Cenizas de las muestras de almidón de maíz y bagazo de caña.



Figura 60. Cenizas de la muestra de madera.



Figura 61. Cenizas de briquetas.



Figura 62. Balanza de humedad OHAUS, modelo MB 120, usada para la determinación del contenido de humedad.



Figura 63. Calorímetro IKA, modelo C 200, empleado para la determinación del PCS de la madera analizada.



Figura 64. Bomba calorimétrica y piezas auxiliares para el funcionamiento del calorímetro IKA.



Figura 65. Medición de masa de madera en el crisol del calorímetro IKA.



Figura 66. Fabricación de briquetas empleando prensa CARVER.



Figura 67. Briqueta pensada dentro de molde.



Figura 68. Briqueta extruida de molde.



Figura 69. Almacenamiento en anaquel de las briquetas fabricadas en composiciones 10, 15 y 20% a 10, 20 y 30 MPa.



Figura 70. Briquetas al 10% de composición a presiones de 10, 20 y 30 MPa (izquierda a derecha) en el día 10 de almacenamiento.



Figura 71. Briquetas al 15% de composición a presiones de 10, 20 y 30 MPa (izquierda a derecha) en el día 10 de almacenamiento



Figura 72. Briquetas al 20% de composición a presiones de 10, 20 y 30 MPa (izquierda a derecha) en el día 10 de almacenamiento



Figura 73. Madera cortada en forma de prisma triangular para la determinación de su densidad.



Figura 74. Muestras de briquetas utilizadas para el PCS y humedad en el día 10 de almacenamiento.



Figura 75. Calorímetro Leco, modelo AC 500, empleado para la medición del PCS en Ingenio San Diego.



Figura 76. Estufa de biomasa empleada para el ensayo de quemado.



Figura 77. Madera alimentada a estufa de biomasa para ensayo de quemado (0.600 kg)





Figura 78. Combustión de la madera en estufa de biomasa.



Figura 79. Cenizas de madera al finalizar la combustión.



Figura 80. Briquetas alimentadas a estufa de biomasa para ensayo de quemado, por cada composición (0.600 kg)



Figura 81. Combustión de la briqueta al 10% en estufa de biomasa.



Figura 82. Combustión de la briqueta al 15% en estufa de biomasa.



Figura 83. Combustión de la briqueta al 20% en estufa de biomasa.



Figura 84. Cenizas de las briquetas al finalizar la combustión.



Figura 85. Efecto de no realizar molienda del bagazo de caña.



Figura 86. Briqueta con almidón y sin almidón.



F. Imágenes adicionales.

Figura 87. Ficha técnica de Almidón de la empresa ALDA.



**CERTIFICATE OF ANALYSIS**

Product : Corn Starch, Royal Lion  
Packing : 600 Paper bags of 25 kg net  
Batch number : 13788  
Analysis results : Moisture : 11,3%  
pH : 5,3%  
SO2 ppm : 13  
Production date: 22-03-2019  
Expiry date: 21-03-2021

**PROPIEDADES QUIMICAS .**

Moisture 10 – 11.9%  
pH 5.4 – 6  
Ash Max. 0.3 %  
Protein Max 0.5 %

**PROPIEDADES MICROBIOLÓGICAS:**

Recuento Total de Placas Max. 5,000 Cfu/g  
Levaduras y Mohos Max. 500 gramos  
E. Coli Max. 10 Cfu/g  
Salmonella Negativo

\*Estos datos son testeados aleatoriamente



| 26 CALLE 7-23 ZONA II, OFIBODEGAS SAN LUIS BODEGA No. 4  
PBX: 2476 - 1112 www.alda.com.gt  
ventas@alda.com.gt

Figura 88. Datos experimentales por el laboratorio de energía de Ingenio San Diego.

	Nombre: <b>Reporte de Resultados de Combustibles</b>	Código:	ENE-REG-021
		Versión:	01

<b>Muestra:</b>	Briquetas de Bagazo
<b>Presentada por:</b>	Edgar Ochoa
<b>Responsable del muestreo:</b>	Edgar Ochoa
<b>Procedencia:</b>	Ingenio La Unión - UVG
<b>Fecha de recepción de muestra:</b>	21 de enero de 2021
<b>Fecha de análisis:</b>	21 – 22 enero de 2021

Fecha	Producto	Humedad %	Volátiles %	Ceniza %	BTU/Lb	Observaciones
21/01/2021	BAGAZO-Bagazo	15.07	66.22	3.7	6163	Briqueta 10 Por Ciento
21/01/2021	BAGAZO-Bagazo	15.07	66.25	3.35	6220	Briqueta 10 Por Ciento
21/01/2021	BAGAZO-Bagazo	15.1	66.28	3.6	6200	Briqueta 10 Por Ciento
21/01/2021	BAGAZO-Bagazo	14.67	67.08	3.25	6387	Briqueta 15 Por Ciento
21/01/2021	BAGAZO-Bagazo	14.52	67.78	3.28	6392	Briqueta 15 Por Ciento
21/01/2021	BAGAZO-Bagazo	14.67	66.21	3.38	6430	Briqueta 15 Por Ciento
21/01/2021	BAGAZO-Bagazo	14.22	67.63	3.2	6322	Briqueta 20 Por Ciento
21/01/2021	BAGAZO-Bagazo	14.62	79.9	2.92	6226	Briqueta 20 Por Ciento
22/01/2021	BAGAZO-Bagazo	14.31	79.84	3.15	6458	Briqueta 20 Por Ciento
22/01/2021	Almidón	12.94	87.52	0.27	6456	Almidón
22/01/2021	Almidón	12.98	87.55	0.25	6384	Almidón
22/01/2021	Almidón	12.99	87.4	0.32	6232	Almidón