

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

Evaluación de la incidencia de dos combustibles forestales de distinta geometría en el desempeño de un gasificador tipo “downdraft”

Proyecto de Graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química

Marco Chaves Flores

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

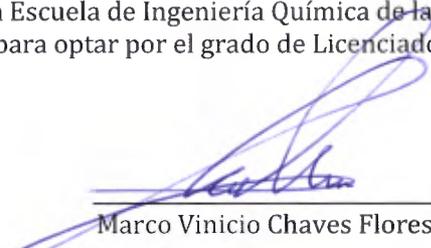
San José, Costa Rica

2017

Evaluación de la incidencia de dos combustibles forestales de distinta geometría en el desempeño de un gasificador tipo “downdraft”

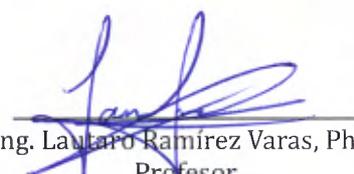
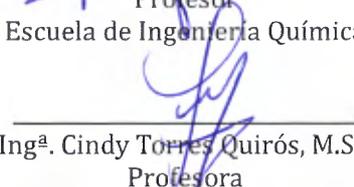
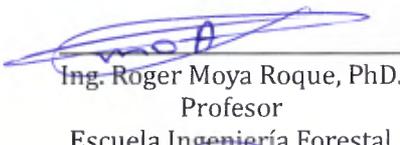
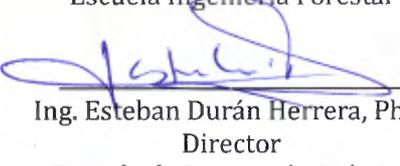
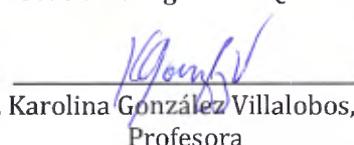
Proyecto presentado a la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica como requisito final para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Química

Sustentante:



Marco Vinicio Chaves Flores

COMITÉ ASESOR

 Ing. Lautaro Ramírez Varas, PhD. Profesor Escuela de Ingeniería Química	Presidente
 Ing ^a . Cindy Torres Quirós, M.Sc. Profesora Escuela de Ingeniería Química	Directora
 Ing. Roger Moya Roque, PhD. Profesor Escuela Ingeniería Forestal	Lector
 Ing. Esteban Durán Herrera, PhD. Director Escuela de Ingeniería Química	Lector
 Ing ^a . Karolina González Villalobos, MBA. Profesora Escuela de Ingeniería Química	Lectora

Dedicatoria

A mi familia,

Por ser un pilar fundamental en mi vida y la razón de mis esfuerzos.

A mi directora,

Su ejemplo de vida han sido una gran fuente de inspiración para seguir adelante.

A mis amigos,

Por su criterio imparcial, en lo bueno, en lo malo.

Agradecimientos

A mi directora por creer en mí y por confiarme este tema de investigación

A mis lectores por ser ir más allá de asesores y siempre brindar apoyo incondicional

*Al resto del comité por su enorme colaboración a través de esta diversa y compleja
travesía de investigación*

*Al personal de la Escuela de Ingeniería Química, CELEQ, Escuela de Ingeniería
Forestal del Tecnológico de Costa Rica, por su apoyo incondicional a través de la ejecución del
proyecto*

Les agradezco

RESUMEN

En un proceso de gasificación de biomasa la geometría de la biomasa es un factor que necesita ser considerado, pues el tamaño, forma y densidad de las partículas del combustible influyen su transporte, velocidades de secado y su descomposición térmica, factores relacionados al desempeño general del proceso. Esto se ha evidenciado al comparar los resultados obtenidos de alimentar pellets y astillas de madera a una planta piloto capaz de gasificar biomasa para la obtención de energía térmica y eléctrica. La unidad se ubica el Laboratorio de Biomateriales de la Escuela de Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica. Se realizó un diseño experimental de dos niveles por triplicado, siendo las variables fijas el tiempo de operación de la planta (cuatro horas), el contenido de humedad (16 % base húmeda) y la potencia eléctrica (6.2 kW).

Se concluye que el uso de los pellets de madera como combustible disminuyen el desempeño de la planta piloto, pues, debido a los atascamientos de los pellets dentro del reactor, se alcanzaron temperaturas menores en todas las etapas del proceso de descomposición térmica. Por ejemplo, en la zona de restricción se obtuvieron temperaturas de (804.19 ± 36.93) °C con astillas y de (731 ± 82.99) °C con pellets; y, al ser la generación de syngas un proceso endotérmico el rendimiento con pellets fue menor con respecto a las astillas de madera (i.e. en promedio se produjeron 1.75 kg de syngas por kilogramo de astillas, un 25 % más que con pellets de madera). A la vez hubo una generación mayor de metano al emplear pellets, (10.06 ± 1.88) %v/v con respecto a un (4.70 ± 0.56) %v/v al emplear astillas, lo que implicó un disminuyó en el contenido energético por kilogramo del syngas al utilizar pellets de madera.

Además, al alimentar pellets de madera se obtuvo una mayor tasa de producción alquitranes de (4.43 ± 0.98) kg/h con (58.97 ± 15.37) % agua, frente a los (2.45 ± 2.22) kg/h con (85.71 ± 16.71) % agua generados al procesar astillas de madera, lo que implica una elevación en el ensuciamiento de todas las unidades de la planta. Todo esto se reflejó en bajas eficiencias durante el proceso de gasificación de pellets con respecto a astillas, ya que, por ejemplo la Eficiencia de Gas Frío al alimentar astillas fue en promedio de (71.46 ± 10.58) % y con pellets fue de (66.12 ± 12.76) %; la Eficiencia Térmica Global fue de un (15.21 ± 0.44) % para astillas y (12.36 ± 0.29) % para pellets; es decir, las pérdidas de la energía disponible en la biomasa para convertirse en energía eléctrica fueron mayores al emplear pellets de madera. La eficiencia del motor/generador, que cuantifica la capacidad de aprovechamiento de la energía del syngas para producir potencia eléctrica, fue de (21.41 ± 3.23) % para astillas y (18.94 ± 3.68) % para pellets. De forma paralela se obtuvieron rendimientos eléctricos para esta planta piloto de 564.50 kWh/t para astillas, y de 487.35 kWh/t a 6.2 kW.

Se recomienda un rediseño en el sistema de alimentación de biomasa de la planta piloto, donde se sustituya el tornillo sin fin por una unidad con mayor flexibilidad, como un resorte, lo cual mejoraría la estabilidad de alimentación de las astillas de madera y también evitaría un desgaste de la integridad mecánica de los pellets de madera. Además, se recomienda utilizar un reactor de lecho descendente con una garganta que posea un área de paso mayor, lo cual mejoraría el transporte de los pellets de madera y evitaría la formación de atascamientos en la zona.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	<i>página</i>
RESUMEN	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE CUADROS.....	xv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	3
1.2 Objetivos específicos	3
2. GASIFICACIÓN DE BIOMASA.....	5
2.1 Procesos de Gasificación de biomasa	5
2.1.1 ¿Qué es biomasa?	5
2.1.2 Aprovechamiento energético de la biomasa.....	5
2.1.3 Fundamentos de la gasificación	7
2.1.4 Tipos de reactores para gasificación.....	10
2.1.5 Perfiles de térmicos en reactor “downdraft”	12
2.2 Parámetros requeridos para evaluar desempeño de un gasificador	13
2.3 Gasificación de madera: oportunidad para desarrollo.....	15
3. GEOMETRÍA DE LA BIOMASA.....	19
3.1 Astillas de madera	19
3.1.1 Proceso de trituración de la madera	19
3.1.2 Empresas proveedoras de tecnología para triturar madera.....	23
3.2 Pellets de madera	24
3.2.1 Densificación	24
3.2.1 Proceso de densificación.....	25

	<i>página</i>
3.2.2 Empresas proveedoras de tecnología para pelletizar biomasa.....	28
3.3 Factor geometría de la biomasa forestal	29
4. CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LA BIOMASA	31
4.1 Composición química de la madera.....	31
4.1.1 Componentes químicos	31
4.1.2 Otros componentes	33
4.2 Contenido de humedad de la biomasa en procesos de gasificación.....	33
4.2.1 Contenido de agua de combustibles en procesos de gasificación.....	33
4.2.2 Humedad en la madera.....	36
4.3 Contenido de cenizas en biomosas.....	37
4.4 Contenido de materias volátiles en biomosas	38
4.5 Contenido de carbono fijo en biomosas	38
4.6 Composición elemental CHONS en biomosas	39
4.7 Contenido de metales en biomosas.....	41
4.7.1 Efecto de los metales alcalinos en procesos de gasificación	41
4.7.2 Análisis de fluorescencia de rayos X.....	42
4.8 Poder calórico en biomosas	42
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	45
5.1 Caracterización fisicoquímica de la biomasa.....	45
5.2 Evaluación de la geometría de la biomasa forestal en el desempeño del reactor “downdraft.....	47
5.2.1 Planta piloto: Unidad Power Palet de All Power Labs.....	48
5.2.2 Adaptaciones al sistema e instrumentación instalada	50
5.2.3 Variables medidas en planta piloto	62
5.2.4 Metodología para la adquisición de datos:.....	64

5.2.5 Procesamiento de datos: MatLab y Excel	65
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
6.1 Caracterización fisicoquímica de la biomasa	67
6.2 Proceso de gasificación en planta piloto e instrumentación	71
6.2.1 Diagrama de Flujo de Proceso	71
6.2.2 Diagrama de Instrumentación y Control (DI&C)	76
6.3 Corridas preliminares: puesta en marcha	78
6.4 Gasificación de astillas y pellets de madera.....	79
6.4.1 Planteamiento del balance de masa	80
6.4.1 Cálculo del balance de masa	82
6.4.2 Resultados de composición syngas.....	86
6.4.3 Caracterización del agente gasificante	90
6.5 Sistemas de recuperación de calor	92
6.5.1 Temperaturas en el reactor	92
6.5.2 Sistema de enfriamiento y limpieza	95
6.5.3 Motor y reactor	98
6.6 Energía y potencia.....	99
6.7 Evaluación del desempeño de la planta piloto	101
6.8 Adquisición, pretratamiento y condiciones operacionales	108
6.8.1 Adquisición y transporte del combustible.....	108
6.8.2 Pretratamiento de la biomasa.....	109
6.8.1 Consideraciones operacionales.....	112
6.9 Niveles de ensuciamiento en el sistema.....	116
6.9.1 Sistema de limpieza original en planta piloto	116

	<i>página</i>
6.9.1 Sistema de limpieza utilizado	118
6.9.2 Mantenimiento de la planta piloto.....	121
6.10 Resistencia a la transferencia de calor.....	123
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	131
7.1 Recomendaciones	132
NOMENCLATURA.....	135
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
APÉNDICES.....	145
A. Resultados caracterización fisicoquímica de la biomasa	145
B. Resultados de corridas experimentales	148
C. Muestra de cálculo.....	157
ANEXOS.....	163
Anexo 1. Procedimiento para medición del contenido de humedad en base húmeda	163
Anexo 2. Procedimiento para medición del contenido de humedad en base seca	163
Anexo 3. Procedimiento para medición del contenido de cenizas	164
Anexo 4. Procedimiento para medición del contenido de materias volátiles.....	165
Anexo 5. Procedimiento para medición de composición elemental.....	166
Anexo 6. Procedimiento para medición del contenido de metales	166
Anexo 7. Procedimiento para medición del poder calórico	167

ÍNDICE DE FIGURAS

página

Figura 2.1. Aprovechamiento energético de la biomasa (Coordinación de Energías Renovables et al., 2008).....	6
Figura 2.2 Potenciales caminos que suceden durante la gasificación de biomasa (Basu, 2013)9	
Figura 2.3. Esquema general de un reactor downdraft de garganta tipo V para procesos de gasificación de biomasa (Basu, 2013).....	11
Figura 2.4. Perfil de temperatura axial CFD a 4 cm de distancia desde el eje del gasificador que muestra la ubicación correspondiente de los puntos calculados a lo largo de la altura gasificador (Janajreh & Al Shrah, 2013).....	12
Figura 3.1. Ejemplo de astillas (chips) de madera (Raid, 2017)	19
Figura 3.2. Alternativas de proceso de producción de astillas de madera. Trituración en (a) terreno (b) terminal (c) planta.....	20
Figura 3.3. Esquema general de un triturador de madera de tambor (Carlton-Inc, 2015).....	21
Figura 3.4. Esquema general de una trituradora de madera de discos (Carlton-Inc, 2015)	22
Figura 3.5. Ejemplos de maquinaria utilizada para triturar la madera en campo (ThomasNET, 2012).....	23
Figura 3.6. Ejemplo de pellets de madera (Quiñones, 2016).....	25
Figura 3.7. Proceso de pelletización de biomasa (Gonzáles, 2012)	26
Figura 3.8. Etapas de un proceso industrial de pelletización (Gonzáles, 2012)	26
Figura 3.9. Esquema general de una pelletizadora de matriz plana (Gonzáles, 2012).....	27
Figura 3.10. Esquema general del funcionamiento de una pelletizadora de matriz anular (Gonzáles, 2012)	28
Figura 4.1. Estructura parcial de la molécula de celulosa $(C_6H_{10}O_5)_x$ en la forma 1,4- β -D-glucopiranososa (Pettersen, 1984).....	31
Figura 4.2. Estructura molecular parcial (arriba) y representación de la estructura (abajo) de O-acetyl-4-O-metil-glucuronoxylan (Pettersen, 1984).....	32
Figura 4.3. Estructura parcial de lignina de madera blanda (Pettersen, 1984).....	32
Figura 4.4. (a) La temperatura final de pirólisis, oxidación y zonas de reducción con la variación del contenido de humedad de 0 % hasta 40 % con A/F = 2.2. (Tpirólisis: ♦ Tcombustión ■	

Treducción: Δ . (b) Las alturas de las zonas de secado, pirólisis y reducción con la variación del contenido de humedad del 0 % al 40 % a A/F)2.2 (Hsecado:+ Hpirólisis: * Hreducción: \circ) (Dejtrakulwong & Patumsawad, 2014) 35

Figura 4.5. Relación entre la Humedad de Equilibrio Higroscópico con la temperatura y humedad del medio ambiente (Kollmann, 1959)..... 37

Figura 4.6. Geometría de excitación de la muestra y detección de la radiación característica (Fellin et al., 2014)..... 42

Figura 5.1. Unidad Power Palet de la empresa All Power Labs modelo PP20 (AllPowerLabs, 2015) 49

Figura 5.2.(a) Medidor de caudal Vortex Marca ABB (b) Instalación medidor de flujo en la unidad..... 50

Figura 5.3. (a) Sensor de humedad relativa y temperatura ambiente Vaisala HMP110 (b) Instalación del sensor en la línea 51

Figura 5.4. Diagrama constructivo del medidor de flujo de tipo orificio (Morice, 2015)..... 51

Figura 5.5. Medidor de flujo de orificio instalado en la planta piloto..... 52

Figura 5.6. Transmisor de presión diferencial Marca Dwyer Serie 616KD 52

Figura 5.7. Transmisor de presión diferencial Marca Dwyer Serie MS-111..... 53

Figura 5.8. Instalación de transmisores de presión diferencial en la planta pilo 53

Figura 5.9. Termocupla WATLOW empleada para la medición de temperatura 54

Figura 5.10. Instalación de termocuplas en la planta piloto 55

Figura 5.11. Chasis de 4 ranuras marca National Instruments para la adquisición de datos..... 55

Figura 5.12. (a) Módulo de entrada de termopares de 16 entradas (b) Módulo de entradas analógicas de 16 entradas, 8 de voltaje y 8 de corriente 56

Figura 5.13. Instalación de unidad de adquisición de datos en la planta piloto 56

Figura 5.14. Sistema de limpieza de muestra de syngas en línea para su posterior análisis de composición a) Filtro de “mecha” b) Filtro con 50% carbón y 50% sílica gel c) Columnas para cromatografía con sílica gel..... 57

Figura 5.15. (a) Analizador MCA 100 Syn Portable MULTICOMPONENT ANALYZER FOR SynGAS (b) Instalación de línea de syngas limpio y seco al analizador..... 58

Figura 5.16. Sistema de cargas empleadas para fijar el gasto energético de la planta piloto ... 59

Figura 5.17. Fluke 435: Three Phase Power Quality Analyzer de Fluke Industrial B.	59
Figura 5.18. (a) Instalación de sensores de corriente y tensión (b) Interfaz de Fluke al realizar mediciones continuas de potencia y energía.....	60
Figura 5.19. Carburador empleado como instrumento de limpieza del motor	60
Figura 5.20. Sistema de agitación dentro de tolva de alimentación.....	61
Figura 5.21. Visualización general de la planta piloto con todas las adaptaciones e instrumentación	62
Figura 6.1. Diagrama de Flujo de Proceso de unidad Power Palet de All Power Labs	75
Figura 6.2. Plano de Instrumentación y Control (PI&C) de la planta piloto	77
Figura 6.3. Flujos que ingresan y salen de las unidades de reacción y limpieza.....	80
Figura 6.4. Flujo másico de syngas durante (a) la primera réplica de astillas del 03/21/2017 y (b) segunda réplica de pellets del 07/08/2017, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis para los balances de masa (área naranja)	81
Figura 6.5. Mecanismo simplificado de formación de alquitranes (Molino, Chianese, & Musmarra, 2016).....	83
Figura 6.6. Composición volumétrica del syngas limpio y seco producido (a) la primera réplica de astillas del 03/21/2017 y (b) segunda réplica de pellets del 07/08/2017, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis (área naranja).....	87
Figura 6.7. Perfiles de temperatura el reactor durante la corrida de astillas de madera del 03/21/2017, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis para los balances de masa (área naranja).....	93
Figura 6.8. Perfiles de temperatura en el reactor durante la corrida de pellets de madera del 07/08/2017, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis para los balances de masa (área naranja).....	93
Figura 6.9. Perfiles de baja temperatura en el sistema durante la corrida de astillas de madera del 03/21/2017, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis para los balances de masa (área naranja).....	96
Figura 6.10. Perfiles de baja temperatura en el sistema durante la corrida de pellets de madera del 07/08/2017, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis para los balances de masa (área naranja)	96

Figura 6.11. Transporte de una tonelada de astillas de madera	109
Figura 6.12. (a) Tamizado de astillas de madera (b) Cámara de acondicionamiento	110
Figura 6.13. (a) Visualización del almacenamiento de astillas (b) Astillas de madera	111
Figura 6.14. Acondicionamiento de los pellets de madera	111
Figura 6.15. Fractura en el tornillo de alimentación de combustible al sistema.....	113
Figura 6.16. Perfiles de presión en el sistema durante (a) la corrida del 03/21/2017 con astillas de madera y (b) la corrida del 06/26/2017 con pellets, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis para los balances de masa (área naranja).	114
Figura 6.17. Flujo másico de syngas corrida de pellets del 06/26/2017, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis para los balances de masa (área naranja).	115
Figura 6.18. Ensuciamiento típico en el gobernador en una corrida con astillas de madera en planta piloto del ICAFE (Torres, 2016)	117
Figura 6.19. Configuración del relleno del filtro según fabricante	118
Figura 6.20. Configuración del relleno del filtro de lecho empacado de planta piloto.....	119
Figura 6.21. Condición de ensuciamiento del gobernador luego de 28 h motor.....	121
Figura 6.22. Visualización de la degradación térmica de las astillas de madera 1) Pirólisis baja 2) Pirólisis superior 3) Combustión 4) Reducción.....	126
Figura 6.23. Visualización de la degradación térmica de los pellets de madera 1) Pirólisis baja 2) Pirólisis superior 3) Combustión 4) Reducción.....	128
Figura E.1. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía S2 Ranger empleado para la determinación del contenido de metales (Ranger, 2015)	167

ÍNDICE DE CUADROS

página

Cuadro 2.1. Parámetros requeridos para evaluar el desempeño de un gasificador de biomasa (Torres et al., 2016).....	13
Cuadro 3.1. Empresas proveedoras de tecnología para producir energía a partir de astillas de madera.....	23
Cuadro 3.2. Empresas proveedoras de tecnología para densificar o producir energía a partir de biomasa.....	28
Cuadro 4.1. Eficiencia de la gasificación y potencia generada a diferentes contenidos de humedad en madera (H. Kumar et al., 2014).....	34
Cuadro 5.1. Metodologías empleadas y lugares de realización de las pruebas de caracterización	45
Cuadro 5.2. Materiales y equipos utilizados en el laboratorio	47
Cuadro 5.3. Especificaciones técnicas importantes de la unidad PP20 (AllPowerLabs, 2015).....	49
Cuadro 5.4. Equipos utilizados como sistema de carga para la planta piloto	58
Cuadro 6.1. Resultados de caracterización fisicoquímica de las biomosas estudiadas.....	67
Cuadro 6.2 Prueba t-Student para los datos con mismo tamaño de muestra, con diferentes varianzas.....	68
Cuadro 6.3. Resultados de composición de metales de las biomosas estudiadas.....	69
Cuadro 6.4. Resultados de composición elemental de las biomosas estudiadas	71
Cuadro 6.5. Sistema de control del Power Palet de All Power Labs.....	76
Cuadro 6.6. Caracterización de las corridas experimentales	79
Cuadro 6.7. Promedio de las variables fijas del diseño experimental realizado.....	80
Cuadro 6.8. Flujos de corrientes que ingresan y sales del sistema de reacción	82
Cuadro 6.9. Contenido de carbono en la biomasa, cenizas y alquitranes.....	84
Cuadro 6.10. Caracterización de corriente de alquitranes para ambas biomosas	85
Cuadro 6.11. Porcentajes de error en balances elementales globales del sistema	86
Cuadro 6.12. Composición del syngas seco y en base libre de oxígeno	87
Cuadro 6.13. Composición del syngas húmedo y en base libre de oxígeno	90
Cuadro 6.14. Propiedades de la corriente de aire que ingresa al reactor como agente gasificante	91

Cuadro 6.15. Temperaturas promedio en las operaciones de limpieza y enfriamiento.....	94
Cuadro 6.16. Resultados de temperaturas en el sistema de enfriamiento y limpieza.....	97
Cuadro 6.17. Diferencia en el comportamiento térmico.....	98
Cuadro 6.18. Temperaturas de las corrientes de las unidades de generación de energía y potencia	99
Cuadro 6.19. Tensión y corriente de la energía eléctrica producida por tipo de biomasa.....	100
Cuadro 6.20 Potencia entregada y variables que caracterizan la energía eléctrica generada	100
Cuadro 6.21. Resultado de la razón biomasa/agente oxidante para cada tipo de biomasa.....	102
Cuadro 6.22. Conversión de carbono obtenida para ambos tipos de biomasa.....	103
Cuadro 6.23. Corrientes energéticas dentro del sistema para ambos tipos de biomasa.....	104
Cuadro 6.24. Eficiencias del proceso de gasificación para obtención de energía eléctrica para los dos tipos de biomosas.....	104
Cuadro 6.25. Rendimientos del proceso de gasificación para los dos tipos de biomosas.....	106
Cuadro 6.26. Resultados de pruebas t-Student para datos de parámetros de desempeño de planta piloto.....	107
Cuadro 6.27. Costo por tonelada de astillas y pellets (Pelletics, 2016).....	109
Cuadro 6.28. Dimensiones de las astillas de madera que se alimentaron a la planta piloto ...	110
Cuadro 6.29. Presiones promedio del sistema según el tipo de biomasa alimentada.....	115
Cuadro 6.30. Estratos que componen el relleno del filtro y la cantidad empleada	120
Cuadro 6.31. Determinación de la capacidad de absorción de la configuración empleada en el filtro.....	120
Cuadro A.1. Determinación de la humedad en base húmeda de las biomosas	145
Cuadro A.2. Resultados de la determinación de la humedad en base seca de las biomosas....	145
Cuadro A.3. Resultados de la determinación del contenido de cenizas en base seca.....	145
Cuadro A.4. Resultados de la determinación del contenido de materias volátiles en base seca	146
Cuadro A.5. Resultados de la determinación del contenido de carbono fijo en base seca	146
Cuadro A.6. Determinación del poder calórico de cada biomasa empleada.....	146
Cuadro A.7. Resultados de análisis de composición del biochar	146

Cuadro A.8. Determinación del contenido de metales de cada biomasa estudiada con espectrofotómetro de rayos X.....	147
Cuadro B.9. Mediciones de masa de estratos de las corridas experimentales.....	148
Cuadro B.10 Flujos de las corrientes dentro del sistema de las corridas experimentales.....	148
Cuadro B.11. Resultados de balance de masa para las corridas experimentales	149
Cuadro B.12. Valores obtenidos de los errores de los balances de masa.....	149
Cuadro B.13. Resultados de composición del syngas de las corridas experimentales	150
Cuadro B.14. Resultados composición libre de aire de las corridas experimentales.....	150
Cuadro B.15. Temperaturas del sistema durante las corridas experimentales	151
Cuadro B.16. Datos de las presiones durante las corridas experimentales	152
Cuadro B.17. Resultados de potencia y energía de las corridas experimentales.....	153
Cuadro B.18. Resultados de composición del syngas limpio y húmedo de las corridas experimentales	154
Cuadro B.19. Rendimiento del syngas limpio y seco de las corridas experimentales	154
Cuadro B.20. Resultados de razón equivalente de las corridas experimentales.....	155
Cuadro B.21. Conversión de carbono de las corridas experimentales.....	156
Cuadro B.22. Rendimientos y eficiencias de las corridas experimentales.....	156

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la gasificación de biomasa para la obtención de un gas combustible, que luego permita la obtención de energía eléctrica empleando motores de combustión interna se está estudiando tanto a nivel internacional como nacional de manera más profunda. Esto, pues se busca apropiarse de la tecnología a las características de cada región, según los tipos y propiedades de los combustibles disponibles con el objetivo de evaluar sus posibles desempeños como fuentes de energía. Los estudios analizan las diferentes aristas que permitirían mejorar el proceso, ya que hay confianza de que este, como un ejemplo claro de recurso para obtener energía limpia, se convierta en una alternativa más para un mundo con alta demanda energética y con una creciente conciencia ambiental.

Es necesario recalcar que la biomasa se considera un recurso energético renovable, ya que los árboles y la vegetación de los que se produce pueden ser reabastecidos por repoblación y porque el dióxido de carbono (CO_2) que se crea cuando se quema la biomasa, se libera en la atmósfera y se fija posteriormente en la vegetación en el ciclo de fotosíntesis. Emplear biomasa ofrece otros beneficios ambientales, incluyendo una baja huella de carbono, no hay emisiones nocivas de azufre o mercurio; y produce significativamente menos óxidos de nitrógeno, lo que resulta en menos lluvia ácida y otros contaminantes tóxicos del aire.

La biomasa es la principal fuente de energía renovable en todo el mundo, las estimaciones varían del 44 % al 65 %, además se le señala que tiene el potencial de satisfacer una proporción considerable de las demandas de energía tanto a corto como a largo plazo. En 2011, los generadores de energía alimentados con biomasa suministraron alrededor del 10% del suministro energético mundial, y la Agencia Internacional de Energía prevé que la capacidad de generación eléctrica global de la biomasa aumentará diez veces, de 50 GW (Gigawatts) en 2009 a 560GW en 2050 (Forestry & Natural Resources Development, 2014)

Este trabajo aportará nueva información para un sector interesado en la implementación de esta tecnología en el país, pues se emplean astillas de madera (comúnmente llamados astillas) y pellets (un material elaborado mediante un proceso de densificación de aserrín) como combustibles producidos a partir de desechos forestales para un gasificador con la capacidad de generación de calor y electricidad. Se busca entonces,

evaluar la incidencia en el desempeño de la planta piloto en cada una de las dos formas de biomasa (astillas y pellet), lo cual permitiría definir las diferencias que existen al procesar cada una y aportar datos técnicos y objetivos a la investigación sobre los procesos de gasificación de biomasa.

Es importante mencionar que en el proyecto “*Implementación y evaluación tecnológica de gasificación en la industria de café, como alternativa para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)*” (325-B5-513 VI), se identificaron variaciones en el comportamiento del sistema cuando se utilizó pellets de madera y cuando se alimentaron astillas de madera, más no fue un objeto de estudio determinar el porqué de estas diferencias, por esa razón, empleando una nueva versión del módulo empleado en ese proyecto, se evalúa el comportamiento de ambas formas geométricas de biomasa según valores de composición del syngas, flujo de aire, flujo de syngas, temperaturas en diferentes secciones, presiones, entre otras variables que permitirán calcular parámetros que numéricamente describirán el desempeño del gasificador

Todos estos valores recopilados presentan una alta confiabilidad debido a la instrumentación instalada y a las adaptaciones realizadas a la planta piloto, lo cual permite, mediante el análisis planteado, describir de manera completa y detallada el desempeño del sistema de reacción, del sistema de limpieza y enfriamiento y del sistema de generación eléctrica según el tipo de combustible empleado. Además, paralelo a la presentación de las diferencias en las variables medidas, y con base a la experiencia adquirida, se describirá como la adquisición del combustible, su pretratamiento y las condiciones operativas de la planta son aspectos importantes que se deben analizar en la evaluación de la incidencia de la geometría en un proceso de gasificación.

1.1 Objetivo general

Evaluar la incidencia de dos combustibles forestales de distinta geometría, pellets y astillas de madera, en el desempeño de un gasificador tipo “downdraft” ubicado en el Tecnológico de Costa Rica, definiendo las diferencias significativas que existan en el rendimiento y eficiencia del sistema de generación de energía eléctrica y térmica.

1.2 Objetivos específicos

Parte de los objetivos específicos fue realizar una investigación bibliográfica sobre los procesos de gasificación de biomasa, los fundamentos teóricos sobre las propiedades de los dos combustibles biomásicos estudiados y una base teórica que justifica la etapa preliminar de caracterización fisicoquímica que se realiza a las biomásas que se utilizan en procesos de descomposición termoquímica. Seguidamente se realizó la caracterización completa de la materia prima forestal mediante análisis completos de composición y propiedades fisicoquímicas mediante ensayos de laboratorio por triplicado aplicando normas internacionales

Posteriormente, se planteó un diseño experimental de un factor por triplicado para evaluar la incidencia de la geometría de la biomasa forestal en el desempeño del reactor de lecho descendente. Sin embargo, previo al desarrollo experimental de este diseño, se determinó la variabilidad del sistema y la correcta adquisición de datos mediante corridas preliminares. Estas aportaron también de la experiencia necesaria en la operación y mantenimiento de la planta, y lograr de esta manera, realizar el diseño experimental planteado mediante corridas de 4 horas motor sin problemas técnicos de gravedad.

Al finalizar las corridas experimentales se obtuvo de la información necesaria para analizar la incidencia en el desempeño de la planta al alimentar astillas de madera o pellets de madera. Datos que se analizan en este el trabajo final de graduación, redactado según el reglamento de la Universidad de Costa Rica para la obtención de un grado de Licenciatura en Ingeniería Química

2. GASIFICACIÓN DE BIOMASA

2.1 Procesos de Gasificación de biomasa

2.1.1 ¿Qué es biomasa?

Por definición, "Bio" significa la vida y la biomasa es un material biológico con un gran volumen que se derivó de organismos vivos, tales como residuos de plantas o animales. En general, la biomasa puede clasificarse en cinco categorías básicas. La primera categoría es la madera virgen que se obtuvo de la silvicultura o en desechos de productos forestales. La segunda categoría se puede clasificar como los cultivos energéticos, que son los cultivos de alto rendimiento cultivados específicamente para aplicaciones energéticas. La tercera categoría son los residuos agrícolas, que incluyen el bagazo de caña de azúcar, cáscara de maíz, cáscara de coco y paja. La cuarta categoría es el residuo de los alimentos, que incluye la grasa animal, los residuos de la fabricación de alimentos y bebidas, etc. La quinta categoría son los residuos industriales de los procesos industriales y de fabricación (Ahmad, Zawawi, Kasim, Inayat, & Khasri, 2016).

Es un proceso natural todos estos tipos de biomasa se descomponen en sus moléculas junto a la liberación de calor. Por lo tanto, la energía obtenida de la biomasa es una forma de energía renovable y no añade dióxido de carbono al medio ambiente en contraste con los combustibles fósiles. De todas las fuentes de energía renovables, la biomasa es única en que almacena eficazmente la energía solar inherentemente. Además, es la única fuente de energía renovable de carbono y es capaz de convertirse en convenientes combustibles sólidos, líquidos y gaseosos (Sheth & Babu, 2010).

2.1.2 Aprovechamiento energético de la biomasa

Específicamente, desde el punto de vista del aprovechamiento energético, la biomasa se caracteriza por tener un bajo contenido de carbono, un elevado contenido de oxígeno y compuestos volátiles. Estos compuestos volátiles (formados por cadenas largas del tipo C_nH_m , y presencia de CO_2 , CO e H_2) son los que concentran una gran parte del poder calórico de la biomasa. Desde el punto de vista energético resulta conveniente dividir la biomasa en los

grupos que se aprecian en la Figura 2.1 (Coordinación de Energías Renovables, Dirección Nacional de Promoción, & Subsecretaría de Energía Eléctrica, 2008)

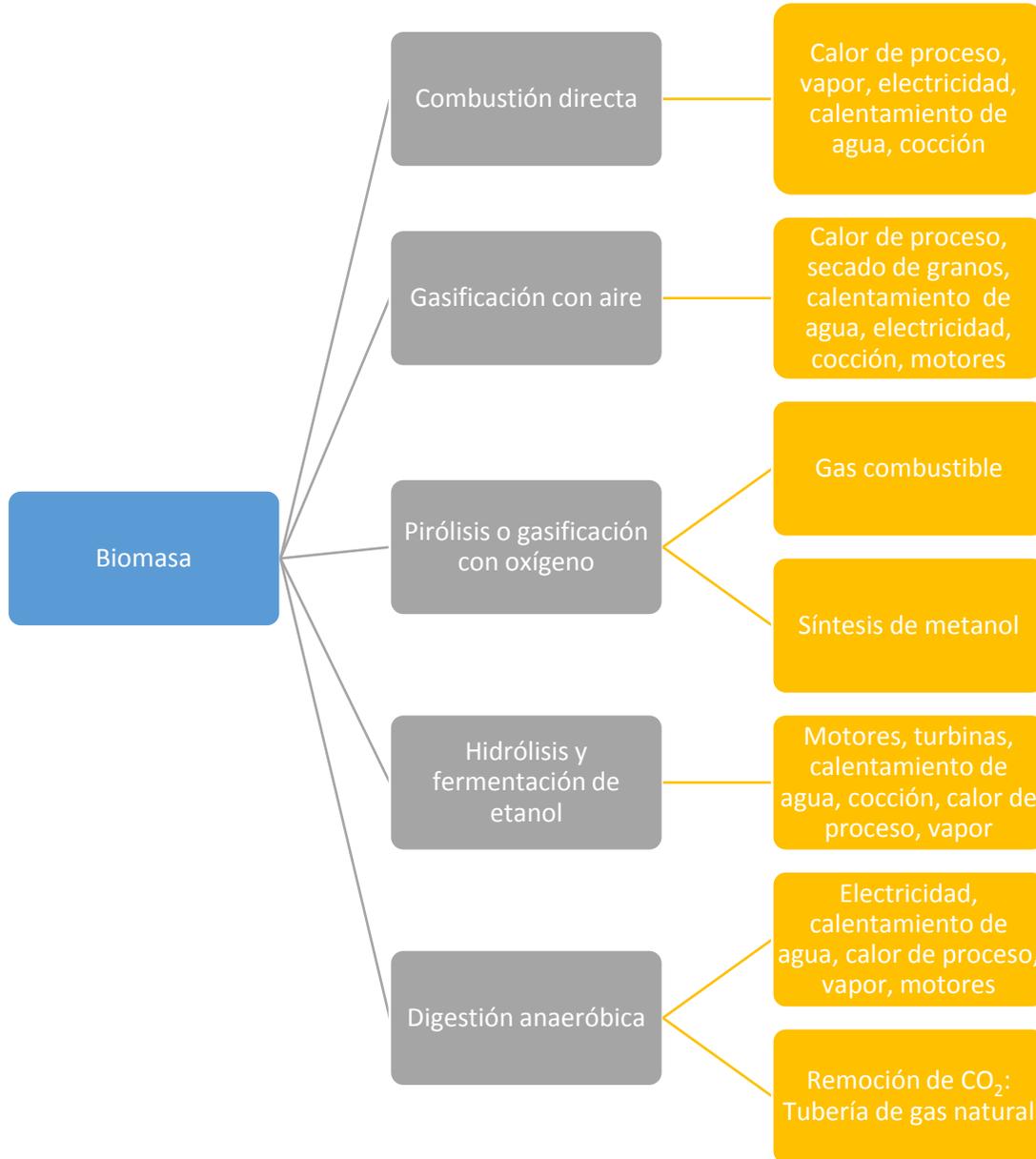


Figura 2.1. Aprovechamiento energético de la biomasa (Coordinación de Energías Renovables et al., 2008)

La capacidad de la biomasa de ser fuente de energía es extensa, por ello la Agencia Internacional de la Energía (AIE) ha desarrollado diversos proyectos sobre biomasa a través de su división IEA Bioenergy. Esta agencia calcula que el 10% de la energía primaria mundial procede de los recursos asociados a esta fuente, incluidos los relacionados con

biocombustibles líquidos y biogás. Gran parte de ese porcentaje corresponde a los países pobres y en desarrollo, donde resulta ser la materia prima más utilizada para la producción de energía, justo en aquellos países donde se prevé un mayor aumento de la demanda energética (IDAE, 2007).

La propia FAO reconoce que la mejora del uso eficiente de los recursos de la energía de la biomasa, incluidos los residuos agrícolas y las plantaciones de materiales energéticos, ofrece oportunidades de empleo, beneficios ambientales y una mejor infraestructura rural. Incluso va más allá al considerar que el uso eficiente de estas fuentes de energía ayudarían a alcanzar dos de los objetivos de desarrollo del milenio: erradicar la pobreza y el hambre y garantizar la sostenibilidad del medio ambiente (IDAE, 2007).

La biomasa, entonces, podría ser el vector energético que permitiera el desarrollo de los países pobres, evitando que el aumento del consumo energético asociado a este desarrollo pusiera en peligro el medio ambiente y la seguridad de abastecimiento energético de nuestra sociedad. Mientras esta apuesta se hace realidad, las previsiones concretas de futuro las marca, entre otros, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, estableciendo que antes de 2100 la cuota de participación de la biomasa en la producción mundial de energía debe estar entre el 25 y el 46% (IDAE, 2007).

2.1.3 Fundamentos de la gasificación

Para esta investigación se estudia el aprovechamiento de la biomasa empleando la tecnología de gasificación con aire, el cual es un proceso termoquímico de oxidación parcial en el cual sustancias con carbono (biomasa, carbón y plásticos) se convierten en gas en presencia de un agente gasificante (aire, vapor, oxígeno, CO₂ o una mezcla de estos). El gas generado, comúnmente referido como syngas (gas de síntesis), consiste principalmente de H₂, CO, CO₂, N₂ y pequeñas partículas de char (residuos de carbono sólidos), ceniza y aceites (Ruiz, Juárez, Morales, Muñoz, & Mendivil, 2013).

La versatilidad de la gasificación es que se puede usar para producir syngas, H₂ y CO, que a partir de ellos se pueden producir combustibles líquidos, polímeros y, por lo tanto, este proceso puede enfrentar la demanda de electricidad, la demanda de energía térmica y síntesis de compuestos. Añadir que el syngas generado puede ser transportado fácilmente sin perder

su gran densidad energética, permitiendo una generación de electricidad no centralizada (Ruiz et al., 2013).

Este es un proceso que ocurre a altas temperaturas (entre 500 °C y 1400 °C), a un rango de presiones desde la atmosférica hasta 3300 kPa y sigue, según Basu (2013), las siguientes etapas, que se aprecian de manera esquemática en la Figura 2.2:

- ✓ *Calentamiento y secado de sólidos:* El contenido de humedad típico de la madera fresca recién cortada está en el intervalo de 30% al 60%, y puede exceder de 90% en algunos tipos de biomasa. Cada kilo de humedad en la biomasa requiere más 2.260 kJ para vaporizar el agua, y esta energía no se puede recuperar. Cuando poco se puede hacer para secar el agua presente en el interior de las paredes celulares de biomasa se debe hacer el máximo esfuerzo para eliminar la humedad superficial. Dependiendo del nivel de humedad de la biomasa, los procesos de secado son generalmente necesarios, preferentemente antes de la entrada en el gasificador. Para la gasificación, el contenido de humedad debe estar entre 10 % y 15 %.
- ✓ *Pirólisis:* Este proceso se produce a entre 150 °C y 400 °C y se obtiene como resultado la formación de un residuo carbonoso sólido conocido como "*char*" junto con gases (condensables y no condensables). Los componentes principales de esta fase gaseosa son H₂O, CO₂, H₂, hidrocarburos y cantidades menores de otros compuestos (ácidos orgánicos). La fracción de hidrocarburo comprende metano y compuestos orgánicos conocidos como alquitranes (que son un problema por encima de una cierta concentración). La composición de esta fracción de hidrocarburos puede estar influenciada por diversos parámetros tales como tamaño de partícula, temperatura, presión, tiempo de calentamiento y tiempo de residencia.
- ✓ *Oxidación o combustión parcial:* En esta etapa algunos gases, vapor y char son oxidados por un agente de gasificación, por lo general aire. Parte del compuesto se convierte en CO, CO₂ y H₂O. La energía necesaria para las reacciones de reducción y de pirólisis se genera en esta etapa.
- ✓ *Reducción o gasificación:* Se reduce el residuo producido durante la pirólisis, ya que el

carbón o biochar se convierte principalmente en CO, CH₄ y H₂. Mencionar que el biochar de la biomasa suele ser más poroso y reactivo que el coque y su nivel de porosidad es entre 40 % y 50 %, mientras que la de carbón es de entre 2 % y 18 %.

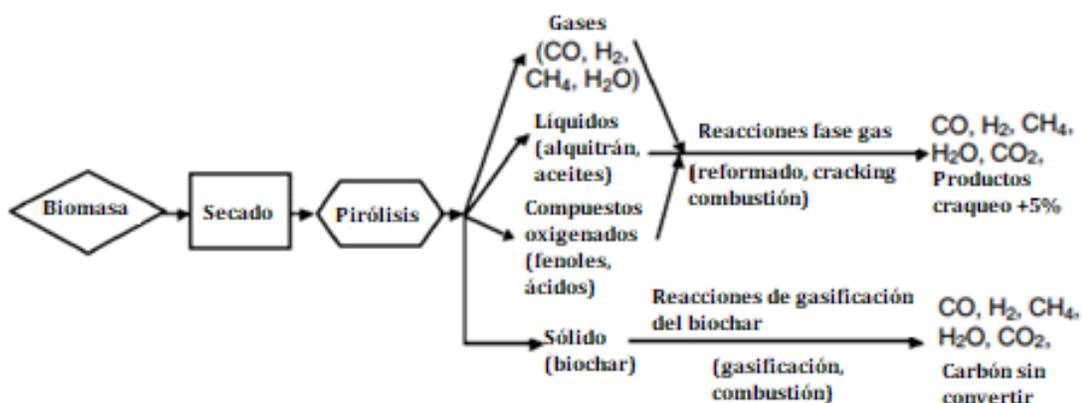


Figura 2.2 Potenciales caminos que suceden durante la gasificación de biomasa (Basu, 2013)

Es importante añadir que la gasificación y la combustión son dos procesos termoquímicos estrechamente relacionados, pero hay una diferencia importante entre ellos. Durante la gasificación se generan paquetes de energía en los enlaces químicos en el gas producto; en la combustión se rompen esos lazos para liberar la energía. El proceso de gasificación añade hidrógeno y remueve carbono de la biomasa de alimentación para producir gases con una relación donde hidrógeno es superior al carbono, es decir la relación (H/C) aumenta; mientras que la combustión se oxida el hidrógeno y el carbono en agua y dióxido de carbono, respectivamente (Basu, 2013).

Es importante mencionar que para que ocurra el proceso de gasificación se necesitan de los llamados agentes gasificantes, los cuales reaccionan con carbono sólido y los hidrocarburos más pesados para convertirlos en los gases de bajo peso molecular como CO y H₂. Los principales agentes gasificantes utilizados para gasificación, según Basu (2013), son: Oxígeno, Vapor y Aire.

El aire es el agente gasificante más utilizado, debido a la gran disponibilidad y costo nulo, pero, debido a la gran cantidad de nitrógeno, no sólo requiere mayor potencia en los sopladores y un equipo más grande, pero sobre todo disminuye el valor calorífico del gas de síntesis producido. El oxígeno puro, evitando el contenido de nitrógeno, aumenta el poder

calorífico del gas de síntesis, pero también los costos de operación debido a la producción de O₂. Utilizando vapor, el cual posee gran disponibilidad y un costo bajo, aumenta el valor de calentamiento y el contenido de H₂ de gas de síntesis, y puede producirse usando el exceso de calor de la planta de energía (Bocci et al., 2014).

2.1.4 Tipos de reactores para gasificación

Los gasificadores se pueden dividir en dos grandes familias: de lecho fijo (del que se deriva el lecho móvil) y lecho fluidizado. Según Bocci et al. (2014), dentro de los gasificadores de lecho fijo, es posible distinguir las siguientes configuraciones:

- Corriente ascendente (“Updraft” o contracorriente): cuando la biomasa se mueve desde la parte superior y el agente de gasificación desde la parte inferior.
- Corriente descendente (DD-“Downdraft” o concurrente): cuando la biomasa y el agente gasificante se mueven juntos desde la parte superior a la parte inferior del reactor.
- Contracorriente (“crossflow”), cuando la biomasa se mueve hacia abajo y el agente se alimenta en ángulo recto.

En los gasificadores de lecho fluidizado (“*Fluidized Bed*”) el combustible sólido, mezclado con el material caliente de la cama (arena inerte, catalizador), se mantienen en un estado semi-suspendido (estado fluidizado) mediante el cual el medio gasificar pasa través de ellos a la velocidad adecuada, llamada velocidad de fluidización mínima. A diferencia del gasificador de lecho fijo, debido a la intensa mezcla de gas-sólido, las diferentes zonas de secado, pirólisis, oxidación y reducción, no puede ser distinguidas (Bocci et al., 2014).

Reactor de lecho descendente o “downdraft”

Para evaluar la incidencia de la geometría de la biomasa alimentada se utilizó un reactor downdraft, en el cual, como se aprecia en la Figura 2.3, la biomasa se alimenta desde la parte superior y cae hacia abajo, mientras se inyecta aire desde un lado y se mezcla con los productos de la pirólisis. A partir de esta etapa los dos gases y los sólidos (carbón y cenizas) se mueven hacia abajo en corrientes paralelas a través del reactor. Parte del gas generado durante la pirólisis puede ser quemado en la zona de gasificación. Así, la energía térmica necesaria para el secado, pirólisis y la gasificación es proporcionado por la combustión de gas producido

durante la pirólisis. A esto se le conoce como llama pirolítica. Este arreglo significa que el gas producido contiene menos alquitrán, pero también posee menos poder calórico debido a los gases pirolíticos que se queman para proporcionar la energía requerida para las reacciones endotérmicas (Basu, 2013).

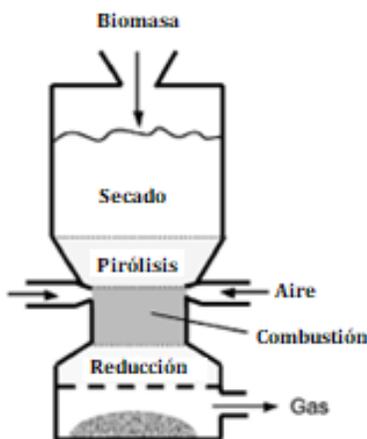


Figura 2.3. Esquema general de un reactor downdraft de garganta tipo V para procesos de gasificación de biomasa (Basu, 2013)

Debido a que los gases salen de la unidad de gasificación a temperaturas alrededor de 900 °C a 1000 °C, la eficiencia energética global de un gasificador “*downdraft*” es baja, debido al alto contenido de calor que porta el gas producido. Este tipo de gasificadores se utilizan generalmente para la generación de electricidad a pequeña escala con un motor de combustión interna; no son adecuados para escalas de hasta tamaños que generen más de 1 MW, ya que no permiten una distribución uniforme del flujo y de la temperatura en la zona estrechada (garganta) (Bocci et al., 2014).

Una modificación importante del diseño de un reactor de lecho descendente es el área de sección transversal que se reduce en la garganta (también llamado constricción) y luego se expande, como se muestra también en la Figura 2.3. El propósito es que la zona de oxidación (combustión) sea la sección más estrecha de la garganta y así obligar a todo el gas producido durante la pirólisis a pasar a través de este estrecho pasaje. Se inyecta aire a través de boquillas justo por encima de la constricción. La altura de la inyección es alrededor de un tercio de su altura desde la parte inferior. El aire piroliza la biomasa y quema el producto de pirólisis o algún carbón. El carbón caliente y el producto de pirólisis pasan a través de la garganta, donde la mayor parte del alquitrán está agrietado y el carbón se gasifica (Basu, 2013).

Entonces en un reactor downdraft de garganta la biomasa, junto con el oxidante, es forzada a pasar a través de una constricción (garganta) donde la mayoría de las reacciones de gasificación se producen. Los productos de reacción se mezclan íntimamente en la región de alta temperatura turbulenta alrededor de la garganta (1100 °C -1200 °C), que ayuda al craqueo del alquitrán. Esta configuración resulta en un gas relativamente limpio de alquitrán (<10 g / Nm³), incluso si las partículas en gas pueden ser altas. El tiempo de residencia de la biomasa es alto, lo cual conduce a una conversión elevada de char ($\approx 95\%$)(Basu, 2013).

2.1.5 Perfiles de térmicos en reactor "downdraft"

Conocer los perfiles térmicos dentro de un reactor de gasificación provee información que predice la tasa de conversión de la biomasa y de esa manera cuantificar la eficiencia durante el proceso. Un esquema del perfil térmico de un reactor downdraft se aprecia en la Figura 2.4 según los resultados del trabajo de Janajreh & Al Shrah (2013), donde evaluaron el comportamiento de un gasificador de corriente descendente comercial a escala de 10-20 kW con astillas de madera (como el empleado para este proyecto de graduación), y en el cual se utilizó también un modelo CFD para predecir las temperaturas del lecho. Teóricamente, el perfil de temperatura que se aprecia en la figura representa el efecto neto de las reacciones endotérmicas y exotérmicas que coincide con la tendencia esperada y también coincide con la evolución de la temperatura esperada predicha por la termogravimetría parcela experimental TG-DSC para el balance de calor en una sola partícula de madera (Janajreh & Al Shrah, 2013).

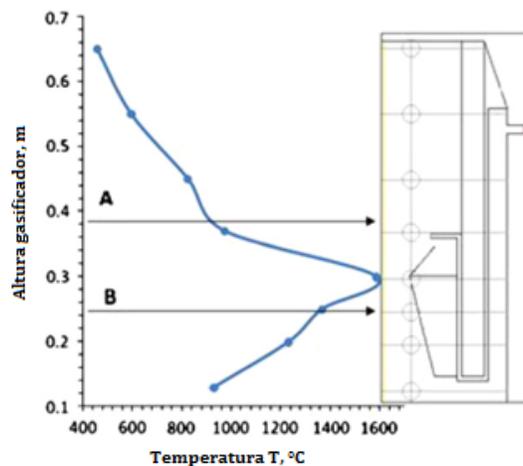


Figura 2.4. Perfil de temperatura axial CFD a 4 cm de distancia desde el eje del gasificador que muestra la ubicación correspondiente de los puntos calculados a lo largo de la altura gasificador (Janajreh & Al Shrah, 2013)

En este perfil se detalla un punto A que representa el final de la zona de pirólisis a aproximadamente 800 °C. Además de un punto B que representa el final de la zona de desvolatilización o combustión a aproximadamente 1300 °C, donde las sustancias volátiles son liberadas justo encima de la salida de la boquilla de aire. Se aprecia además que existe una zona de liberación de calor significativa seguida de una disipación de calor en la zona de desvolatilización o combustión.

Esta la liberación de calor puede ser debido a las reacciones exotérmicas de volátiles muy ligeros que fueron lanzados a temperaturas más bajas. Por lo tanto, la disipación de calor puede estar relacionado con la naturaleza endotérmica de las reacciones de combustión. Como era de esperar, la temperatura más alta se encuentra en frente de la boquilla de aire, donde se realiza la combustión a altas concentraciones de oxígeno. Esto corresponde a la zona de combustión que se extiende desde aproximadamente 1000 °C hasta 1500 °C en la garganta del gasificador. Finalmente, los gases calientes se reducen por el char sin reaccionar que queda en la zona de gasificación/restricción a aproximadamente 1000 °C (Janajreh & Al Shrah, 2013).

2.2 Parámetros requeridos para evaluar desempeño de un gasificador

Caracterizar el desempeño de la operación de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de un proceso de gasificación de biomasa empleando un reactor de lecho descendente o “downdraft” requiere, según Torres, Molina, Hernández, & Urvina (2016), de la obtención de razones, rendimientos y eficiencias que se muestran el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Parámetros requeridos para evaluar el desempeño de un gasificador de biomasa (Torres et al., 2016)

Parámetro	Descripción
Conversión de carbono	La razón entre el carbono remanente en el sistema en cenizas más alquitrán y el carbono que ingresa al sistema en la biomasa alimentada. Esto, pues bajo condiciones de gasificación típicas, una porción del carbono que entra con la biomasa abandona el reactor sin convertir a fase gaseosa.

Cuadro 2.1 (continuación). Parámetros requeridos para evaluar el desempeño de un gasificador de biomasa (Torres et al., 2016)

Parámetro	Descripción
Razón biomasa/agente oxidante	Se define como la razón entre el flujo de biomasa seca que ingresa al sistema y el flujo de oxígeno que ingresa al sistema de reacción. Lo cual indica la capacidad del agente gasificante, el oxígeno, para lograr la conversión termoquímica alcanzada de la biomasa que ingresa al reactor.
Razón equivalente	Es la razón entre el flujo de aire que ingresa al sistema y el flujo de aire requerido para una combustión estequiométrica de la biomasa, lo cual indica el grado de combustión parcial, esencial para evaluar el desempeño de la oxidación de la biomasa como fuente de energía para el proceso de reducción dentro del reactor.
Rendimiento eléctrico base húmeda	Se define en este trabajo como la potencia real generada en una hora, entre el flujo de biomasa consumido en el mismo período a una condición de operación dada, las unidades son kWh/t (Energía entregada por tonelada de biomasa húmeda). La magnitud de este valor funciona para estimar cantidades requeridas de biomasa para satisfacer una demanda energética empleando un sistema de gasificación similar.
Rendimiento de syngas	La razón entre el flujo de syngas producido en kg/h y el flujo de biomasa alimentada también en kg/h. Las unidades son kilogramo de biomasa por kilogramo de biomasa. Indica la capacidad de conversión de la biomasa en el gas producto o syngas, una magnitud necesaria para definir la viabilidad operativa del proceso.
Eficiencia térmica global	Es un parámetro que permite conocer el desempeño de conversión de la energía térmica disponible a electricidad, por tanto, se define como el porcentaje de potencia eléctrica generada en MJ/h, según el contenido energético de la biomasa también en MJ/h.

Cuadro 2.1 (continuación). Parámetros requeridos para evaluar el desempeño de un gasificador de biomasa (Torres et al., 2016)

Parámetro	Descripción
Eficiencia de gas frío	<p>Se define como el porcentaje del contenido energético de la biomasa y el contenido energético del syngas en porcentaje.</p> <p>Este parámetro indica la capacidad del sistema de reacción para aprovechar la energía disponible en la biomasa y transformarla en energía disponible en el gas producto.</p>
Eficiencia de motor/generador	<p>El porcentaje de energía entregada por la unidad en MJ/h con respecto al contenido energético del syngas producido en MJ/h que ingresa al motor. Se obtiene al dividir la eficiencia térmica global entre la eficiencia de gas frío. Esta eficiencia indica la capacidad de aprovechamiento energético del motor y generador que acarrea el syngas para ser convertido en energía eléctrica fija y estable.</p>

2.3 Gasificación de madera: oportunidad para desarrollo

La generación de electricidad con madera y sus residuos no afectaría las zonas protegidas o agrícolas del país, según Lara, Arias, & Villalobos, (2017), porque la materia prima vendría de las 80.000 hectáreas de plantaciones forestales existentes en Costa Rica, donde los residuos de la producción maderera suelen estar disponibles y ociosos en los propios terrenos donde crecen los árboles. Esto, pues cuando se tala un árbol para producción de madera se pierde casi 40% de este en el proceso. Esos residuos se quedan en las plantaciones y serviría en esta forma de generación. Hoy nada más se descomponen sobre la tierra.

Incluso la siembra de árboles para generación posee ventajas, pues algunas especies de árboles autóctonas tienen capacidad de retoño desde el primer corte de la madera. Esto hace innecesario nuevas siembras de árboles. El corte, además, puede repetirse cada 12 meses cuando ya es posible volver a sacar madera y así asegurar un suministro estable. Hay alrededor de 20 tipos de árboles aptos para biomasa seca en el país donde, entre las maderas más

promisorias, figuran la teca, el eucalipto, el madero negro y la melina; entre otras (Lara et al., 2017).

Esta iniciativa está siendo abordada por el Instituto Tecnológico de Costa Rica, la cual atrae la atención del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) debido a que la biomasa seca se puede almacenar; constituyendo así una base de generación más firme y estable respecto a la solar (fotovoltaica) o eólica (viento). Sin embargo, tiene que darse algún tipo de acuerdo, a nivel nacional para dar apertura y confianza a la biomasa que tiene gran oportunidad como energía firme. Con este proceso se puede almacenar la fuente por meses de forma que quien genera su energía térmica o eléctrica puede eludir cualquier faltante (Lara et al., 2017).

Lara et al., (2017) señalan que esta forma de biomasa seca tiene clara vocación para autoconsumo en distintos sectores productivos (agrícola, comercial e industrial) siempre y cuando pueda asegurarse un suministro estable de materia prima a quien decida importar un gasificador e invertir en este proceso. Además, en el reporte, se menciona que en el futuro inmediato, las primeras empresas llamadas a una transformación son aquellas del sector agroindustrial, hotelero y hospitalario y toda aquella organización que utilice calderas que puedan ser convertidas al uso de biomasa.

La biomasa, como fuente de generación, tiene mucho más potencial del que hoy se está aprovechando en Costa Rica donde esta aporta solo 1,7% del total de la energía nacional según datos del Centro Nacional de Control de Energía (CENCE). Lara et al., (2017) mencionan que este cultivo de árboles representa una oportunidad de negocio más en el sector forestal para aquellos terrenos marginales que están sin uso o hectáreas ociosas en zonas donde ya hayan siembras agrícolas. De esta forma, se supone que la actividad no competiría por terreno con la producción agrícola, ni presionaría zonas silvestres.

El Tecnológico de Costa Rica ya ha sumado a empresas y organizaciones que tienen plantaciones de árboles entre las cuales están el Ingenio Taboga (Guanacaste), la empresa Puro Verde (Alajuela), Maderas Cultivadas (Cartago), el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en Turrialba, Coopetarrazú (Dota) y la Universidad Nacional (UNA), entre otras. Max Cerdas López, coordinador de vinculación y asesoría del Consejo Nacional para Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT) también ve en que

proyecto puede generar altos réditos al país con una alternativa energética cuyos beneficios se sientan en comunidades por todo el territorio; especialmente las rurales.

Detallar, que en Costa Rica la empresa Pelletics Energía Renovable, es la principal productora de biomasa como combustible renovable sólido, hecho a base de desechos del agro que se utiliza como fuente de energía en calderas, quemadores industriales, calefacción, entre otros. Comercializan tanto astillas de madera como pellets que elaboran con subproductos de la industria maderera (Pelletics, 2016).

Potencial: Según el Plan de Expansión de la Generación Eléctrica 2016-2035 del ICE, la biomasa como fuente de generación tiene un potencial identificado de 445 MW de los cuales, en instalados, solo hay 9 % (45 MW).

Esto corresponde sobre todo a generación a base del bagazo de ingenios azucareros, aunque también hay biomasa con residuos húmedos del cultivo de piña, café, banano, palma aceitera, arroz, sector pecuario y la industria forestal. No obstante, su utilización aún puede crecer. El sector industrial usa intensivamente los combustibles fósiles, que cubren el 33% de sus necesidades, para la generación de calor y vapor según el documento. El 50% del consumo de ese sector proviene de biomasa (residuos vegetales y leña), utilizado en su mayor proporción por la industria de producción de alimentos (Lara et al., 2017).

3. GEOMETRÍA DE LA BIOMASA

3.1 Astillas de madera

El tipo más común de biomasa utilizado en los sistemas de transformación térmica (calderas y gasificadores) es la madera astillada o astillas (Figura 3.1), el cual es un subproducto que normalmente proviene de aserraderos. Hay muchas fuentes de madera de las cuales se obtiene este tipo de combustible, ya que existen muchas maneras en que la madera puede ser cosechada, procesada, cargada, transportada y recibida, aunque cada fuente determina la calidad general de la astilla combustible. Las características más importantes para caracterizar las astillas de madera para ser considerado como combustible son el contenido energético, contenido de humedad, forma, tamaño y uniformidad del chip; además de su contenido de cenizas y la presencia de suciedad y otros desechos (BERC, 2011).



Figura 3.1. Ejemplo de astillas (chips) de madera (Raid, 2017)

Para este trabajo se utilizaron astillas de árbol entero, las cuales varían ampliamente en tamaño debido a la naturaleza inconsistente del material alimentado a la astilladora, el cual consiste en ramas, corteza, tronco, entre otros. En general son un combustible de calidad inferior, con respecto a los fósiles, debido a un contenido más alto de la ceniza y una forma, un tamaño y humedad poco uniforme. Además, en procesos donde se restringe el tamaño de partícula, la presencia de "largueros", astillas largos (de hasta 10 cm-12 cm de longitud), puede causar atascos en el sistema de alimentación si el equipo es de tamaño insuficiente (BERC, 2011).

3.1.1 Proceso de trituración de la madera

El sistema de producción de astillas forestales consiste en una secuencia de operaciones individuales para procesar la biomasa y convertirla en un combustible comercial

y transportarlo desde la fuente hasta la planta de proceso. Este sistema se construye alrededor de la fase de trituración, ya que la posición de la astilladora o trituradora en la cadena de adquisiciones determina en gran medida el estado de la biomasa durante el transporte y, en consecuencia, si las máquinas subsiguientes dependen entre sí. La fragmentación puede tener lugar en la fuente, al lado de la carretera, en una terminal o en la planta donde se van a usar las astillas. Existen cuatro sistemas de producción alternativos según el Programa de Tecnología Energética de la Madera que se representan en el diagrama de la Figura 3.2 (Kärhä & Oy, 2011).

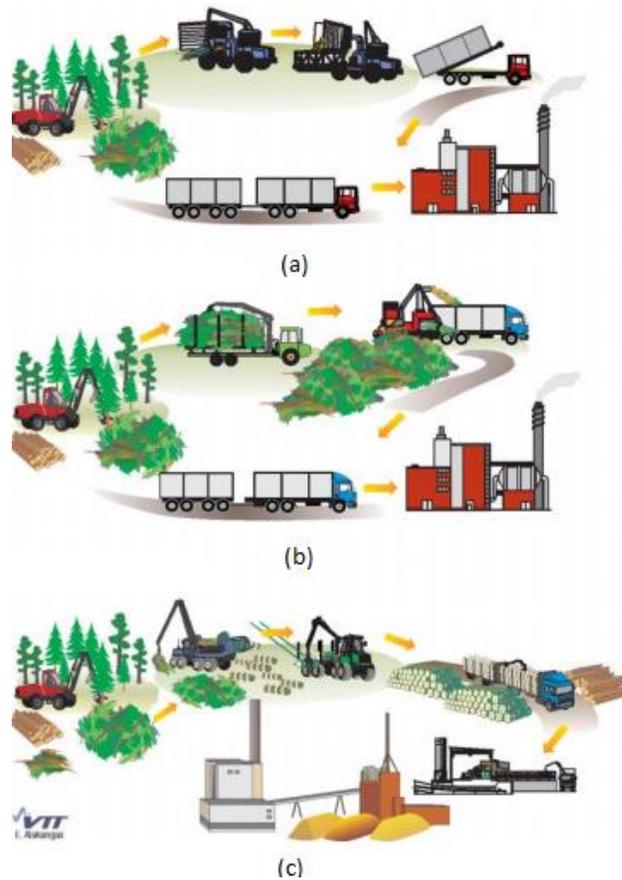


Figura 3.2. Alternativas de proceso de producción de astillas de madera. Trituración en (a) terreno (b) terminal (c) planta

Trituradoras de madera

Independientemente del tamaño o la marca, los trituradores de madera funcionan de la misma manera: un motor interno, ya sea un motor eléctrico o un motor de combustible fósil, alimenta el dispositivo, una caja de cambios que utiliza poleas y correas trapezoidales permite conectar al motor con conjunto de cuchillos. (la polea permite al motor controlar la velocidad

a la cual estas cuchillas giran y la correa aporta la potencia del motor). Los trituradores de madera tienen típicamente dos conductos separados para procesar la madera; el primer conducto, el más pequeño de los dos, fragmenta las ramas en virutas, el segundo canal, más grande, tiene cuchillas y dispositivos adicionales, como martillos, para convertir el exceso de material vegetal (como las hojas) en polvo. Basándose en el tipo de cuchillas dentro de la astilladora, se puede determinar el tipo y grosor de la madera que la astilladora será capaz de procesar. Típicamente, cuanto más grande es la máquina de astillado de madera, mayor es la carga que puede soportar (ThomasNET, 2012). Existen varios tipos de mecanismos de trituración:

1. Trituradora de tambor

Los trituradores de tambor reciben su nombre debido al gran tambor motorizado ubicado en el centro de la máquina, como se aprecia en la Figura 3.3. El tambor atrae material, como un alimentador, mientras triturado se mueve hacia el conducto de salida. El proceso es muy rápido y fuerte, y conlleva riesgos de seguridad significativos debido a que el tambor y el motor están conectados directamente, así, cualquier tipo de atasco de tambor puede afectar al motor, haciendo que este se detenga y trozos de madera queden alojados en este. Además, los operadores deben tener cuidado al alimentar a la máquina para que la ropa o apéndices no sean atrapados por el tambor (ThomasNET, 2012).



Figura 3.3. Esquema general de un triturador de madera de tambor (Carlton-Inc, 2015)

2. Trituradora de discos

Una astilladora de discos presenta un disco, típicamente de acero, con cuchillas de corte unidas. El material se extrae de la tolva a través de ruedas hidráulicas, y luego se mueve hacia

el disco giratorio. A medida que el disco gira, las cuchillas encuentran la madera y el material es cortado en astillas. Las trituradoras de disco industriales pueden poseer un disco de hasta 4 m de diámetro, con un motor entre 3.000 kW hasta 3.700 kW. Las trituradoras comerciales de esta tecnología suelen tener una capacidad de diámetro de material de (15-45) cm c. En la Figura 3.4 se muestra un esquema general de este tipo de triturador de madera.

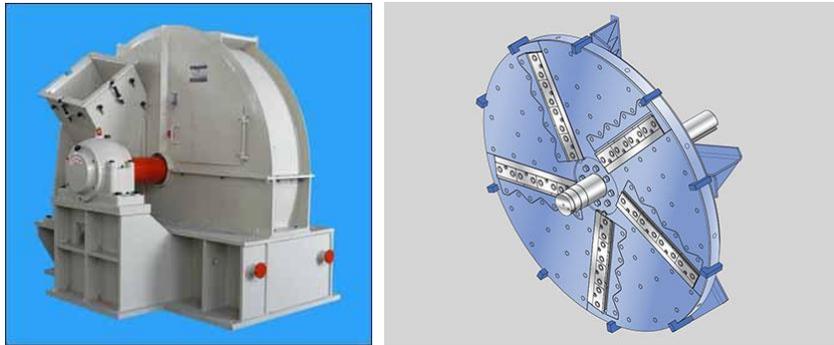


Figura 3.4. Esquema general de una trituradora de madera de discos (Carlton-Inc, 2015)

3. Rodillo de alto torque

Los rodillos de alto torque tienden a ser de baja velocidad. Debido a que también son accionados por un motor eléctrico son silenciosos, lo que los convierte en una opción popular para aplicaciones residenciales. Además, se autoalimentan, y algunos ofrecen características anti-jamming (ThomasNET, 2012).

4. Otros

Las máquinas más grandes que se usan en el procesamiento de la madera, a menudo llamadas "molinos de tina", pueden manejar hasta un largo de material de 73 m o más, al usar martillos con punta de carburo para pulverizar la madera en lugar de cortarla. Estas máquinas suelen tener entre 200 caballos de fuerza (150 kW) hasta 1.000 caballos de fuerza (750 kW). Algunos ejemplos de estas maquinarias utilizadas para obtener astillas de madera se muestran en la Figura 3.5 (ThomasNET, 2012).



Figura 3.5. Ejemplos de maquinaria utilizada para triturar la madera en campo (ThomasNET, 2012)

3.1.2 Empresas proveedoras de tecnología para triturar madera

En el Cuadro 3.1 se muestran empresas proveedoras de tecnología necesaria para realizar un proceso de trituración industrial de madera para obtener astillas o astillas como los empleados para esta investigación.

Cuadro 3.1. Empresas proveedoras de tecnología para producir energía a partir de astillas de madera

Empresa	Ubicación	Descripción
FarmAgro	San José, Costa Rica	Proveedor de astilladoras de troncos y ramas. Proveedor principal del país de maquinaria industrial y comercial marca STIHL.
Rosal Instalaciones Agroindustriales SA	Santa Perpetua, España	Empresa fundada en 1975 y dedicada a la manufactura de equipos, así como la construcción completa de plantas destinadas al procesamiento y reciclaje de todo tipo de biomasa.
Shandong Double Crane Machinery Manufacture Co Ltd	Jinan, China	Ofrece equipo para el granulado de biomasa tal como madera o desechos agrícolas para su uso en equipo térmico de biomasa.
Cobtech Renewables	Australia	Desde el 2014 es una empresa distribuidora de equipo de calidad para sistemas de calentamiento y potencia de uso agrícola, comercial, doméstico e industrial operados con biomasa. Además de micro plantas de vapor de 5200 kW.

Cuadro 3.1 (continuación). Empresas proveedoras de tecnología para producir energía a partir de astillas de madera

Empresa	Ubicación	Descripción
Vecoplan AG	Bad Marienberg, Alemani	Es una empresa pionera en el desarrollo de tecnologías de trituración para las industrias del plástico, madera papel y de desechos. Sus productos constan principalmente de trituradoras.

3.2 Pellets de madera

3.2.1 *Densificación*

El empleo energético de la biomasa forestal residual, como las ramas y troncos de madera, tiene una serie de desventajas con respecto a otros combustibles como son su baja densidad y dificultad de manejo, ya que mientras un combustible fluido es fácil de transportar y de manejar, residuos madereros, por ejemplo, no son susceptibles de ser aprovechados en una caldera, y sus usos se reducen a sistemas tradicionales, como las chimeneas (González, 2012).

Una de las posibilidades que se plantean para evitar este tipo de problemas es la densificación de la biomasa, es decir, su compactación para la obtención de productos combustibles densificados con un alto poder calorífico, y que sean homogéneos tanto en propiedades como en dimensiones, un ejemplo de estos se aprecia en la Figura 3.6. Entonces, la densificación de biomasa (también llamado pelletización) es un proceso de aplicación de una fuerza mecánica a los residuos de biomasa, como aserrín, afeitado, astillas o placa, para compactarlos en partículas sólidas de tamaño uniforme, tales como pellets, briquetas y troncos. Los objetivos de la densificación de la biomasa son: aumentar la densidad volumétrica de (40-200) kg/m³ a una final de (600-1.400) kg/m³, para facilitar el almacenamiento, la manipulación, el costo de transporte, y para disminuir el contenido de humedad (McMullen, 2005).



Figura 3.6. Ejemplo de pellets de madera (Quiñones, 2016)

Es importante añadir que la calidad de pellets depende fuertemente de las fuentes de fibra, tamaño de partícula, contenido de humedad de las partículas, la temperatura de las partículas, la velocidad de alimentación de biomasa, tamaño y forma del molde, la velocidad de compactación y la temperatura del moldeo (Bissen, 2009).

Emplear este tipo de biomasa viene de mano con el esfuerzo por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y con el aumento de los precios del petróleo y de gas natural, los cuales conducen al rápido crecimiento de la industria de pellets de madera en el mundo. Actualmente, pellets de madera son considerados como una fuente de energía renovable transportables importante (Chen, Peng, & Bi, 2015).

3.2.1 Proceso de densificación

El pelletizado consiste en aplicar presión (entre 1100 kg/cm² a 2500 kg/cm² dependiendo de las características de las especies de madera utilizadas) sobre un material, en este caso lignocelulósico, mediante una serie de rodillos (de uno a seis) situados en una matriz metálica dotada de orificios de salida de calibre variable (de 5 mm. a 25 mm.). La presión ejercida por los rodillos, unida al rozamiento del material con la matriz y sus orificios de salida, provoca su calentamiento y aglomeración forzada del material como se demuestra en el diagrama de la Figura 3.7.

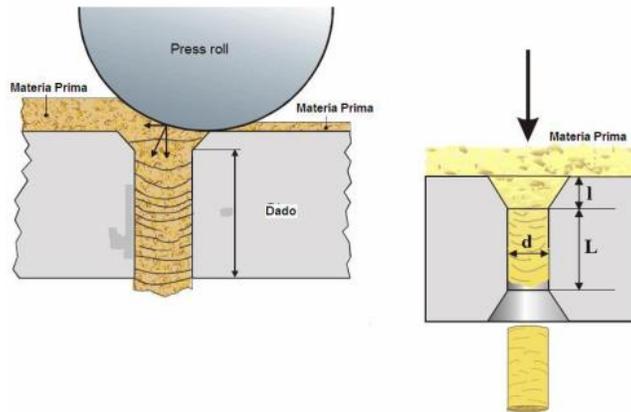


Figura 3.7. Proceso de pelletización de biomasa (Gonzáles, 2012)

Los residuos biomásicos deben ser previamente acondicionados (secados y triturados: con una granulometría adecuada entre 0,5 mm. hasta 15 mm. y un contenido de humedad entre 45 %-55 %). A la salida de los orificios existen unas cuchillas que cortan según la longitud deseada, normalmente entre 35 mm. y 65 mm. El diagrama del proceso industrial de densificación se aprecia en la Figura 3.8 (Gonzáles, 2012).

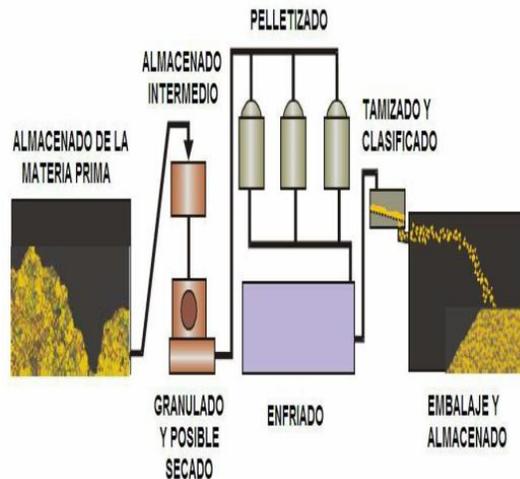


Figura 3.8. Etapas de un proceso industrial de pelletización (Gonzáles, 2012)

La temperatura, junto con la humedad son los factores cuyos efectos sobre el proceso de densificación son más acentuados. La aplicación de calor a un material densificado confiere a éste una mayor cohesión, necesitándose una presión mínima para obtener la densidad deseada. La hipótesis que justifica la acción de la temperatura se basa en las características de las ligninas: a temperaturas comprendidas entre los 80 °C y 200 °C, según las materias estudiadas, la lignina se reblandece, modifica su estructura y tras su enfriamiento, asegura una

mayor unión de las partículas. En este sentido la lignina es considerada como una cola termoplástica natural (González, 2012).

Pelletizadoras de madera

1. Pelletizadoras de matriz plana:

La matriz (superficie donde la biomasa es presionada) es fija y tiene la forma de un disco horizontal, mientras que los rodillos recorren la cara superior. En muchas pelletizadoras de matriz plana el material se dosifica verticalmente desde arriba a la cámara de prensado y se forma una capa sobre la matriz; los rodillos pasan sobre esta capa y la compactan, como se aprecia en la Figura 3.9. La presión aumenta continuamente, a medida que el rodillo va llevando el material hacia el canal de compactación, hasta tal punto que el material que se encuentra dentro del canal va siendo desplazado poco a poco y termina saliendo por el lado inferior de la matriz (González, 2012).



Figura 3.9. Esquema general de una pelletizadora de matriz plana (González, 2012)

2. Pelletizadora de matriz anular

En este equipo la forma de la matriz es anular o en anillo, como se observa en la Figura 3.10. Dentro de este tipo de prensa existen dos variantes, en el primero la matriz anular es fija y los rodillos, también llamados discos, animados de un movimiento giratorio, empujan la materia a través de las numerosas hileras; en el segundo los rodillos son fijos y es la matriz la que gira a alta velocidad (González, 2012).

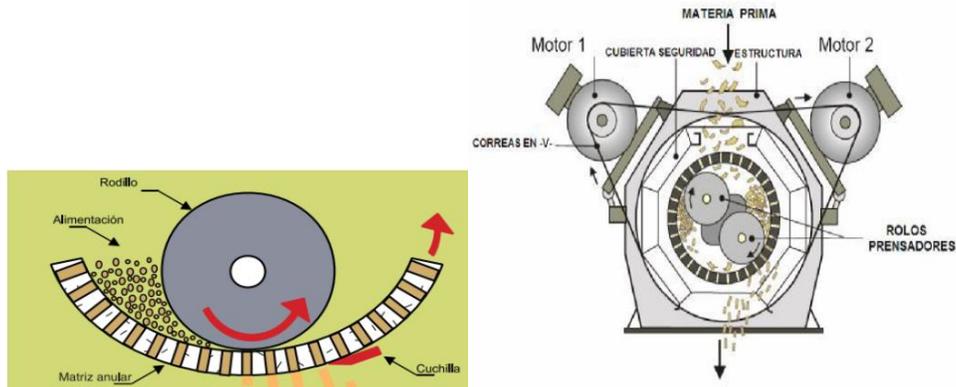


Figura 3.10. Esquema general del funcionamiento de una pelletizadora de matriz anular (González, 2012)

La mayoría de las pelletizadoras de matriz anular son de construcción vertical, al igual que las de matriz plana, pudiendo igualmente ser la parte móvil los rodillos o la matriz. Además, existen algunos modelos en los que los rodillos están rodando y la matriz también como consecuencia de las fuerzas de rozamiento. La fuerza de rozamiento es transmitida por el material que va a ser pelletizado. A parte de esta diferencia con respecto a las pelletizadoras de matriz plana, cabe destacar también que este tipo de pelletizadoras presentan menor número de rodillos (de 1 a 3) (González, 2012).

3.2.2 Empresas proveedoras de tecnología para pelletizar biomasa

Análogamente en el Cuadro 3.2 se incluye información importante de proveedores de tecnología para densificar/pelletizar biomasa.

Cuadro 3.2. Empresas proveedoras de tecnología para densificar o producir energía a partir de biomasa

Empresa	Lugar	Descripción
Nishant Bioenergy Pvt	Chandigarh, India	Empresa dedicada a la manufactura y venta de equipo para la fabricación de pastillas de biomasa, así como de estufas para cocción y quemadores alimentados por medio de estas pastillas.
Agripellets Ltd	Alcester, Reino Unido	Empresa dedicada a la fabricación y venta de pastillas de biomasa elaboradas a partir de desechos agrícolas de alto contenido energético para uso doméstico o de oficinas comerciales.

Cuadro 3.2 (continuación). Empresas proveedoras de tecnología para densificar o producir energía a partir de biomasa

Empresa	Lugar	Descripción
Whirlston Pellet Machinery	Zhengzhou, China	Empresa que ofrece plantas para el procesamiento y producción de pastillas de biomasa con equipos tales como secadores de biomasa y empastilladores de la misma.
Allance Pellet Machinery	Zhengzhou, China	Se dedica a la fabricación y venta de equipo utilizado en la granulación de todo tipo de material crudo para obtener pastillas de biomasa
Gemco Pellet Mill	Anyang, China	Empresa dedicada a la venta de equipo para la producción de pastillas de biomasa, así como la instalación de plantas completas para dicho fin.
Guangzhou Pengfa Biomass Energy Equipment	Guangzhou, China	Empresa dedicada a la instalación y puesta en marcha de plantas de producción de pastillas de biomasa de cualquier origen, tales como madera, desechos agrícolas, etc.

3.3 Factor geometría de la biomasa forestal

El tamaño de la biomasa es un factor que necesita ser considerado en un proceso de gasificación, pues el tamaño, forma y densidad de las partículas de la biomasa influyen en su transporte, fluidización, velocidades de secado y su descomposición térmica (Rezaei, Lim, Lau, & Sokhansanj, 2016). Pérez, Melgar, & Benjumea, (2012) llevaron a cabo un experimento con un reactor *downdraft* y se encontró que la biomasa (corteza de pino) se comporta de manera diferente de acuerdo con su tamaño. Un aumento de tamaño de las partículas dio lugar a menores tasas de consumo de biomasa, relaciones de combustible/aire y temperaturas máximas del proceso. En particular, cuando el tamaño de partícula aumenta, la densidad aparente de la biomasa (combustible sólido por volumen de lecho) se reduce y el proceso tiende a combustión que se nota por un aumento de las concentraciones de CO₂ y N₂ en el gas de productor.

Con respecto a la utilización de biomasa en forma de pellets, se ha evidenciado que su gasificación en reactores de lecho descendente o *downdraft* provoca que la productividad y la

estabilidad disminuyan debido al aumento de las pérdidas de carga. Sin embargo, el gas de síntesis producido tiene una buena composición (H_2 17,2%, N_2 46,0%, CH_4 2,5%, CO 21,2%, CO_2 12,6% y C_2H_4 0,4%), además la cantidad de gas de síntesis producido por kilo de biomasa es alta (de 2.2 hasta 2.4 Nm^3/kg) y la eficiencia en frío también es alta (67,7 % a 70,0%). El uso de esta biomasa, entonces, se propone como un suplemento a otros combustibles para mejorar el contenido de energía por unidad de volumen del gas de síntesis y reducir los efectos de humedad promedio (Šulc et al., 2012).

Gambles, Bridwater & Kuester, (1988) concluyeron que no hay ningún problema en la gasificación de pellets de madera y astillas si su contenido de humedad está dentro de límites razonables y si su tamaño está adaptado a las dimensiones del reactor. Se puede decir que los pellets de buena calidad tienen un buen comportamiento produciendo syngas. Si su cohesión es buena: no se desmoronan, el cual es un factor importante que considerar para efectos de transporte de los sólidos dentro del reactor. Pero pellets de mediana y baja calidad no tiene el mismo comportamiento, los pellets de media calidad pueden resistirse un poco a las duras condiciones de gasificación, pero progresivamente se desmoronan y obstruye la salida del gasificador o no pueden resistir la caída por el reactor. Además, inducen una alta caída de presión tan rápida que impide que el gas pase a través del reactor. Esto demuestra claramente que sólo muy buenos productos densificados tienen la oportunidad de ser gasificado con éxito como bloques de madera y virutas.

Por lo tanto, se ha encontrado que existe la posibilidad que ocurran problemas cuando los combustibles destinados a ser gasificados son productos densificados. Sus características físico-químicas influyen fuertemente en el proceso de gasificación, por lo tanto, se recomiendan pruebas de laboratorio rápidas donde se puedan señalar fácilmente si la biomasa tiene una buena cohesión o no. Si esto último no es suficiente, el producto densificado no tiene posibilidad de gasificarse con éxito (Gambles, Bridwater, Kuester, 1988).

4. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA BIOMASA

4.1 Composición química de la madera

La composición química de la madera no se puede definir de manera precisa para una especie forestal ni incluso un árbol específico. La composición varía con las partes del árbol (raíces, tallo o ramas), tipo de madera (suave o dura), locación geográfica, clima y condiciones del suelo. Datos analíticos acumulados por muchos años de investigación y por diferentes laboratorios han ayudado a definir valores promedio esperados para la composición química de la madera (Pettersen, 1984).

4.1.1 *Componentes químicos*

Carbohidratos:

La porción de carbohidratos en la madera se resume en celulosa y hemicelulosa. La celulosa es entre el 40 % y el 50 % del peso de madera seca y la hemicelulosa entre el 25 % y el 35 %. Según Pettersen (1994), estos carbohidratos se describen por las siguientes propiedades:

- Celulosa: Es un polímero con cadenas lineares de unidades 1,4-B-anhidroglucosa (Figura 4.1). El número de unidades de azúcares en una cadena está determinado por el grado de polimerización, el cual ronda entre 9 000 y 10 000.

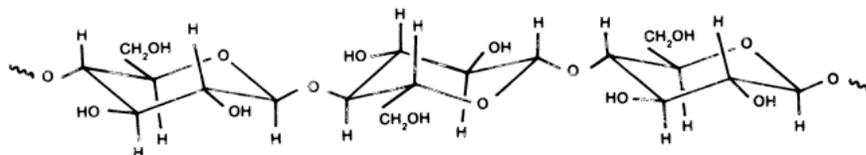


Figura 4.1. Estructura parcial de la molécula de celulosa $(C_6H_{10}O_5)_x$ en la forma 1,4- β -D-glucopiranososa (Pettersen, 1984)

- Hemicelulosa: Es una mezcla de polisacáridos sintetizados a partir de glucosa, manosa, galactosa, xilosa, arabinosa, ácido 4-O-metilfluglucorínico y residuos de ácido galactorínico. Una representación se aprecia en la Figura 4.2. Generalmente, las

hemicelulosas son de menor peso molecular que la celulosa y contribuye como componente estructural en la planta.

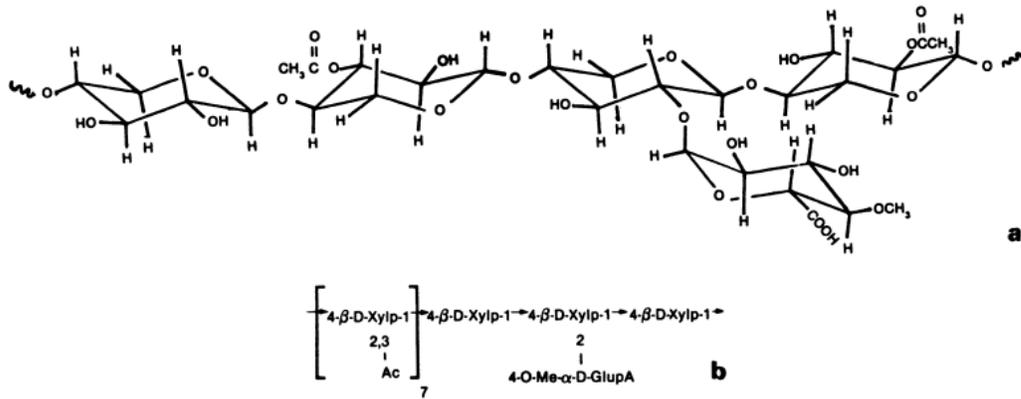


Figura 4.2. Estructura molecular parcial (arriba) y representación de la estructura (abajo) de O-acetyl-4-O-metil-glucuronoxylan (Pettersen, 1984)

Lignina:

Es una sustancia fenólica que consiste en un arreglo de varios enlaces entre unidades hidroxi- y metóxi- fenilpropanos como se aprecia en la Figura 4.3.

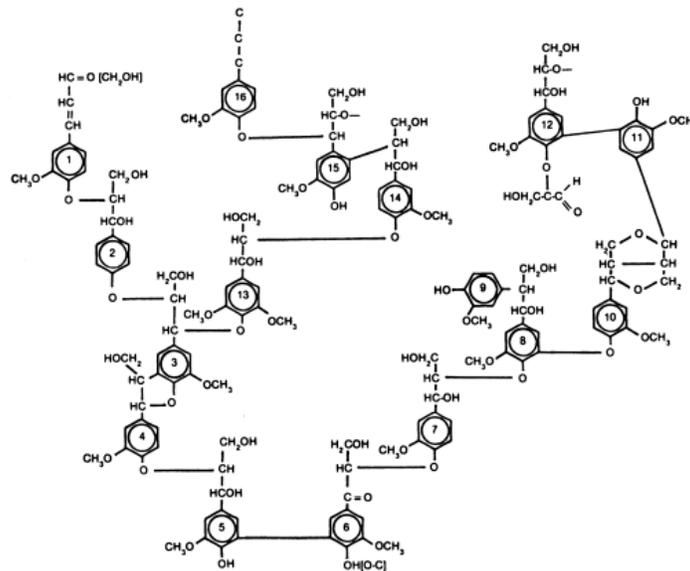


Figura 4.3. Estructura parcial de lignina de madera blanda (Pettersen, 1984)

4.1.2 Otros componentes

Son sustancias que no contribuyen a la estructura de la pared celular y la mayoría son solubles en solventes neutros. Los extractivos constituyen entre el-(4-10) % de la madera en base seca en climas templados, y hasta un 20 % en climas tropicales. Estos son una variedad de componentes, incluyendo grasas, ceras, alcaloides, proteínas, fenoles, azúcares simples, pectinas, mucílagos, gomas, resinas, terpenos y aceites esenciales, todos estos funcionan como intermediarios en el metabolismo del árbol, reserva de energía y parte del mecanismo de defensa del árbol ante ataques microbianos. Contribuyen además con propiedades como el color, olor y resistencia (Pettersen, 1984).

Además de los extractivos se encuentran las cenizas, un residuo inorgánico remanente luego de una combustión a alta temperatura. Generalmente es menor al 1% en madera de zonas templadas y un poco mayor en climas tropicales (Pettersen, 1984).

4.2 Contenido de humedad de la biomasa en procesos de gasificación

4.2.1 Contenido de agua de combustibles en procesos de gasificación

El contenido energético del gas producido por cualquier tipo de gasificador depende al menos en parte del contenido de humedad de la materia prima. Los altos contenidos de humedad reducen la eficiencia térmica, ya que se utiliza calor para expulsar el agua y, por consiguiente, esta energía no está disponible para las reacciones de reducción y para convertir la energía térmica en energía ligada al producto químico. Por lo tanto, altos contenidos de humedad resultan en bajos valores de energía que se pueda aprovechar del gas. Cuando el gas se utiliza para propósitos de combustión directa, se pueden tolerar valores bajos y también es factible el uso de materias primas con contenido de humedad (base seca) de hasta (40-50)%, especialmente cuando se utilizan gasificadores de corriente ascendente (Forestry Department, 2010).

De manera más específica, en todo sistema de gasificación, cualquier contenido de agua en el combustible es eliminado antes de que pueda producirse la primera etapa de combustión, este proceso consume energía y un alto contenido de humedad provoca una reducción en la eficiencia general del sistema y reduce potencialmente la temperatura de combustión por

debajo del óptimo, lo cual puede provocar una combustión incompleta del combustible que da lugar a la emisión de alquitranes que puede condensarse en los sistemas de limpieza y enfriamiento (H. Kumar, Baredar, Agrawal, & Soni, 2014).

Otro efecto de un alto contenido de humedad es que mucha agua puede condensarse en las unidades de proceso posterior al reactor, lo cual puede provocar corrosión de materiales y componentes, además de que la acumulación gradual de material conduce a potenciales atascamientos (H. Kumar et al., 2014). En el Cuadro 4.1 se aprecian los resultados obtenidos por Kumar et al (2014) al estudiar el efecto del contenido de humedad sobre un proceso de generación eléctrica a partir de gasificación de biomasa en un reactor de lecho descendente.

Cuadro 4.1. Eficiencia de la gasificación y potencia generada a diferentes contenidos de humedad en madera (H. Kumar et al., 2014)

Experimento	Contenido de humedad, %	Eficiencia de gasificación, %	Potencia generada, kW
1	15	65	8.0
2	30	52	5.2
3	45	37	4.1

Se aprecia claramente que la eficiencia de la gasificación disminuye con el aumento del contenido de humedad, y capacidad de entregar una potencia de generación también se reduce con el aumento del contenido de humedad (H. Kumar et al., 2014). Se concluye de esta investigación que:

- El material con alta humedad toma más tiempo en el proceso de combustión.
- La eficiencia de la gasificación se reduce considerablemente con el aumento del contenido de humedad.
- La calidad del gas productor también se ve afectada con el aumento del contenido de agua en el combustible.
- El poder calórico del gas del producto también se reduce.

Adicionalmente Dejtrakulwong & Patumsawad (2014) estudiaron el efecto del contenido de humedad sobre las temperaturas del proceso y sobre las alturas de cada zona dentro del reactor con una relación aire/combustible fija de 2.2, variando el contenido de humedad entre el 0 % y el 40 %. Como se muestra en la Figura 4.4a el aumento del contenido

de humedad si afecta la caída de temperatura de todas las zonas, ya que se requiere más calor para vaporizar el contenido de humedad al vapor de agua, lo cual que afecta directamente a la temperatura de todos los procesos.

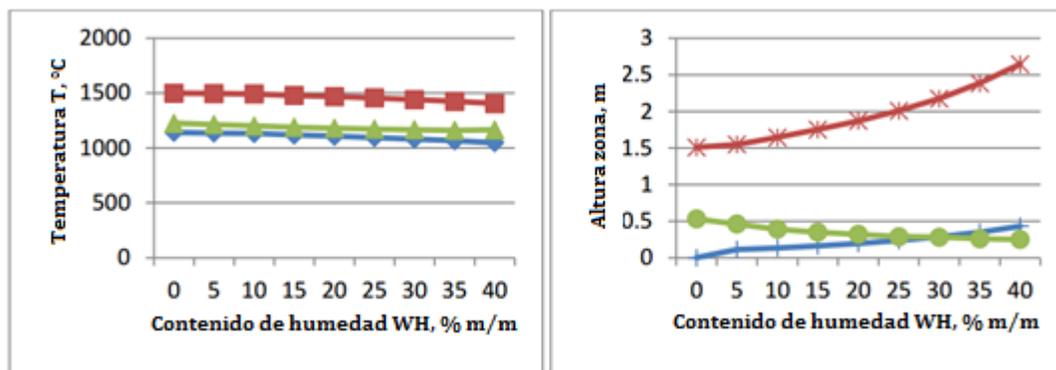


Figura 4.4. (a) La temperatura final de pirólisis, oxidación y zonas de reducción con la variación del contenido de humedad de 0 % hasta 40 % con A/F = 2.2. (T_{pirólisis}: ◆ T_{combustión} ■ T_{reducción}: ▲. (b) Las alturas de las zonas de secado, pirólisis y reducción con la variación del contenido de humedad del 0 % al 40 % a A/F)2.2 (H_{secado}:+ H_{pirólisis}: * H_{reducción}: ○) (Dejtrakulwong & Patumsawad, 2014)

La Figura 4.4b muestra el efecto del contenido de humedad sobre la altura de las zonas de secado, pirólisis y reducción. La altura de las zonas de secado y pirólisis aumenta con el aumento del contenido de humedad debido a que la temperatura de todas las zonas disminuye, de modo que el calor se transfiere menos a las zonas de secado y pirólisis y los procesos de secado y pirólisis pasan más tiempo de residencia. La altura crítica de la zona de reducción disminuye de 0.53 m a 0.25 m con el aumento del contenido de humedad. Por otra parte, debido a que el agua es reactivo de la zona de reducción, las reacciones primarias del proceso de gasificación ocurren en mayor tasa, por lo tanto se consume más carbono, pero con un efecto de disminución de temperatura de reducción (Dejtrakulwong & Patumsawad, 2014).

Por lo tanto, se requiere un bajo contenido de humedad en la biomasa dentro del sistema de reacción para mantener eficiencias en el proceso altas. Algunos sistemas de gasificación están diseñados para manejar combustible a un contenido de humedad mucho más alto, lo cuales suelen hacer uso de parte del calor de combustión para secar el combustible a medida que se aproxima a la zona de combustión. Sin embargo, la gran mayoría de gasificadores de biomasa están diseñados para funcionar con materia prima de contenido de humedad muy baja, entre un 10 %-20 % (H. Kumar et al., 2014).

4.2.2 Humedad en la madera

El estudio tecnológico de las relaciones entre el agua y la madera es, seguramente, el más importante de todos los que dependen este material, dado que afecta a la mayoría de los procesos de transformación de la madera. Así, la humedad de la madera influye de forma determinante en la concepción de procesos físicos tales como el aserrado, el cepillado y en procesos termoquímicos como la pirólisis, la gasificación o la combustión. (Peña & Rojas, 2005).

Por lo tanto, determinar y controlar el contenido de humedad de los dos combustibles que se alimentaron al gasificador fue de suma importancia. Para lograr esto, se controló la Humedad de Equilibrio Higroscópico, esta es la humedad de la madera en la que equilibran la fuerza de absorción de humedad de la madera con la fuerza desecante del aire. También se puede definir como el porcentaje de humedad que alcanzaría una madera a lo largo del tiempo, sometidos a ciertas condiciones de humedad y temperatura del medio ambiente. (Peña & Rojas, 2005).

Kollmann (1959), comprobó que la HEH es casi constante para todas las maderas y elaboró un diagrama donde varía dos condiciones ambientales: la humedad relativa y la temperatura y cuantifica la humedad en equilibrio en la madera, como se observa en la Figura 4.5. En este diagrama se aprecia que la HEH máxima que puede tener una madera, un 30 %, se alcanza cuando se encuentra en un ambiente saturado, en este punto se saturan todos los huecos existentes entre las fibrillas elementales, entre las microfibrillas y entre las fibras que componen la pared celular.

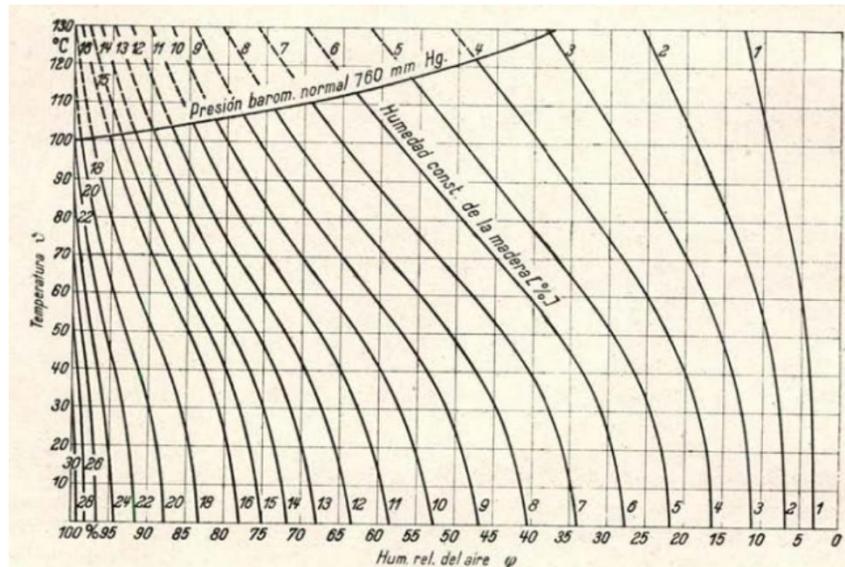


Figura 4.5. Relación entre la Humedad de Equilibrio Higroscópica con la temperatura y humedad del medio ambiente (Kollmann, 1959)

4.3 Contenido de cenizas en biomásas

Las cenizas pueden causar una variedad de problemas, especialmente en gasificadores de lecho descendente y ascendente. La formación de clinkers en el reactor, causada por la fusión y la aglomeración de cenizas, afectará en gran medida la cantidad de mano de obra requerida para operar el gasificador. Si no se toman medidas especiales, la clinkerización puede conducir a una formación excesiva de alquitrán y bloqueo del reactor. Un caso peor es la posibilidad de canalización de aire que puede conducir a un riesgo de explosión, especialmente en los gasificadores de corriente ascendente (Forestry Department, 2010).

La formación de clinkers depende del contenido de ceniza del combustible, de las características de fusión de la ceniza y del perfil de temperaturas en el gasificador. Las altas temperaturas locales en vacíos en el lecho de combustible en la zona de oxidación, causadas por el puente en el lecho, pueden causar clinkers incluso usando combustibles con una alta temperatura de fusión de cenizas (Forestry Department, 2010).

En general, no se observan clinkers con combustibles que tienen contenidos de cenizas por debajo de (5-6) %. Se puede esperar una fuerte clinkerización para los combustibles que tengan un contenido de cenizas del 12 por ciento y superior. Para los combustibles con contenidos de cenizas comprendidos entre 6 y 12 por ciento, el comportamiento de los clinkers

depende en gran medida de la temperatura de fusión de la ceniza, que está influenciada por la presencia de oligoelementos que dan lugar a la formación de mezclas eutécticas de bajo punto de fusión (Forestry Department, 2010).

4.4 Contenido de materias volátiles en biomásas

La cantidad de sustancias volátiles en la materia prima determina la necesidad de medidas especiales (ya sea en el diseño del gasificador o en la disposición del tren de limpieza de gas) para eliminar los alquitranes del gas producto en las aplicaciones del motor. En la práctica, el único combustible de biomasa que no necesita esta atención especial es el carbón de buena calidad. Como regla general, si el combustible contiene más del 10 % de materias volátiles, debe utilizarse reactores de lecho descendente, pero incluso en este caso debe tenerse en cuenta el método de producción del combustible (Forestry Department, 2010).

4.5 Contenido de carbono fijo en biomásas

Es la parte que no es volátil y que quema en estado sólido. El contenido de carbono fijo corresponde a un valor calculado, que se determina mediante la suma de los porcentajes de humedad, cenizas y materia volátil, sustraída de 100 %; siempre y cuando se cumpla que todos los porcentajes se encuentren en una misma base de referencia de humedad. (American Society for Testing and Materials, 2013). Se calcula de la siguiente manera:

$$FC = 100 - V - A - DH \quad (4.1)$$

Donde,

FC= porcentaje de carbono fijo en base seca, % m/m

V = porcentaje de materias volátiles de la biomasa en base seca, % m/m

H = porcentaje de cenizas en la biomasa en base seca, % m/m

DH = humedad de la biomasa en base seca, % m/m

4.6 Composición elemental CHONS en biomesas

Un análisis final (*ultimate analysis*-inglés) de la biomasa, reporta la composición del carbono elemental (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) y oxígeno (O) (muy a menudo por diferencia en el combustible sólido). Con el fin de evitar la confusión y para dar una buena representación del combustible en sí, un análisis final se reporta sobre una base seca, porque de lo contrario la humedad se indica como hidrógeno adicional y oxígeno. Se considera, según el tipo de biomasa, realizar una determinación del cloro, ya que representa un posible agente contaminante y corrosivo en los sistemas de pirólisis, gasificación y combustión (Stahl, Henrich, Gehrman, Vodegel, & Koch, 2004).

El **carbono (C)** es obviamente el componente más importante de los combustibles de biomasa. En su mayoría proviene del CO₂ atmosférico que se convirtió en parte de la materia vegetal durante la fotosíntesis. El carbono representa la contribución principal al valor de calentamiento total (Stahl et al., 2004).

En cualquier aplicación de combustión, una parte del carbono no se quema completamente y conduce a emisiones de gases no quemados, típicamente monóxido de carbono o HAP (hidrocarburo aromático policíclico). Sin embargo, esto no se correlaciona con el contenido total de carbono, sino más bien con las condiciones de combustión y el equipamiento (Stahl et al., 2004).

El contenido de carbono del combustible está directamente relacionado con su contenido de lignina, hemicelulosa y celulosa. Un bajo contenido de lignina, como con la biomasa herbácea, conduce a un menor contenido de carbono en comparación con la biomasa leñosa. Los valores típicos estarían entre (44-50) % m/m, en base seca para biomasa leñosa. Algunos combustibles ricos en lignina tienen un contenido de carbono superior al 50 % m/m en base seca (Stahl et al., 2004).

El **hidrógeno (H)** es otro componente importante de la biomasa, como puede esperarse de la estructura química del carbohidrato y de los polímeros fenólicos. Durante la combustión, el hidrógeno se convierte en H₂O, contribuyendo significativamente al valor de calentamiento global. Como se mencionará en la sección 4.8, el contenido de hidrógeno determina el cálculo del valor de calentamiento inferior a partir del valor de calentamiento superior medido

experimentalmente. El contenido en peso de hidrógeno, sobre una base seca, suele ser ligeramente menor en la biomasa herbácea (5.5-6) % m/m que, en la biomasa leñosa, (6-8) % m/m (Stahl et al., 2004).

El **nitrógeno (N)** durante la combustión y para todos los propósitos prácticos, el nitrógeno no se oxida en cantidades significativas y se libera en la fase gaseosa como N_2 , por lo tanto, su contribución al valor de calentamiento global es cero. Sin embargo, el poco nitrógeno que se oxida y se convierte en óxidos de nitrógeno es una emisión gaseosa importante de los sistemas de biomasa. El alto contenido de nitrógeno de la biomasa herbácea puede, por lo tanto, resultar caro, pero esto depende fuertemente de las condiciones de combustión, control y equipamiento en altas emisiones de óxidos de nitrógeno (Stahl et al., 2004).

El **azufre (S)** se incorpora en varias estructuras orgánicas como aminoácidos, proteínas y enzimas. Con las fracciones de desecho, en las que una mezcla de sustancias orgánicas constituye la parte principal del combustible, el contenido de azufre puede en algunos casos ser significativo. Junto con el nitrógeno, fósforo y potasio, es un nutriente importante para el crecimiento de las plantas (Stahl et al., 2004).

El **cloro (Cl)** durante un proceso termoquímico, el cloro se vaporiza casi completamente, formando HCl, Cl_2 y cloruros alcalinos. Los problemas asociados con el cloro provienen de cuestiones relacionadas con las emisiones (dioxinas, facilitación de la formación de aerosoles) y cuestiones operativas, a saber, el ensuciamiento y la corrosión de las superficies metálicas. Para el ensuciamiento y la corrosión, el efecto del cloro es muy afectado por el contenido de álcali de la biomasa. Generalmente, el contenido de cloro superior al 0,1% en peso, en base seca, es problemático (Stahl et al., 2004).

El **oxígeno (O)** es un elemento importante en todos los combustibles de biomasa, como es evidente por la naturaleza del proceso fotosintético y la composición química de los componentes de la biomasa. El oxígeno del combustible reduce la cantidad de aire necesaria para la combustión y se encuentra en los productos de la combustión unidos químicamente en las moléculas de CO_2 y H_2O . Debe tenerse en cuenta que el oxígeno no se mide directamente, su concentración de peso se estima restando de 100 las concentraciones de todos los demás elementos (C, H, N, S, Cl) y del contenido de cenizas en el combustible seco (Stahl et al., 2004).

4.7 Contenido de metales en biomásas

4.7.1 Efecto de los metales alcalinos en procesos de gasificación

Durante la combustión y la gasificación, los metales alcalinos pueden contribuir a la escorificación, deposición, corrosión y aglomeración en lecho. El metal alcalino permanece en las fracciones de cenizas durante el proceso o se libera como metal alcalino gaseoso, este último reacciona con las fracciones de ceniza o se condensa debido a la saturación. Se ha observado que los problemas durante la gasificación de carbón están relacionados principalmente con el sodio y con respecto a las biomásas los problemas están relacionados con el potasio (Hald, 1994).

Sin embargo, dado que durante el proceso de gasificación se acumula el contenido de Ca y K, así como metales pesados, en el biochar, un contenido alto de estos elementos se interpreta generalmente como que existieron temperaturas altas de la gasificación debido a que entre más calor generado durante la oxidación, mayor el consumo de carbono. Es decir, los aumentos en la temperatura de gasificación y la cantidad de oxígeno a su vez aumentan la volatilización de los minerales (K y Ca), pero paralelamente mejora las reacciones con el carbono (Qian et al., 2013).

Debido a estas propiedades mencionadas, los metales alcalinos (K y Na), junto a los metales alcalinotérreos (Ca y Mg) y los de transición (Fe) son los catalizadores más comúnmente usados, y su uso ha sido ampliamente reportado en la literatura. Huang et al., (2009) estudiaron la reactividad de la gasificación y el modelado cinético de los caracteres de biomasa derivados de una amplia gama de orígenes de las plantas, y propusieron un modelo cinético de gasificación semi-empírica. Llegaron a la conclusión de que la tasa máxima a alto rango de conversión podría atribuirse principalmente al efecto catalítico del potasio. El óxido de potasio (K_2O) es generalmente el óxido alcali más abundante en la biomasa vegetal y el de mayor efecto catalítico, por lo tanto, al que mayor atención hay que poner. Se ha logrado definir que el óxido de potasio incrementa la reactividad de la biomasa y el biochar en un factor de 100.

4.7.2 Análisis de fluorescencia de rayos X

La técnica de fluorescencia de rayos X (XRF) se utiliza para determinar concentraciones de elementos químicos en diversos tipos de muestras. Es un método analítico de alta precisión, con la ventaja de ser no destructivo en la mayoría de las aplicaciones y de poder preparar la muestra de manera simple. Puede utilizarse para monitorear elementos con un número atómico (Z) mayor de 11 (Na) en alta concentración hasta el Uranio (Fellin, Negri, All, Mazzei, & Zanuttini, 2014).

La fluorescencia de rayos X es una técnica bien conocida para la detección y cuantificación de elementos químicos en varias matrices. Esta técnica se basa en la ionización de las capas atómicas internas obtenidas por irradiación de las muestras con radiación electromagnética: las vacantes de la cáscara interna se llenan rápidamente con electrones de la cáscara externa, con la liberación de energía radiante dentro de las líneas características que llevan una firma del átomo emisor; el esquema general de este proceso se muestra en la Figura 4.6 (Fellin et al., 2014).

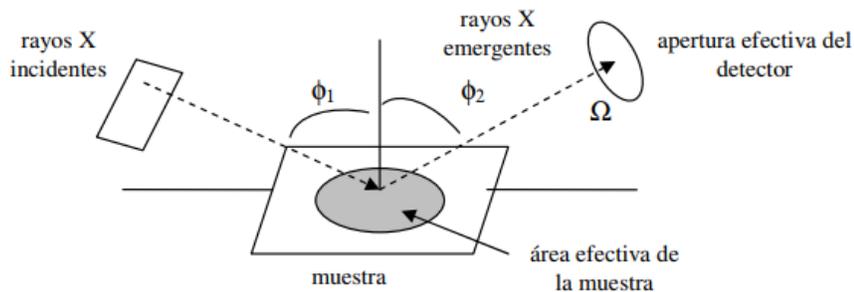


Figura 4.6. Geometría de excitación de la muestra y detección de la radiación característica (Fellin et al., 2014)

4.8 Poder calórico en biomásas

El poder calórico es la cantidad de calor generada por una combustión completa de una masa específica de material en presencia de oxígeno. El poder calorífico, en la biomasa, representa la energía de combustión del carbono e hidrógeno de la materia orgánica y del azufre y en parte del orgánico (Norma D2015-89).

La elección de un combustible para la gasificación se decidirá en parte por su valor de calentamiento. El método de medición del contenido de energía del combustible influirá en la estimación de la eficiencia de un sistema de gasificación dado. La notificación de los valores de calentamiento del combustible es a menudo confusa, ya que se utilizan al menos tres bases diferentes según el Forestry Department (2010):

- a. El valor más alto de calentamiento del combustible obtenidos en un calorímetro de bomba adiabática se le llama poder calorífico superior (PCS). Estos valores incluyen el calor de condensación del agua que se produce durante la combustión. Debido a que es muy difícil recuperar el calor de condensación en operaciones de gasificación reales, estos valores presentan una visión demasiado optimista del contenido de energía del combustible.
- b. Elevar los valores de calentamiento en una base libre de humedad, que ignoran el contenido real de humedad del combustible y, por lo tanto, proporcionan estimaciones aún más optimistas del contenido energético.
- c. Elevar los valores de calentamiento de los combustibles sobre una base libre de humedad y cenizas, que desprecian los componentes incombustibles y, por consiguiente, proporcionan estimaciones de contenido energético demasiado altas para un determinado peso de combustible, especialmente en el caso de algunos residuos agrícolas.

Según el Forestry Department (2010) la única manera realista de presentar los valores de calentamiento del combustible con fines de gasificación es dar valores de calentamiento más bajos (excluyendo el calor de condensación del agua producida) sobre una base de ceniza incluida y con referencia específica al contenido de humedad real del combustible. a este valor se le llama poder calorífico neto (PCN).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Caracterización fisicoquímica de la biomasa

Ambos combustibles utilizados en esta investigación fueron comprados a la empresa Pelletics Energía Renovable. Según los técnicos de la empresa para la producción de ambos se utilizan diferentes especies forestales y de diferentes materias primas: troncos pequeños, troncos grandes, árboles completos, aserrín, entre otros; lo cual impidió el conocimiento de la composición fisicoquímica esperada para cada combustible, por ello la necesidad de la caracterización.

La mayoría de los ensayos de laboratorio se realizaron en el Laboratorio de Biomateriales de la Escuela de Ingeniería Forestal en el Tecnológico de Costa Rica, sede en Cartago. Mismo lugar donde se ubica la planta piloto operada. En el Cuadro 5.1 se presentan las metodologías aplicadas para la determinación de cada propiedad, además del lugar y los materiales requeridos según las normas consultadas. Los Anexos del 1 al 7 muestran los diferentes procedimientos realizados durante las pruebas de laboratorio.

Cuadro 5.1. Metodologías empleadas y lugares de realización de las pruebas de caracterización

Propiedad	Método	Lugar y materiales
Contenido de humedad	ASTM E871–82: Método de prueba estándar para el análisis de la humedad de los combustibles de madera en partículas	Laboratorio de Biomateriales de la Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Se empleó: mufla Thermo-Scientific, crisoles de 50 mL y una balanza analítica con un rango de 0-6000 g
Contenido de cenizas	ASTM D1102–84: Contenido de cenizas para de madera y productos de madera	Laboratorio de Biomateriales de la Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Se empleó: mufla Thermo-Scientific, crisoles de 50 mL y una balanza analítica con un rango de 0-6000 g

Cuadro 5.1 (continuación) Metodologías empleadas y lugares de realización de las pruebas de caracterización

Propiedad	Método	Lugar y materiales
Contenido de materias volátiles	ASTM D1762-84: Método de prueba estándar para el análisis químico de carbón	Laboratorio de Biomateriales de la Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Se empleó una mufla Thermo-Scientific, crisoles de 50 mL y una balanza analítica con un rango de 0-6000 g
Contenido de carbono fijo	ASTM D1762-84: Método de prueba estándar para el análisis químico de carbón	Método matemático mediante la suma de los porcentajes de humedad, cenizas y materia volátil, sustraída del 100 %
Contenido de metales	Espectrómetro de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía S2 RANGER (EDXRF): Se utiliza la técnica de cuantificación estándar EQUA ALL	Centro de Energía Química y Electroquímica (CELEQ), Universidad de Costa Rica, Rodrigo Facio. No se requirieron materiales extras, más que el recipiente para colocar la muestra
Composición elemental	Según la norma EN 15104 para su medición. Para el azufre y el cloro se describen diferentes procedimientos en la norma EN 15289.	Pruebas realizadas en el Laboratorio de Ingeniería Forestal de la Universidad de Chile, Chile.
Poder calórico	Guía de Laboratorio: Calor de combustión del curso IQ-0331 Medición y Tratamiento de Datos Experimentales, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica.	Laboratorio de Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica, Sede Rodrigo Facio. Ver Cuadro 5.2 con las listas de materiales y equipo utilizados

El poder calórico de cada biomasa forestal estudiada se determinó en el Laboratorio de Ingeniería Química. El equipo utilizado en el proceso experimental se muestra en el Cuadro 5.2.

Cuadro 5.2. Materiales y equipos utilizados en el laboratorio

Nombre	Fabricante	Ámbito	Serie	Placa UCR	Incertidumbre
Bomba calorimétrica	Parr Instrument	-	6755	-	-
Termómetro calorimétrico	Parr Instrument	(10-50) °C	67722130628425	350879	± 0.0001 °C
Balanza analítica 2	OCONY	0-6000 g	7132100084	325968	± 0.001 g
Balanza analítica 2	AE ADAM	0-360 g	-	223343	± 1 g

5.2 Evaluación de la geometría de la biomasa forestal en el desempeño del reactor “downdraft

Para evaluar la incidencia de la geometría de la biomasa se realizó un diseño experimental de un factor y dos niveles para distinguir las diferencias significativas que existe al alimentar pellets o astillas de madera en una unidad de gasificación con un reactor downdraft de la empresa All Power Labs. Este planteamiento sigue parte de los procedimientos desarrollados en el proyecto *“Implementación y evaluación tecnológica de gasificación en la industria de café, como alternativa para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)” (325-B5-513 VI)*.

El diseño se integra de la siguiente estructura:

- ✓ **Factor de estudio:** Geometría de biomasa forestal.
- ✓ **Niveles:** 1. Astillas de madera y 2. Pellets de madera.
- ✓ **Variables fijas:** el contenido de humedad y tiempo de corrida.
- ✓ **Variables no controlables:** la humedad relativa del ambiente, temperatura ambiente y composición fisicoquímica.
- ✓ **Variables de respuesta:** la caída de presión en el lecho del reactor, caída de presión en sistema de limpieza, la composición del syngas, temperaturas en el sistema, potencia y energía producida, flujos de: biomasa, aire, syngas, cenizas, alquitranes.

A partir de todas estas variables respuesta se obtienen los diferentes parámetros que permiten caracterizar integralmente el proceso de gasificación para ambos tipos de biomásas, que se explicaron en el apartado 2.2. Recalcar, que para determinar si hay diferencias significativas entre las respuestas medias a distintos niveles del factor, se basará en un Análisis de la Varianza, el cual descompone la variabilidad de un experimento en componentes independientes que se asignan a causas distintas (Baíllo, 2009). Bajo el modelo de ANOVA unifactorial se puede contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu$$

Esta primera hipótesis nula declara que, si todas las medias de las variables respuesta serán iguales, que el factor no influye.

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ para algún par } i \neq j$$

Si esto no se cumple, las medias difieren y el factor de geometría influye.

5.2.1 Planta piloto: Unidad Power Palet de All Power Labs

Para el estudio realizado se operó una planta piloto modelo Power Palet que se muestra en la Figura 5.1, el cual es un módulo para generación de energía eléctrica a utilizando biomasa como combustible, pues convierte las astillas y los pellets de madera y otros tipos de biomásas en electricidad y calor. En el Cuadro 5.3 se muestran las características principales de la unidad. Es un sistema integrado y compacto, que se compone de manera general por: el gasificador downdraft GEK Totti, el motor de combustión interna, el generador y un controlador electrónico (AllPowerLabs, 2015).

Se adjudica la propiedad de planta piloto debido a que, por ejemplo, posee un sistema que ajusta automáticamente la mezcla de gas de síntesis/aire a través de un sensor de oxígeno Bosch de banda ancha, de manera automática sacude la rejilla a la base del reactor cuando existen atascamientos de material dentro del mismo, y elimina las cenizas acumuladas a través de un tornillo sin fin mecánico de manera automática. Posee entonces una Unidad de Control de Procesos (UCP), la cual supervisa y responde a todas las condiciones del reactor, del filtro y del motor. Todo estas condiciones y acciones de actuadores dentro del sistema se recopilan en una memoria extraíble, lo cual permite caracterizar de manera más profunda las corridas experimentales y sus eventos (AllPowerLabs, 2015).



Figura 5.1. Unidad Power Palet de la empresa All Power Labs modelo PP20 (AllPowerLabs, 2015)

Cuadro 5.3. Especificaciones técnicas importantes de la unidad PP20 (AllPowerLabs, 2015)

Parámetro	Valor
Régimen de potencia continua, kW	15@50Hz/18@60Hz
Tiempo máximo de operación, h	12
Temperatura ambiental, °C	5-40
Humedad ambiental, %HR	5-95
Tamaño de la biomasa, mm	12-40
Contenido de humedad en la biomasa base seca, %	5-30
Dimensiones, cm	145x145x140 (PP20) / 83x83x114 (tolva)
Materiales, acero	304SS/310SS/321 SS
Tipo de motor	HM Vortec
Revoluciones por minuto, RMP	1500 @50Hz/1800@60Hz
Batería recomendada	55 Ah, 880CCA Marine
Tipo de generador	Mecc Alte NPE32-E/4 12 wire

Una cualidad importante es que el generador es configurable a una sola, dividida o tres fases, en 120/208/240 V en corriente alterna a 60 Hz o 50 Hz de frecuencia, y también están disponibles con un paquete opcional Grid-Tie permitiendo que el PP20 para trabajar con otros

dispositivos de generación de energía, tales como la eólica o solar, así como con otros módulos adicionales de energía, servicios públicos o micro-redes-sincronizada para generar energía confiable (AllPowerLabs, 2015).

5.2.2 Adaptaciones al sistema e instrumentación instalada

Obtener un perfil completo del comportamiento del sistema en cada una de sus operaciones unitarias y obtener los valores de las variables necesarias para evaluar el desempeño del proceso, se realizaron una serie de adaptaciones en la unidad y se agregaron diferentes puntos de medición. A continuación, se describirá de forma detallada la metodología empleada para la instalación del componente y la razón de su adición.

Medición del flujo volumétrico de aire entrada

La necesidad de cuantificar la cantidad de agente gasificante que ingresa al sistema de reacción es fundamental en un proceso de gasificación. Para dicha tarea se instaló un medidor de flujo tipo vortex modelo: *TRIO-WIRL Flowmeter Vortex VT4000*, marca *ABB* (Figura 5.2a). Instrumento de propiedad de la Escuela de Ingeniería Química. Se obtiene el flujo en litros por minuto, es decir en términos volumétricos. En la Figura 5.2b se observa su instalación previo al medidor de humedad relativa y temperatura.



(a)



(b)

Figura 5.2.(a) Medidor de caudal Vortex Marca ABB (b) Instalación medidor de flujo en la unidad

Medición de humedad relativa y temperatura de aire a la entrada

El flujo medido con el Vortex se encuentra en unidades volumétricas, por lo tanto, para obtener el flujo en kilogramos por hora se requiere medir la temperatura en la línea y poder así calcular la densidad del fluido. Para lograr esto, se instala un *Vaisala Humidity and Temperature Probe*, serie HMP110, el cual es un sensor de temperatura y humedad relativa ambiental que se muestra en la Figura 5.3a y su instalación Figura 5.3b.



Figura 5.3. (a) Sensor de humedad relativa y temperatura ambiente Vaisala HMP110 (b) Instalación del sensor en la línea

Medición del flujo de syngas generado

Morice, (2015) diseña medidor de flujo de orificio para el proyecto “*Implementación y evaluación tecnológica de gasificación en la industria de café, como alternativa para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)*” (325-B5-513 VI), el cual se muestra en la Figura 5.4.

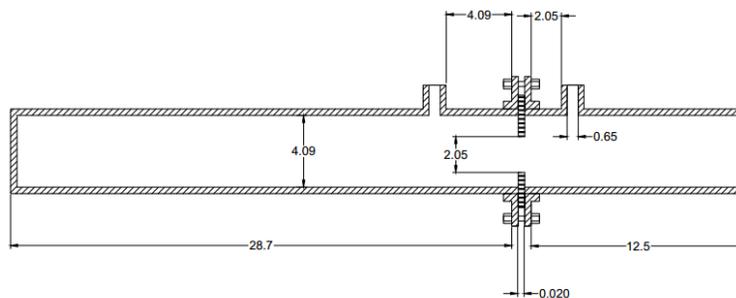


DIAGRAMA MEDIDOR DE ORIFICIO

Unidades en cm

Figura 5.4. Diagrama constructivo del medidor de flujo de tipo orificio (Morice, 2015)

Basándose en este diseño, se recalcularon los parámetros según los resultados del proyecto mencionado y se rediseñó y se construyó un medidor de flujo de tipo orificio que permitiera obtener datos precisos de caída de presión que se puedan traducir a un flujo másico según su principio de funcionamiento. La instalación de mismo se aprecia en la Figura 5.5.



Figura 5.5. Medidor de flujo de orificio instalado en la planta piloto

Medición de caídas de presión

- a) Caída de presión en el medidor de flujo de tipo orificio: Según los resultados alcanzados en el proyecto “*Implementación y evaluación tecnológica de gasificación en la industria de café, como alternativa para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)*” (325-B5-513 VI), se logró estimar de forma más precisa la máxima caída de presión del flujo de syngas en el medidor de orificio. Se adquiere entonces un transmisor de presión diferencial *Marca Dwyer, Serie 616KD* (ver Figura 5.6)., con un rango de medición de (0-9.16) kPa Su señal de salida es de corriente, con un rango de (4-20) mA.



Figura 5.6. Transmisor de presión diferencial Marca Dwyer Serie 616KD

- 1) Caída de presión en el intercambiador de calor: El factor de ensuciamiento, debido a acumulación de alquitranes, agua y cenizas, en un proceso de esta magnitud es trascendental de cuantificar para operar siempre en los niveles bajos de obstrucción del

sistema y evitar posibles fallos o hasta explosiones, por lo cual, se emplea un transmisor de presión diferencial *Marca Dwyer Serie MS-111 Magnesense*, con rango de: (0-1250) Pa (Ver Figura 5.7) para medir la caída de presión del gas al atravesar el intercambiador. Esto, pues es proporcional a una medición del nivel de ensuciamiento de la unidad, pues la caída de presión aumenta al depositarse más material en los tubos de la unidad de enfriamiento.



Figura 5.7. Transmisor de presión diferencial Marca Dwyer Serie MS-111

La instalación de ambos sensores se muestra en la Figura 5.8 su ubicación fue estratégica según la cercanía a las unidades donde realizan medición y la cercanía del componente de adquisición de datos.



Figura 5.8. Instalación de transmisores de presión diferencial en la planta piloto

Figura 5.1to

Medición de temperaturas del proceso

Para obtener información completa sobre el comportamiento del proceso al modificar la geometría de la biomasa alimentada sobre las diferentes operaciones unitarias, se decidió instalar 11 puntos extras de medición de temperaturas que se enlistan a continuación:

- Perfil temperaturas zona de pirólisis
- Temperatura a la salida del reactor
- Temperatura a la salida del ciclón
- Temperatura a la entrada de cámara de precalentamiento en tolva
- Temperatura a la salida de cámara de precalentamiento en tolva
- Temperatura entrada intercambiador
- Temperatura salida intercambiador
- Temperatura a la salida del filtro
- Temperatura a la entrada del motor
- Temperatura a la salida del motor
- Temperatura a la entrada de la mufla

Se adquirieron termocuplas tipo k, tipo mineral, de la empresa AF WATLOW, con 3/16 pulgadas de diámetro y 3 pulgadas de largo, con 84 pulgadas de cable con forro de fibra de vidrio con un gauge #20, se solicitó además un resorte de refuerzo para el cable y con epoxi especial para alta temperatura. En la Figura 5.9 se aprecia un ejemplo de las termocuplas empleadas.



Figura 5.9. Termocupla WATLOW empleada para la medición de temperatura

Se decidió utilizar fitting's ajustables para espiga de 3/16" con rosca de 1/4", los cuales permiten un desensamble rápido de las termocuplas, como se muestra en la Figura 5.10. Esta función permite realizar el mantenimiento de la unidad sin dañar la integridad de las mismas. Estas piezas mantienen un sello perfecto que no afecta el vacío permanente que debe de existir dentro de la unidad mientras esté operando.



Figura 5.10. Instalación de termocuplas en la planta piloto

Adquisición de datos

Una etapa transcendental de la recopilación de datos en un proceso es la adquisición y traducción de las señales enviadas por todos los sensores instalados. Se adquiere un Chasis USB de 4 ranuras con la capacidad de acoplamiento de módulos de entrada y salida para la medición de sensores y señales eléctricas de la marca National Instruments que logra adquirir los datos enviados por los sensores y, mediante una conexión USB con un ordenador, envía la información recopilada (ver Figura 5.11)



Figura 5.11. Chasis de 4 ranuras marca National Instruments para la adquisición de datos

Uno de los módulos empleados, es el de entrada de termopares con 16 entradas con acondicionamiento por compensación de unión fría y una resolución de 24 bits (Figura 5.12.a). El otro módulo empleado fue el de entradas analógicas con 8 entradas de corriente con un

rango de ± 22 mA y 8 entradas de voltaje con un rango de ± 10 V y una resolución de 24 bits (Figura 5.12b).



Figura 5.12. (a) Módulo de entrada de termopares de 16 entradas (b) Módulo de entradas analógicas de 16 entradas, 8 de voltaje y 8 de corriente

Se decide instalar cerca de todos los sensores instalados como se aprecia en la Figura 5.13



Figura 5.13. Instalación de unidad de adquisición de datos en la planta piloto

Limpieza continua de muestra de syngas de línea

Para realizar mediciones de composición del syngas producido, se decidió instalar una toma en línea, es decir, remover una pequeña cantidad de syngas del proceso de manera continua y enviarla a un analizador de gases. Para llevar a cabo esta tarea se debe primero remover todos hidrocarburos y el agua de la corriente, lo cual se realiza en un tren de filtros absorbentes en serie como se muestra en la Figura 5.14. El primer filtro, Figura 5.14a, se compone de “mecha”, la cual permite recolectar agua e hidrocarburos con una alta temperatura

de condensación. El siguiente filtro, Figura 5.14b, se compone de una mezcla 50/50 de carbón fino y sílica gel, el primero absorbe hidrocarburos de la misma manera que el filtro adsorbente, el segundo limpia el gas de agua y componentes polares. La última limpieza se realiza en dos filtros de cromatografía, Figura 5.14c, rellenos con sílica gel, los cuales procuran la remoción de los componentes mencionados afines a este absorbente.

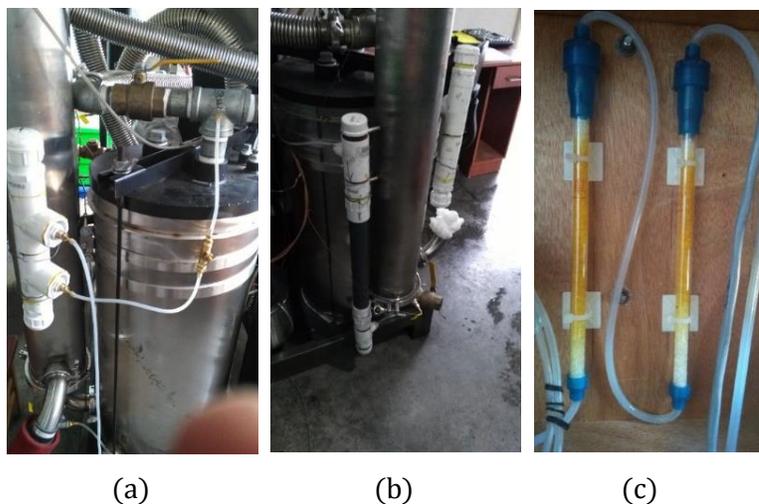


Figura 5.14. Sistema de limpieza de muestra de syngas en línea para su posterior análisis de composición a) Filtro de “mecha” b) Filtro con 50% carbón y 50% sílica gel c) Columnas para cromatografía con sílica gel

Medición continua de la composición del syngas

Se emplea un *MCA 100 Syn Portable MULTICOMPONENT ANALYZER FOR SynGAS* de la empresa ETG RISORSE E TECNOLOGIA (Figura 5.15a). El equipo permite un análisis continuo de la composición volumétrica de los compuestos en el syngas: CH_4 , CO , CO_2 , O_2 y H_2 , como se muestra en la Figura 5.15b, con la posibilidad de recopilar todos los datos con respecto al tiempo y ser exportados en un archivo .csv de manera muy sencilla



Figura 5.15. (a) Analizador MCA 100 Syn Portable MULTICOMPONENT ANALYZER FOR SynGAS (b) Instalación de línea de syngas limpio y seco al analizador

Sistema de cargas para el generador

Una etapa crucial en todo el proceso realizado fue determinar las cargas para el generador, pues éstas deben poseer ciertas características, según la capacidad del generador y la configuración del mismo. Para este estudio, se decidió configurar el sistema de generación en 220 V trifásico a 60 Hz, posteriormente se instaló la caja de breaks para la alimentación de las cargas, como se aprecia en la Figura 5.16. En el Cuadro 5.4 se muestran los equipos y sus cualidades energéticas

Cuadro 5.4. Equipos utilizados como sistema de carga para la planta piloto

Equipo	Consumo nominal, kW	Consumo, kW
Mufla	1.2	0.7
Lijadora automática	-	0.9
Secadora experimental	23	2.8
Pelletizadora	7.5	1.1
Horno experimental	1.2	0.8
Total	32.9	6.3



Figura 5.16. Sistema de cargas empleadas para fijar el gasto energético de la planta piloto

Medición de variables durante la generación eléctrica

Se emplea un *Fluke 435: Three Phase Power Quality Analyzer* de Fluke Industrial B.V (Figura 5.17), pues tiene la capacidad de medir diferentes parámetros simultáneamente y guardarlos en tiempo real. Para el interés de este trabajo se recopilaban datos de manera continua de potencia real, potencia reactiva, potencia aparente, tensión en las tres fases, corrientes en las tres fases, factor de potencia y el factor de potencia por desplazamiento.



Figura 5.17. Fluke 435: Three Phase Power Quality Analyzer de Fluke Industrial B.

La instalación de los sensores de corriente y de tensión se realizaron en el generador directamente, como se aprecia en la Figura 5.18a. Tres anillos para medición de corriente en cada fase y cuatro sensores de voltaje, para las tres fases (A, B y C) y la tierra. En la Figura 5.18b se muestra la interfaz del instrumento durante la operación del motor



Figura 5.18. (a) Instalación de sensores de corriente y tensión (b) Interfaz de Fluke al realizar mediciones continuas de potencia y energía

(a)

(b)

Limpieza del motor

Se adquiere y modifica un carburador de motocicleta (Figura 5.19) para limpiar de manera muy eficiente el motor. Esto se realiza debido a que la limpieza de contaminantes del syngas previa al ingreso del motor no es perfecta y estos componentes podían llegar al motor y condensar, provocando un ensuciamiento escalonado, lo cual fue indeseado, pues hubiera provocado, en algún momento, el fallo total del equipo de generación de electricidad. Por lo tanto, se empleó gasolina como disolvente de estos compuestos, permitiendo una limpieza rápida y eficiente de los inyectores, los pistones, bujías y escape del motor.



Figura 5.19. Carburador empleado como instrumento de limpieza del motor

Agitadores en tolva de alimentación

Se evidenció en las corridas preliminares realizadas la dificultad de las astillas de madera en descender por la tolva de alimentación, por lo tanto, se diseñó y construyó un sistema de agitación manual, como se aprecia en la Figura 5.20, que permitiera facilitar el descenso de la biomasa y evitar los “puentes en la tolva” que provocan problemas de alimentación continua al reactor



Figura 5.20. Sistema de agitación dentro de tolva de alimentación

Planta piloto con adaptaciones e instrumentación

En la Figura 5.1 se muestra la planta piloto sin ninguna modificación realizada, y como se ha mencionado, se necesitaron realizar diferentes adaptaciones en esta para poder evaluar el desempeño del módulo. Luego de la etapa de instrumentación e instalación, como se describió detalladamente a lo largo de este apartado, se obtuvo una planta piloto muy diferente a la original y que se aprecia en la Figura 5.21.



Figura 5.21. Visualización general de la planta piloto con todas las adaptaciones e instrumentación

5.2.3 Variables medidas en planta piloto

Para evaluar la incidencia modificar la geometría del combustible en un proceso de gasificación, se realizaron, entonces, mediciones continuas de las siguientes variables:

1. Flujo de aire a la entrada del reactor, l/min
2. Temperatura del aire de entrada, °C
3. Humedad relativa del aire de entrada, %
4. Perfil térmico en la zona de pirólisis del reactor (seis puntos en vertical), °C
5. Temperatura de reducción, °C
6. Temperatura de restricción, °C
7. Temperatura a la salida del reactor, °C
8. Temperatura a la salida del ciclón, °C
9. Temperatura a la entrada de cámara de precalentamiento en tolva, °C
10. Temperatura a la salida de cámara de precalentamiento en tolva, °C
11. Temperatura a la entrada del intercambiador, °C
12. Temperatura a la salida del intercambiador, °C
13. Temperatura a la salida del filtro/ orificio, °C

14. Temperatura a la entrada del motor, °C
15. Temperatura a la salida del motor, °C
16. Temperatura a la entrada de la mufla, °C
17. Temperatura del refrigerante del motor, °C
18. Flujo de syngas, kg/h, Nm³/h, mol/h
19. Caída de presión en el intercambiador, kPa
20. Caída de presión en el orificio, kPa
21. Presión a la salida del filtro, kPa
22. Presión en zona de combustión, kPa
23. Presión en el reactor, kPa
24. Composición de CH₄, CO, CO₂, O₂ y H₂ en el gas producto, % v/v
25. Potencia real, kW
26. Potencia reactiva, kVA
27. Voltaje de fases y línea, V
28. Corriente de fases y línea, A
29. Factor de potencia, adim
30. Condiciones de encendido y apagado de: Motor, grade shacker, ash auger, feed auger,

Todos los valores promedio de estas variables independientes permitieron realizar los cálculos requeridos para obtener los parámetros que describen el proceso de generación de energía eléctrica a partir de un proceso de gasificación de biomasa, como se describió en el apartado 2.2. La adquisición de todos estos valores se realizó de forma continua, con una frecuencia de 5 segundos específicamente, debido a que, como todo proceso de transformación de materia, para alcanzar un estado estable se requiere de un tiempo determinado, el cual se quería cuantificar y eliminar del intervalo de análisis. Además, durante la operación se pudieron presentar anomalías que afectaran una o más variables, por lo tanto, conocer el momento que sucedió y la magnitud de afectación sobre la estabilidad del sistema fue importante para caracterizar la corrida experimental.

Estas condiciones hacen que una toma de datos no continua no sea lo más factible para la caracterización de este tipo de proceso con los parámetros que se requirieron encontrar, ya que se buscaron los valores promedios de las diferentes variables en el estado estable del

sistema, apegados a un error o desviación estándar asociados a la serie de datos dentro de los intervalos de estabilidad/análisis definidos.

5.2.4 Metodología para la adquisición de datos:

Como se mencionó en el apartado 5.2.2.6 se emplearon dos módulos para adquirir las señales enviadas por los diferentes sensores instalados en la planta piloto, ambos se conectaron a un chasis, el cual permitió adquirir las señales de voltaje y corriente y traducirlas en una señal en bits para ser procesada en un ordenador mediante una conexión USB entre este y esta unidad de adquisición de datos.

Para procesar estas señales y recopilar la información en valores numéricos asociados a las magnitudes de las variables medidas, se utilizó el software LabView®, el cual permitió, de manera muy sencilla, asociar al ordenador con los módulos de adquisición de datos y presentar en pantalla los valores de las señales de todos los canales que se estaban empleando por los diferentes sensores (una vez calibrados). Además de visualizar estos datos, el programa guardó estos datos en un archivo .xls, para ser leídos por un programa como lo es Microsoft Excel®, y lograr así, adquirir los datos de cada variable medida con respecto al tiempo, para su posterior procesamiento.

La información que la planta recopiló dentro de su memoria interna, gracias a la Unidad de Control del Proceso, fue fácilmente exportable a un archivo .xls, pues se realizó una copia continua de los valores de las diferentes variables que midió y las condiciones de la unidad en una memoria extraíble, la cual se removía y se conectaba fácilmente al ordenador.

El analizador de gases tiene la capacidad de guardar cada 5 segundos los datos de composición de los diferentes componentes. Esta información, entonces, fue extraída de un archivo .csv de manera muy sencilla mediante una memoria externa con conexión USB de 32 bits. Para la adquisición de datos de potencia y energía, con el Fluke 435, se instaló un software llamado FlukeView®, el cual permitió visualizar y guardar todos los valores de las diferentes variables medidas en un archivo .xls. Se debió realizar una conexión con cable óptico entre el ordenador y el analizador de redes y correr el programa para recopilar la información.

5.2.5 Procesamiento de datos: MatLab y Excel

En el proyecto “*Implementación y evaluación tecnológica de gasificación en la industria de café, como alternativa para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)*” (325-B5-513 VI), se desarrollaron cuatro programas en el software MatLab® R2014a para procesar todos los datos que se recopilaron en el ordenador. Este trabajo se apoyó de estos códigos para el procesamiento de los datos, sin embargo, se reescribió parte de este debido a las diferentes condiciones de operación de la planta piloto, ya que se agregaron más sensores, se modificaron ciertas metodologías de cálculo y la cantidad de variables que se trabajaron. De forma consecutiva, los programas realizan las siguientes tareas:

- 1) *Cargar todos los datos* de los diferentes archivos que se generaron: Cada conjunto de variables, según su fuente (DAQ, analizador de gases, analizador de redes, UPC), se cargó a la memoria de MatLab. En esta etapa se debieron ajustar las líneas de tiempo de cada fuente de información para que todas estén en sintonía para los posteriores cálculos. Este ajuste se realizó de manera iterativa apoyándose con el segundo programa que se describirá a continuación.
- 2) *Graficar los datos* y, a partir de las tendencias observadas y el desvío cada conjunto de datos con respecto al tiempo cero, se realizó el proceso iterativo del ajuste de las líneas del tiempo para los diferentes conjuntos de datos. Una vez realizado el ajuste de todas las líneas de tiempo, de manera gráfica se definió el intervalo de tiempo donde el sistema era estable, para esto se analizaron las gráficas de temperaturas, composiciones, flujos y energía
- 3) *El tercer programa realiza los cálculos*: primeramente, se obtuvieron los valores promedio de cada variable en el intervalo de tiempo de estabilidad. Con estos datos se realizaron diferentes cálculos: desde la obtención de la composición de agua en la línea de aire mediante ley de Raoult, hasta la resolución de un balance de masa elemental para obtener el flujo de alquitranes y la composición de estos en el syngas: Se calculó, además, el error asociado a este cálculo de balance global elemental. De este programa se obtuvieron todas las variables requeridas para posteriormente calcular los parámetros que me describen el desempeño del reactor

- 4) En el último programa *se exportan todos los datos deseados en un archivo .xls*. Este conjunto de datos resumió de manera completa y justificada cada corrida experimental realizada

Entonces una vez procesada la información, se ordenaron los datos obtenidos de cada corrida en una sola tabla de datos en el programa Microsoft Excel®. A partir de estos valores se realizaron una serie de cálculos para obtener los parámetros que evalúan el rendimiento y eficiencia de la operación realizada.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Caracterización fisicoquímica de la biomasa

El Apéndice A contiene los resultados del estudio de caracterización de ambos tipos de biomasa y en el Cuadro 6.1 se muestran los valores promedio para cada propiedad determinada en los diferentes ensayos realizados por triplicado. Como se aprecia, no existe variación aparente entre las propiedades fisicoquímicas de las dos biomásas estudiadas; esto es lógico, pues ambos combustibles son de fuente forestal y sus propiedades no deberían variar sustancialmente, como se obtuvo también en el estudio de caracterización de especies forestales nacionales por Tenorio, Moya, Salas, & Berrocal, (2016).

Cuadro 6.1. Resultados de caracterización fisicoquímica de las biomásas estudiadas

Variable	Astillas	Pellets
Contenido de cenizas en base seca A, % m/m	0.985	1.097
D.std. Contenido de cenizas en base seca, % m/m	0.031	0.026
Contenido de humedad en base húmeda WH, % m/m	16.331	15.882
D.std. Contenido de humedad en base húmeda, % m/m	0.452	0.913
Contenido de humedad en base seca DH, % m/m	14.034	13.703
D.std. Contenido de humedad en base seca, % m/m	0.333	0.682
Contenido de materias volátiles en base seca V, % m/m	79.893	80.242
D.std. Contenido de materias volátiles base seca, % m/m	0.158	0.272
Contenido de carbono fijo en base seca FC, % m/m	4.976	5.070
D.std. Contenido de carbono fijo en base seca, % m/m	0.457	0.887
Poder calórico PC, MJ/kg	17.413	18.317
D.std. Poder calórico, MJ/kg	0.184	0.149

En el Cuadro 6.2 se muestra los resultados de las pruebas t-Student realizadas a los valores determinados para cada propiedad. Se obtuvo que para el contenido de cenizas y para el poder calórico existe evidencia estadística para concluir que existe una diferencia significativa entre ambas geometrías con respecto a estas propiedades. Para el poder calórico se obtiene que hay (17.41 ± 0.18) MJ/kg disponibles en las astillas de madera y en pellets hay un aumento de 1 MJ/kg aproximadamente, lo cual implica que los pellets de madera poseen

mayor cantidad de energía disponible por unidad másica, lo cual es producto al proceso de densificación, el cual ocurre a temperaturas de hasta 200 °C, lo cual implica que la biomasa se torrefacta y modifica su estructura fisicoquímica y aumenta su contenido energético.

Cuadro 6.2 Prueba t-Student para los datos con mismo tamaño de muestra, con diferentes varianzas

Variable	Grados de libertad	Estadístico t	Valor crítico de t (dos colas)	P(T<=t) dos colas	Condición
Poder calórico	4	6.615	2.776	0.003	Rechaza hipótesis nula Hay diferencia
Contenido de cenizas	4	4.753	2.776	0.009	Rechaza hipótesis nula Hay diferencia
Contenido de materias volátiles	4	1.925	2.776	0.15	No hay evidencia de diferencia Hipótesis nula
Contenido de carbono fijo	4	0.162	2.776	0.882	No hay evidencia de diferencia Hipótesis nula
Contenido de humedad base seca	4	0.757	2.776	0.504	No hay evidencia de diferencia Hipótesis nula

El bajo contenido de cenizas de ambas biomásas, cerca del 1 % de la masa total seca, las convierte en combustibles aptos para ser alimentados a la planta piloto utilizada, según las especificaciones técnicas del fabricante. Esto, pues dentro del reactor no existiría una acumulación excesiva de material que no sería posible convertir termoquímicamente durante la operación de la planta, lo cual implicaría menores problemas de atascamientos dentro del reactor o canalizaciones dentro del material (por donde fluirían los productos gaseosos, lo cual aumentaría el riesgo de explosiones o puntos calientes). Además de que, según la teoría, no se formarían clinkers a una tasa cuantificable. Los clinkers son subproductos sólidos duros en estado cristalino que se generan debido a un exceso de minerales que intervienen en las reacciones dentro del reactor y sus equilibrios; su principal consecuencia es que provocan atascamientos severos en el sistema.

A parte de unos contenidos de cenizas favorables, para ambas biomásas existe un 80 % en peso aproximadamente de materias volátiles (una mezcla de hidrocarburos, monóxido de carbono, hidrógeno, y otros componentes) que se liberarían en forma de gas mientras descienden por el reactor, mientras que solo un 5 % de la biomasa seca se recolectaría al finalizar el proceso en forma de biochar, según la determinación del carbono fijo, lo cual es esperado para biomásas de fuente forestal y óptimo en un proceso de gasificación de biomasa.

Para el análisis de composición de metales se analizaron las muestras de biochar y cenizas de ambas biomásas, ya que son los subproductos en la base del reactor que se obtienen luego del proceso de degradación termoquímica, por lo tanto, son estos los estratos que acumulan los diferentes minerales, lo cual permite estudiar las magnitudes de las composiciones de los diferentes compuestos que se acumulan, y así caracterizar la biomasa según las composiciones de metales, sobre todo de aquellos que puedan tener un efecto el proceso de gasificación.

El equipo utilizado para la determinación del contenido de metales, como se describe en el Anexo 6, posee un rango de medición de elementos desde el sodio (Na) hasta el Uranio (U) -según el orden de la tabla periódica-, es decir, no se reporta el contenido de los elementos presentes en los primeros dos períodos, como el carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, lo cuales siempre están en mayor proporción en las biomásas. Por lo tanto, utilizando los resultados de la determinación de la composición elemental del biochar de Melina en la Universidad de Western Ontario, que se muestran en el Cuadro A.7, y los resultados de la determinación del contenido de cenizas y carbono fijo, se lograron calcular las composiciones reales de los metales para cada biomasa según el estrato, como se muestra en el Cuadro 6.3

Cuadro 6.3. Resultados de composición de metales de las biomásas estudiadas

Compuesto	Composición de metales w_M , mg/kg			
	Astillas		Pellets	
	Biochar ¹	Cenizas	Biochar ¹	Cenizas
Fe₂O₃	363,4	194,9	404,3	1534,5
CaO	2010,7	3443,8	3220,3	2266,8
Al₂O₃	201,9	100,1	173,9	390,0
MgO	58,8	112,2	116,3	160,3

Cuadro 6.3 (continuación). Resultados de composición de metales de las biomásas estudiadas

Compuesto	Composición de metales w_M , mg/kg			
	Astillas		Pellets	
	Biochar ¹	Cenizas	Biochar ¹	Cenizas
K₂O	1477,6	1052,8	970,6	2626,8
SiO₂	406,4	145,0	269,3	697,4
P₂O₅	101,3	168,3	187,5	144,7
SO₃	34,2	65,3	116,7	104,4
Cl	57,2	69,3	149,7	131,5
TiO₂	28,6	4,2	13,4	85,1
Na₂O	N.D ²	39,7	122,1	N.D ²

¹Biochar: Carbón remanente en la base del reactor. ²N.D: no detectable

Se obtiene que los contenidos de los compuestos: K₂O, Fe₂O₃, CaO son los mayores y como se detalla en la sección 4.7.1, los metales alcalinos (K y Na), junto a los metales alcalinotérreos (Ca y Mg) y los de transición (Fe) tiene un efecto catalítico en procesos de gasificación. Para la madera en específico, se ha encontrado que el óxido de potasio (K₂O) aumenta la tasa de conversión de la biomasa durante el proceso de descomposición térmica como catalizador en las reacciones más importantes en la zona de reducción.

Los efectos catalíticos de sales de metales alcalinos sobre las reacciones de gasificación del carbono suelen explicarse con secuencias de procesos redox cíclicas que implican la reacción de las sales con el sustrato de carbono y una posterior re-oxidación por reacción con el medio gaseoso oxidante. Los intermedios alcalinos también pueden interactuar con el sustrato para formar radicales libres o posiblemente compuestos de intercalación (McKee, 1983). Sin embargo, según McKee (1993), no se posee información certera de la cantidad presente de uno u otro compuesto para que implique un aumento o reducción de generación de syngas debido a sus efectos catalíticos. Por lo tanto, un estudio donde se analice el efecto individual de los metales sobre un proceso de gasificación de biomasa sería un aporte importante para el desarrollo de esta tecnología en el país.

Es importante mencionar que, durante la combustión y la gasificación, los metales alcalinos, según Hald, (1994) pueden volatilizarse después de alcanzar los 700 °C dentro del

reactor y contribuir a la escorificación, deposición, corrosión al condensar en las siguientes operaciones unitarias del proceso y al observar una disminución de la composición de todos los metales en las cenizas al comparar con el biochar, lo más posible es que parte de estos se hayan volatilizado. Por lo tanto, sería importante realizar un análisis de composición de metales en las diferentes corrientes gaseosas posteriores al reactor y verificar si las tasas de estos compuestos requieren o no de una operación de remoción de sus partículas.

Los valores utilizados de composición elemental de las biomásas estudiadas se basan en los resultados de Moya & Tenorio, (2013), quienes no identificaron diferencias significativas entre las composiciones elementales de diferentes especies autóctonas de Costa Rica, por lo tanto se toman los resultados de composición de la especie *Gmelina arborea* para ser empleados en los análisis de este trabajo para la resolución de los balances de masa elementales globales. Los valores normalizados se aprecian en el Cuadro 6.4.

Cuadro 6.4. Resultados de composición elemental de las biomásas estudiadas

Biomasa	$C_xH_yO_z$		
	x	y	z
Astillas	1.000	1.816	0.835
Pellets	1.000	1.816	0.835

Es importante mencionar que la composición elemental de los pellets de madera si debería variar con respecto a las astillas de madera, incluso si se utiliza la misma especie forestal como materia prima para la elaboración de ambos combustibles. Esto, pues existen aglomerantes que se agregan a las partículas de madera previo al proceso de densificación para procurar un producto de buena calidad en cuanto a dureza y resistencia. Por lo tanto, al existir componentes externos, se afectarían las magnitudes de las composiciones elementales, pero para efectos de este estudio y considerando que la composición de estos materiales es pequeña dentro de la mezcla junto a la biomasa, se decide emplear los datos mencionados.

6.2 Proceso de gasificación en planta piloto e instrumentación

6.2.1 *Diagrama de Flujo de Proceso*

Antes de iniciar con la evaluación de las diferencias encontradas en el desempeño de la planta piloto al alimentar pellets de madera o astillas de madera, es importante describir las

operaciones unitarias que se llevan a cabo en este módulo para generar electricidad a partir de un proceso de gasificación de biomasa empleando un reactor de lecho descendente. El Diagrama de Flujo de Proceso que describe la transformación del combustible sólido en uno gaseoso para ser quemado en un motor de combustión interna se muestra en la Figura 6.1. Se adjunta el plano a mayor escala como Anexo. Desde una perspectiva de unidades de proceso, existen varios conjuntos que conforman de manera integral y compacta la planta piloto:

1. Unidades de alimentación: La biomasa se alimenta al módulo por la tolva de alimentación (M-100) por la parte superior de esta, esta desciende por gravedad hasta la cámara de alimentación y pre-secado (D-101); en esta se encuentra instalado un tornillo sin fin impulsado por un motor monofásico (N-102), este componente permite una alimentación estable de biomasa al reactor y es activado por la UPC cuando un sensor de presión en la parte superior del reactor detecta faltante de biomasa.
2. Unidades de sistema de reacción: Compuesto por el reactor de lecho descendente de tipo garganta (R-106) con cinco mangueras metálicas que lo rodean en la parte externa (por este medio ingresa el aire -el agente gasificante- al reactor y el objetivo de envolverlo es para precalentar el oxígeno para elevar la eficiencia del proceso de combustión). Además, dentro de este conjunto se debe incluir la canasta o parrilla a la base del reactor, la cual se activa para liberar atascamientos de biomasa. Por último, mediante un tornillo sin fin (M-107) se remueven cenizas del reactor hacia el depósito colector (M-108) de forma periódica para evitar acumulación de material.
3. Unidades de limpieza y enfriamiento: Una vez que se produce el syngas en el reactor, este es succionado por el motor y es transportado hacia cuatro unidades que permiten su limpieza y su enfriamiento. La limpieza se refiere a la remoción de alquitranes y agua, los contaminantes de mayor proporción en la corriente gaseosas, ya que la calidad del syngas, debe ser alta al considerar la utilización de un motor de combustión interna para su combustión, es decir, la mezcla que ingresa al motor debe poseer la menor cantidad posible de contaminantes, esto, pues el diseño del motor tolera niveles bajos de concentración de estos subproductos que se deben respetar: (5-10) g/Nm³. Sin una eficiente remoción de estas partículas se provocarían daños irreversibles en las cámaras

de combustión y en los pistones, reduciendo la vida útil del motor y aumentando la frecuencia de mantenimiento el mismo.

La primera operación de limpieza y enfriamiento es de remoción de sólidos gruesos como las cenizas empleando un ciclón (S-109), en el cual las cenizas se depositan, gracias a la diferencia de densidad, en el fondo de este equipo en un depósito. Las cenizas se deben recolectar al finalizar la corrida al desarmar este depósito y su cuantificación permitió completar los respectivos balances de masa del proceso.

La siguiente operación tiene como mayor objetivo el enfriamiento más que limpieza; ya que el gas ingresa a una chaqueta que recubre la cámara de alimentación y gracias a esto se calienta la biomasa que se va a alimentar al reactor. El objetivo secundario, entonces, es iniciar el proceso de secado de la biomasa y mejorar la eficiencia del proceso al restar el consumo de energético dentro del reactor para secar la biomasa, lo cual disminuiría la eficiencia de todo el proceso.

La tercera unidad es un intercambiador de calor de tubos y coraza (I-111), en el cual, más que enfriar el syngas, permite el precalentamiento del aire (fluye por la coraza) que se mezclará posteriormente con el syngas limpio y seco, que como mezcla ingresarán al motor. Este precalentamiento mejora la eficiencia del proceso de combustión, ya que, según el principio de Carnot, al elevar la temperatura de entrada, la eficiencia aumentará. Precalentar el aire evita también que, a la hora de unir las ambas corrientes gaseosas, condensen subproductos o remantes de alquitranes previo al proceso de combustión, debido al choque térmico entre ambas corrientes, lo cual genera problemas de ensuciamiento a los componentes previo al motor.

El filtro de lecho fijo (U-112), es la cuarta y última unidad para el enfriamiento y limpieza del syngas, y la más importante de todas, pues acá se remueven los alquitranes y el agua. Posteriormente se abordará de manera más detallada el funcionamiento de este filtro.

4. Unidades de operación térmica: Incluye los sopladores de gas (G-115 y G-116), la chimenea (H-119), el quemador (O-120) y el soplador del aire (G-118). Este conjunto no se utiliza en operación normal, es decir durante el proceso de generación eléctrica, ya que funciona para la etapa de calentamiento del reactor al iniciar una corrida y para el enfriamiento del sistema al terminar una. El objetivo es quemar de manera continua el syngas, el cual es succionado por los sopladores y mezclado con el aire en la base de la chimenea para que procurar una combustión completa del mismo y que las emisiones sean lo menos tóxicas posibles.

5. Unidades de operación con generación de energía eléctrica: Incluye el motor de combustión interna (N-123), el generador (O-124) y la mufla (O-104). Durante la operación con generación eléctrica, el motor succiona el gas producido en el reactor, este es limpiado y enfriado, y mediante un ciclo de combustión interna (Ciclo de Otto) se genera trabajo mecánico, el cual es utilizado por el generador para ser convertido en energía eléctrica. Se obtiene energía con una tensión de salida de 220 V en cada una de las tres fases, a una frecuencia de 60 Hz. Los gases exhaustos son enviados a una chaqueta que permite transferir calor en la zona de superior del reactor, disminuyendo aún más la energía requerida para secar y pirolizar la biomasa. Luego de este intercambio, los gases son expulsado por medio de la mufla.

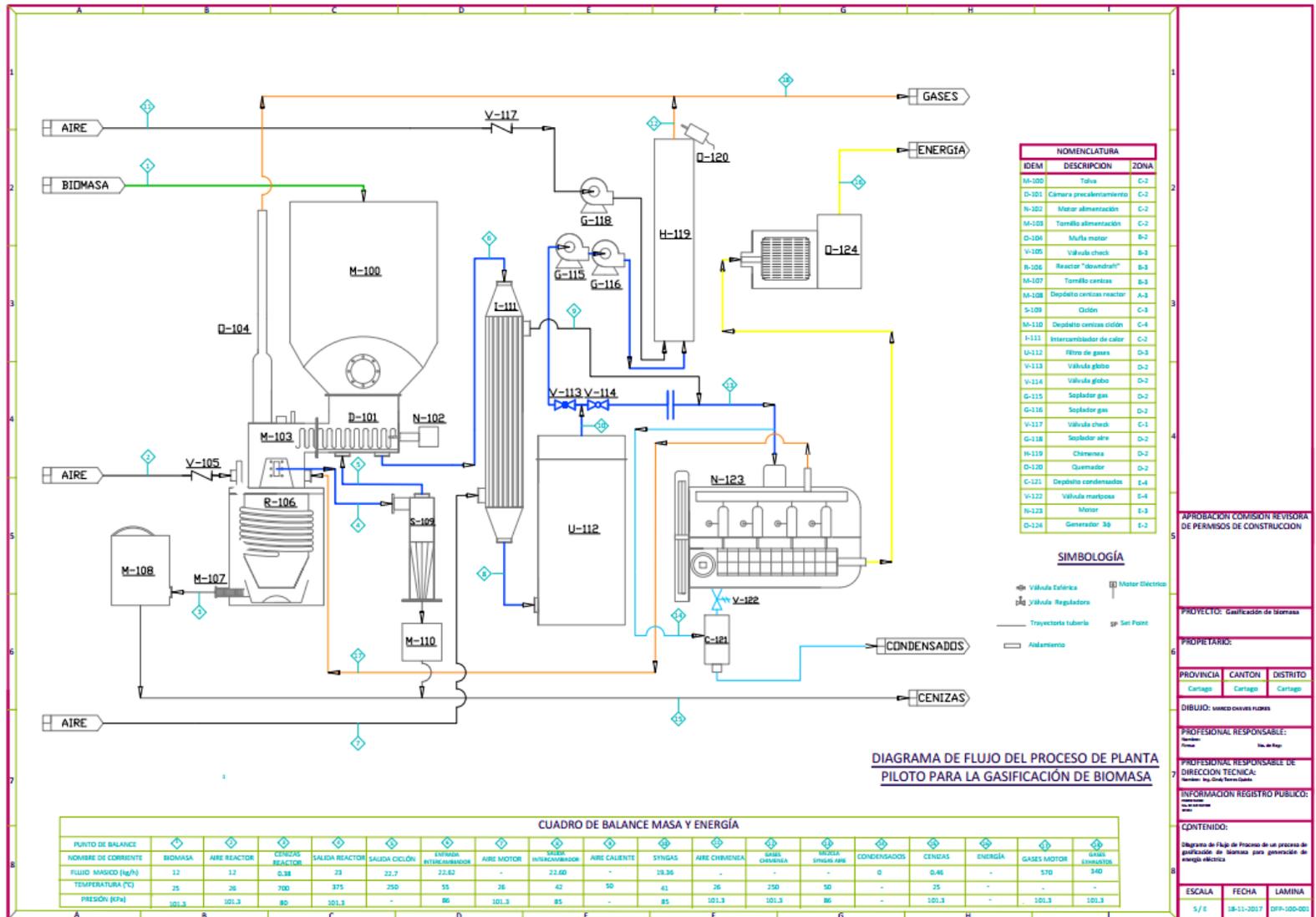


Figura 6.1. Diagrama de Flujo de Proceso de unidad Power Palet de All Power Labs

6.2.2 *Diagrama de Instrumentación y Control (DI&C)*

La Unidad de Control de Procesos del módulo realiza mediciones continuas de las diferentes variables críticas del proceso, y si existe un fenómeno que provoca pérdida de la estabilidad de una o más variables se activa la alarma. Lo primero que realiza la UCP es intentar corregir esa condición, si no es posible estas alarmas del módulo se activan. La corrección es posible gracias a un controlador integral que permite activar uno o varios actuadores. Los sensores y los actuadores presentes más importantes y su función se muestran en el Cuadro 6.5.

Cuadro 6.5. Sistema de control del Power Palet de All Power Labs

Sensor	Actuador	Función
Interruptor de combustible	Tornillo de alimentación	Mantener el reactor con combustible
Sensores de presión dentro del reactor	Canasta del reactor	Corrige atascamientos de combustible en el reactor Elimina depósitos para
Sensores de presión dentro del reactor	Tornillo de remoción de cenizas	evitar acumulación y atascamientos dentro del reactor
Sensor de relación oxígeno/combustible	Gobernador	Controlar una relación de oxidante/combustible óptima para el motor

En la Figura 6.2 se muestra el Diagrama de Flujo de Tubería, Instrumentación y Control (PI&C) de la planta. En este se muestran, según lo mencionado el apartado 5.2.2, todas las adaptaciones que se realizaron, además de toda la instrumentación instalada y necesaria para realizar la mayor cantidad de mediciones en cada operación unitaria para evaluar la incidencia de la geometría sobre el desempeño del proceso como un todo, pero también a nivel individual dentro de cada equipo que compone la planta. Se adjunta el plano a mayor escala como Anexo.

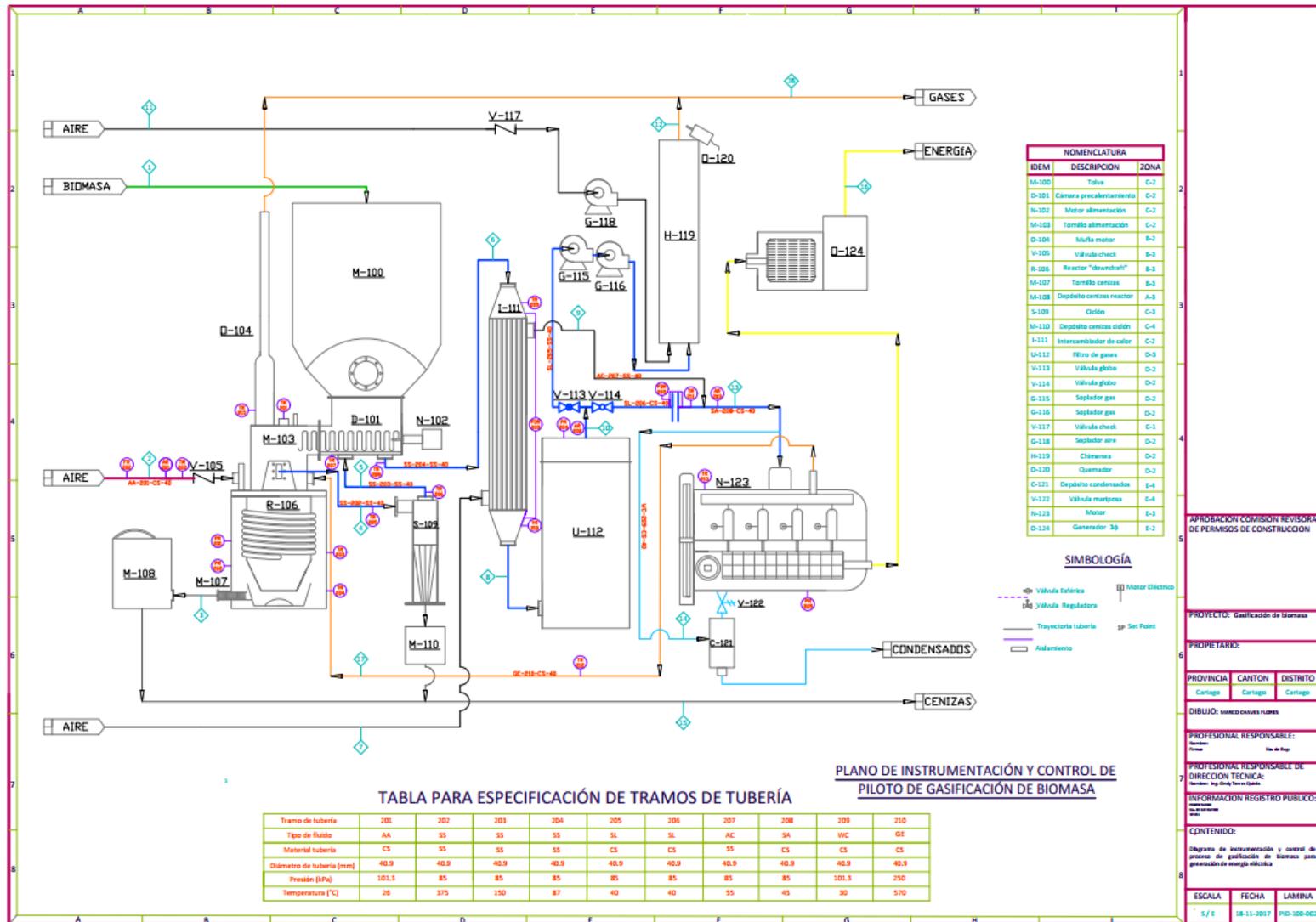


Figura 6.2. Plano de Instrumentación y Control (PI&C) de la planta piloto

6.3 Corridas preliminares: puesta en marcha

En total se realizaron 9 corridas preliminares, los objetivos de esta etapa fueron: estudiar las diferentes condiciones de operación y mantenimiento del módulo, y verificar la funcionalidad correcta de toda la instrumentación instalada y las adaptaciones realizadas. Las metas alcanzadas en cada una de estas corridas se describirán a continuación:

- Una vez instalados todos los puntos de medición de temperatura se verificó que el sistema mantuviera el vacío, es decir, que no existieran fugas debido a fallos durante la soldadura de las adaptaciones; además se determinó la coherencia de los datos de temperatura obtenidos en pantalla, lo que indicaría una correcta programación de la unidad de adquisición de datos y un buen funcionamiento de los sensores.
- El medidor de humedad y temperatura ambiental de marca Vaisala se reconfiguró para que midiera ambas variables simultáneamente, por lo cual se realizó una corrida de una hora para verificar su correcto funcionamiento. Además, se recopilaron datos de caídas de presión en el orificio y el intercambiador de calor por primera vez, lo cual indicó un correcto funcionamiento de los sensores después de instalados y calibrados.
- Se realizó otra corrida una vez que se instaló el analizador de gases, ya que se deseaba corroborar que la toma de la muestra de syngas en línea estuviera bien construida, lo que evitaría el ingreso de contaminantes gaseosos externos, como el aire, que afectaría las mediciones en el analizador durante las corridas experimentales.
- Se operó una primera vez con cargas de energía, pero que no superaron los 3 kW de consumo eléctrico. Al no cumplir con una tasa de consumo neto deseada, se decidió buscar otras cargas que permitieran elevar la potencia generada por la planta y así exigir más de todas las unidades dentro del sistema.
- En la siguiente corrida se determinó el nuevo valor de potencia con las nuevas cargas agregadas. Esta corrida fue una de las más importantes y la más complicada de concretar, ya que, conseguir y conectar todos los equipos tomó casi un mes, por lo cual esta corrida y el valor de potencia entregada o consumida, con un valor promedio de 6.2 kW, fue trascendental para dar inicio a las corridas experimentales.
- Se operó el módulo previo al inicio de las pruebas reales como colaboración con la Escuela de Ingeniería Forestal, ya que deseaban mostrar la planta piloto en

funcionamiento a diferentes personas interesadas. Se aprovechó para realizar mediciones de todo lo instalado para verificar su correcto funcionamiento. La demostración fue de dos horas.

- Se realizaron otras tres que terminaron inconclusas o fallidas, debido a problemas de atascamiento en la tolva de alimentación, al rompimiento tornillo y un apagón eléctrico que no permitió la medición de datos ni la recopilación de los mismos. Estas corridas ayudaron a realizar las modificaciones respectivas al equipo para evitar que estas condiciones afectaran durante el desarrollo del diseño experimental.

6.4 Gasificación de astillas y pellets de madera

Se realizaron tres corridas experimentales de cuatro horas motor para cada tipo de biomasa (todos los datos obtenidos luego del procesamiento de la información recopilada durante las corridas experimentales se muestran en el Apéndice B). Los valores mostrados en el Cuadro 6.6 son propios de las variables fijas que se plantearon previo al inicio de las corridas: el contenido de agua en el combustible y el tiempo de operación del motor. El contenido de humedad, la variable más importante, se controló de manera exitosa entre un 15 % y un 17 % en una base húmeda. Este valor se fijó debido a que contenidos de humedad superiores al 20 % hubieran provocado una disminución de la eficiencia del proceso debido al consumo de energía para secar la biomasa, e inferiores al 14 % hubieran provocado un aumento en la síntesis de alquitranes, lo cual hubiera implicado un mayor ensuciamiento en el sistema y una disminución de la tasa de producción de syngas, ya que el vapor de agua es reactivo de las reacciones más importantes dentro del reactor.

Cuadro 6.6. Caracterización de las corridas experimentales

Fecha, mes/día	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellets	Pellets	Pellets
Humedad base húmeda WH, %	15.88	16.32	16.78	14.83	16.41	16.41
Tiempo de análisis t_a, h	2.71	2.08	1.47	3.03	1.77	1.07
Tiempo operación motor t_o, h	4.89	4.40	3.27	3.94	3.93	4.45

El valor de humedad se fijó no solo por la teoría, si no que la experiencia obtenida en el proyecto *“Implementación y evaluación tecnológica de gasificación en la industria de café, como alternativa para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)”* (325-B5-513

VI) permitió evidenciar que al operar tanto con astillas de madera como con pellets de broza con bajo contenido de humedad, provoca que el sistema de limpieza resultara ineficiente debido a la alta tasa de producción de alquitranes y que el rendimiento de producción de syngas fuera bajo.

Como se aprecia, se operó la planta piloto por cuatro horas motor para la mayoría de las corridas, solamente la tercera réplica de astillas tuvo un tiempo de operación menor (3.27 h), debido a que no había más combustible que alimentar. En el Cuadro 6.7 se muestra, en promedio, las magnitudes de estas variables fijas para cada biomasa. Al controlar de manera efectiva ambas variables se desarrolló un análisis que identificó las diferencias significativas excluyendo el efecto de la humedad de la biomasa y el de las horas de operación, siendo el único factor: la geometría de la biomasa alimentada.

Cuadro 6.7. Promedio de las variables fijas del diseño experimental realizado

Variables fijas	Astillas	Pellets
Humedad en base húmeda WH, % m/m	16.33	15.88
Tiempo de operación del motor t_o , h	4.19	4.11

6.4.1 *Planteamiento del balance de masa*

El análisis del balance de masa es esencial para la obtención de las variables requeridas para la evaluar el desempeño del proceso, como se muestra en la Figura 6.3, existen dos corrientes que ingresan al sistema: la de biomasa y la de aire. La primera se calculó como la razón entre la biomasa consumida y el tiempo total de operación con motor. Para la segunda se empleó el medidor de flujo tipo vortex que, junto a la medición de temperatura realizada por el Vaisala, se calculó el flujo másico de aire. Por lo tanto, todas las corrientes que ingresan al sistema fueron cuantificadas durante las corridas.

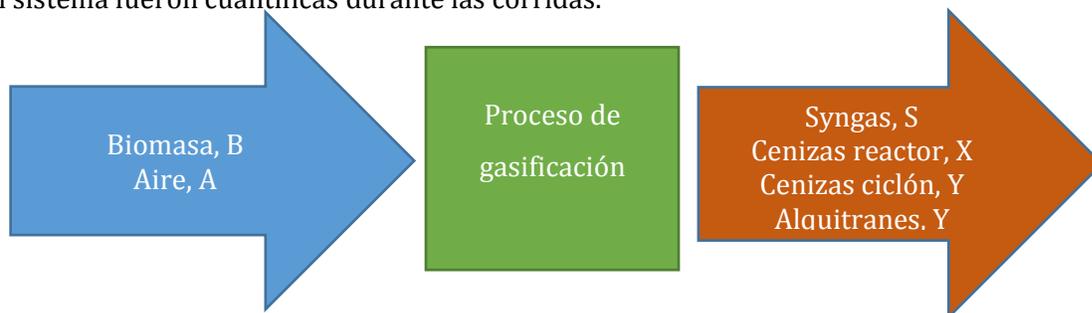


Figura 6.3. Flujos que ingresan y salen de las unidades de reacción y limpieza

Para las corrientes que salen de las unidades de reacción y limpieza, la única desconocida fue el flujo de alquitranes generado. Esto, pues el flujo de syngas se midió con el medidor de flujo de tipo orificio de manera continua como se aprecia en la Figura 6.4. Los flujos de cenizas, tanto del reactor como del ciclón, se obtuvieron al dividir la masa recolectada en ambos depósitos entre el tiempo de operación del motor.

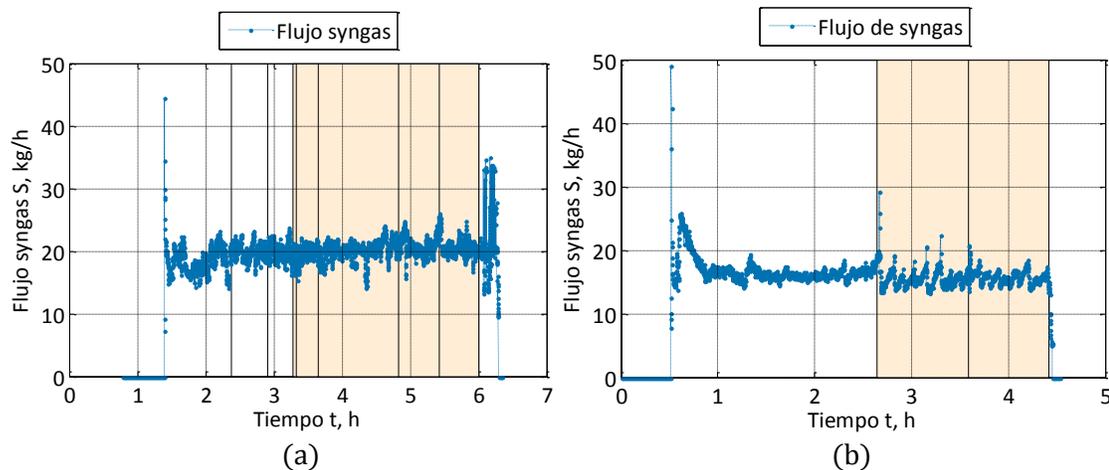


Figura 6.4. Flujo másico de syngas durante (a) la primera réplica de astillas del 03/21/2017 y (b) segunda réplica de pellets del 07/08/2017, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis para los balances de masa (área naranja).

Al comparar los promedios de los flujos de las corrientes según cada tipo de combustible alimentado (ver Cuadro 6.8), se aprecia que al alimentar pellets de madera: el consumo de biomasa aumentó, sin embargo, el consumo de aire y la producción de syngas disminuyeron y la cantidad de cenizas recolectadas aumentaron. Aunque el porcentaje analítico de cenizas es prácticamente igual entre las biombras, al operar una cantidad similar de horas la planta piloto, el material que no se transformó en gas y fue removido del sistema aumentó al utilizar pellets de madera.

Por lo tanto, según esta primera información, se aprecia un proceso de gasificación de pellets más ineficiente, ya que, según los valores obtenidos de contenido de carbono fijo para ambas biombras (5 % aproximadamente), se hubiera esperado una conversión mayor de material para los pellets, pero debido condiciones de temperatura o presión o tiempo de residencia dentro del reactor, no lo logró.

Cuadro 6.8. Flujos de corrientes que ingresan y sales del sistema de reacción

Variables	Astillas	Pellets
Flujo de biomasa B, kg/h	11.04	12.75
D.std. Flujo de biomasa B, kg/h	0.03	0.03
Flujo de aire A, kg/h	11.23	9.48
D.std. Flujo de aire A, kg/h	1.74	0.97
Flujo de syngas S, kg/h	19.36	16.60
D.std. Flujo de syngas S, kg/h	5.09	3.93
Acumulación de cenizas del reactor X, kg/h	0.38	0.78
D.std. Acumulación de cenizas del reactor X, kg/h	0.01	0.02
Acumulación de cenizas del ciclón Y, kg/h	0.08	0.15
D.std. Acumulación de cenizas del ciclón Y, kg/h	0.01	0.01

6.4.1 Cálculo del balance de masa

Como se mencionó previamente los alquitranes son subproductos que se generan durante las reacciones de reducción y oxidación dentro del reactor según el mecanismo simplificado que se muestra en la Figura 6.5. Es una corriente que no fue posible cuantificar durante la operación de la planta; sin embargo, si fue posible calcularla mediante una herramienta típica en la ingeniería química: un balance de masa.

Se resuelve entonces un balance global con una serie de balances elementales, ya que el gasificador es un sistema donde intervienen reacciones químicas y a pesar de que las especies en cada corriente varíen, el número de átomos de cada elemento no lo hará (Torres et al., 2016). En la ecuación 6.1 se presentan los cinco balances seleccionados, el primero es un balance de masa global, mientras que los otros cuatro corresponden a balances de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N) respectivamente. Los coeficientes $w_{i,j}$, hacen referencia a fracciones masa, donde i identifica el balance elemental y j a la corriente

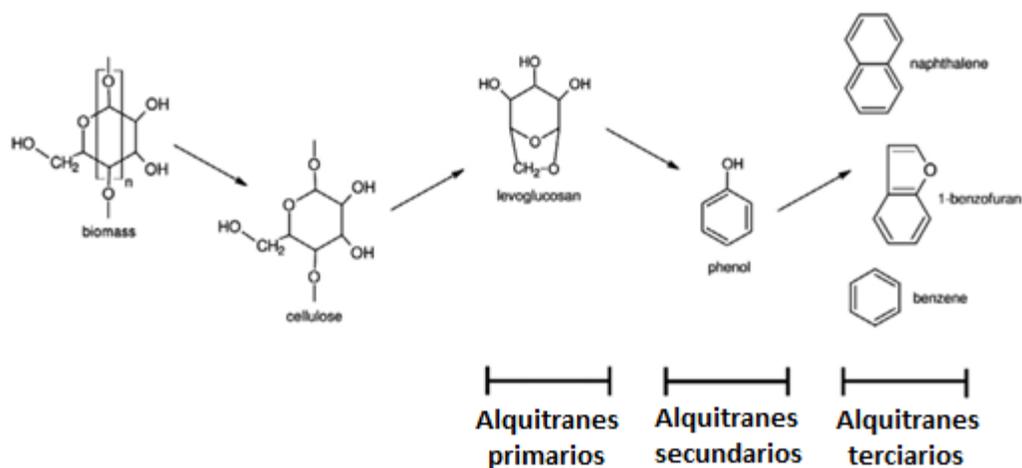


Figura 6.5. Mecanismo simplificado de formación de alquitrans (Molino, Chianese, & Musmarra, 2016).

$$\begin{bmatrix}
 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\
 w_{C,B} & 0 & -w_{C,X} & -w_{C,Y} & -w_{C,T} & -w_{C,S} \\
 w_{H,B} & w_{H,A} & -w_{H,X} & -w_{H,Y} & -w_{H,T} & -w_{H,S} \\
 w_{O,B} & w_{O,A} & -w_{O,X} & -w_{O,Y} & -w_{O,T} & -w_{O,S} \\
 0 & w_{N,A} & 0 & 0 & 0 & -w_{N,S}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 B \\
 A \\
 X \\
 Y \\
 T \\
 S
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \quad (6.1)$$

Siendo,

B= Flujo de biomasa, kg/h.

X= Flujo de cenizas reactor, kg/h.

T= Flujo de alquitrans, kg/h.

$w_{C,B}$ = Composición C en biomasa, %.

$w_{C,Y}$ = Composición C en cenizas ciclón, %.

$w_{C,S}$ = Composición C en syngas, %.

$w_{H,A}$ = Composición H en aire, %.

$w_{H,X}$ = Composición H en cenizas, %.

$w_{H,T}$ = Composición H en alquitrans, %.

$w_{O,B}$ = Composición O en biomasa, %.

$w_{O,X}$ = Composición O en cenizas, %.

$w_{O,T}$ = Composición O en alquitrans, %.

$w_{N,A}$ = Composición N en aire, %.

A= Flujo de aire, kg/h.

Y= Flujo de cenizas ciclón, kg/h.

S= Flujo de biomasa, kg/h.

$w_{C,X}$ = Composición C en cenizas, %.

$w_{C,T}$ = Composición C en alquitrans, %.

$w_{C,A}$ = Composición C en aire, %.

$w_{H,B}$ = Composición H en biomasa, %.

$w_{H,Y}$ = Composición H en cenizas ciclón, %.

$w_{H,S}$ = Composición H en syngas, %.

$w_{O,A}$ = Composición O en aire, %.

$w_{O,Y}$ = Composición O en cenizas ciclón, %.

$w_{O,S}$ = Composición O en syngas, %.

$w_{N,S}$ = Composición N en syngas, %.

Las suposiciones que se realizaron para resolver el sistema de ecuaciones perteneciente al balance de masa elemental según Torres et al., (2016), son:

- ✓ El aire seco está compuesto únicamente por un 21% de oxígeno y un 79% de nitrógeno en base molar, así mismo se contempla la humedad relativa del aire dado que esta se midió.
- ✓ La biomasa está libre de nitrógeno, así como lo estarán la ceniza del ciclón y del reactor.

Adicionalmente, se fijó, de diferentes fuentes, el contenido de carbono para la biomasa, las cenizas del reactor, las cenizas del ciclón y los alquitranes del sistema. La composición en la biomasa se obtuvo de la literatura, según Tenorio, Moya, Salas, & Berrocal, (2016). La composición de carbono de ambas cenizas se obtuvo de los resultados del ensayo de análisis elemental de biochar realizados en la Universidad de Western Ontario por la M.Sc Cindy Torres Quirós. Los valores se presentan en el Cuadro 6.9, y lleva a la tercera suposición:

- ✓ El contenido de carbono de la biomasa, las cenizas del reactor, las cenizas del ciclón, y las fracciones de alquitranes en el sistema será la reportada en el Cuadro 6.9 **Error! Reference source not found.** y son las mismas para todas las corridas.

Cuadro 6.9. Contenido de carbono en la biomasa, cenizas y alquitranes

Material	TOC Astillas, % m/m	TOC Pellets, % m/m
Biomasa	0.4601	0.4848
Cenizas del reactor	0.7662	0.7662
Cenizas del ciclón	0.7662	0.7662
Alquitranes	0.4601	0.4848

El siguiente recurso fue utilizar el análisis elemental de las biomásas, y a partir de esto se generó una cuarta suposición:

- ✓ La composición elemental, según lo reportado en el Cuadro 6.4, de las astillas de madera será $C_{1.0}H_{1.816}O_{0.835}$ y para los pellets $C_{1.0}H_{1.811}O_{0.823}$, y será la misma para todas las corridas, así mismo se tomará dicha composición elemental para las fracciones de alquitranes en el sistema.

Esta suposición se sustenta en el hecho de que las especies que se derivan de la biomasa suelen ser pobres en hidrógeno, de hecho la composición dependerá especialmente de las temperaturas en el sistema de reacción, pero se acepta esta desviación porque las corrientes que afecta no son las principales del balance (B , A y S) y no hacer esta suposición llevaría a otras que se contradicen directamente con las experiencias llevadas a cabo (Maschio, de Carvalho, & Schiozer, 2010). El balance resultante se muestra en la ecuación 6.1, en este se resaltan las tres variables que desconocidas: composición de hidrógeno en los alquitranes, composición de oxígeno en los alquitranes y el flujo de alquitranes. Existen, entonces, 6 ecuaciones y 3 incógnitas, por lo tanto, el sistema se puede resolver.

Al resolver este balance para cada corrida experimental se obtienen, en promedio, los resultados que se muestran en el Cuadro 6.10, los cuales indican que en promedio al alimentar astillas de madera la corriente de alquitranes fue en su mayoría agua: un 85 % aproximadamente de los 2.45 kg/h que se generaron. En cambio, al alimentar pellets el contenido de agua disminuyó a un 59 %, es decir, la producción de alquitranes fue mayor, lo cual influyó en el factor de ensuciamiento del sistema. Del balance, además, se obtuvo la fracción peso de alquitranes en fase gaseosa que acompañó la corriente de syngas. Para ambos tipos de biomasa el porcentaje fue bajo, entre el 2 % y el 3 %, lo cual indica que el sistema de limpieza fue eficaz para remover y acumular los contaminantes que acompañaban al gas producto, independientemente al tipo de combustible alimentado.

Cuadro 6.10. Caracterización de corriente de alquitranes para ambas biomasa

Variable	Astillas	Pellets
Acumulación de alquitranes en el sistema T, kg/h	2.45	4.43
D.std. Acumulación de alquitranes en el sistema T, kg/h	2.22	0.98
Fracción peso de agua en los alquitranes acumulados w_{wa} , % m/m	85.71	58.97
D.std. Fracción peso de agua en los alquitranes acumulados, % m/m	16.71	15.37
Fracción peso de alquitranes en el syngas húmedo w_{as} , % m/m	2.21	2.64
D.std. Fracción peso de alquitranes en el syngas húmedo, % m/m	3.03	4.57
Fracción mol de agua en el syngas libre de alquitranes w_{ws} , % m/m	7.09	5.28
D.std. Fracción mol de agua en el syngas libre de alquitranes, % m/m	6.58	6.83

Para cada balance matemático realizado existe un error asociado, ya que se definieron restricciones, pues de no hacerlo se pudieron haber obtenido fracciones masa o moles mayores que la unidad o flujos negativos, aun cuando ya se contempló la dirección de las corrientes en los signos de la matriz de balances. En el Cuadro 6.11 se muestran los errores asociados a cada balance realizado y para cada biomasa, como se aprecia, ningún error superó el 2 %, lo cual es aceptable.

Cuadro 6.11. Porcentajes de error en balances elementales globales del sistema

Parámetro	Astillas	Pellets
Error del balance de masa global, %	-0.07	1.18
D.std. Error del balance de masa global, %	<i>0.19</i>	<i>1.05</i>
Error del balance de masa C, %	-0.56	-1.45
D.std. Error del balance de masa C, %	<i>0.97</i>	<i>3.83</i>
Error del balance de masa H, %	0.21	0.10
D.std. Error del balance de masa H, %	<i>0.28</i>	<i>0.17</i>
Error del balance de masa O, %	-0.29	0.48
D.std. Error del balance de masa O, %	<i>1.27</i>	<i>2.06</i>
Error del balance de masa N, %	0.59	-1.26
D.std. Error del balance de masa N, %	<i>1.02</i>	<i>5.89</i>
Error total de balance de masa, %	1.72	4.47
D.std. Error del balance de masa, %	<i>0.44</i>	<i>1.13</i>

6.4.2 Resultados de composición syngas

La composición del syngas que es producido a partir de una biomasa es transcendental para su verificar su capacidad como combustible en un proceso de gasificación. El reporte de los valores de composición se puede realizar de dos maneras: en base limpio y seco, el cual no incluye la composición de alquitranes, ni de agua ni de oxígeno; o limpio y húmedo, sin incluir alquitranes ni oxígeno, pero si agua. Se reportan ambos en base libre de oxígeno, pues, aunque se procuró que la línea instalada para la toma de la muestra de syngas estuviera sellada, el ingreso de aire fue inevitable.

En la Figura 6.6 se muestra en color amarillo el comportamiento del oxígeno durante dos corridas experimentales, se aprecia tanto en la Figura 6.6a como en la Figura 6.6b que el contenido de oxígeno aumenta sin razón alguna y provocó por ende una disminución de la concentración de los otros componentes. Además, para un sistema de gasificación es común asumir una reducción total del oxígeno que ingresa al sistema de reacción, pues de manera ideal, el agente gasificante se alimenta en condiciones sub-estequiométricas acorde a lo requerido para etapa de combustión completa, pues el objetivo principal es entregar la energía suficiente y requerida por las reacciones de reducción propias del proceso de gasificación, no un convertirse en un proceso de combustión completa de la biomasa.

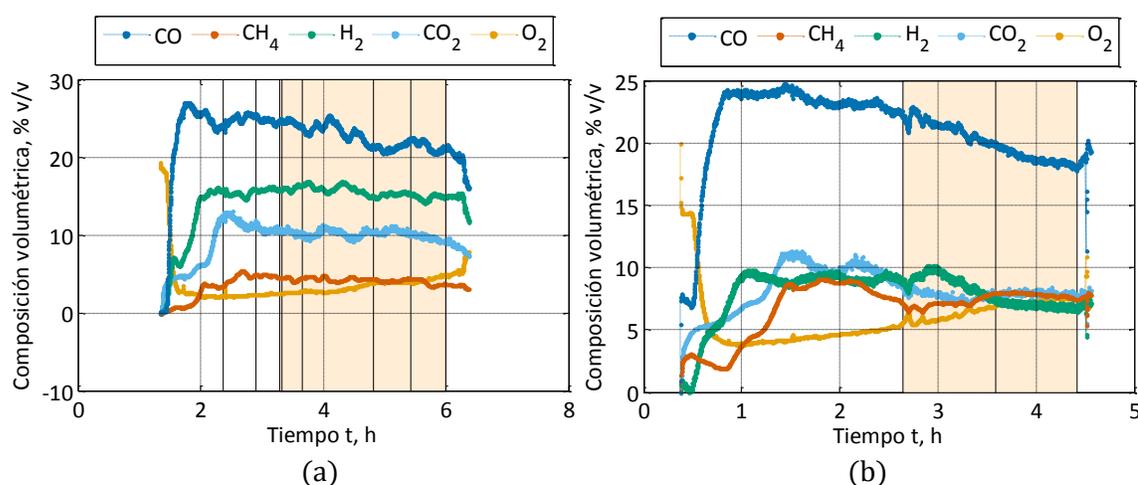


Figura 6.6. Composición volumétrica del syngas limpio y seco producido (a) la primera réplica de astillas del 03/21/2017 y (b) segunda réplica de pellets del 07/08/2017, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis (área naranja).

En el Cuadro 6.12 se muestran los valores de composición de diferentes en base limpia y seca. Las composiciones de monóxido de carbono e hidrógeno, (los compuestos que en mezcla se denominan gas de síntesis, gas producto o syngas), son las más importantes que se deben analizar.

Cuadro 6.12. Composición del syngas seco y en base libre de oxígeno

Variable	Astillas	Pellets
Composición de monóxido de carbono CO y_{CO} , % v/v	25.11	27.96
D.std. Composición de monóxido de carbono CO, % v/v	1.24	1.59
Composición de metano CH ₄ y_{CH_4} , % v/v	4.70	10.06
D.std. Composición de metano CH ₄ , % v/v	0.56	1.88

Cuadro 6.12 (continuación). Composición del syngas seco y en base libre de oxígeno

Variable	Astillas	Pellets
Composición de hidrógeno H ₂ y _{H₂} , % v/v	16.42	13.37
D.std. Composición de hidrógeno H ₂ , % v/v	0.83	3.65
Composición de dióxido de carbono CO ₂ y _{CO₂} , % v/v	12.03	12.01
D.std. Composición de dióxido de carbono CO ₂ , % v/v	1.47	1.36

En detalle, la composición de monóxido de carbono para astillas fue de (25.11±1.24) % y para pellets de (27.96+1.59) %, por lo cual, según el error asociado, para ambos niveles no existieron diferencias en el contenido de monóxido de carbono del syngas para ambas biomásas. Para el contenido de hidrógeno en pellets, debido a la gran desviación de los datos, la cual fue del 3.65 %, se obtuvieron valores más bajos que al alimentar astillas. Existen varias hipótesis por las que sucede esto, la primera es que dentro del reactor no se alcanzaron las temperaturas adecuadas para un proceso eficiente de gasificación, esto provocó que el “cracking” o reformación del biochar fuera ineficiente y que hidrocarburos con material disponible para reducir no se descompusieran térmicamente.

Esto, pues según A. Kumar, Jones, & Hanna, (2009) a temperaturas superiores a (750-800) °C, la naturaleza endotérmica de las reacciones de producción de H₂ (Reacción de reformado de metano en vapor, reacción 6.1 y la reacción heterogénea agua-gas, reacción 6.2) resulta en un aumento del contenido de H₂ y una disminución del contenido de CH₄ con un aumento de la temperatura, lo cual no sucedió, pues se reportan valores entre 690 °C y 750 °C en la zona de restricción al operar pellets (Apartado 6.5.1). Mencionar que a temperaturas superiores a los (850-900) °C, dominan el reformado de metano con vapor y las reacciones de Boudouard (reacción 6.3), lo que da lugar a aumentos en el contenido de CO. La alta temperatura también favorece la destrucción y el reformado del alquitrán (reacción 6.4) que conduce a una disminución del contenido de alquitrán y un aumento la eficiencia del proceso.

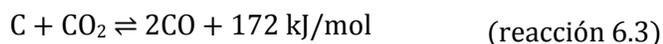
Reacción de reformado de metano en vapor



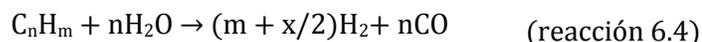
Reacción heterogénea agua-gas



Reacción de Boudouard



Reformado de alquitranes en vapor



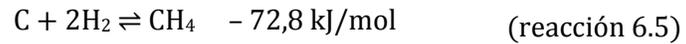
La segunda hipótesis está ligada a la primera, ya que el tiempo de residencia de las partículas sólidas dentro del reactor estuvo afectado por la acción del agitador a la base del mismo, ya que se configuró el equipo para que este componente se activara con mucha más frecuencia que al emplear astillas de madera. Se realizó esta modificación debido a que el descenso de los pellets por la garganta dentro del reactor no fue óptimo, provocando atascamientos en esta zona en específico. Por lo tanto, cuando la parrilla agitaba, casi de inmediato, se liberaba el atascamiento y material no combustionado caía a una zona de reducción vacía, ya que, al no descender biomasa de forma continua, el material en la zona se consumió sin reponerse, fenómeno que provoca que la temperatura disminuya hasta 200 °C en esta zona en cuestión de (20-30) s aproximadamente. Esto no solo afectó el tiempo de residencia, sino que también el perfil térmico dentro del reactor cambiaba abruptamente lo cual afectó los equilibrios de las reacciones y por ende la producción de gas combustible con altas composiciones de hidrógeno.

Mencionar que al aumentar la frecuencia de agitación se evitaron los atascamientos en el reactor, sin embargo, provocó un aumento del descenso de biomasa, por lo tanto, con mayor frecuencia combustible ingresó a la zona de combustión y el tiempo de residencia en la zona de reducción fue corto, lo que se tradujo entonces a un: mayor consumo de biomasa, mayor cantidad de material sin reaccionar que se acumuló junto a las cenizas y por ende una menor tasa de producción de syngas, fenómeno que se aprecia en las magnitudes de los flujos promedio, como se discutió anteriormente.

En adición, reportar en base húmeda, es decir cuando se suma el porcentaje de agua en la corriente gaseosa, obtenida según Ley de Raoult, es una manera más correcta de caracterizar la corriente gaseosa, pues integra la mayoría de sus componentes. En el Cuadro 6.13 se

muestran los valores de composición incluyendo el vapor de agua. Como se esperaba, el monóxido de carbono, el dióxido de carbono producido para ambos tipos de biomasa fue altamente similar, al igual que el nitrógeno presente. Como ya se mencionó, el contenido de metano aumentó al alimentar pellets (8.97 % en pellets y 4.40 % en astillas) sacrificando el contenido de hidrógeno en la mezcla. La formación de metano, según Prins, (2005), se basa en la reacción 6.5, que debido a los perfiles de temperatura y presión, esta reacción tuvo prioridad dentro del reactor.

Reacción de formación de metano



Cuadro 6.13. Composición del syngas húmedo y en base libre de oxígeno

Variable	Astillas	Pellets
Composición de monóxido de carbono CO y_{CO}, % v/v	23.52	26.33
D.std. Composición de monóxido de carbono CO, % v/v	1.21	1.58
Composición de metano y_{CH₄}, % v/v	4.40	8.97
D.std. Composición de metano CH ₄ , % v/v	0.54	1.65
Composición de hidrógeno y_{H₂}, % v/v	15.31	13.38
D.std. Composición de hidrógeno H ₂ , % v/v	0.80	3.46
Composición de dióxido de carbono y_{CO₂}, % v/v	11.24	11.36
D.std. Composición de dióxido de carbono CO ₂ , % v/v	1.40	1.35
Composición de nitrógeno y_{N₂}, % v/v	38.90	34.68
D.std. Composición de nitrógeno N ₂ , % v/v	2.49	3.67
Composición de vapor de agua y_{H₂O}, % v/v	7.09	5.28
D.std. Composición de vapor de agua H ₂ O, % v/v	0.75	0.62

6.4.3 Caracterización del agente gasificante

Existen varios agentes gasificantes que reaccionan con el carbono sólido para convertirlo en gases combustibles, los más importantes son: vapor, dióxido de carbono, oxígeno puro y aire. Este último es el más utilizado debido a que no incluye ningún costo de adquisición (durante la operación se emplea la succión del motor para crear el vacío en el

reactor que permite la succión de aire y el transporte del syngas hacia el motor), sin embargo, al ingresar nitrógeno al sistema, como gas inerte, provoca una disminución del poder calórico del syngas. Por ejemplo, Wang, Weller, Jones, & Hanna,(2008) determinaron que el valor de calentamiento y el contenido de H₂ del gas de síntesis pueden aumentarse si se utiliza vapor como agente de gasificación, en cuyo caso el poder calórico del gas de producto podría ser de aproximadamente (10-15) MJ/Nm³ comparado con (3-6) MJ/Nm³ gasificación de la biomasa por aire, por lo tanto realizar una investigación donde se emplee vapor de agua como agente gasificante sería importante para el sector académico e industrial del país.

El agente gasificante utilizado para el proceso fue el aire y como se mencionó anteriormente en las unidades que componen el sistema de reacción, el flujo aire que ingresa al reactor fue precalentado mediante unas mangueras que rodean mediante una distribución helicoidal la parte inferior del reactor. De esta manera se dividió el flujo neto en estas cinco mangueras que guían hasta la zona de combustión, donde el oxígeno del aire permitió la oxidación parcial de la biomasa mientras esta descendía por el reactor.

En el Cuadro 6.14 se muestran las propiedades de la corriente del aire que ingresó al reactor. Estas propiedades son importantes, pues para el estudio del desempeño del proceso se requiere conocer el flujo másico de oxígeno como agente gasificante y la cantidad de agua que ingresa en esta corriente. Estos datos son esenciales para, primero completar el balance de masa, segundo, para obtener la razón biomasa/agente oxidante, un parámetro que describe desde otra perspectiva el desempeño del sistema de reacción y tercero, para calcular la razón equivalente, parámetro que me indica la cercanía que existió a un proceso combustión total de la biomasa, lo cual no era deseado.

Cuadro 6.14. Propiedades de la corriente de aire que ingresa al reactor como agente gasificante

Variable	Astillas	Pellets
Flujo de aire A, kg/h	11.23	9.48
D.std. Flujo de aire A, kg/h	1.74	0.97
Humedad relativa del aire HR, %	38.76	43.16
D.std. Humedad relativa del aire HR, %	8.96	3.12
Fracción mol de agua en el aire n_{wa} , % mol/mol	2.54	2.42
D.std. Fracción mol de agua en el aire, % mol/mol	0.68	0.09

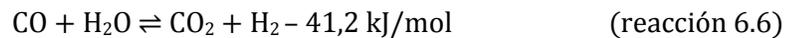
Cuadro 6.14 (continuación). Propiedades de la corriente de aire que ingresa al reactor como agente gasificante

Variable	Astillas	Pellets
Temperatura aire de entrada T_a , °C	34.19	31.49
D.std. Temperatura aire de entrada, °C	1.69	0.89

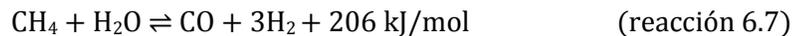
Los datos recopilados muestran que la razón molar agua/aire se mantuvo para las corridas con astillas de madera y con pellets, con valores de 2.54 % para astillas y 2.42 % para pellets. Como se fijó la humedad de la biomasa, el efecto de la cantidad de agua que ingresa al sistema no fue un punto base para concluir en la existencia o no de diferencias significativas en el desempeño del módulo que se encontraron para ambas biomasa.

Señalar que solo existen estas dos fuentes de agua, la que ingresa con la biomasa, y la que ingresa con el aire según su humedad relativa. Ambas corrientes de agua se transformaron en vapor, elemento fundamental para conversión termoquímica de la biomasa, ya que es reactivo en las reacciones más importantes de reducción, como se aprecia a continuación en las siguientes reacciones:

Reacción homogénea agua-gas (o Water-gas shift reaction)



Reacción de reformado de metano en vapor



6.5 Sistemas de recuperación de calor

6.5.1 *Temperaturas en el reactor*

La medición en varios puntos de la temperatura también permite apreciar diferencias dentro del proceso de gasificación de las biomasa empleadas. El perfil de temperatura dentro del reactor, por ejemplo, está relacionado directamente con el desempeño del proceso de descomposición térmica de la biomasa.

De los resultados fisicoquímicos de la biomasa se concluye que ambas biomasa empleadas poseen características altamente similares, su única variación está en la

estructuración macro de sus partículas, es decir, el proceso de densificación, lo cual afecta en este caso al proceso de gasificación y los sistemas de recuperación de calor, pues en la Figura 6.7 se muestran el comportamiento de las temperaturas dentro del reactor al alimentarlo con astillas de madera, el cual fue muy distinto al observado por una corrida con pellets, como se muestra en la Figura 6.8. Se observa que la corrida con astillas es estable, es decir, que las variaciones de los valores de las diferentes temperaturas oscilan de la manera normal. Las magnitudes de las temperaturas son altas, en la zona de restricción se superaron los 800 °C, en la zona de pirólisis se alcanzaron los 400 °C y a la salida del reactor los valores fueron estables y cercanos a los 375 °C.

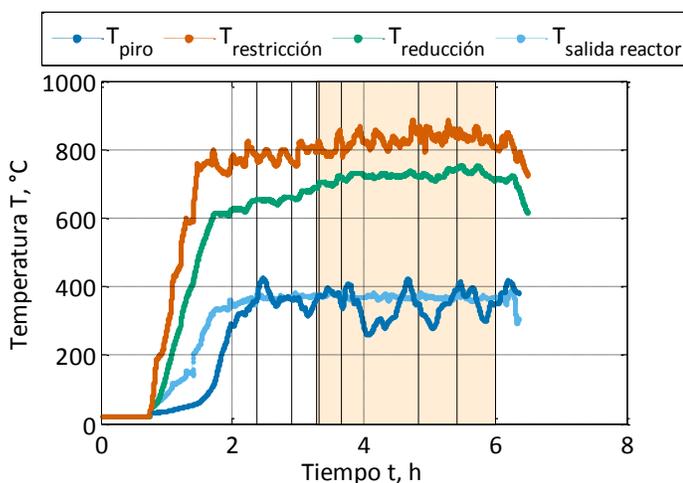


Figura 6.7. Perfiles de temperatura el reactor durante la corrida de astillas de madera del 03/21/2017, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis para los balances de masa (área naranja).

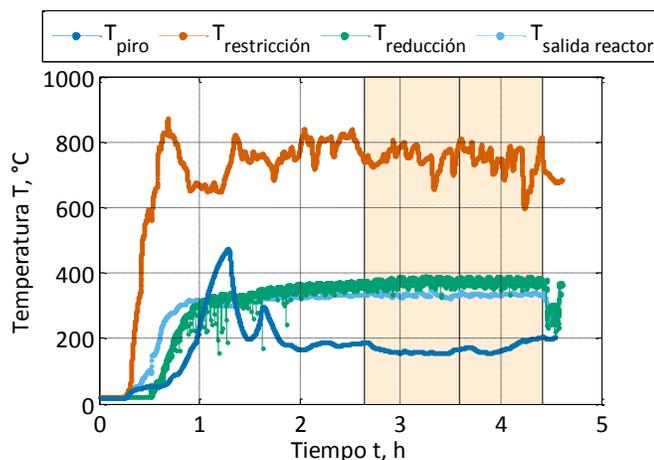


Figura 6.8. Perfiles de temperatura en el reactor durante la corrida de pellets de madera del 07/08/2017, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis para los balances de masa (área naranja)

En la Figura 6.8 se muestra los comportamientos de las mismas variables, pero para una corrida con pellets de madera. Como se aprecia, las temperaturas fueron menores, pero con oscilaciones con respecto al tiempo similares, es decir, una aparente estabilidad en ambas corridas. En el Cuadro 6.15 se resumen los valores encontrados para cada una de estas variables para las 6 corridas realizadas y el error asociado a según las desviaciones de los datos del promedio estadístico encontrado.

Cuadro 6.15. Temperaturas promedio en las operaciones de limpieza y enfriamiento

Variable	Astillas	Pellets
Temperatura aire a la de entrada T_a , °C	34.19	31.49
D.std. Temperatura aire de entrada, °C	1.69	0.89
Temperatura promedio pirólisis T_{piro} , °C	329.27	182.11
D.std. Temperatura promedio pirólisis, °C	42.32	41.11
Temperatura en zona de restricción T_{rstb} , °C	804.19	731.69
D.std. Temperatura en zona de restricción, °C	36.93	82.99
Temperatura en zona de reducción T_{red} , °C	584.99	514.24
D.std. Temperatura en zona de reducción, °C	52.27	19.58
Temperatura a la salida del gasificador T_{gas} , °C	373.71	348.64
D.std. Salida del gasificador, °C	19.95	16.47

Como se mencionó, el perfil de temperatura dentro del reactor al emplear pellets se describió por poseer magnitudes de temperatura menores que al alimentar astillas. En la zona de restricción, una de las zonas de mayor importancia dentro del reactor, pues es donde sucede el cracking del biochar en las especies gaseosas de interés- existió una disminución de 70 °C aproximadamente, lo cual afectó directamente el desempeño de las reacciones de reducción o gasificación, las cuales son endotérmicas.

La eficiencia de la etapa de gasificación o reducción está ligada a proceso de pirólisis de la biomasa, pues esta es una etapa que precede a la gasificación y en ella sucede la descomposición térmica de moléculas de hidrocarburos más grandes de la biomasa en moléculas de gas más pequeñas sin reacción química importante con aire, por lo tanto la eficiencia de todo el proceso es proporcional a la capacidad de descomposición de la biomasa en la zona de pirólisis para producir un tasa de gases combustibles que se quemarán en la zona

de oxidación para aportar energía a todo el proceso dentro del reactor, en específico a las reacciones de gasificación o reducción

De manera detallada, con respecto a la temperatura en la zona de pirólisis, se encontraron valores cercanos a los (180 ± 41) °C para pellets de madera, una diferencia de 150 °C aproximadamente que al alimentar astillas de madera: (329 ± 42) °C. Basu (2013) menciona que una correcta descomposición de las largas cadenas de hidrocarburos en un proceso de pirólisis sucede en el rango de $(250-600)$ °C, por lo tanto, este impedimento en los pellets de alcanzar estas temperaturas afecta el desempeño general del proceso de transformación, pues la gasificación, como paso posterior, depende estrictamente de los productos sólidos, líquidos y gaseosos producidos durante la pirólisis para lograr una mayor eficiencia en las reacciones químicas entre los hidrocarburos, el vapor, el dióxido de carbono, el oxígeno y el hidrógeno en la parte inferior del reactor. La geometría entonces es un factor importante que implica un descenso en la eficacia del proceso, el cual es afectado por la temperatura y la velocidad de calentamiento.

En las siguientes secciones se continuarán describiendo las diferentes condiciones operacionales que permitirán describir el porqué, el factor geometría, afecta el desempeño de un proceso de gasificación de biomasa en un reactor de lecho descendente. Específicamente en la sección 6.10 se retomarán los resultados y se asociarán entre sí para efectuar las conclusiones que responden a los objetivos de esta investigación.

6.5.2 Sistema de enfriamiento y limpieza

Las unidades utilizadas para la limpieza del gas producto también permitieron enfriarlo. Este enfriamiento permitió la condensación de hidrocarburos en mezcla con el syngas que dañarían potencialmente el motor de combustión, por lo tanto, analizar el desempeño de estos equipos y compararlo entre ambas biomásas también es importante para definir diferencias significativas. En la Figura 6.9 se muestra el comportamiento de las temperaturas en las unidades de proceso de limpieza y enfriamiento al procesar astillas de madera. Comparando con los resultados obtenidos para pellets de madera, Figura 6.10, hubo mucha mayor estabilidad del sistema, además las corrientes de proceso en general fueron más calientes.

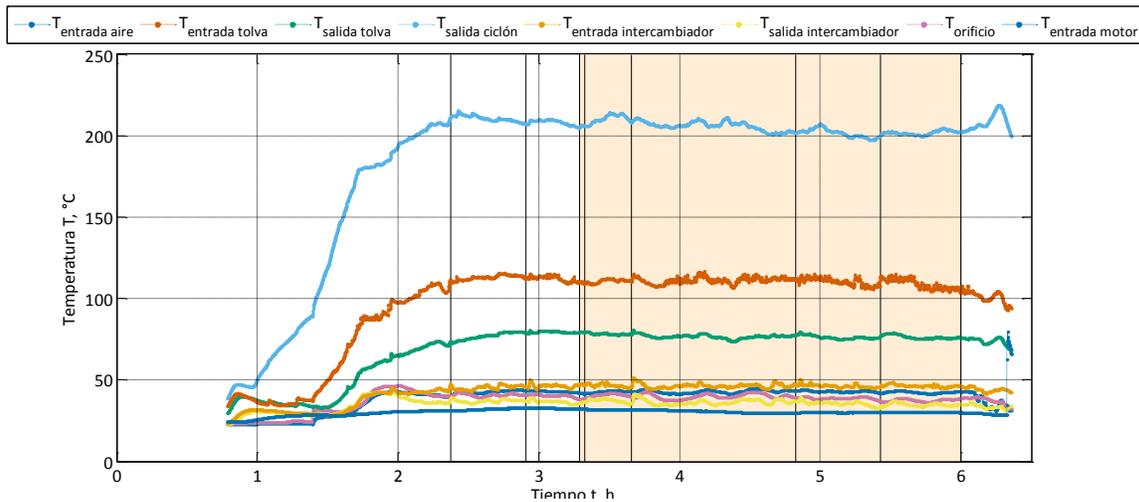


Figura 6.9. Perfiles de baja temperatura en el sistema durante la corrida de astillas de madera del 03/21/2017, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis para los balances de masa (área naranja).

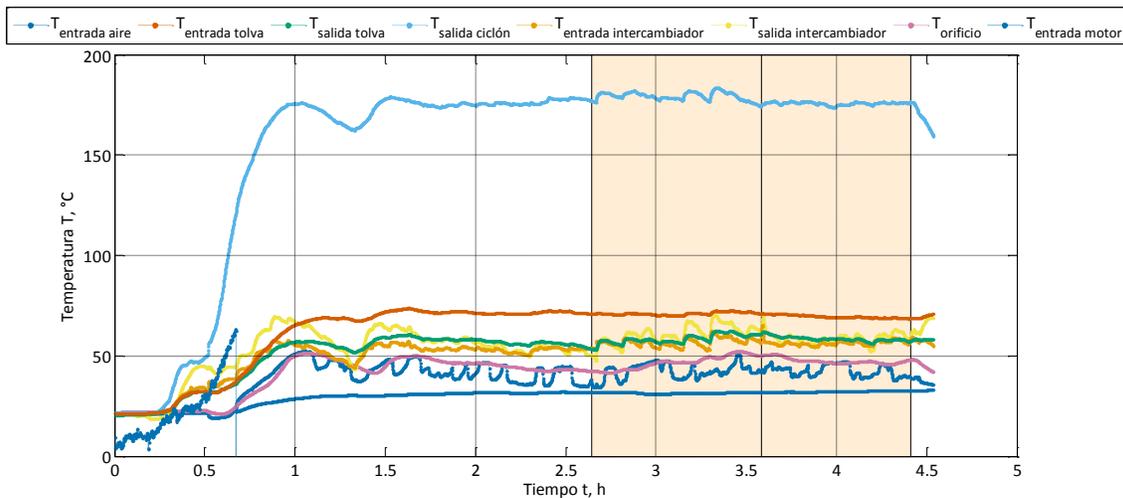


Figura 6.10. Perfiles de baja temperatura en el sistema durante la corrida de pellets de madera del 07/08/2017, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis para los balances de masa (área naranja)

En el Cuadro 6.16 se muestran los resultados promedio de todas estas temperaturas medidas. El efecto de una generación mayor de calor en el reactor al emplear astillas se muestra en valores altos de temperatura en las corrientes posteriores al sistema de reacción, sin embargo, las diferencias no fueron muy grandes al comparar con pellets, y la temperatura de entrada al motor para ambas biomásas fue alrededor de los 45 °C, lo cual dicta una gran

eficiencia de enfriamiento por parte de las unidades instaladas sin importar el tipo de combustible empleado.

Cuadro 6.16. Resultados de temperaturas en el sistema de enfriamiento y limpieza

Variable	Astillas	Pellets
Temperatura a la salida del ciclón $T_{s,cln}$, °C	202.32	192.97
D.std. Temperatura a la salida del ciclón, °C	8.61	10.02
Temperatura a la entrada tolva $T_{e,tv}$, °C	98.77	73.95
D.std. Temperatura a la Entrada tolva, °C	4.07	3.04
Temperatura a la salida tolva $T_{sd,tv}$, °C	75.97	62.98
D.std. Temperatura a la Salida tolva, °C	3.74	2.96
Temperatura a la entrada intercambiador $T_{e,int}$, °C	54.35	61.14
D.std. Temperatura a la entrada intercambiador, °C	2.96	3.39
Temperatura a la salida intercambiador $T_{sd,int}$, °C	42.00	57.51
D.std. Temperatura a la salida intercambiador, °C	3.41	6.72
Temperatura en el orificio T_{ori} , °C	40.95	48.13
D.std. Temperatura en el orificio, °C	2.62	4.34
Temperatura a la entrada motor $T_{e,mot}$, °C	46.80	42.72
D.std. Temperatura a la entrada motor, °C	2.17	5.91

En el Cuadro 6.17 se muestran las diferencias en el comportamiento térmico en las diferentes secciones de la planta piloto en función de la geometría. Este análisis permite caracterizar de forma general la capacidad de recuperación de calor de la planta piloto, ya que, de todas las unidades, solo en el ciclón el calor removido se pierde al ambiente, en las demás es aprovechado por medio de un intercambio con otras corrientes entrantes.

En el ciclón, por ejemplo, existió una disminución de temperatura, entre 170 °C y 155 °C y el calor que se removió no se aprovechó, por lo tanto, se podría rediseñar esta operación para que sea aislada térmicamente, y que la remoción de cenizas no implique una pérdida de energía que podría ser utilizada para el calentamiento de la biomasa que ingresa al reactor y así mejorar la eficiencia del proceso de reacción.

Cuadro 6.17. Diferencia en el comportamiento térmico

Unidades de enfriamiento	Astillas	Pellets
Cambio de temperatura neto en ciclón ΔT_{cln} , °C	171.39	155.67
Cambio de temperatura neto en cámara alimentación ΔT_{tiv} , °C	22.80	10.97
Cambio de temperatura neto en intercambiador ΔT_{int} , °C	12.35	3.62
Cambio de temperatura neto en filtro ΔT_{fil} , °C	1.05	13.00
Cambio de temperatura en zona de mangueras en el reactor ΔT_{int} , °C	430.48	383.85
Cambio de temperatura total (restricción / entrada motor) ΔT_{neto} , °C	757.39	688.97

En gas que fue producido en el reactor intercambió parte de la energía con el aire que ingresaba a la zona de combustión, el cual era transportado por las mangueras que rodean la parte inferior del reactor. Este proceso permitió un enfriamiento neto de 430 °C cuando se emplean astillas de madera y de 384 °C cuando se alimentan pellets.

El cambio es menor, pues, como se mencionó anteriormente, la zona de reducción del reactor posee menores temperaturas cuando el combustible era pellets. Existió un enfriamiento neto del gas desde la zona de restricción-la parte inferior del reactor- de (690-760) °C, hasta llegar a los 45 °C de temperatura que caracteriza la corriente de entrada al motor para ambas biomasas.

6.5.3 Motor y reactor

La medición de temperatura en las unidades de generación de energía y potencia tuvo como resultados los valores que se muestran en el Cuadro 6.18. Como se aprecia no existió efecto de los combustibles en este proceso. Todos los valores fueron similares y existe una diferencia de temperatura de 520 °C entre la corriente que ingresaba al motor, a 45 °C y la corriente de los gases exhaustos, a 570 °C. Estos gases se enfriaban hasta 343 °C después de intercambiar calor por medio de la chaqueta que recubría la parte superior del reactor, es decir existió un enfriamiento de 225 °C aproximadamente de los gases exhaustos antes de ser eliminados a la atmósfera.

Cuadro 6.18. Temperaturas de las corrientes de las unidades de generación de energía y potencia

Variable	Astillas	Pellets
Temperatura entrada motor $T_{e,mot}$, °C	46.80	42.72
D.std. Temperatura entrada motor, °C	2.17	5.91
Temperatura salida de motor $T_{sd,mot}$, °C	568.19	570.01
D.std. Temperatura salida de motor, °C	26.30	15.95
Temperatura mufla $T_{e,muf}$, °C	343.25	343.15
D.std. Temperatura mufla, °C	19.84	14.50
Temperatura refrigerante del motor T_{cool} , °C	52.21	54.05
D.std. Temperatura refrigerante del motor, °C	10.12	7.61
Diferencia de temperatura neto en motor $\Delta T_{neto,mot}$, °C	-521.39	-527.29
Diferencia de temperatura neto en chaqueta reactor $\Delta T_{neto,rect}$, °C	224.94	226.86

6.6 Energía y potencia

Se han considerado y analizado los datos obtenidos a partir de la operación de la planta piloto, enfocándose en las unidades de alimentación, reacción y enfriamiento y limpieza. A continuación, se describirán los resultados de la medición continua de energía y potencia del generador de la planta. En el Cuadro 6.19 se muestran los valores promedio de tensión y corriente para las tres fases, como se aprecia se mantuvieron valores estables de 220 V aproximadamente en cada fase. El amperaje en las fases fue diferente, para la fase 1, se suministraron 25 A en ambas biomásas, para la segunda 21 A y la tercera 21 A también. Es importante destacar que no debieron existir diferencias significativas entre todas las variables de energía y potencia que se midieron, ya que el sistema de cargas era fijo y estable, por lo que la potencia entregada debió ser igual para ambas biomásas y depende estrictamente de la estabilidad de la corrida para que no se apagara el motor, única condición que hubiera hecho un cambio en la capacidad de suministro de energía. Se buscó de esta manera identificar las variaciones que existen entre ambas geometrías en el sistema de reacción y limpieza (flujos, temperaturas, presiones, entre otros) para entregar la misma cantidad de potencia eléctrica.

Cuadro 6.19. Tensión y corriente de la energía eléctrica producida por tipo de biomasa

Variable	Astillas	Pellets
Tensión 1-2 $V_{rms,1-2}$, V	219.10	217.77
D.std. Tensión 1-2, V	2.57	29.52
Tensión 2-3 $V_{rms,2-3}$, V	222.63	221.30
D.std. Tensión 2-3, V	2.62	29.99
Tensión 3-1 $V_{rms,3-1}$, V	219.29	217.92
D.std. Tensión 3-1, V	2.58	29.54
Corriente 1 $A_{rms,1}$, A	25.61	24.69
D.std. Corriente 1, A	1.30	4.19
Corriente 2 $A_{rms,2}$, A	21.31	21.28
D.std. Corriente 2, A	4.85	4.47
Corriente 3 $A_{rms,3}$, A	21.50	21.27
D.std. Corriente 3, A	1.20	4.06

Sin embargo, se cuantificaron todas estas variables para definir los rendimientos y eficiencias pertinentes. Pues el consumo de biomasa, el contenido energético que posee la biomasa y el syngas si variaron entre combustibles, por lo que fue importante recopilar información de la potencia entregada, como se muestra en el Cuadro 6.20

Cuadro 6.20 Potencia entregada y variables que caracterizan la energía eléctrica generada

Variable	Astillas	Pellets
Potencia real P_{real} , W	6.23	6.20
D.std. Potencia real, W	0.12	0.07
Potencia reactiva P_{react} , var	5.64	5.80
D.std. Potencia reactiva, var	1.52	0.02
Potencia aparente P_{aprt} , VA	8.11	8.71
D.std. Potencia aparente, VA	2.03	0.05
Factor de potencia FP, adim.	0.75	0.71
D.std. Factor de potencia, adim.	0.01	0.01
Factor de potencia por desplazamiento FPD, adim.	0.76	0.71
D.std. Factor de potencia por desplazamiento, adim.	0.01	0.01

6.7 Evaluación del desempeño de la planta piloto

El diseño experimental realizado plateaba variar la geometría de la biomasa y evaluar su incidencia en el desempeño en un proceso de gasificación que culminara en producción de energía eléctrica a partir de la combustión del gas combustible generado. Para completar este objetivo se midieron una gran cantidad de variables, muchas de las cuales ya se mostraron en los apartados anteriores, sus respectivos valores y se analizaron las diferencias que se encontraron entre magnitudes reportadas para todas ellas para ambas biomásas. Sin embargo, para realmente describir el desempeño del proceso se calcularon los parámetros que se describieron en el apartado 2.4.

Primeramente, se analiza el papel del aire como agente gasificante, pues este suministra el O_2 para la combustión, influye entonces en el tiempo de residencia de la biomasa, pues al variar la cantidad de suministro de O_2 se controla el grado de combustión que, a su vez, afecta a la temperatura de gasificación, fenómeno observado en las corridas con pellets de madera: flujo bajo de aire y bajas temperaturas en el reactor. Por lo tanto, una mayor velocidad de flujo de aire da como resultado una temperatura más alta que conduce a una mayor conversión de biomasa y a una mayor calidad de combustible. Sin embargo, un grado excesivo de combustión, por otra parte, da lugar a una disminución del contenido energético del gas producido porque una parte de la energía de la biomasa (productos de la pirólisis) se gasta durante la combustión. Entonces, un exceso de flujo de aire reduce el tiempo de residencia, lo que provoca una disminución en el grado de conversión de biomasa.

El primer parámetro para evaluar entonces este fenómeno y el papel del agente gasificante es la razón biomasa/agente oxidante, (ver Cuadro 6.21) valor que indica los kilogramos de biomasa seca y sin cenizas que ingresaron al sistema por kilogramo de oxígeno que ingresa por la corriente de aire. Como se aprecia, a la hora de gasificar pellets de madera, se requirió de menos cantidad de oxígeno, un 26 % de diferencia específicamente. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el flujo de biomasa fue mayor al usar pellets, y el flujo de aire fue menor, lo cual indica que no se aprovechó el combustible durante el proceso de combustión parcial dentro de reactor, provocando temperaturas menores dentro del reactor que como consecuencia principal fue la mejor producción de syngas con un menor contenido de hidrógeno y una mayor producción de cenizas que se removieron del sistema.

Cuadro 6.21. Resultado de la razón biomasa/agente oxidante para cada tipo de biomasa

Variable	Astillas	Pellets
Oxígeno en el aire húmedo w_{oa} , kg/kg	0.23	0.23
D.std. Oxígeno en el aire húmedo, kg/kg	0.05	0.04
Razón biomasa/agente oxidante $Z_{b,o}$, adim.	3.27	4.44
D.std. Razón biomasa/agente oxidante, adim.	0.25	0.17
Razón equivalente Z_{eq} , adim.	1.69	2.29
D.std. Razon equivalente, adim.	0.09	0.08

El siguiente parámetro es la razón equivalente, el cual es relación de equivalencia que se utiliza comúnmente para indicar cuantitativamente si una mezcla de oxidante/combustible es rica, pobre o estequiométrica. Si es mayor que uno la mezcla es rica, menor que uno es pobre e igual a uno es una mezcla estequiométrica. Es decir, a medida que disminuye la cantidad de oxígeno, la mezcla de combustible y aire se vuelve rica en combustible ($Z_{eq} > 1$) con el resultado de que el CO_2 disminuirá y al mismo tiempo el CO aumentará (Jangsawang, Laohalidanond, & Kerdsuwan, 2015).

El propósito del proceso de gasificación es producir un gas de síntesis ajustando la relación de equivalencia y la temperatura del agente de gasificación. Estos parámetros son críticos para optimizar el proceso. Jangsawang, Laohalidanond, & Kerdsuwan, (2015), identificaron dos casos distintos de equilibrio químico en el proceso de gasificación. El primero está con el exceso de carbono presente en el proceso de gasificación, mientras que el segundo abarca el exceso de agente de gasificación con todo el gasificado. Un caso único en el punto entre estos dos casos se identifica donde el carbono está completamente gasificado sin exceso del agente de gasificación.

El valor promedio de la razón equivalente para astillas de madera es cercano a 1, con un valor de (1.69 ± 0.09) , y es menor que el encontrado al gasificar pellets de madera, lo cual indica que la atmósfera dentro del reactor al alimentar astillas de madera fue cercana a la ideal, donde se gasificó la biomasa sin un exceso considerable de agente gasificante, lo cual indica un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles: la biomasa como combustible y el aire como agente gasificante para producir syngas de manera más eficiente.

Estas condiciones de ineficacia de descomposición térmica de los pellets de madera se reflejan también en una conversión de carbono menor con respecto a astillas de madera (como se muestra en el Cuadro 6.22). Los resultados de la caracterización fisicoquímica aportan información suficiente para concluir que ambas biomásas son fisicoquímicamente similares (Prueba t-student con valores críticos similares a estadístico). Sin embargo, el proceso de descomposición térmica realizado es más ineficiente cuando se utilizan pellets de madera como combustible.

Cuadro 6.22. Conversión de carbono obtenida para ambos tipos de biomasa

Variable	Astillas	Pellets
Ingreso de carbono F_c , kg/h	4.25	4.93
D.std. Ingreso de carbono, kg/h	0.03	0.03
Acumulación de carbono A_c , kg/h	0.58	1.59
D.std. Acumulación de carbono, kg/h	0.02	0.04
Conversión de carbono ϵ_c , %	86.38	67.99
D.std. Conversión de carbono, %	0.52	0.84

Un 20 % aproximadamente es la diferencia de conversión de carbono entre una geometría y otra: (86.38 ± 0.52) % para astillas y (67.99 ± 0.84) % para pellets, es decir una gran cantidad de material que no logró participar en los mecanismos de reacción dentro del reactor se acumuló en las cenizas y en el biochar, ambos posteriormente eliminados del sistema.

Las corrientes energéticas se calculan a partir de los flujos másicos y los poderes calóricos respectivos. Existen tres corrientes: la energía que contiene el syngas, que se calculó utilizando las composiciones promedio de sus compuestos y el poder calórico teórico de cada uno. Para la biomasa se utilizó el poder calórico inferior, el cual excluye el calor de condensación del agua producida, y el flujo de biomasa. La tercera corriente energética es la potencia entregada, que se mide en kW, entonces fue solo realizar un cambio de unidades a MJ/h. Los resultados se muestran en el Cuadro 6.23. Estos valores de flujos energéticos permitieron calcular las diferentes eficiencias que caracterizaron el proceso de gasificación estudiado.

Cuadro 6.23. Corrientes energéticas dentro del sistema para ambos tipos de biomasa

Variable	Astillas	Pellets
Poder calórico syngas por volumen L_v , MJ/Nm ³	6.18	8.00
D.std. Poder calórico syngas por volumen LHV, MJ/Nm ³	0.25	0.76
Contenido energético syngas E_s , MJ/h	105.47	118.94
D.std. Contenido energético LHV syngas, MJ/h	15.44	22.81
Contenido energético biomasa seca E_b , MJ/h	147.43	180.76
D.std. Contenido energético LHV biomasa seca, MJ/h	3.22	3.74
Potencia E_p , MJ/h	22.42	22.32
D.std. Potencia, MJ/h	0.41	0.25

Los valores obtenidos de las diferentes eficiencias en el proceso se muestran en el Cuadro 6.24. La primera en obtener fue la Eficiencia de Gas Frío (*CGE-Cold Gas Efficiency* en inglés), este valor nos indica que para astillas de madera hubo menores pérdidas de energía de la biomasa después del proceso de transformación termoquímica y de limpieza; en otras palabras, la eficiencia del proceso de gasificación dentro del reactor es mayor al alimentar astillas con un valor de $(71.46 \pm 10.58) \%$, que, al utilizar pellets, con los cuales disminuye 5 puntos porcentuales $(66.12 \pm 12.76) \%$. Este concuerda con todo lo ya discutido para el proceso de gasificación de astillas de madera: temperaturas altas y estables dentro del reactor, composiciones de hidrógeno mayores, razón equivalente cercana a la unidad y un menor flujo de alquitranes generados

Cuadro 6.24. Eficiencias del proceso de gasificación para obtención de energía eléctrica para los dos tipos de biomasa

Variable	Astillas	Pellets
Eficiencia gas frío (syn/bio) ϵ_{CGE} , %	71.46	66.12
D.std. Eficiencia gas frío CGE (syn/bio), %	10.58	12.76
Eficiencia térmica global (pot/bio) ϵ_{GTE} , %	15.21	12.36
D.std. Eficiencia térmica global TE (pot/bio), %	0.44	0.29
Eficiencia del generador/motor (pot/syn) ϵ_{EGE} , %	21.41	18.94
D.std. Eficiencia del generador/motor EE (pot/syn), %	3.23	3.68

Otro parámetro importante es la eficiencia de conversión de la energía disponible en la biomasa alimentada en energía eléctrica. La Eficiencia Térmica Global indica el desempeño

general del módulo para realizar el proceso de gasificación para obtención de energía eléctrica. Los valores siempre serán bajos, en este caso en particular, fue de un (15.21 ± 0.44) % para astillas y un (12.36 ± 0.29) % para pellets. Fueron eficiencias pequeñas, pero son las esperadas, pues cualquier proceso de transformación de la materia incluye pérdidas de energía según las leyes de la termodinámica, sobre todo porque existieron una serie de operaciones unitarias y transformaciones termoquímicas, en el reactor y en el motor, que provocaron grandes pérdidas de energía. A los combustibles en forma de astillas se le lograron aprovechar más energía que en forma de pellets según los resultados obtenidos, pues 15.21 % de la energía disponible en las astillas fue convertida en energía eléctrica y solo un 12.36 % sucedió en los pellets de madera.

La tercera eficiencia dentro del proceso es la capacidad de aprovechar la energía que posee la corriente de syngas para la producción de energía eléctrica. Según el cálculo de la Eficiencia del Generador/Motor, hay una mejor conversión en esta unidad cuando se emplean astillas de madera, pero la diferencia es poca, ya que según la desviación promedio de los datos, calculada a partir de todas las desviaciones con el promedio de las variables medidas y requeridas para la obtención de estos valores, el rango en que ambas eficiencias interceden es amplio. Por lo tanto, el proceso de combustión del syngas para producir energía mecánica que será aprovechada por el generador (el cual posee una eficiencia de diseño del 95 %) para generar energía eléctrica es eficiente como operación unitaria sin importar el tipo de combustible utilizado.

Mencionar, que en el Cuadro 6.26 se mostrarán los resultados de las pruebas estadísticas t-Student aplicadas a los valores obtenidos para todos los parámetros determinados y concluir con base a estos datos si existe o no diferencias estadísticamente significativas entre ambas geometrías con respecto al desempeño de la planta piloto.

Los rendimientos muestran la utilidad de una cosa en relación con lo que cuesta, con lo que gasta, con lo que en ello se ha invertido. En el Cuadro 6.25 se muestran los rendimientos más importantes que caracterizan la operación del gasificador; por ejemplo, para obtener (564 ± 10.53) kWh de energía en un mes se requiere una tonelada de astillas de madera a un 16.00 % de humedad. En contraste, se requiere una tonelada de pellets para entregar 487.35 kWh en un mes también, es decir se obtiene un 13 % de más energía al alimentar astillas de madera.

Cuadro 6.25. Rendimientos del proceso de gasificación para los dos tipos de biomásas

Variable	Astillas	Pellets
Rendimiento eléctrico base húmeda R_{WH}, KWh/t	564.50	487.35
D.std. Rendimiento eléctrico base húmeda KWh/t	10.53	5.57
Rendimiento eléctrico base seca R_{DH}, KWh/t	674.68	579.24
D.std. Rendimiento eléctrico base seca, KWh/t	13.08	7.34
Rendimiento de syngas/biomasa $R_{s,b}$, kg/kg	1.75	1.31
D.std. Rendimiento de syngas/biomasa alim, kg/kg	0.46	0.31
Rendimiento de gas limpio y seco en base húmeda, Nm³/kg	1.55	1.18
D.std. Rendimiento de gas limpio y seco en base húmeda, Nm ³ /kg	0.31	0.29

Sin embargo, hay que considerar se alimentan astillas de madera de un tamaño específico, es decir se requiere entre un (30-40) % más de lo estimado para que después del proceso de tamizaje se obtenga la tonelada calculada, en otras palabras, se requieren entre (1.3-1.4) t de astillas de madera para obtener la cantidad de energía mencionada. Al despreocuparse el contenido de humedad, menos cantidad de combustible es requerido para generar la misma cantidad de energía, pero recordar que el combustible debe contener entre 15 % - 22 % de humedad en base húmeda para que el proceso sea eficiente. En forma de ejemplo, una residencia en promedio consumo 350 kWh en un mes en la zona metropolitana, por lo tanto, se requieren 620 kg de astillas de madera o 719 kg de pellets de madera para satisfacer esa demanda empleando esta planta piloto como fuente única de energía.

El rendimiento de syngas/biomasa es un valor que indica cuántos kilogramos se obtiene de syngas al alimentar un kilogramo de biomasa a la planta. Para las astillas de madera se obtiene en promedio 1.75 kg de syngas por kilogramo de biomasa, 25 % más que al alimentar pellets de madera. El rendimiento de producción del flujo volumétrico de gas limpio y seco con base a flujo de biomasa húmeda que ingresa al sistema es de (1.55 ± 0.31) Nm³/kg para las astillas y (1.18 ± 0.29) Nm³/kg para los pellets de madera. Ambos rendimientos se reflejan fácilmente en los flujos de las corrientes obtenidas y los valores de las eficiencias de gas frío para las corridas con pellets de madera, ambos casos ya se discutieron previamente. Entonces, en general, existen en general un mejor desempeño de la planta al utilizar astillas de madera como combustible.

Como se mencionó anteriormente, para concluir si existe o no diferencia estadísticamente significativa entre los parámetros típicos que describen el desempeño de un proceso de gasificación de biomasa para la generación de energía eléctrica y térmica según el tipo de geometría de la biomasa alimentada, se realizaron pruebas t-Student. Los resultados se aprecian en el Cuadro 2.26.

Cuadro 6.26. Resultados de pruebas t-Student para datos de parámetros de desempeño de planta piloto

Parámetro	Grados de libertad	Estadístico t	Valor crítico de t (dos colas)	P(T<=t) dos colas	Condición
Conversión de carbono	4	2.236	2.776	0.111	No hay evidencia de diferencia
Razón equivalente	4	3.550	2.776	0.038	No hay evidencia de diferencia
Eficiencia de Gas Frío	4	0.790	2.776	0.487	No hay evidencia de diferencia
Eficiencia Térmica Global	4	6.910	2.776	0.002	Rechaza hipótesis nula Hay diferencia
Eficiencia Generador/Motor	4	1.303	2.776	0.262	No hay evidencia de diferencia
Rendimiento eléctrico base húmeda	4	4.400	2.776	0.022	Rechaza hipótesis nula Hay diferencia
Rendimiento de syngas/biomasa	4	4.469	2.776	0.021	Rechaza hipótesis nula Hay diferencia

La información recopilada a partir de este análisis estadístico indica que parámetros importantes para describir el desempeño general del proceso como lo es la eficiencia térmica global, el rendimiento eléctrico y el rendimiento syngas son estadísticamente diferentes, lo cual, apoyado con lo anteriormente discutido con respecto a los valores promedio, indica que la incidencia de la geometría de la biomasa, empleada en un proceso de gasificación con un

reactor “downdraft” o de lecho descendente, es importante para el desempeño del proceso, siendo en este caso en específico, las astillas de madera un combustible que supera a los pellets de madera en el desempeño de su transformación termoquímica para la generación de energía térmica y eléctrica. Mencionar que el resultado estadístico de dos colas para los parámetros que difieren estadísticamente, al notar los valores del p-value, permite deducir que la diferencia es poca, debido a la cercanía del valor de 0.025 para los p-value, sin embargo, lo suficiente para concluir que hay incidencia de la geometría de los combustibles en el desempeño del proceso en todas las unidades de la planta.

6.8 Adquisición, pretratamiento y condiciones operacionales

En este apartado se abarcará desde una perspectiva diferente las diferencias que existen al utilizar un combustible en forma de astillas o en forma de pellets para gasificar y obtener energía. En este trabajo se desea concluir en cómo el factor geometría incide sobre el desempeño del proceso de gasificación, y hasta el momento se han discutido las diferencias entre las variables medidas, por lo tanto, en este apartado se discutirán las diferencias en las etapas necesarias para lograr adquirir estos datos. Eso, pues es importante describir las diferencias que se encontraron al adquirir y transportar el combustible hasta la ubicación de la planta, además de cómo fue el pretratamiento de cada tipo de biomasa antes de alimentarse al módulo y las condiciones operativas más significantes y diferentes entre cada biomasa.

6.8.1 Adquisición y transporte del combustible

El alcance del análisis realizado para este trabajo no contempla un estudio económico-financiero para evaluar la factibilidad del proceso; sin embargo, se mencionará brevemente algunas de las implicaciones que sucederían al emplear una u otra biomasa como fuente de energía en un proceso de gasificación de biomasa que impactarían directamente sobre un posible análisis financiero. En el Cuadro 6.27 se muestra el costo por tonelada de ambas biomásas. Los combustibles fueron proporcionados por la empresa Pelletics, en noviembre del 2016. Como se observa el costo de una tonelada de pellets es un 73.3 % más alto que una tonelada de astillas

Cuadro 6.27. Costo por tonelada de astillas y pellets (Pelletics, 2016)

Biomasa	Costo por tonelada, ¢/ton
Pellets	90 000
Astillas	24 000

Para el proyecto se adquirió una tonelada de cada tipo de biomasa, y el transporte de los pellets fue mucho más sencillo, ya que, al pelletizar, la densidad aumenta, es decir ocupa menos volumen por kilogramo de material, gracias a esto solo se requirió de una paca para almacenar toda la tonelada solicitada; en contraste, las astillas de madera requirieron de una paca y 15 sacos extras, por lo que el transporte fue incómodo debido a que requirió de mucho espacio como se aprecia en la Figura 6.11



Figura 6.11. Transporte de una tonelada de astillas de madera

6.8.2 Pretratamiento de la biomasa

Astillas

Las astillas de madera poseen un proceso de pretratamiento largo y laborioso. Las etapas se describen a continuación:

1. **Tamizado:** La planta está diseñada para trabajar óptimamente en un rango muy definido de tamaño de partícula. Por lo tanto, la tonelada de astillas de madera tuvo que ser tamizada; lo que se podía utilizar era lo remanente entre las mallas de 1" y 1/2". Las dimensiones promedio de las astillas se muestran

en el Cuadro 6.28. La Figura 6.12a muestra cómo se disponía de la biomasa en el lugar de trabajo y el equipo utilizado para tamizar

Cuadro 6.28. Dimensiones de las astillas de madera que se alimentaron a la planta piloto

Dimensión	Largo	Ancho	Grosor
Promedio, cm	3-4	1-2	0.5-1.5

2. Acondicionamiento: La humedad en el combustible se fijó para esta investigación, por lo que se basó en el diagrama de la Figura 4.5, donde la muestra como varía la Humedad de Equilibrio Higroscópico de la madera, para fijar la humedad relativa y la temperatura ambiente en una Cámara de Acondicionamiento ubicada en el Laboratorio de Biomateriales de la Escuela de Ingeniería Forestal que se muestra en la Figura 6.12b, para alcanzar un contenido de humedad del 16 % en base húmeda. Se fijó la cámara a un 88 % de humedad relativa y a 25 °C, y en una cuestión de una semana, la madera se encontraba al contenido de humedad deseado.



Figura 6.12. (a) Tamizado de astillas de madera (b) Cámara de acondicionamiento

3. Almacenamiento: En una configuración Saco/Bolsa/Saco de (10-14) kg se mantuvo la humedad de la biomasa de manera estable en el tiempo y la integridad mecánica del combustible. En la Figura 6.13a se muestra el almacenamiento de las astillas de madera utilizados, que se muestran en la Figura 6.13b



Figura 6.13. (a) Visualización del almacenamiento de astillas (b) Astillas de madera

Pellets

El contenido de humedad en base húmeda de los pellets adquiridos estaba en el rango de (10-12) %, por lo tanto, se adicionaron 300 g de agua por cada 4 kg de pellets para aumentar su contenido de humedad hasta el 16 % deseado. El proceso de adición de agua se muestra en la Figura 6.14; una vez finalizado el acondicionamiento se empacaba entre 20 kg y 25 kg de material en sacos en una configuración saco/bolsa/saco, por las mismas razones que las astillas



Figura 6.14. Acondicionamiento de los pellets de madera

Los procesos de pretratamiento son muy distintos, y por mucho el de astillas fue mucho más laborioso y duradero, y a la vez poco viable, ya que al tamizar las astillas un porcentaje importante se pierde como desechos al no poseer la geometría óptima. Se estima que solo un 60 % de la masa inicial fue utilizable según los requerimientos de tamaño.

6.8.1 Consideraciones operacionales

Deficiencias en el diseño original de planta piloto

Previo a describir las dificultades operativas que se experimentaron al operar la planta con cada tipo de combustible, es importante mencionar las deficiencias en el diseño original del módulo ante la operación de cada una de estas biomásas.

Ante operación con astillas de madera

Dentro de la gama de combustibles que el fabricante recomienda, las astillas o astillas de madera pertenecen al grupo donde se espera, con alta confiabilidad, una operación estable de la unidad. Sin embargo, aunque la geometría sea recomendada y el tamaño se partícula se respete, varias especies de maderas tienen problemas durante el descenso en la tolva de alimentación, y se genera el fenómeno denominado "*bridging*" - en inglés, o formación de un puente en español, fenómeno que se define como la formación de una burbuja dentro de la tolva, debido a que la biomasa se adhiere entre sí y no permite un descenso normal hacia el fondo de la tolva, y por consiguiente, una correcta y controlada alimentación de combustible al reactor. Para evitar este fenómeno se diseñó e instaló el sistema de agitación manual dentro de la tolva de alimentación.

Otra deficiencia es la calidad del tornillo sin fin que se emplea para esta alimentación mencionada, este componente posee altas deficiencias de diseño, tanto en el mecanismo de funcionamiento, como en el material de construcción. Se emplea un motor monofásico como impulsor, unidos en un único punto de rotación, lo cual otorga cierta libertad de movimiento perpendicular al eje de esta pieza. Sin embargo, debido a esta libertad y a la dureza de la madera, al ocurrir una obstrucción en cualquier punto, y junto a la gran fuerza del motor, provoca una fractura estructural completa del tornillo, lo cual ocurre sin previo aviso y durante el transcurso de la corrida.

En la Figura 6.15 se aprecia el resultado de tal condición. Al fracturarse, no existe manera de alimentar combustible al reactor, lo cual activa las alarmas del equipo, ya que el faltante de biomasa provoca que las temperaturas dentro del reactor aumenten entre (350-400) °C más de lo normal, consumiendo toda la biomasa en pocos minutos y dañando las propiedades estructurales del material reactor y sensores dentro del mismo. Después de varias

rupturas, se decidió diseñar y construir otro tornillo de alimentación de hierro al carbono, el cual funcionó sin problemas.



Figura 6.15. Fractura en el tornillo de alimentación de combustible al sistema Ante operación con pellets de madera

La geometría del reactor pertenece a la familia de reactores de lecho descendente de tipo garganta, estos, como se menciona en el Capítulo 1, poseen una restricción ante el descenso de sólidos y gases, lo cual beneficia la interacción entre ambos y mejora el equilibrio de reacción hacia la producción de los productos gaseosos deseados. Sin embargo, al operar con pellets de madera, existe una alta posibilidad de que se generen obstrucciones en esta zona específica del reactor, por lo tanto se debe inducir la caída de la biomasa dentro del reactor activando el agitador de parrilla a la base del reactor, lo cual provoca una disminución del tiempo de residencia del combustible dentro de la esta zona, disminuyendo la tasa de gas producto que se pueda generar y reduciendo al conversión de carbono y eficiencia total del sistema de generación eléctrica a partir de este proceso de gasificación.

Dificultades operativas

Para describir las condiciones operacionales se debe evaluar el comportamiento de las presiones en las unidades de proceso, pues de este análisis se obtiene información que es proporcional a evaluar el desempeño operativo de la planta, ya que estas variables están estrictamente relacionadas con la estabilidad del módulo ante la operación de cada combustible.

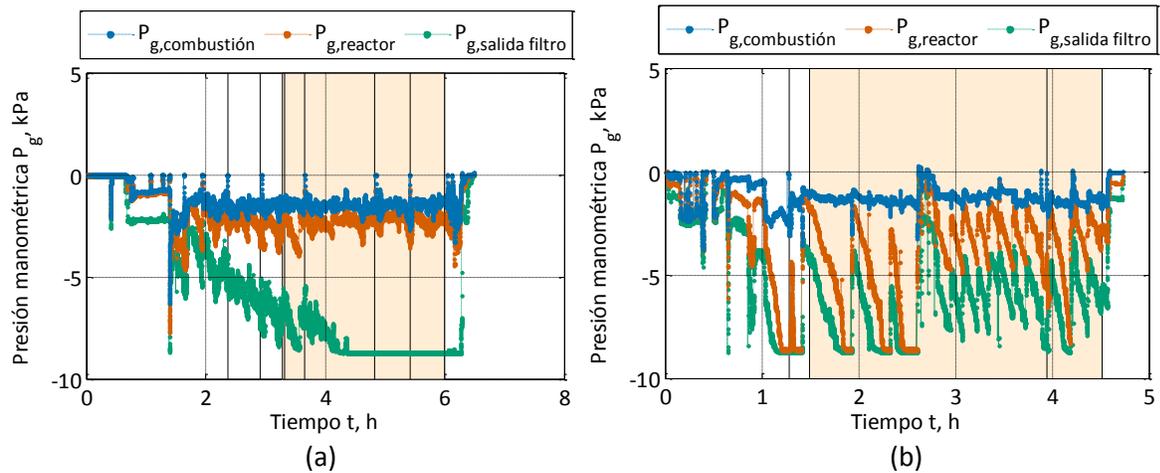


Figura 6.16. Perfiles de presión en el sistema durante (a) la corrida del 03/21/2017 con astillas de madera y (b) la corrida del 06/26/2017 con pellets, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis para los balances de masa (área naranja).

En la Figura 6.16a se aprecia el comportamiento de las presiones más importantes en una corrida típica con astillas de madera. La estabilidad en el proceso es visible al operar con este tipo de biomasa, pues las presiones en el reactor (P_{comb} y P_{react}) se mantuvieron oscilando dentro de un promedio estable; notar que la presión absoluta a la salida del filtro (P_{filtro}) disminuyó considerablemente cuando se encendió el motor, a las 1.8 h de iniciar la corrida, ya que la capacidad de succión es mayor.

En contraste, en una corrida con pellets, debido al atascamiento frecuente en la garganta del reactor, la estabilidad del proceso fue poca. Esto se refleja en la Figura 6.16b, donde se aprecia que de forma casi periódica se genera una caída de presión de gran magnitud entre P_{comb} y P_{react} , fenómeno que sucede cuando se produce una obstrucción entre ambos puntos de medición y por lo tanto se genera un vacío a la base del reactor hasta que la parrilla a la base se activa y se libera la obstrucción, y las presiones se normalizan, aunque por poco tiempo, pues la caída de presión vuelve ocurrir como se aprecia en el gráfico. Estas condiciones operativas, como se mencionado repetidamente, provocaron una disminución en las tasas de conversión de la biomasa en forma de pellets al gas combustible deseado, además de que las temperaturas dentro del reactor fueron de menor magnitud y se generó una mayor producción de alquitranes y de metano.

Esta inestabilidad del proceso no solo se reflejó en las presiones del sistema, en la Figura 6.17 se observa cómo afectó el comportamiento en el flujo de syngas producido, que varió según la formación y liberación de las obstrucciones dentro del reactor

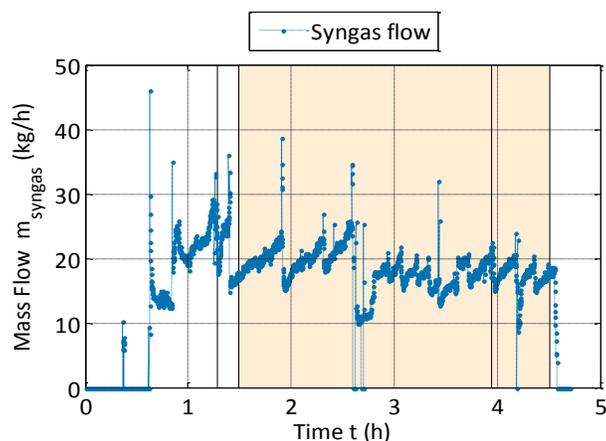


Figura 6.17. Flujo másico de syngas corrida de pellets del 06/26/2017, con cargas de biomasa (líneas negras) y período de análisis para los balances de masa (área naranja).

En el Cuadro 6.29 se resumen, en valores promedio, las presiones medidas para cada tipo de biomasa. El vacío generado en el sistema al operar con astillas de madera es en general mayor, sinónimo de que una mayor capacidad de succión del motor de una mayor cantidad de syngas

Cuadro 6.29. Presiones promedio del sistema según el tipo de biomasa alimentada

Presiones	Astillas	Pellets
Presión en zona de combustión P_{comb} , kPa	-1.68	-1.14
D.std. Combustión, kPa	0.51	-0.43
Presión a la salida del gasificador $P_{sd, gas}$, kPa	-3.22	-2.92
D.std. Salida del gasificador, kPa	1.45	-1.80
Presión a la salida del filtro P_{filt} , kPa	-6.48	-6.11
D.std. Salida del filtro, kPa	1.52	1.75
Caída de presión intercambiador ΔP_{int} , Pa	151.68	95.92
D.std. Caída de presión intercambiador, Pa	-270.07	243.65
Caída de presión orificio P_{ori} kPa	0.62	0.47
D.std. Caída de presión orificio, kPa	-0.15	0.12
Presión del aceite en el motor P_{act} , kPa	348.83	367.34
D.std. Aceite en el motor, kPa	-80.41	47.19

6.9 Niveles de ensuciamiento en el sistema

Una de las ventajas de emplear un gasificador de corriente descendente es que los productos de reacción de pirólisis y reducción se mezclan íntimamente en la región de alta temperatura turbulenta alrededor de la garganta (1100 °C -1200 °C), lo cual ayuda al craqueo del alquitrán. Esta configuración resulta en un gas relativamente limpio de alquitrán ($<10 \text{ g / Nm}^3$), incluso si las partículas en gas pueden ser altas según Basu, (2013).

Sin embargo, el uso del gas de síntesis como combustible para motores de combustión interna, o para generación de calor y energía, o como materia prima para la síntesis de combustibles líquidos y químicos depende principalmente de las tecnologías de limpieza usadas para eliminar partículas de polvo y el alquitrán condensable de la corriente gaseosa. A continuación, se describirá el sistema de limpieza del módulo de manera más detallada y su capacidad de limpieza. Además, se describirá la información recopilada durante los mantenimientos de la planta y una descripción del cambio de configuración del filtro de lecho empacado para mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes del filtro.

6.9.1 Sistema de limpieza original en planta piloto

Como se mencionó anteriormente, la primera operación de limpieza fue mecánica, donde se removieron la mayoría de las cenizas de la corriente mediante un ciclón, sin embargo, no fue una operación con alta eficiencia, ya que se encontró una gran cantidad de cenizas en las mangueras y unidades posteriores. Por lo tanto, aparte de un recubrimiento que evite la pérdida de calor al ambiente, se recomienda un rediseño mecánico para mejorar la eficiencia de remoción de los sólidos, o colocar varias de estas unidades en serie previo la siguiente operación, lo cual aumentaría la capacidad de remoción de sólidos.

La segunda etapa de limpieza fue un filtro de lecho empacado, el cual, según el manual de operación del fabricante, posee una configuración recomendada del relleno que lo compone. Es decir, se estipulan las cualidades y cantidades de los materiales que se necesitan dentro del mismo para lograr la remoción de alquitranes, agua y otros subproductos de la corriente gaseosa. Sin embargo, en el proyecto "*Implementación y evaluación tecnológica de gasificación en la industria de café, como alternativa para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)*" (325-B5-513 VI) se evidenció que existía espacio para mejora de esta

unidad de limpieza, ya que, usando las especificaciones el fabricante, las incrustaciones en el motor, y componentes previos a este, como el gobernador, como se aprecia en la Figura 6.18, eran de gran magnitud. Esto provocó serios daños al sistema de generación de electricidad, y en general en los componentes de la planta piloto.



Figura 6.18. Ensuciamiento típico en el gobernador en una corrida con astillas de madera en planta piloto del ICAFE (Torres, 2016)

Lo recomendado por el fabricante es que para el empacado del filtro se debe contar con astillas de madera con dimensiones específicas, tal y como se puede observar en la Figura 6.20. En el fondo del tambor se debe colocar el primer soporte metálico de manera que sirva de base para el lecho. Seguidamente se agrega una capa de 23 cm de carbón con un tamaño de partícula de entre 12 a 25 mm. Como siguiente paso se coloca un nuevo soporte metálico perforado que separe el primer lecho del siguiente y que a su vez permita el ascenso del flujo de gas. Seguidamente se agrega carbón con un tamaño de partícula de entre 3 a 6 mm; el grosor de esta capa es de aproximadamente 17 cm. Posteriormente se coloca un nuevo soporte metálico perforado y carbón con un tamaño de partícula de entre 1 y 3 mm.

Esta capa debe tener un grosor de 17 cm. Finalmente se coloca un último soporte metálico perforado y sobre este una pequeña capa de astillas de madera con un tamaño de partícula de entre 3 a 6 mm. Como paso último se coloca la tapa del filtro y se acoplan las mangueras. Es importante indicar que dependiendo del tipo de madera y la cantidad de humedad contenida en la materia prima utilizada la vida útil del lecho puede variar significativamente. Como promedio, se deberá cambiar el lecho de madera cada 10 h a 12 h de operación del reactor (AllPowerLabs, 2015).



Figura 6.19. Configuración del relleno del filtro según fabricante

6.9.1 Sistema de limpieza utilizado

Se requería entonces una mejora en esta configuración recomendada por el fabricante para aumentar la capacidad de remoción de contaminantes y reducir la frecuencia de cambio del relleno y disminuir el factor de ensuciamiento en el motor y en el gobernador. Torres, Molina, Hernández, & Urvina, (2016) plantearon un relleno del filtro que constituyera en una serie de estratos ordenados de mayor a menor en tamaño de partícula en el sentido del flujo conforme este ascendía en el filtro.

El objetivo de esta configuración era que el flujo experimentara una aceleración paulatina conforme recorría el filtro al reducir el área por dónde fluir, lo que disminuyó las caídas de presión no recuperables del gas al atravesar el relleno sólido. Respetando la disposición de los rellenos en cuestión de tamaño de partícula se procede a elegir los estratos. En la Figura 6.20 se muestra la configuración del relleno empleada durante la operación de la planta piloto. Las diferencias con respecto a las recomendaciones del fabricante son:

- ✓ Se utilizan mezclas madera/carbón en cada estrato con tamaños de partícula similares y no solo carbón

- ✓ Se emplea *peat moss* o musgo de turbera como absorbente natural de hidrocarburos
- ✓ Se adiciona un “boom” de polipropileno universal como absorbente químico de hidrocarburos y agua
- ✓ Se utiliza mecha y astillas gruesas en la parte superior para retener partículas pequeñas dentro del relleno, y no sean succionadas por el motor. Además de absorber agua e hidrocarburos pesados
- ✓ Se colocan en la parte superior tapetes de polipropileno como absorbentes químicos de hidrocarburos
- ✓ Se cubre todo el relleno con cedazo en la parte superior para ayudar a retener partículas al igual que la mecha

En el Cuadro 6.30 se reporta la cantidad utilizada de cada uno de los estratos en esta nueva configuración del relleno del filtro. En total son 14.03 kg de relleno dentro del filtro que sirvieron como agentes removedores de alquitranes y agua de la corriente de syngas que provenía del reactor.

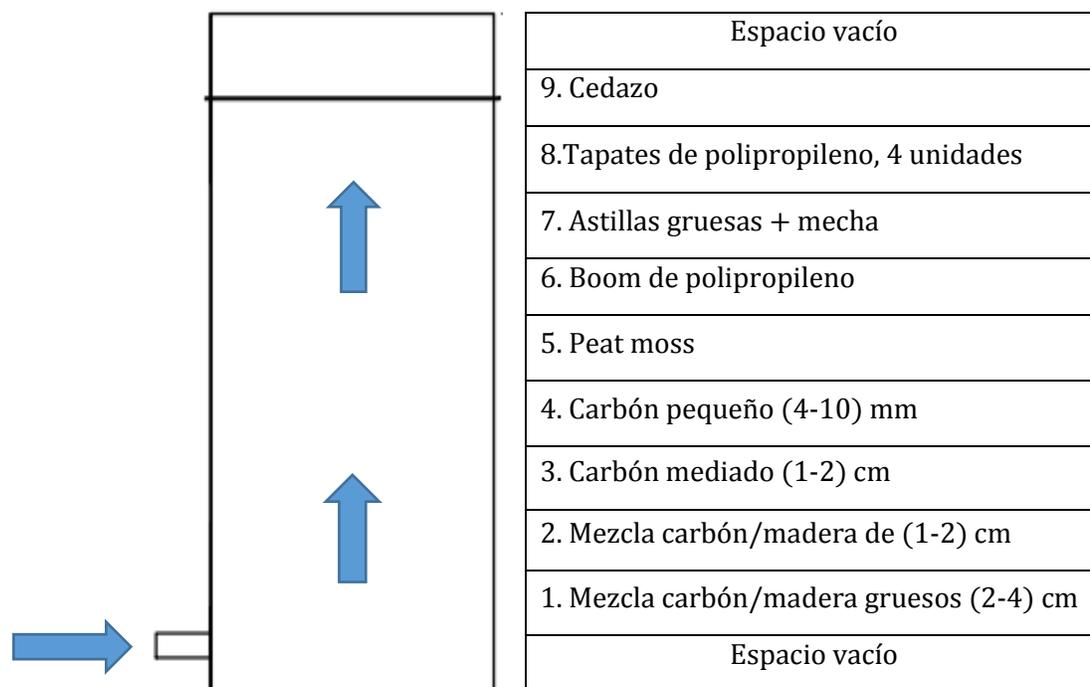


Figura 6.20. Configuración del relleno del filtro de lecho empacado de planta piloto

Cuadro 6.30. Estratos que componen el relleno del filtro y la cantidad empleada

Relleno	Masa, kg
Carbón grande	1.30
Madera grande	1.30
Carbón mediano	2.00
Madera mediana	2.00
Carbón mediano	1.30
Carbón pequeño	2.00
Peat moss	2.50
Boom polipropileno	0.63
Mecha	0.10
Madera grande	0.70
Tapetes polipropileno	0.20
Total	14.03

Se obtiene una capacidad de absorción de 182 %, gracias a que los 14.03 kg de relleno absorbieron 25.52 kg de contaminantes, de estos 10.16 kg era agua líquida recolectada al fondo del filtro y 15.46 kg fueron los otros contaminantes que se absorbieron en el relleno. Estos resultados se muestran en el Cuadro 6.31 y se obtuvieron después de 28 h motor y no las 12 h que recomienda el fabricante, en otras palabras, se aumentó en 16 h motor la capacidad del relleno, lo cual disminuyó la frecuencia de sustitución del mismo, por lo tanto se logró una reducción de los costos de mantenimiento de la planta

Cuadro 6.31. Determinación de la capacidad de absorción de la configuración empleada en el filtro

Variable	Valor
Cantidad de corridas de 4 h motor	7
Masa absorbida en relleno, kg	15.46
Masa de agua condensada en filtro, kg	10.16
Masa recolectada total en filtro, kg	25.52
Capacidad de absorción de material, %	181.89

El resultado no solo es cuantitativo, ya que en la Figura 6.21 se muestra como al lograr un aumento de la eficiencia de remoción de contaminantes, no se forman depósitos de en el

governador, la imagen se toma luego de 28 h motor, antes del cambio de relleno del filtro, y es muy diferente a lo observado en la Figura 6.19



Figura 6.21. Condición de ensuciamiento del gobernador luego de 28 h motor

6.9.2 *Mantenimiento de la planta piloto*

Toda planta de proceso requiere un análisis exhaustivo en la parte operativa, pero el mantenimiento es fundamental para el correcto funcionamiento de todas las unidades y componentes dentro de la misma. Se realizaron dos tipos de mantenimiento que se describirán a continuación:

- ✓ **Limpieza ligera:** Involucra la limpieza del gobernador, si es requerida, cambio del relleno de los filtros para la limpieza de la muestra de syngas si es necesario, remoción de biomasa remanente en la tolva. Además de la recolección de los estratos del reactor y de los depósitos de cenizas. Por último, se realiza la adición de 5 kg de carbón al reactor para la siguiente corrida.
- ✓ **Limpieza pesada:** Cambio de relleno del filtro de lecho empacado: se pesa relleno viejo como un todo y se pesa cada estrato nuevo de manera individual. Además, se desconectan todas las mangueras y se limpian utilizando agua a presión. Se vacían los depósitos de cenizas, se vacía la tolva de alimentación, se limpia el gobernador si es necesario, limpieza con aire comprimido de toda la unidad para eliminar polvo y cenizas. Se vacía el reactor y se adiciona pasta de grafito a la compuerta a la base del mismo para renovar el sello. Se remueven y abren los sopladores y se limpian con gasolina para evitar su fallo. Cambio de sílica gel columnas cromatográficas. En la Figura 6.22 se muestra las condiciones de trabajo a la hora de realizar la limpieza pesada de la planta



Figura 6.1. Mantenimiento de la planta piloto

Mantenimiento del motor

Involucró el cambio de aceite del motor, revisión del estado de bujías, cargar la batería. El fabricante recomienda el cambio de aceite cada 150 h motor o cada 3 meses; sin embargo, el cambio se realizó al cuarto mes de adquirida y operada la planta, debido a esto se recuperó un aceite de motor con una condición no deseada, como se aprecia en la Figura 6.23, ya que se aprecia que el aceite absorbió muchos contaminantes, lo cual modifica sus propiedades lubricantes y aumenta las posibilidades de daño del motor



Figura 6.2. Estado del aceite del motor luego de 4 meses de adquirida la planta

Una acción preventiva y correctiva para el mantenimiento del motor es el uso de un carburador que alimente gasolina al motor, como se observa en la Figura 6.24. La gasolina funciona como disolvente de hidrocarburos que pueden quemarse. Por lo tanto, limpia de forma efectiva inyectores y bujías



Figura 6.3. Instalación del carburador en el motor para efectuar la limpieza del motor

6.10 Resistencia a la transferencia de calor

La geometría de la biomasa, entonces, es un factor que necesita ser considerado en un proceso de gasificación, pues el tamaño, forma y densidad de las partículas de la biomasa influyen su transporte, velocidades de secado y su descomposición térmica, como se ha evidenciado en los resultados obtenidos al alimentar pellets y astillas de madera al gasificador para la obtención de energía térmica y eléctrica.

Según los datos obtenidos, los pellets de madera poseen grandes desventajas como combustibles de un gasificador con un reactor de lecho descendente o “*downdraft*” tipo garganta, pues debido a los atascamientos de las partículas dentro del reactor, se alcanzaron temperaturas menores en todas las etapas del proceso de descomposición térmica, y al ser las reacciones principales de generación del syngas endotérmicas, la producción del gas producto fue menor que al utilizar astillas de madera y con una generación mayor de metano, sacrificando la tasa de producción de hidrógeno, lo cual no es deseado, pues disminuye el contenido energético del gas producto.

Además, al alimentar pellets de madera se obtuvo una tasa mayor de alquitranes (consecuencia de las reacciones incompletas dentro del reactor), lo que implicó una elevación en el ensuciamiento de todas las unidades de la planta. Todo esto se reflejó en magnitudes bajas de las eficiencias calculadas, es decir, las pérdidas de la energía disponible en la biomasa fueron

mayores que al emplear astillas de madera, por lo que se obtuvieron rendimientos bajos para generar una tasa de energía a partir de una cantidad de biomasa.

Es importante analizar estos resultados con respecto al comportamiento de la degradación térmica de las partículas de biomasa estudiando la resistencia a la transferencia de calor y masa interna de las partículas con respecto a la externa mientras descienden por el reactor. Esto, pues la transferencia de calor y masa en sistemas de partículas de fluidos es de importancia clave para diseñar, optimizar y comprender procesos tales como: reacciones catalíticas que implican partículas porosas o no porosas, o gasificación y combustión de biomasa.

Para ello es importante determinar Número Biot Térmico en los diferentes estratos del reactor. Este parámetro adimensional relaciona la velocidad de transferencia convectiva a la superficie de la partícula con la velocidad de transferencia de calor conductiva en la partícula (Mehrabian, Scharler, & Obernberger, 2012). Radl, Krainer, Puffitsch, & Kloss, (2015) describen al Biot Number como un parámetro clave para juzgar sobre la importancia de los fenómenos de transporte intra-partícula (es decir, el calor y el transporte de masa dentro de la partícula). Existen dos valores adimensionales que caracterizan la transferencia de masa y calor independientemente. El primero es el Número Biot Másico, este se ha define como la relación entre el tiempo característico de difusión de masa interna y de transferencia de masa externa (Dupont, Boissonnet, Seiler, Gauthier, & Schweich, 2007), según la ecuación 6.2.

$$Bi_M \equiv \frac{\alpha_{mp} d_p}{D_p} \quad (6.2)$$

$$Bi_T \equiv \frac{\alpha_{fp} d_p}{\lambda_p} \quad (6.3)$$

Donde,

Bi_M = Número de Biot Másico, adim

Bi_T = Número de Biot Térmico, adim

α_{mp} = Coeficiente de transferencia de masa de la partícula sólido-gas, m/s

D_p = Coeficiente de difusión de masa, m²/s

α_{fp} = Coeficiente de transferencia de calor convectivo, kW/m²K

λ_p = Conductividad térmica del material, kW/mK

d_p = Diámetro de la partícula, m

El segundo es el Número Biot Térmico, es el número adimensional que relaciona la velocidad de transferencia convectiva a la superficie de la partícula con la velocidad de transferencia de calor conductiva en la partícula, y está estrechamente relacionada con el número de Nusselt (o Sherwood), como se muestra en la ecuación 6.3. Este valor da una medida de la relación entre las resistencias de transferencia de calor dentro y en la superficie de la partícula. La constante de tiempo térmico muestra la respuesta de la partícula a los cambios en su entorno térmico. En otras palabras, una constante de tiempo térmica grande significa que la temperatura de la partícula cambia lentamente con el tiempo (Mehrabian, Scharler, & Obernberger, 2012).

Ambos números se definen en otras palabras como la relación de transferencia externa entre la interna. Si ambos números son $\gg 1$, la transferencia de masa externa y los procesos de transferencia de calor externos son lo suficientemente rápidos como para no influir en la velocidad de suministro de masa y calor a las partículas, por lo tanto, hay limitaciones en los mecanismos internos. Cuando son $\ll 1$, ocurre lo contrario, y la velocidad externa de transporte de masa y calor determina la velocidad, pues serán las limitantes. En el caso intermedio, sin son similares a 1, tanto los procesos externos como internos deben tomarse en cuenta (Gómez-Barea & Leckner, 2010).

Para un mayor entendimiento de los fenómenos térmicos que ocurren dentro un reactor de gasificación de biomasa se requiere conocer entonces la variación del número de Biot térmico. Específicamente, cuando este número adimensional es mayor a 40 la resistencia externa es muy pequeña, si es menor a 0.1 la resistencia interna es muy pequeña. Cuando el número de Biot Térmico está entre 0.1 y 40 tanto la resistencia interna como externa son altas. Para las astillas de madera utilizados en este proceso se esperan valores mayores a 40, debido a la intensa atmósfera térmica que atravesaron en el reactor, además porque al ser de fuentes forestales poseen gran facilidad de descomposición térmica, por lo tanto, no hay gran impedimento de desintegración de las partículas en su superficie según Pozzobon (2016).

Un valor mayor a 40 indicaría que la resistencia externa es muy pequeña y hay facilidad de la transferencia de calor en la superficie de las partículas, lo cual es deseado en las biomásas que se utilizan como combustibles en un procesos de gasificación, ya que no existirá impedimento a la reducción u oxidación de las partículas a la superficie inmediata a la fuente de calor, lo que permite un facilidad de conversión termoquímica de las especies químicas superficiales en sus componentes principales como el monóxido de carbono y el hidrógeno.

Debido a la inexistencia bibliográfica ni experimental del valor del coeficiente de transferencia de calor de las astillas dentro de la atmósfera del reactor (según las temperaturas y flujo de gases externos a la superficie de la partícula) no fue posible un cálculo de un valor esperado de número de Biot; sin embargo los estudios de Pozzobon (2016) indican valores de mayor a 100 para astillas o chips de madera, lo cual sería lo esperado para las astillas empleadas en esta investigación, pues poseían dimensiones similares a las utilizadas por el estudio de Pozzobon (2016). En la Figura 6.22 se observa el proceso de descomposición de las astillas mientras descenden por el reactor, se aprecia que desde la sección superior del reactor inicia el proceso de carbonización, específicamente en la zona denominada pirólisis baja.



Figura 6.22. Visualización de la degradación térmica de las astillas de madera 1) Pirólisis baja 2) Pirólisis superior 3) Combustión 4) Reducción

Este comportamiento experimental de la biomasa concuerda con la conclusión de que para las astillas de madera la resistencia externa a la transferencia de calor es pequeña, lo cual permitió una degradación de las partículas de manera eficiente dentro de la atmósfera del reactor de lecho descendiente utilizado, lo cual se respalda con los resultados de un perfil térmico dentro del reactor óptimo, una estabilidad dentro del mismo observado en el perfil de presiones sin que ocurrieran atascamientos del combustible y valores de flujos de syngas altos y flujos de cenizas bajos.

Para pellets de madera, existe un cambio en la determinación del diámetro equivalente con respecto a las astillas de madera; este se debe calcular como la razón entre el volumen y el área superficial. No sería recomendable emplear los valores de conductividad térmica y coeficiente de transferencia de calor de las astillas de madera, ya que el proceso de densificación modifica estas propiedades al aglomerar las partículas, eliminando gran parte de los espacios vacíos, lo cual aumenta la resistencia a la transferencia de calor. Esta propiedad provoca un aumento en el tiempo requerido para su total desintegración. Guo, Lim, Bi, Sokhansanj, & Melin, (2013) determinaron los valores de conductividad térmica y transferencia de calor para pellets de madera de diferentes tamaños, en el rango de (1-4) cm, como lo empleados en este trabajo, para la obtención de diferentes valores de números de Biot térmicos. Al igual que para las astillas, para esa investigación no fue posible determinar los valores requeridos para un cálculo correcto del número de biot de las partículas de pellets.

Guo et al (2013) encontraron que, para diferentes condiciones y tamaños de pellets, los valores del número de Biot se mantienen muy por debajo de 40, específicamente entre 0.1 y 10. Esto indica que existe tanto la resistencia interna como externa son altas, resultado acorde a la teoría y concluido también por Guo et al (2013). Por lo tanto, se respalda la conclusión de que la variación de la temperatura en un pellet de manera individual fue pequeña, y por lo tanto la distribución de temperatura dentro del espacio vacío de cada pellet fue uniforme, lo cual responde ciertas condiciones encontradas durante el procesamiento de este material, ya que al recuperar los estratos del reactor, al finalizar la corrida, se apreció que no existían pellets carbonizados ni desintegrados en la zona de pirólisis en gran cantidad, a diferencia de las astillas de madera; sino que hasta la zona de combustión el material se carbonizaba, es decir, existió gran resistencia tanto externa como interna a la transferencia de calor mientras descendía en las primeras etapas del reactor. Además, se apreció que en la base del reactor los

pellets carbonizados mantuvieron su geometría, solo con una reducción del volumen, es decir, al haber tanta resistencia a la descomposición térmica, como describe el número de Biot Térmico, parte del combustible no se aprovechó y se removió del sistema, lo cual se aprecia en valores de corrientes promedio de cenizas mayores que al alimentar astillas de madera

En la Figura 6.23 se muestra como los pellets de madera sufrieron de un proceso de degradación térmica muy distinto a las astillas. Primeramente, se aprecia como en la zona de pirólisis (imágenes 1 y 2) la presencia de material pirolizado o carbonizado es poca, esto sucedió debido a que, como se ha mencionado por varias ocasiones, las temperaturas dentro del reactor al emplear pellets fueron menores, específicamente en la zona de pirólisis, provocando la disminución de la eficiencia del proceso de degradación desde esta primera etapa del proceso, ya que sin una concentración alta de los productos gaseosos e inflamables que se generan durante la pirólisis, el proceso de combustión tiende a la combustión de mucho material sólido, lo cual provoca, como se observa en la tercera imagen, que todo el material se carbonice drásticamente, acompañado a una reducción clara de tamaño de las partículas sólidas.

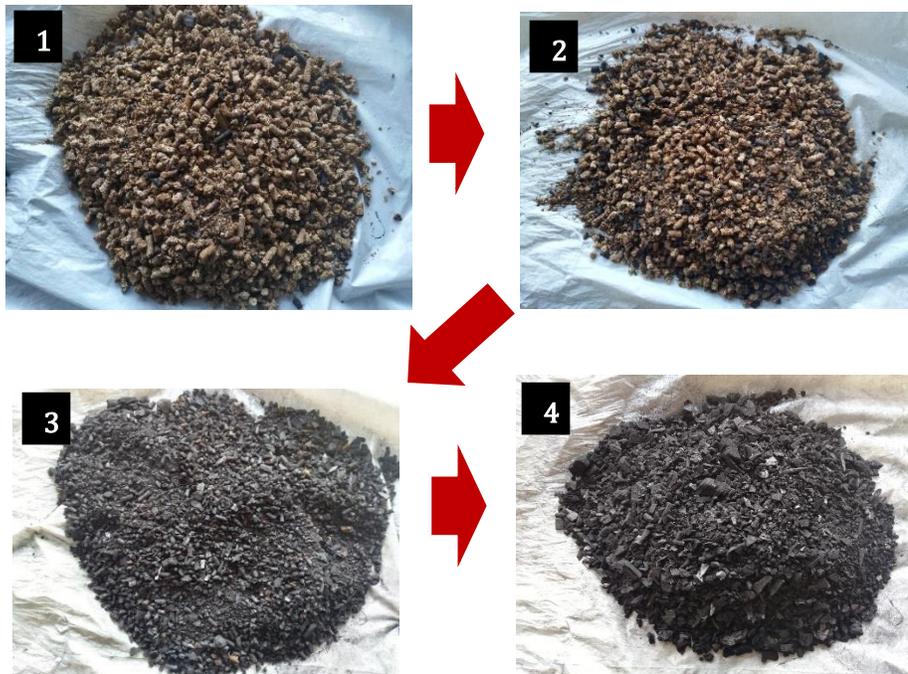


Figura 6.23. Visualización de la degradación térmica de los pellets de madera 1) Pirólisis baja 2) Pirólisis superior 3) Combustión 4) Reducción

Estos fenómenos fueron provocados por la alta resistencia a la transferencia de calor por parte de los pellets, que, junto al aumento en la frecuencia de agitación de la parrilla en la base del reactor debido a los atascamientos de material, hizo que el desempeño del proceso de gasificación de pellets de madera fuera menor que al alimentar astillas de madera.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Se evidenció, estadísticamente, que solo existe diferencia en el contenido de cenizas y el poder calórico entre ambos combustibles utilizados. El aumento del poder calórico en los pellets de madera se debe al proceso de torrefacción durante la densificación de los residuos forestales.
2. Los valores de las propiedades fisicoquímicas de ambos combustibles indican que ambos son aptos para ser utilizados en el proceso de gasificación en la planta piloto según las especificaciones del fabricante.
3. Las corridas preliminares permitieron la verificación correcta de datos de todas las variables medidas en la planta piloto. Además, se evidenciaron problemas operativos que se lograron corregir previo a las corridas experimentales, lo cual es esencial durante la puesta marcha del módulo
4. Al comparar los promedios de los flujos de las corrientes según cada tipo de combustible alimentado, se apreció que al alimentar pellets de madera el consumo de biomasa aumentó, sin embargo, el consumo de aire y la producción de syngas disminuyeron y la cantidad de cenizas recolectadas aumentaron. Aunque el porcentaje analítico de cenizas es prácticamente igual entre las biomásas, al operar una cantidad similar de horas la planta piloto, el material que no se transformó en gas y fue removido del sistema aumentó al utilizar pellets de madera.
5. En una corrida con pellets, debido al atascamiento frecuente en la garganta del reactor, la estabilidad del proceso es poca, ya que de forma casi periódica se genera una caída de presión de gran magnitud entre la zona de combustión y la zona de reducción del reactor, hasta que la parrilla en la base se activa, por lo tanto, se tuvo que aumentar la frecuencia de activación de este componente, provocando un aumento en el consumo de biomasa y en la producción de cenizas, lo cual afecta también al perfil de temperatura dentro del reactor.
6. Las temperaturas dentro del reactor fueron menores al emplear pellets de madera. En la zona de restricción existe una disminución de 70 °C aproximadamente con respecto a las astillas, lo cual afecta directamente el desempeño de las reacciones de reducción o gasificación que son endotérmicas.

7. Al no alcanzar temperaturas lo suficientemente altas dentro del reactor, el contenido de H_2 en el syngas disminuyó y aumentó el contenido de CH_4 al emplear pellets de madera debido a la naturaleza endotérmica de las reacciones de producción de H_2 .
8. Las corrientes de proceso en general son más calientes cuando se emplearon astillas de madera como combustible, lo cual es importante para usos de intercambio térmico del gas productos.
9. Parámetros importantes como lo son la eficiencia térmica global, el rendimiento eléctrico y el rendimiento de syngas fueron estadísticamente diferentes, lo cual, apoyado con los valores promedio de cada uno, indica que la incidencia de la geometría de la biomasa, empleada en un proceso de gasificación con un reactor “downdraft” o de lecho descendente, es importante para el desempeño del proceso, siendo en este caso en específico las astillas de madera un combustible que superó a los pellets de madera en el desempeño de la planta piloto. Por lo tanto, esta geometría posee gran capacidad para un proceso de transformación termoquímica para la generación de energía térmica y eléctrica.

7.1 Recomendaciones

- ✓ El diseño original de la unidad requiere de una modificación del mecanismo de alimentación de la biomasa al reactor, en otras palabras, un rediseño o sustitución del tornillo de alimentación debido a su baja calidad estructural y funcional. Se recomienda la instalación de un resorte, ya que posee flexibilidad ante posibles obstrucciones.
- ✓ Se requiere además instalar un mecanismo de agitación automática dentro de la tolva de alimentación que promueva el correcto y ordenado descenso de la biomasa por esta unidad hacia la cámara de alimentación donde se ubica el mecanismo de alimentación de biomasa al reactor.
- ✓ Elaborar pruebas en el módulo de gasificación de astillas de madera con y sin corteza, pues permitiría la evaluación del impacto de este componente extra, ya que posee altos contenidos de minerales que pueden implicar diferencias en el desempeño del gasificador.
- ✓ Se recomienda un recubrimiento en el ciclón para evitar pérdidas excesivas de energía que pueda ser utilizada en el precalentamiento de la biomasa. Además de instalar equipos en serie para mejorar la eficiencia de remoción de partículas sólidas.

- ✓ Sería factible, operativamente, realizar un proceso de tamizado mecánico de las astillas de biomasa, que acelere la obtención de las partículas de tamaño adecuado para alimentar al reactor.
- ✓ No se realizaron pruebas a potencia máxima, en esta condición todas las unidades de equipos dentro de la planta operan a su máxima capacidad, lo cual se recomienda estudiar.
- ✓ Realizar un diseño experimental que contemple la variación del flujo de aire de alimentación al reactor y la humedad de la biomasa y sus efectos sobre el desempeño de una planta piloto.
- ✓ Se recomienda un estudio de permeabilidad del lecho dentro del reactor para definir la diferencia entre ambos combustibles empleados sobre la capacidad del gas producido en fluir dentro del reactor y salir de este. Además de cómo va modificándose la porosidad del lecho al descender por el reactor.
- ✓ Sería importante a la hora de sustituir los estratos del filtro de lecho empacado recuperar cada uno de manera individual para evaluar capacidad de absorción por estrato y la neta
- ✓ Se recomienda alimentar vapor al sistema de reacción al utilizar pellets de madera, evitando la adición de agua al combustible previo al proceso y así evitar debilitar mecánicamente su estructura y con ello verificar desempeño del proceso y comparar con los resultados obtenidos al gasificar solo con aire.
- ✓ Un aporte importante en esta línea de investigación sería un estudio de los mecanismos de transferencia de masa y calor mediante la determinación del número de Biot másico y térmico en los estratos que componen al reactor.
- ✓ Por último, sería importante realizar un estudio financiero que permita definir la rentabilidad del proceso, contemplando no solo la operación del módulo, sino también el proceso de adquisición, pretratamiento, mantenimiento, operación y todos los costos directos e indirectos que se deben considerar en cada etapa de un proceso de esta magnitud.

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción
A	Flujo de aire, kg/s
Ac	Acumulación de carbono, kg/h
A_{rms}	Corriente eficaz en las fases, A
B	Flujo de biomasa, kg/s
B_s	Masa de la muestra después de secada a 105 °C, g
Bi_T	Número de Biot Térmico, adim
Bi_M	Número de Biot Másico, adim
Wf	Masa de la muestra después de secada a 950 °C, g
D	Masa de las cenizas remanentes, g
D_p	Coefficiente de difusión de masa, m ² /s
DH	Contenido de humedad de la biomasa en base seca, % m/m
E_j	Contenido energético de una corriente, MJ/h
FC	Porcentaje de carbono fijo en base seca, % m/m
Fc	Ingreso de carbono al sistema, kg/h
FP	Factor de potencia, adim
FPD	Factor de potencia por desplazamiento, adim
H	Porcentaje de cenizas en la biomasa en base seca, % m/m
HEH	Humedad de Equilibrio Higroscópico, % m/m
LHV	Poder calórico inferior
HR	Humedad relativa del aire, %
R_{CHON}	Porcentaje otros elementos en análisis de CHON en muestras, % m/m
R_j	Rendimiento, KWh/t
Rs,b	Rendimiento de syngas/biomasa
P	Presión, kPa
P_E	Potencia eléctrica, kW
PC	Poder calórico, MJ/kg
T	Flujo de alquitranes, kg/s

T_i	Temperatura, °C
TOC	Composición total de carbono, % m/m
V	Porcentaje de materias volátiles en base seca, % m/m
V_{rms}	Tensión eficaz en las fases, V
W_j	Masa, g
X	Flujo de cenizas reactor, kg/s
Y	Flujo de cenizas ciclón, kg/s
$Z_{i,j}$	Razón entre dos propiedades, adim
Z_M	Composición metales según espectrofotómetro de rayos X, % m/m
d_p	Diámetro de la partícula, m
n	Fracción mol, mol/mol
t	Tiempo, h
$w_{i,j}$	Fracción peso, % m/m
y	Composición volumétrica, % v/v
α_{fp}	Coefficiente de transferencia de calor convectivo, kW/m ² K
α_{mp}	Coefficiente de transferencia de masa de la partícula sólido-gas, m/s
ε_i	Eficiencia, adim
Δ	Cambio neto
λ_p	Conductividad térmica del material, kW/mK
Ω	Es el ángulo sólido efectivo subtendido por el detector, rad
ϕ_1	Es el ángulo formado por el haz de radiación incidente y la dirección normal al plano de la muestra, rad
ϕ_2	Es el ángulo formado por el haz de radiación emergente y la dirección normal al plano de la muestra, rad

Subíndices

C	Se refiere a carbono
CGE	Se refiere a eficiencia de gas frío
CO	Se refiere a monóxido de carbono
CO_2	Se refiere a dióxido de carbono
CH_4	Se refiere a metano

<i>EGE</i>	Se refiere a eficiencia motor generador
<i>GTE</i>	Se refiere a eficiencia térmica global
<i>H₂</i>	Se refiere a hidrógeno
<i>H₂O</i>	Se refiere a agua
<i>N₂</i>	Se refiere a nitrógeno
<i>a</i>	Se refiere a análisis
<i>act</i>	Se refiere a aceite
<i>c</i>	Se refiere a contenedor
<i>e</i>	Se refiere a entrada
<i>eq</i>	Se refiere a equivalente
<i>f</i>	Se refiere a masa final de muestra después de secada a 105 °C
<i>cln</i>	Se refiere a la salida del ciclón
<i>gas</i>	Se refiere a la salida del gasificador
<i>i</i>	Se refiere a masa inicial de muestra húmeda
<i>int</i>	Se refiere a intercambiador de calor
<i>mot</i>	Se refiere a motor
<i>o</i>	Se refiere a durante la operación
<i>ori</i>	Se refiere a orificio
<i>p</i>	Se refiere a partícula
<i>piro</i>	Se refiere a zona de pirólisis en el reactor
<i>red</i>	Se refiere a zona de reducción en el reactor
<i>rst</i>	Se refiere a zona de restricción en el reactor
<i>s</i>	Se refiere a syngas
<i>sd</i>	Se refiere a salida
<i>tv</i>	Se refiere a tolva
<i>w</i>	Se refiere a agua

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, A. A., Zawawi, N. A., Kasim, F. H., Inayat, A., & Khasri, A. (2016). Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1333–1347. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.030>
- AllPowerLabs. (2015). PP20 Power Pallet. Retrieved from <http://www.allpowerlabs.com/>
- ASTM. (2001). ASTM D 1102 – 84 Standard Test Method for Ash in Wood, 84(June 1984), 1–2.
- Baíllo, A. (2009). Estadística. In *CC.Ambientales* (pp. 6–9). México: Universidad Autónoma de México.
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CB09781107415324.004>
- BERC. (2011). Woodchip Heating Fuel Specifications in the Northeastern United States. Retrieved from http://www.biomasscenter.org/images/stories/Woodchip_Heating_Fuel_Specs_electronic.pdf
- Bissen, D. (2009). *Biomass densification document of evaluation*. Minneapolis, USA: Zachry Engineering Corporation.
- Bocci, E., Sisinni, M., Moneti, M., Vecchione, L., Di Carlo, A., & Villarini, M. (2014). State of art of small scale biomass gasification power systems: A review of the different typologies. *Energy Procedia*, 45, 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.027>
- Carlton-Inc. (2015). 9 " Disk Style Brush Chipper Model 1790, (864).
- Chen, W. H., Peng, J., & Bi, X. T. (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 847–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
- Coordinación de Energías Renovables, Dirección Nacional de Promoción, & Subsecretaría de

- Energía Eléctrica. (2008). Energía Biomasa. *Energías Renovables*, 19.
- Dejtrakulwong, C., & Patumsawad, S. (2014). Four zones modeling of the downdraft biomass gasification process: Effects of moisture content and air to fuel ratio. *Energy Procedia*, 52, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.064>
- Dupont, C., Boissonnet, G., Seiler, J. M., Gauthier, P., & Schweich, D. (2007). Study about the kinetic processes of biomass steam gasification. *Fuel*, 86(1–2), 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.06.011>
- Fellin, M., Negri, M., All, S. M., Mazzei, F., & Zanuttini, R. (2014). Characterization of Ed-Xrf Technology Applied To Wooden Matrix, 59(4), 533–546.
- Forestry Department. (2010). Wood as engine fuel. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/t0512e/T0512e0b.htm>
- Forestry&NaturalResourcesDevelopment. (2014). Wood Chip for Biomass Power Generation. Retrieved January 1, 2017, from <http://www.active-energy.com/wood-chip-biomass-power-generation>
- Gambles, Bridwater, Kuester. (1988). *Research in Thermochemical* (1st editio). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-2737-7>
- Gómez-Barea, A., & Leckner, B. (2010). Modeling of biomass gasification in fluidized bed. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(4), 444–509. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.12.002>
- González, G. (2012). *Diseño de una planta de peletización en Castilla y León*. Castilla: Universidad Carlos III Castilla.
- Guo, W., Lim, C. J., Bi, X., Sokhansanj, S., & Melin, S. (2013). Determination of effective thermal conductivity and specific heat capacity of wood pellets. *Fuel*, 103, 347–355. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.08.037>
- IDAE. (2007). *Energía de la biomasa*. <https://doi.org/9968-904-02-3>
- Janajreh, I., & Al Shrah, M. (2013). Numerical and experimental investigation of downdraft gasification of wood chips. *Energy Conversion and Management*, 65, 783–792.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.03.009>

- Jangsawang, W., Laohalidanond, K., & Kerdsuwan, S. (2015). *Optimum Equivalence Ratio of Biomass Gasification Process Based on Thermodynamic Equilibrium Model*. *Energy Procedia* (Vol. 79). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.528>
- Kärhä, K., & Oy, M. (2011). Production systems of forest chips in Finland. *19th European Biomass Conference & Exhibition, 1884–1887*.
- Kollmann, F. (1959). *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*, 695.
- Kumar, A., Jones, D. D., & Hanna, M. A. (2009). Thermochemical biomass gasification: A review of the current status of the technology. *Energies*, 2(3), 556–581. <https://doi.org/10.3390/en20300556>
- Kumar, H., Baredar, P., Agrawal, P., & Soni. (2014). Effect of Moisture Content on Gasification Efficiency in Down Draft Gasifier. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 413(3), 411–413.
- Lara, J. ., Arias, D., & Villalobos, C. (2017). Árboles podrían convertirse en nueva fuente de electricidad. *La Nación*, (23 junio). Retrieved from http://www.nacion.com/nacional/Arboles-podrian-nueva-fuente-electricidad_0_1647235280.html
- Maschio, C., de Carvalho, C. P. V., & Schiozer, D. J. (2010). A new methodology to reduce uncertainties in reservoir simulation models using observed data and sampling techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 72(1–2), 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.03.008>
- McKee, D. W. (1983). Mechanisms of the alkali metal catalysed gasification of carbon *. *Fuel*, 62(2), 170–175.
- McMullen, J. . (2005). *Storage and handling characteristics of pellets from poultry litter*. *Appl Eng Agric*.
- Mehrabian, R., Scharler, R., & Obernberger, I. (2012). Effects of pyrolysis conditions on the heating rate in biomass particles and applicability of TGA kinetic parameters in particle thermal conversion modelling. *Fuel*, 93, 567–575.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.054>

Molino, A., Chianese, S., & Musmarra, D. (2016). Biomass gasification technology: The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*, 25(1), 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005>

Morice, J. (2015). *Diseño Mecánico: Medidor de flujo tipo orificio*. San José: Universidad de Costa Rica.

Moya, R., & Tenorio, C. (2013). Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. *Biomass and Bioenergy*, 56, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.04.013>

Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2007). A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. *Fuel*, 86(12–13), 1710–1719. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.029>

Pelletics. (2016). ¿Qué son pellets? Retrieved from http://pelletics.com/?page_id=17

Peña, V., & Rojas, P. (2005). *Tecnología de la Madera 3ed*. Madrid: Mundi-Prensa.

Pérez, J. F., Melgar, A., & Benjumea, P. N. (2012). Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study. *Fuel*, 96, 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.064>

Petterson, R. (1984). The chemical composition of wood. *The Chemistry of Solid Wood*, 1–9. <https://doi.org/10.1021/ba-1984-0207>

Pozzobon, V. (2016). Biomass gasification under high solar heat flux: Experiments on thermally thick samples. PhD Thesis, 1–193. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.003>

Prins, M. J. (2005). *Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction*. Technische Universiteit Eindhoven. <https://doi.org/10.6100/IR583729>

Quiñones, F. (2016). Pellets de madera de pino. Retrieved from <http://www.ventapelletsmadera.es/pellets-de-madera-de-pino/>

Radl, S., Krainer, F., Puffitsch, T., & Kloss, C. (2015). Biot Number Effects on the Local Heat and Mass Transfer Rate in Fixed and Fluidized Beds CFD-DEM Simulation Approach 1D Model

for Heat and Mass Balances. *Institute of Process and Particle Engineering Graz University of Technology*, (NOVEMBER).

- Raid, J. (2017). Wood chips. Retrieved from <https://www.tootsiturvas.ee/en/wood-chips/>
- Ranger, S. (2015). Lab Report XRF 97 S2 RANGER The Analysis of Metal Samples Using EQUA ALL.
- Rezaei, H., Lim, C. J., Lau, A., & Sokhansanj, S. (2016). Size, shape and flow characterization of ground wood chip and ground wood pellet particles. *Powder Technology*, *301*, 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.07.016>
- Ruiz, J. A., Juárez, M. C., Morales, M. P., Muñoz, P., & Mendivil, M. A. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *18*, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.021>
- Sheth, P. N., & Babu, B. V. (2010). Production of hydrogen energy through biomass (waste wood) gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, *35*(19), 10803–10810. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.009>
- Stahl, R., Henrich, E., Gehrmann, H. ., Vodegel, S., & Koch, M. (2004). Definition of a standard biomass Definition of a standard biomass. *Contract*, 1–14.
- Subero, E., Pallar, J., Mec, R., Omar, R., Idris, A., Yunus, R., ... ASTM. (2013). ASTM D1762-84. Standard test method for chemical analysis of wood charcol. *American Society for Testing and Materials*, *84*(Reapproved 2013), 1–2. <https://doi.org/10.1520/D1762-84R13.2>
- Šulc, J., Štojdl, J., Richter, M., Popelka, J., Svoboda, K., Smetana, J., ... Buryan, P. (2012). Biomass waste gasification - Can be the two stage process suitable for tar reduction and power generation? *Waste Management*, *32*(4), 692–700. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.08.015>
- Tenorio, C., Moya, R., Salas, C., & Berrocal, A. (2016). Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica Estudio de propiedades de la madera de seis especies nativas en plantaciones de Costa Rica. *Bosque*, *37*(1), 71–84. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000100008>
- ThomasNET. (2012). How Wood Chippers Word. Retrieved January 1, 2017, from

<http://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools-supplies/How-Wood-Chippers-Work>

Torres, C. (2016). Implementación y Evaluación Tecnológica de Gasificación en la Industria de Café, como alternativa para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) I AVANCE (p. 77). San Pedro, San José, Costa Rica.

Torres, C., Molina, D., Hernández, N., & Urvina, L. (2016). *Informe técnico: Evaluación de desempeño de la tecnología comercial de gasificación utilizando residuos de café*. San José.

Wang, L., Weller, C. L., Jones, D. D., & Hanna, M. A. (2008). Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production. *Biomass and Bioenergy*, 32(7), 573–581. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.12.007>

APÉNDICES

A. Resultados caracterización fisicoquímica de la biomasa

Cuadro A.1. Determinación de la humedad en base húmeda de las biomosas

Réplica	Contenido de humedad base húmeda WH, % m/m	
	Astillas	Pellets
1	15.88	14.83
2	16.32	16.41
3	16.78	16.41
Promedio, % m/m	16.33	15.88
Desviación estándar, % m/m	0.45	0.91

Cuadro A.2. Resultados de la determinación de la humedad en base seca de las biomosas

Réplica	Contenido de humedad base seca DH, % m/m	
	Astillas	Pellets
1	13.704	12.915
2	14.030	14.097
3	14.369	14.097
Promedio, % m/m	14.034	13.703
Desviación estándar, % m/m	0.333	0.682

Cuadro A.3. Resultados de la determinación del contenido de cenizas en base seca

Réplica	Contenido de cenizas, % m/m	
	Astillas	Pellets
1	1.020	1.126
2	0.978	1.087
3	0.958	1.077
Promedio, % m/m	0.985	1.097
Desviación estándar, % m/m	0.031	0.026

Cuadro A.4. Resultados de la determinación del contenido de materias volátiles en base seca

Réplica	Contenido de materias volátiles V, %m/m	
	Astillas	Pellets
1	79.795	79.986
2	79.808	80.213
3	80.075	80.528
Promedio, % m/m	79.893	80.242
Desviación estándar, % m/m	0.158	0.272

Cuadro A.5. Resultados de la determinación del contenido de carbono fijo en base seca

Réplica	Contenido de carbono fijo FC, %m/m	
	Astillas	Pellets
1	5.376	6.079
2	5.075	4.712
3	4.478	4.418
Promedio, % m/m	4.976	5.070
Desviación estándar, % m/m	0.457	0.887

Cuadro A.6. Determinación del poder calórico de cada biomasa empleada

Réplica	Poder calórico, MJ/kg	
	Astillas	Pellets
1	17.531	18.473
2	17.201	18.305
3	17.506	18.175
Promedio, MJ/kg	17.413	18.317
Desviación estándar, MJ/kg	0.184	0.149

Cuadro A.7. Resultados de análisis de composición del biochar

	Astillas	Pellets
Carbono, % m/m	76.62	76.62
Hidrógeno, % m/m	0.9	0.9
Oxígeno, % m/m	6.42	6.42
Cenizas, % m/m	16.06	16.06

Cuadro A.8. Determinación del contenido de metales de cada biomasa estudiada con espectrofotómetro de rayos X

Compuesto	Composición de metales Z_M , %m /m			
	Astillas		Pellets	
	Biochar	Cenizas	Biochar	Cenizas
Fe_2O_3	7.62	3.59	6.95	18.67
CaO	42.17	63.42	55.36	27.58
Al_2O_3	4.23	1.84	2.99	4.75
MgO	1.23	2.07	2.00	1.95
K_2O	30.99	19.39	16.69	31.96
SiO_2	8.52	2.67	4.63	8.49
P_2O_5	2.12	3.10	3.22	1.76
SO_3	0.72	1.20	2.01	1.27
Cl	1.20	1.28	2.57	1.60
TiO_2	0.60	0.08	0.23	1.04
V_2O_5	0.01	0.00	0.00	0.06
Cr_2O_3	0.00	0.02	0.05	0.13
MnO	0.08	0.07	0.24	0.18
CoO	0.02	0.02	0.02	0.06
NiO	0.00	0.02	0.03	0.06
CuO	0.05	0.02	0.10	0.14
ZnO	0.07	0.10	0.48	0.08
SrO	0.34	0.29	0.32	0.21
CdO	0.01	0.00	0.00	0.03
Sb_2O_3	0.00	0.00	0.00	0.01
Br	0.00	0.00	0.00	0.01
Na_2O	0.00	0.83	2.10	0.00
SUMA	99.98	100.00	97.90	99.99

B. Resultados de corridas experimentales

Cuadro B.9. Mediciones de masa de estratos de las corridas experimentales

Fecha, mes/día	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellets	Pellets	Pellets
Biomasa alimentada, kg	37.50	54.03	41.22	63.47	65.31	83.06
Carbón inicial, kg	5.36	5.04	5.00	5.06	5.00	5.00
Biomasa en tolva, kg	4.20	1.02	5.81	10.21	9.06	13.63
Pirólisis baja, kg	0.33	0.33	-	1.77	2.15	1.31
Pirólisis media, kg	0.18	0.22	-	1.48	1.37	0.98
Pirólisis superior, kg	0.35	0.11	0.11	1.35	0.45	1.34
Combustión, kg	1.02	0.39	0.36	0.65	2.05	1.71
Reducción, kg	1.70	1.37	2.05	2.93	2.67	2.68
Cenizas reactor, kg	1.81	1.69	1.27	1.71	2.71	5.40
Cenizas ciclón, kg	0.46	0.29	0.31	0.54	0.43	0.91
Total biomasa remanente, kg	10.05	5.42	9.91	20.64	20.89	27.96

Cuadro B.10 Flujos de las corrientes dentro del sistema de las corridas experimentales

Fecha, mes/día	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de biomasa	Astilla	Astilla	Astilla	Pellet	Pellets	Pellets
	s	s	s			
Flujo de biomasa, kg/h	11.20	10.80	11.12	12.15	12.58	13.51
D.std. Flujo de biomasa, kg/h	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Flujo de aire, l/m	172.25	214.12	224.8	175.6	168.07	168.15
D.std. Flujo de aire, l/m	15.19	22.68	16.12	13.60	9.67	5.98
Flujo de aire, kg/h	9.60	11.81	12.27	9.74	9.33	9.38
D.std. Flujo de aire, kg/h	0.85	1.26	0.86	0.75	0.53	0.33
Flujo de syngas, kg/h	20.40	19.14	18.54	18.02	15.67	16.12
D.std. Flujo d syngas, kg/h	1.48	1.19	4.54	3.79	1.26	1.17
Humedad relativa del aire, %	42.23	37.12	36.91	44.84	42.22	42.43
D.std. Humedad relativa del aire, %	0.87	1.28	8.40	2.48	1.61	1.12
Fracción mol de agua en el aire, %	2.32	2.46	2.83	2.50	2.51	2.25
D.std. Fracción mol agua en aire, %	0.08	0.08	0.75	0.08	0.03	0.03

Cuadro B.11. Resultados de balance de masa para las corridas experimentales

Fecha, mes/día	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellet	Pellet	Pellet
Acumulación de cenizas del reactor, kg/h	0.37	0.38	0.39	0.43	0.69	1.21
D.std. Acumulación de cenizas del reactor, kg/h	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Acumulación de cenizas del ciclón, kg/h	0.09	0.07	0.09	0.14	0.11	0.20
D.std. Acumulación de cenizas del ciclón, kg/h	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Acumulación de tar en el sistema, kg/h	0.00	3.02	4.34	3.30	5.00	5.00
Fraccción peso de agua en el tar acumulado, %	100.	67.3	89.7	75.3	44.8	56.6
Fraccción peso de tar en el syngas húmedo, %	5.66	0.96	0.00	0.00	0.00	7.91
Fraccción mol de agua en el syngas libre de tar, %	13.00	8.28	0.00	2.84	0.00	13.00

Cuadro B.12. Valores obtenidos de los errores de los balances de masa

Fecha, mes/día	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellet	Pellets	Pellets
Error del balance de masa global, %	-2.90E-01	7.64E-07	7.27E-02	6.45E-06	2.02E+00	1.53E+00
Error del balance de masa C, %	-1.68	-4.81E-05	0.00	-1.68	-5.16	2.50
Error del balance de masa H, %	0.54	0.10	0.00	0.01	0.00	0.30
Error del balance de masa O, %	0.88	-0.11	-1.63	-1.14	-0.21	2.80
Error del balance de masa N, %	-2.60E-03	1.00E-04	1.77	-0.05	3.94	-7.66

Cuadro B.13. Resultados de composición del syngas de las corridas experimentales

Fecha, mes/día	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellet	Pellets	Pellets
CO, % v/v	22.65	11.65	18.31	18.31	20.08	19.20
D.std. CO, % v/v	1.39	0.02	0.80	1.46	1.34	1.40
CH ₄ % v/v	4.28	2.24	3.31	6.26	7.52	6.89
D.std. CH ₄ , % v/v	0.32	0.01	0.36	0.90	0.44	0.67
H ₂ , % v/v	15.62	8.15	10.55	10.41	8.01	9.21
D.std. H ₂ , % v/v	0.62	0.05	0.54	2.28	1.08	1.68
CO ₂ , % v/v	10.20	6.59	7.96	8.58	7.88	8.23
D.std. CO ₂ , % v/v	0.46	0.01	0.94	0.60	0.24	0.42
O ₂ , % v/v	3.53	9.97	6.19	6.43	6.75	6.59
D.std. O ₂ , % v/v	0.69	0.02	0.25	0.65	0.67	0.66
CV, MJ/Nm ³	5.58	3.00	4.06	5.31	5.75	5.53
D.std. CV, MJ/Nm ³	0.49	0.00	0.24	0.68	0.44	0.56

Cuadro B.14. Resultados composición libre de aire de las corridas experimentales

Fecha, mes/día	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellet	Pellets	Pellets
CO, % v/v	27.20	22.18	25.96	26.36	29.57	27.96
D.std. CO, % v/v	0.79	0.07	1.03	1.11	0.65	0.88
CH ₄ , % v/v	5.14	4.26	4.69	8.99	11.14	10.06
D.std. CH ₄ , % v/v	0.31	0.01	0.48	1.06	1.10	1.08
H ₂ , % v/v	18.79	15.51	14.96	14.97	11.76	13.37
D.std. H ₂ , % v/v	0.49	0.09	0.64	3.09	1.05	2.07
CO ₂ , % v/v	12.28	12.53	11.29	12.39	11.64	12.01
D.std. CO ₂ , % v/v	0.57	0.04	1.27	0.90	0.67	0.78

Cuadro B.15. Temperaturas del sistema durante las corridas experimentales

Fecha, mes/día	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellet	Pellets	Pellets
Aire de entrada, °C	30.87	34.13	37.57	31.48	32.12	30.87
D.std. Aire de entrada, °C	0.78	0.79	1.33	0.74	0.49	0.11
Pirólisis 1, °C	372.91	321.62	358.78	175.44	169.45	184.77
D.std. Pirólisis 1, °C	48.29	35.21	22.61	38.44	13.02	22.74
Pirólisis 2, °C	348.02	291.70	344.12	169.58	170.66	179.98
D.std. Pirólisis 2, °C	41.95	29.25	23.12	34.00	14.09	26.56
Pirólisis 3, °C	330.70	288.38	333.78	167.62	174.49	174.72
D.std. Pirólisis 3, °C	31.78	23.66	21.52	27.57	14.31	28.85
Pirólisis 4, °C	325.74	303.38	327.85	173.11	181.98	172.79
D.std. Pirólisis 4, °C	22.31	15.89	19.36	21.57	12.98	29.24
Pirólisis 5, °C	326.34	324.06	325.12	187.35	196.26	178.32
D.std. Pirólisis 5, °C	16.13	12.50	21.89	17.22	11.53	28.95
Pirólisis 6, °C	331.12	343.16	330.03	208.81	216.32	196.28
D.std. Pirólisis 6, °C	12.96	10.23	20.06	17.64	10.92	28.76
Restricción, °C	832.51	758.15	821.91	752.38	749.69	692.99
D.std. Restricción, °C	21.67	18.63	23.65	66.60	38.93	33.46
Reducción, °C	727.81	608.89	418.28	400.42	378.82	385.48
D.std. Reducción, °C	12.32	23.42	32.98	15.71	7.68	9.38
Salida del gasificador, °C	372.52	373.81	374.81	371.78	336.80	337.33
D.std. Salida del gasificador, °C	4.98	8.06	17.60	15.88	4.79	4.81
Salida del ciclón, °C	205.08	191.13	210.75	222.23	177.96	178.73
D.std. Salida del ciclón, °C	3.83	4.02	6.73	9.88	2.40	4.14
Entrada tolva, °C	110.81	94.61	90.88	82.31	70.64	68.91
D.std. Entrada tolva, °C	2.33	2.78	1.80	2.51	1.01	1.63
Salida tolva, °C	77.18	76.37	74.35	66.61	58.81	63.54
D.std. Salida tolva, °C	1.24	1.81	2.98	1.94	1.73	1.42
Entrada intercambiador, °C	46.86	49.41	66.78	57.84	56.93	57.77
D.std. Entrada intercambiador, °C	1.10	1.53	2.55	2.31	1.76	1.75

Cuadro B.7 (continuación). Temperaturas del sistema durante las corridas experimentales

Fecha, mes/día	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellet	Pellets	Pellets
Salida de intercambiador, °C	36.46	37.17	52.37	58.69	60.22	64.51
D.std. Salida intercambiador, °C	1.50	1.09	3.33	4.04	3.83	3.70
Orificio, °C	39.64	41.34	41.88	45.41	47.38	51.62
D.std. Orificio, °C	1.59	1.08	1.78	2.82	2.60	1.84
Entrada motor, °C	43.19	49.99	47.21	43.08	42.77	42.31
D.std. Entrada motor, °C	0.80	0.85	1.83	4.68	3.33	1.52
Salida de motor, °C	568.96	575.89	559.70	559.71	576.18	574.13
D.std. Salida de motor, °C	6.12	2.89	25.04	14.44	2.92	5.49
Mufla, °C	342.22	348.01	339.52	338.53	333.21	357.70
D.std. Mufla, °C	3.42	2.44	19.18	12.62	1.39	6.95
Refrigerante del motor, °C	54.94	49.24	52.46	56.14	51.23	54.78
D.std. Refrigerante del motor, °C	3.98	6.19	6.74	4.60	4.81	3.58

Cuadro B.16. Datos de las presiones durante las corridas experimentales

Fecha, mes/día	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de biomasa	Astilla	Astilla	Astilla	Pelle	Pellet	Pellet
	s	s	s	t	s	s
Combustión, kPa	-1.46	-1.90	-1.69	-1.22	-1.14	-1.06
D.std. Combustión, kPa	0.25	0.30	0.32	0.34	0.19	0.21
Salida del gasificador, kPa	-2.25	-3.72	-3.68	-3.37	-3.02	-2.36
D.std. Salida del gasificador, kPa	0.44	1.00	1.12	1.52	1.24	0.22
Salida del filtro, kPa	-7.24	-7.35	-4.85	-5.55	-6.49	-6.28
D.std. Salida del filtro, kPa	0.50	0.41	1.05	1.42	0.77	0.31
Caída de presión intercambiador, Pa	219.8	215.3	19.87	44.8	43.16	199.7
D.std. Caída de presión intercambiador, Pa	74.77	121.3	32.87	87.4	69.45	52.06
Caída de presión orificio, kPa	0.67	0.60	0.59	0.56	0.41	0.44

Cuadro B.16 (Continuación) Datos de las presiones durante las corridas experimentales

Fecha, mes/día	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellet	Pellets	Pellets
D.std. Caída de presión orificio, Pa	74.77	121.31	32.87	87.44	69.45	52.06
Aceite en el motor, kPa	357.50	347.72	341.28	357.56	374.98	369.48
D.std. Aceite en el motor, kPa	14.06	11.67	76.66	43.76	10.45	10.12

Cuadro B.17. Resultados de potencia y energía de las corridas experimentales

Fecha	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de Biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellets	Pellets	Pellets
Tensión 1-2, Vrms	219.05	219.13	219.11	214.90	219.20	219.23
D.std. Tensión 1-2, Vrms	0.15	2.56	0.20	29.13	0.15	0.14
Tensión 2-3, Vrms	222.60	222.65	222.65	218.52	222.67	222.72
D.std. Tensión 2-3, Vrms	0.16	2.60	0.19	29.61	0.16	0.14
Tensión 3-1, Vrms	219.22	219.30	219.33	215.10	219.33	219.34
D.std. Tensión 3-1, Vrms	0.16	2.56	0.22	29.16	0.15	0.14
Corriente 1, Arms	25.54	25.75	25.53	23.96	25.03	25.09
D.std. Corriente 1, Arms	0.09	0.46	1.21	4.06	0.10	0.08
Corriente 2, Arms	21.99	1.79	22.15	20.43	21.71	21.71
D.std. Corriente 2, Arms	0.12	0.56	1.19	4.29	0.13	0.10
Corriente 3, Arms	21.36	21.66	21.49	20.47	21.57	21.77
D.std. Corriente 3, Arms	0.10	0.37	1.14	3.90	0.11	0.11
Potencia real, W	6.18	6.28	6.22	6.22	6.17	6.21
D.std. Potencia real, W	0.05	0.10	0.04	0.02	0.05	0.04
Potencia reactiva, var	5.76	5.80	5.35	5.80	5.81	5.79
D.std. Potencia reactiva, var	0.02	0.08	1.44	0.00	0.02	0.02
Potencia aparente, VA	8.74	7.38	8.19	8.78	8.67	8.70
D.std. Potencia aparente, VA	0.04	0.10	2.05	0.01	0.04	0.03
Factor de potencia, adim.	0.70	0.84	0.70	0.71	0.70	0.71
D.std. Factor de potencia, adim.	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro B.18. Resultados de composición del syngas limpio y húmedo de las corridas experimentales

Fecha	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de Biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellets	Pellets	Pellets
CO, % v/v	24.27	20.34	25.96	25.61	29.57	23.80
D.std. CO, % v/v	0.79	0.07	1.03	1.11	0.65	0.85
CH ₄ , % v/v	4.59	3.91	4.69	8.74	11.14	7.05
D.std. CH ₄ , % v/v	0.31	0.01	0.48	1.06	1.10	0.69
H ₂ , % v/v	16.76	14.23	14.96	14.54	11.76	13.82
D.std. H ₂ , % v/v	0.49	0.09	0.64	3.09	1.05	1.63
CO ₂ , % v/v	10.95	11.49	11.29	12.03	11.64	10.40
D.std. CO ₂ , % v/v	0.57	0.04	1.27	0.90	0.67	0.75
N ₂ , % v/v	31.83	41.76	43.10	36.23	35.88	31.92
D.std. N ₂ , % v/v	1.47	0.45	1.85	2.48	1.86	1.98
H ₂ O, % v/v	13.00	8.28	0.00	2.84	0.00	13.00
D.std. H ₂ O, % v/v	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro B.19. Rendimiento del syngas limpio y seco de las corridas experimentales

Fecha	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de Biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellets	Pellets	Pellets
N ₂ limpio y seco libre de aire % v/v	36.59	45.53	43.10	37.29	35.88	36.69
D.std. N ₂ limpio y seco libre de aire % v/v	1.47	0.45	1.85	2.48	1.86	1.98
Flujo másico de syngas, húmedo y sin tar, kg/h	19.25	18.96	18.54	18.02	15.67	14.84
D.std. Flujo másico de syngas, húmedo y sin tar, kg/h	2.67	1.47	2.13	1.95	1.12	3.01
Masa molar del syngas, húmedo y sin tar, g/mol	23.96	24.86	25.37	24.83	25.49	23.94
D.std. Masa molar del syngas, húmedo y sin tar, g/mol	0.53	0.13	0.82	0.88	0.65	0.70
Flujo molar de syngas, húmedo y sin tar, mol/h	803.38	762.53	730.92	725.62	614.96	619.78

Cuadro B.19 (continuación) Rendimiento del syngas limpio y seco de las corridas

Fecha	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de Biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellets	Pellets	Pellets
D.std. Flujo molar de syngas, húmedo y sin tar, mol/h	112.95	59.14	87.25	82.47	46.82	127.14
Flujo molar de syngas, seco y sin tar, mol/h	698.94	699.40	730.91	705.00	614.96	539.21
D.std. Flujo molar de syngas, seco y sin tar, mol/h	98.27	54.25	87.25	80.12	46.82	110.61
Flujo volumétrico de syngas, seco y sin tar, Nm ³ /h	16.81	16.82	17.58	16.96	14.79	12.97
D.std. Flujo volumétrico de syngas, seco y sin tar, Nm ³ /h	2.36	1.30	2.10	1.93	1.13	2.66
Rendimiento de gas limpio y seco en base húmeda, Nm ³ /kg	1.50	1.56	1.58	1.40	1.18	0.96
D.std. Rendimiento de gas limpio y seco en base húmeda, Nm ³ /kg	0.21	0.12	0.19	0.16	0.09	0.20

Cuadro B.20. Resultados de razón equivalente de las corridas experimentales

Fecha	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de Biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellets	Pellets	Pellets
O ₂ en el aire húmedo, m/m	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
D.std. O ₂ en el aire húmedo, m/m	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Razón biomasa/agente oxidante, adim.	3.85	3.00	2.97	4.17	4.42	4.72
D.std. Razón biomasa/agente oxidante, adim.	0.02	0.03	0.02	0.15	0.02	0.04
Razon equivalente, adim.	1.98	1.55	1.53	2.15	2.28	2.43
D.std. Razon equivalente, adim.	0.12	0.15	0.09	0.23	0.18	0.13

Cuadro B.21. Conversión de carbono de las corridas experimentales

Fecha	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de Biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellets	Pellets	Pellets
Ingreso de carbono, kg/h	4.33	4.16	4.26	4.82	4.90	5.26
D.std. Ingreso de carbono, kg/h	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Acumulación de carbono, kg/h	0.36	0.80	0.57	0.81	1.90	2.10
D.std. Acumulación carbono, kg/h	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02
Conversión de carbono, %	91.80	80.80	86.54	83.16	61.29	60.16
D.std. Conversión de carbono, %	0.15	0.41	0.26	0.29	0.56	0.43

Cuadro B.22. Rendimientos y eficiencias de las corridas experimentales

Fecha	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de Biomasa	Astillas	Astillas	Astillas	Pellets	Pellets	Pellets
Contenido energético syngas por volumen LHV, MJ/Nm ³	6.81	5.59	6.13	7.61	8.38	8.00
D.std. Contenido energético por volumen LHV, MJ/Nm ³	0.15	0.01	0.21	0.49	0.39	0.43
Contenido energético LHV syngas, MJ/h	114.53	94.11	107.76	129.08	124.00	103.73
D.std. Contenido energético LHV syngas, MJ/h	10.76	6.39	9.63	13.42	10.59	14.18
Contenido energético LHV biomasa seca, MJ/h	150.40	144.21	147.67	174.49	177.37	190.41
D.std. Contenido energético LHV biomasa seca, MJ/h	1.90	1.82	1.87	2.09	2.12	2.27
Potencia, MJ/h	22.25	22.61	22.40	22.38	22.21	22.36
D.std. Potencia, MJ/h	0.17	0.35	0.15	0.09	0.19	0.14
Eficiencia gas frío (CGE) (syn/bio), %	76.15	65.26	72.98	73.98	69.91	54.48
D.std. Eficiencia gas frío (CGE) (syn/bio), %	7.22	4.51	6.59	7.74	6.03	7.47
Eficiencia térmica global (TE), %	14.79	15.68	15.17	12.83	12.52	11.75
D.std. Eficiencia térmica global (TE), %	0.22	0.31	0.22	0.16	0.18	0.16
Eficiencia generador/motor (EE), %	19.42	24.03	20.79	17.34	17.91	21.56
D.std. Eficiencia generador/motor (EE), %	1.86	1.73	1.90	1.83	1.57	2.97

Cuadro B.14. (continuación) Rendimientos y eficiencias de las corridas experimentales

Fecha	3/21	4/17	5/24	6/26	7/8	7/15
Tipo de Biomasa	Astill as	Astill as	Astill as	Pellet s	Pellet s	Pellet s
Rendimiento eléctrico base húmeda, kWh/t	551.7 4	581.8 8	559.8 9	511.8 3	490.2 7	459.9 5
D.std. Rendimiento eléctrico base húmeda kWh/t	4.21	9.00	3.97	2.13	4.20	2.91
Rendimiento eléctrico base seca, kWh/t	655.9 0	695.3 6	672.7 8	600.9 6	586.5 2	550.2 4
D.std. Rendimiento eléctrico base seca, kWh/t	5.41	10.97	5.17	3.22	5.33	3.87
Rendimiento de syngas/biomasa alim, kg/kg	1.82	1.77	1.67	1.48	1.25	1.19
D.std. Rendimiento de syngas/biomasa alim, kg/kg	0.13	0.11	0.41	0.31	0.10	0.09

C. Muestra de cálculo

C.1 Cálculo de concentración de metales

Para el cálculo de la concentración de metales en las muestras de cenizas y biochar se utiliza la relación:

$$\omega_M = Z_M \cdot R_{CHON} \cdot FC \cdot \left(\frac{1000^2}{100^2 \cdot 100} \right) \quad C.1$$

Donde,

$$R_{CHON} = 100 - (\omega_C + \omega_O + \omega_H)$$

Utilizando los datos del Cuadro A.8 para el biochar de las astillas de madera, óxido de hierro III

$$R_{CHON} = 100 - (76.62 + 0.9 + 6.42) = 16.06 \% \frac{m}{m}$$

$$\omega_M = 7.62 \% \frac{m}{m} \cdot 16.06 \% \frac{m}{m} \cdot 4.985 \% \frac{m}{m} \cdot \left(\frac{1000^2}{100^2 \cdot 100} \right) \left(\frac{\frac{mg}{kg}}{\% \frac{m}{m}} \right) = 609 \frac{mg}{kg}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro 6.2

C.2. Cálculo de la conversión de carbono

Para el cálculo de la conversión de carbono se utiliza la relación:

$$\varepsilon_c = 100 \cdot \frac{(TOC_{Biomasa} \cdot B) - (TOC_{cenizas reactor} \cdot X + TOC_{cenizas ciclón} \cdot Y)}{(TOC_{Biomasa} \cdot B)} \quad C.2$$

Utilizando los datos de los Cuadros B.1, B.2 y 7.8:

$$\varepsilon_c = \frac{\left(0.4601 \frac{m}{m} \cdot 11.20 \frac{kg}{h}\right) - \left(0.7662 \frac{m}{m} \cdot 0.37 \frac{kg}{h} + 0.7662 \frac{m}{m} \cdot 0.09 \frac{kg}{h}\right)}{\left(0.4601 \frac{m}{m} \cdot 11.20 \frac{kg}{h}\right)} = 91.80 \%$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.13. El mismo cálculo se llevó a cabo para las otras corridas experimentales

C.3 Cálculo de la razón biomasa/agente oxidante

Para el cálculo de la razón biomasa/agente oxidante se utiliza la relación:

$$r_{B/O} = \frac{B \cdot (1 - w_{inerte}) \cdot \left(1 - \frac{WD}{100}\right)}{(A \cdot w_{O_2})} \quad C.3$$

Utilizando los datos de los Cuadros B.2, 7.5 y B.12:

$$r_{B/O} = \frac{11.20 \frac{kg}{h} \cdot \left(1 - 0.01 \frac{m}{m}\right) \cdot \left(1 - \frac{15.88\% \frac{m}{m}}{100}\right)}{\left(9.60 \frac{kg}{h} \cdot 0.23 \frac{m}{m}\right)} = 3.85 \frac{m}{m}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.12. El mismo cálculo se llevó a cabo para las otras corridas experimentales

C.4 Cálculo de la razón equivalente

Para el cálculo de la razón equivalente se utiliza la relación:

$$r_{eq} = \frac{r_{B/O}}{\left(\frac{F}{O_x}\right)} \quad C.4$$

Utilizando los datos de los Cuadros B.12 y el cálculo teórico de la razón elemental C/O requerida para la combustión completa de la biomasa:

$$r_{eq} = \frac{3.85 \frac{m}{m}}{1.94 \frac{m}{m}} = 1.98$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.12. El mismo cálculo se llevó a cabo para las otras corridas experimentales

C.5 Cálculo del contenido energético de biomasa

Para el cálculo del contenido energético de la corriente de biomasa se utiliza la relación:

$$E_B = B \cdot LHV_{biomasa} \quad C.5$$

Utilizando los datos del Cuadro B.12 y A.6:

$$E_B = 11.20 \frac{kg}{h} \cdot 15.96 \frac{MJ}{kg} = 150.40 \frac{MJ}{h}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.14. El mismo cálculo se llevó a cabo para las otras corridas experimentales

C.6 Cálculo del contenido energético del syngas

Para el cálculo del contenido energético de la corriente de syngas se utiliza la relación:

$$E_S = S \cdot HV_{syngas} \quad C.6$$

Utilizando los datos de los Cuadros:

$$E_S = 16.81 \frac{Nm^3}{h} \cdot 6.81 \frac{MJ}{Nm^3} = 114.53 \frac{MJ}{h}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.14. El mismo cálculo se llevó a cabo para las otras corridas experimentales

C.7 Cálculo del rendimiento eléctrico en base húmeda

Para el cálculo del rendimiento eléctrica del módulo se utiliza la relación:

$$R_{WH} = 1000 \cdot \frac{P_E}{B} \quad C.7$$

Utilizando los datos de los Cuadros:

$$R_{WH} = 1000 \cdot \frac{22.25 \frac{MJ}{h}}{150.40 \frac{MJ}{h}} = 551.74 \frac{kWh}{t}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.14. El mismo cálculo se llevó a cabo para las otras corridas experimentales

C.8 Cálculo del rendimiento de syngas

Para el cálculo del rendimiento de producción de syngas se utiliza la relación:

$$R_{S/B} = \frac{S}{B} \quad C.8$$

Utilizando los datos de los Cuadros B.2

$$R_{S/B} = \frac{20.40 \frac{kg}{h}}{11.20 \frac{kg}{h}} = 1.82 \frac{kg_{syngas}}{kg_{biomasa}}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro. El mismo cálculo se llevó a cabo para las otras corridas experimentales

C.9 Cálculo de la eficiencia térmica global

Para el cálculo de la eficiencia térmica global se utiliza la relación:

$$\varepsilon_{GTE} = 100 \cdot \frac{P_E}{E_B} \quad C.9$$

Utilizando los datos del Cuadro B.13

$$\varepsilon_{GTE} = 100 \cdot \frac{22.25 \frac{MJ}{kg}}{150.40 \frac{MJ}{kg}} = 14.79 \%$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.14. El mismo cálculo se llevó a cabo para las otras corridas experimentales

C.10 Cálculo de la eficiencia de gas frío

Para el cálculo de la eficiencia de gas frío se utiliza la relación:

$$\varepsilon_{CGE} = 100 \cdot \frac{E_S}{E_B} \quad \text{C.10}$$

Utilizando los datos del Cuadro B.13

$$\varepsilon_{CGE} = 100 \cdot \frac{114.53 \frac{MJ}{h}}{150.40 \frac{MJ}{h}} = 76.15 \%$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.14. El mismo cálculo se llevó a cabo para las otras corridas experimentales

C.11 Cálculo de la eficiencia del motor/generador

Para el cálculo de la se utiliza la relación:

$$\varepsilon_{GTE} = 100 \cdot \frac{\varepsilon_{CGE}}{\varepsilon_{GTE}} \quad \text{C.11}$$

Utilizando los datos del Cuadro B.14:

$$\varepsilon_{GTE} = 100 \cdot \frac{14.79 \%}{76.15 \%} = 19.42 \%$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.14. El mismo cálculo se llevó a cabo para las otras corridas experimentales

ANEXOS

Anexo 1. Procedimiento para medición del contenido de humedad en base húmeda

Para especies forestales, se sigue la metodología de la ASTM E871-82: Método de prueba estándar para el análisis de la humedad de los combustibles de madera en partículas. Se inicia secando el recipiente de la muestra durante 30 minutos a 103 ± 1 ° C en el horno, luego se enfría en el desecador a temperatura ambiente. Se pesa el recipiente a 0.02 g más cercanos y se registran como peso del recipiente, W_c . Se coloca un mínimo de 50 g de muestra en el recipiente, se pesa la muestra y el recipiente a 0.01 g más cercano, y se registra como peso inicial, W_i .

Se coloca la muestra y el recipiente en el horno durante 16 h a 103 ± 1 ° C. Se debe retirar la muestra y el recipiente del horno y se deja enfriar en el desecador a temperatura ambiente luego de este transcurrido este tiempo. Posteriormente se retira la muestra y el recipiente del desecador, se pesa inmediatamente a 0.01 g, y se registra el peso. Se debe regresar la muestra y el recipiente al horno a (103 ± 1) °C durante 2 h. Finalmente se continúa hasta que el cambio de peso total entre pesadas varíe menos de 0.2 % y registrar como el peso final, W_f . Se calcula el contenido de humedad en base húmeda de la siguiente manera

$$WH = \left(\frac{W_i - W_f}{W_i - W_c} \right) * 100 \quad (E.1)$$

Donde,

W_i = masa inicial de muestra, g.

W_f = masa final de muestra después de secada a 105 °C, g.

W_c = masa de contendor, g

Anexo 2. Procedimiento para medición del contenido de humedad en base seca

Alternativamente, el contenido de humedad en una base seca se define como:

$$DH = \left(\frac{W_i - W_f}{W_f - W_c} \right) * 100 \quad (E.2)$$

Donde,

DH= contenido de humedad en base seca, % m/m

Las conversiones de uno a otro pueden ser obtenidas por:

$$DH = \left(\frac{100 * WH}{100 + WH} \right) * \quad (E.3)$$

y:

$$WH = \left(\frac{100 * DH}{100 + DH} \right) * \quad (E.4)$$

Anexo 3. Procedimiento para medición del contenido de cenizas

El contenido de cenizas se determina como el residuo sólido remanente de un proceso de oxidación seca de 1 g de biomasa a (575 ± 25) °C por un período de tres horas, de acuerdo a la norma ASTM D1102-84 para de madera y productos de madera (ASTM, 2001).

Se utiliza una muestra del material en crisoles de porcelana con tapa, identificados, previamente calcinados para eliminar posibles impurezas, y llevados a masa constante. El material distribuido en los crisoles se precalienta hasta una temperatura de 250 °C por un período de 30 min, y posteriormente se incinera a 575 °C en una mufla Thermo-Scientific Finalmente, cuando los crisoles se enfrían, se dejan reposando en un desecador previo a registrar su peso en la balanza analítica.

El procedimiento según la ASTM D1102-84 es el siguiente: Se enciende el crisol vacío y se cubre sobre un quemador o en la mufla a 600 °C, se deja enfriar en un desecador y se pesa hasta 0,1 mg. Se coloca la muestra de 2 g en el crisol, se mide el peso del crisol más la muestra y se coloca en el horno de secado a 105 °C con la tapa del crisol retirada. Después de 1 h, se vuelve a colocar la tapa en el crisol, se enfría en un desecador y se pesa. Se repite el secado y se pesa hasta que el peso sea constante hasta 0,1 mg. Durante los periodos de enfriamiento y pesaje, se mantiene el crisol cubierto para evitar la absorción de humedad del aire. Se registra

el peso (crisol más el espécimen menos el peso del crisol) como el peso del espécimen de prueba seco al horno

Se coloca el crisol y el contenido, con la tapa removida, en el horno de la mufla y se enciende hasta que todo el carbón se elimine. Se debe calentar lentamente al comienzo para evitar la combustión y proteger el crisol de corrientes fuertes en todo momento para evitar la pérdida mecánica de la probeta. La temperatura recomendada para el encendido final es de 580 °C a 600 °C. Se debe evitar calentar por encima de este máximo.

Para terminar, se retira el crisol con su contenido en un desecador, se vuelve a colocar la tapa flojamente, se enfría y pesa con precisión. Es necesario repetir el calentamiento durante períodos de 30 min hasta que el peso después del enfriamiento sea constante hasta 0,2 mg. Se calcula el porcentaje de cenizas en la muestra con la siguiente ecuación

$$H = \left(\frac{D}{B_s} \right) * 100 \quad (\text{E.5})$$

Donde,

H= porcentaje de cenizas en la biomasa en base seca, % m/m

B_s = masa de la muestra después de secada a 105 °C, g.

D= masa de las cenizas remanentes, g

Anexo 4. Procedimiento para medición del contenido de materias volátiles

El contenido de materias volátiles se determina según la norma ASTM D1762-84 como el porcentaje de productos gaseosos a partir de la cuantificación de la pérdida de peso resultante del calentamiento de 1 g de biomasa bajo condiciones controladas de (950 ± 20) °C. (American Society for Testing and Materials, 2013)

Se utilizan los mismos crisoles empleados para medición de contenido de cenizas; sin embargo, calcinados previamente a 1000 °C para eliminar posibles residuos que sean volátiles a esa temperatura y puedan influir en el resultado final.

El procedimiento según Subero et al., (2013) es el siguiente: Se calienta el horno de mufla a 950 ° C. Se precalienta los crisoles utilizados para la determinación de la humedad, con las tapas en su sitio y conteniendo la muestra, de la siguiente manera: con la puerta del horno abierta, durante 2 min en el reborde exterior del horno (300 °C) y luego durante 3 min en el borde del horno (500 °C). Luego se mueven las muestras a la parte trasera del horno durante 6 min con la puerta de la mufla cerrada. Se deben observar las muestras a través de un pequeño orificio en la puerta de la mufla. Si se producen chispas, los resultados serán erróneos. Se dejan enfriar las muestras en un desecador durante 1 hora y se pesan. Se calcula el porcentaje de volátiles de la muestra de la siguiente manera

$$V = \frac{(B_s - C)}{B_s} * 100 \quad (E.6)$$

Donde,

V= porcentaje de materias volátiles, % m/m

C= masa de la muestra después de secada a 950 °C, g

Anexo 5. Procedimiento para medición de composición elemental

La medición de la composición elemental para C, H y N se realiza típicamente en equipos de laboratorio llamados analizadores elementales. Debe seguirse la norma EN 15104 para su medición. Para el azufre y el cloro se describen diferentes procedimientos en la norma pertinente, que es EN 15289. Típicamente, sin embargo, el azufre también se puede medir en un analizador elemental, aunque según la norma se requerirá alguna validación con materiales de referencia.(Parikh, Channiwala, & Ghosal, 2007). Se llevó a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Forestal de la Universidad de Chile.

Anexo 6. Procedimiento para medición del contenido de metales

Se emplea un espectrómetro de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía S2 RANGER (EDXRF) en el Centro de Energía Química y Electroquímica (CELEQ), el cual viene precalibrado con la técnica de cuantificación estándar EQUA ALL. Se utilizó este programa, pues permite el análisis rápido de diferentes tipos de muestras, no importa si la muestra es

líquida, en polvo o masa compacta. Sin realizar una calibración se analiza la composición de la muestra que cubre todos los elementos que van desde el sodio al uranio (Ranger, 2015).



Figura E.1. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía S2 Ranger empleado para la determinación del contenido de metales (Ranger, 2015)

Los resultados del análisis de los componentes metálicos se realizaron a tres estratos: la biomasa “cruda”, al biochar y a las cenizas del reactor. Se desea analizar los cambios de composición, y sobre todo la concentración de los metales en el biochar y las cenizas, los cuales son subproductos del proceso de conversión de C, H y O de la biomasa en un gas combustible mediante el proceso de gasificación.

La técnica de fluorescencia permite determinar la composición elemental de los metales en distintos tipos de muestras. El equipo muestra el contenido de los metales en su forma más estable, es decir en forma de óxido y no en su forma elemental.

Anexo 7. Procedimiento para medición del poder calórico

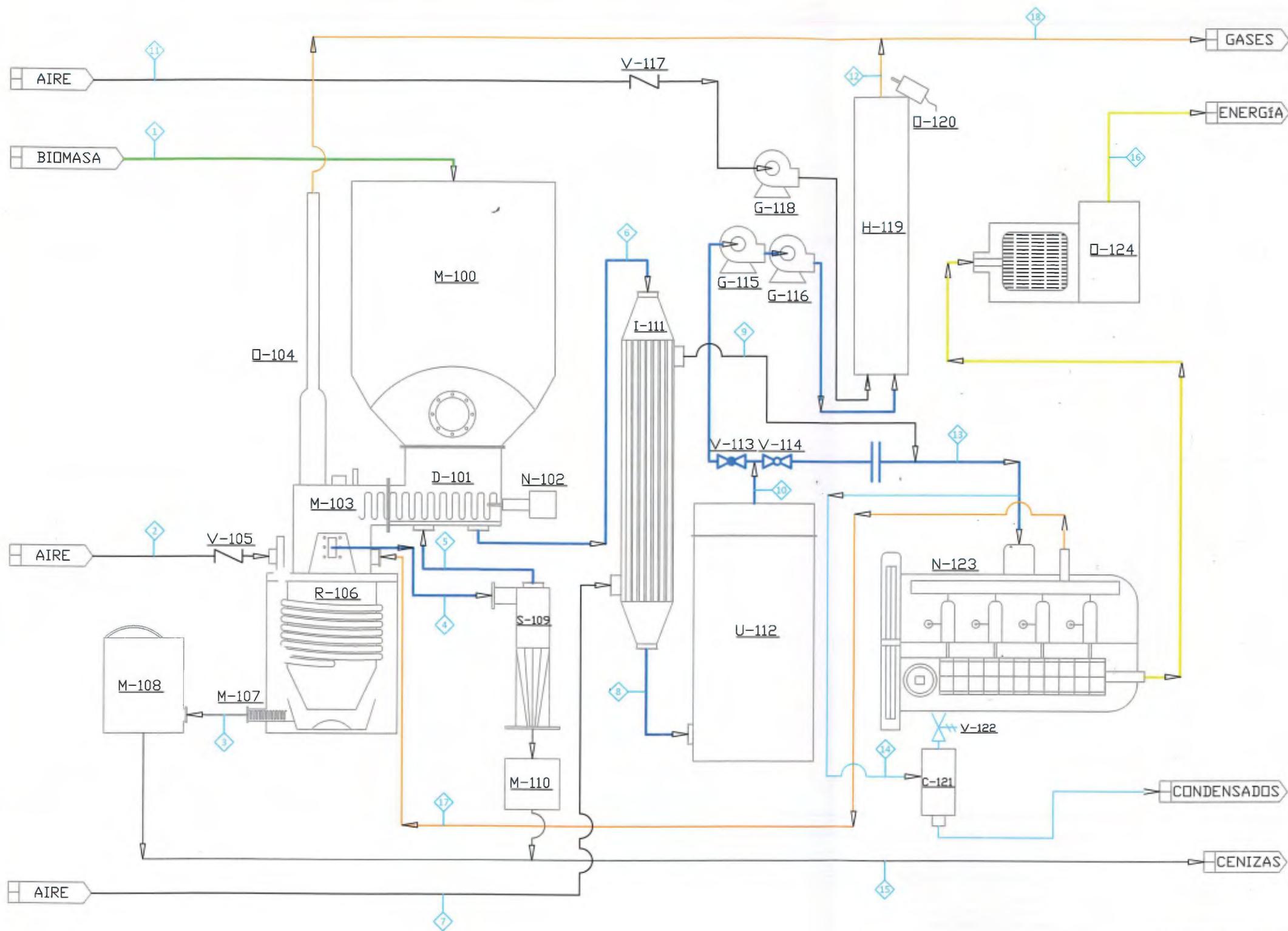
Primeramente, se utilizó el ácido benzoico como sustancia de referencia para realizar el cálculo de la capacidad calorífica del calorímetro Parr 6772, para ello se realizó la elaboración de una pastilla con un peso inferior a 1,1 g, la cual se colocó en la capsula. Luego, se realizó la medición de 10 cm de alambre níquel-cromo, el cual se fijó a los electrodos y se puso en contacto con la muestra, cuidando que este no estuviera en contacto con las paredes de la cápsula.

Seguidamente se llevaron a cabo dos lavados con oxígeno a la bomba, (la presión no debe superar las 25 atm). La cubeta del calorímetro se llenó con 2000 g de agua destilada y se colocaron los cables de ignición a la bomba para así introducir la misma dentro de la cubeta

con agua. Posteriormente se realizó el proceso de combustión de la muestra mediante la programación adecuada del equipo del calorímetro.

Una vez finalizado el proceso se revisó la cápsula de combustión para buscar evidencia, si es que la hay, de que la combustión haya sido incompleta. Se retiraron los trozos no quemados del alambre fusible para medir su longitud y con el valor de la longitud inicial se determina por diferencia la cantidad neta de alambre quemado.

Se realizó el mismo procedimiento detallado anteriormente para la realización por triplicado del calor de combustión. Seguidamente se realizó por triplicado la medición del calor de combustión de cada biomasa estudiada.



NOMENCLATURA		
IDEM	DESCRIPCION	ZONA
M-100	Toiva	C-2
D-101	Cámara precalentamiento	C-2
N-102	Motor alimentación	C-2
M-103	Tornillo alimentación	C-2
Q-104	Mufla motor	B-2
V-105	Válvula check	B-3
R-106	Reactor "downdraft"	B-3
M-107	Tornillo cenizas	B-3
M-108	Depósito cenizas reactor	A-3
S-109	Ciclón	C-3
M-110	Depósito cenizas ciclón	C-4
I-111	Intercambiador de calor	C-2
U-112	Filtro de gases	D-3
V-113	Válvula globo	D-2
V-114	Válvula globo	D-2
G-115	Soplador gas	D-2
G-116	Soplador gas	D-2
V-117	Válvula check	C-1
G-118	Soplador aire	D-2
H-119	Chimenea	D-2
Q-120	Quemador	D-2
C-121	Depósito condensados	E-4
V-122	Válvula mariposa	E-4
N-123	Motor	E-3
Q-124	Generador 3φ	E-2

SIMBOLOGÍA

- Válvula Esférica
- Válvula Reguladora
- Trayectoria tubería
- Aislamiento
- Motor Eléctrico
- SP Set Point

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PLANTA PILOTO PARA LA GASIFICACIÓN DE BIOMASA

CUADRO DE BALANCE MASA Y ENERGÍA

PUNTO DE BALANCE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
NOMBRE DE CORRIENTE	BIOMASA	AIRE REACTOR	CENIZAS REACTOR	SALIDA REACTOR	SALIDA CICLÓN	ENTRADA INTERCAMBIADOR	AIRE MOTOR	SALIDA INTERCAMBIADOR	AIRE CALIENTE	SYNGAS	AIRE CHIMENEA	GASES CHIMENEA	MIZAJA SYNGAS AIRE	CONDENSADOS	CENIZAS	ENERGÍA	GASES MOTOR	GASES EXHAUSTOS
FLUJO MASICO (kg/h)	12	12	0.38	23	22.7	22.62	-	22.60	-	19.36	-	-	-	0	0.46	-	570	340
TEMPERATURA (°C)	25	26	700	375	250	55	26	42	50	41	26	250	50	-	25	-	-	-
PRESIÓN (KPa)	101.3	101.3	80	101.3	-	86	101.3	85	-	85	101.3	101.3	86	-	101.3	-	101.3	101.3

APROBACION COMISION REVISORA DE PERMISOS DE CONSTRUCCION

PROYECTO: Gasificación de biomasa

PROPIETARIO:

PROVINCIA	CANTON	DISTRITO
Cartago	Cartago	Cartago

DIBUJO: MARCO CHAVES FLORES

PROFESIONAL RESPONSABLE:
Nombre: No. de Reg:
Firma:

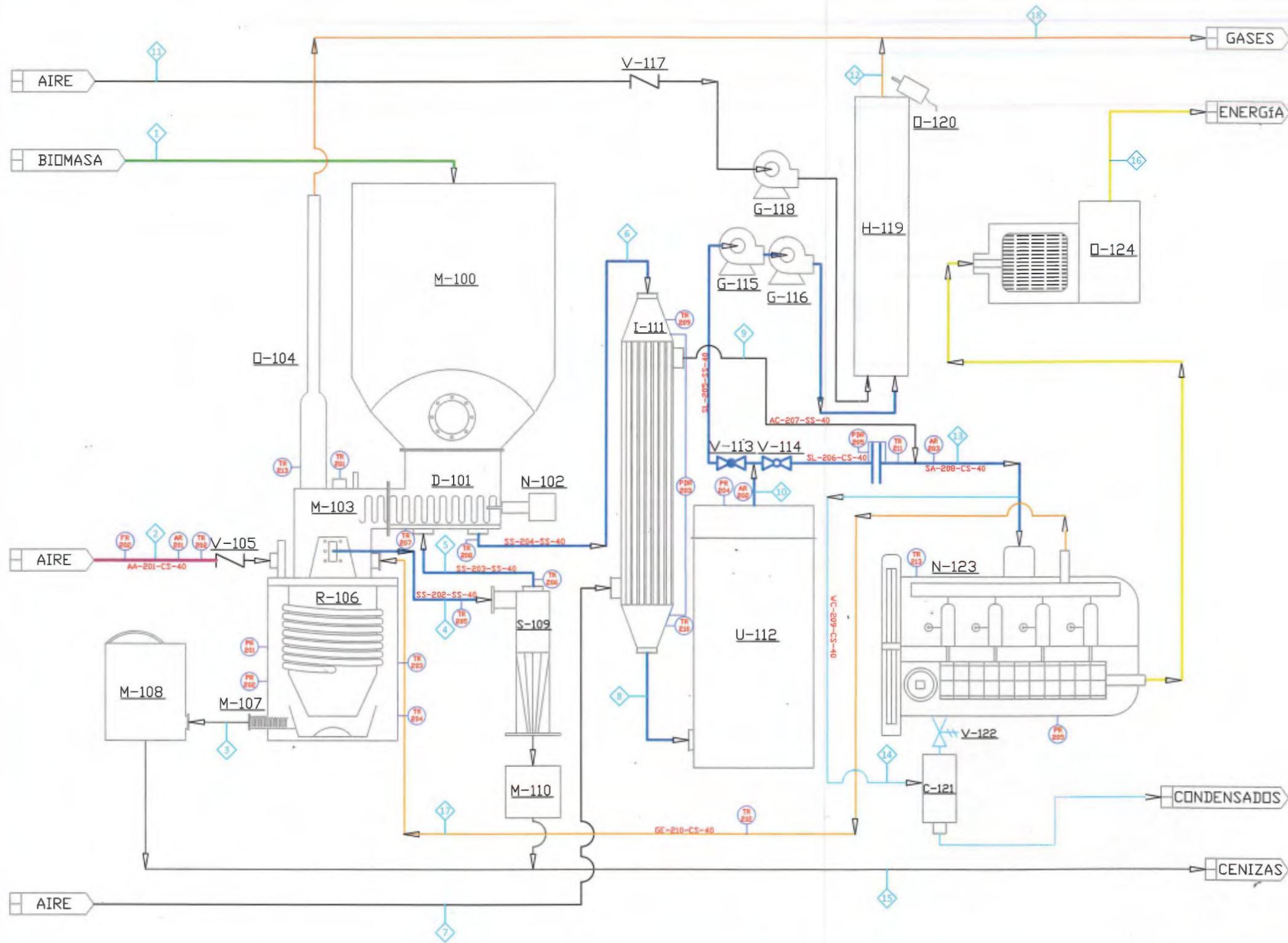
PROFESIONAL RESPONSABLE DE DIRECCION TECNICA:
Nombre: Ing. Cindy Torres Quiros

INFORMACION REGISTRO PUBLICO:
PROPIETARIO:
No. DE CALIFICACION:
SITAS:

CONTENIDO:

Diagrama de Flujo de un proceso de gasificación de biomasa para generación de energía eléctrica

ESCALA	FECHA	LAMINA
5/E	18-11-2017	DFP-100-001



NOMENCLATURA		
IDEM	DESCRIPCION	ZONA
M-100	Tolva	C-2
D-101	Cámara precalentamiento	C-2
N-102	Motor alimentación	C-2
M-103	Tornillo alimentación	C-2
O-104	Mufla motor	B-2
V-105	Válvula check	B-3
R-106	Reactor "downdraft"	B-3
M-107	Tornillo cenizas	B-3
M-108	Depósito cenizas reactor	A-3
S-109	Ciclón	C-3
M-110	Depósito cenizas ciclón	C-4
I-111	Intercambiador de calor	C-2
U-112	Filtro de gases	D-3
V-113	Válvula globo	D-2
V-114	Válvula globo	D-2
G-115	Soplador gas	D-2
G-116	Soplador gas	D-2
V-117	Válvula check	C-1
G-118	Soplador aire	D-2
H-119	Chimenea	D-2
O-120	Quemador	D-2
C-121	Depósito condensados	E-4
V-122	Válvula mariposa	E-4
N-123	Motor	E-3
O-124	Generador 3φ	E-2

SIMBOLOGÍA

- Válvula Esférica
- Válvula Reguladora
- Trayectoria tubería
- Aislamiento
- Motor Eléctrico
- SP Set Point

TABLA PARA ESPECIFICACIÓN DE TRAMOS DE TUBERÍA

Tramo de tubería	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
Tipo de fluido	AA	SS	SS	SS	SL	SL	AC	SA	WC	GE
Material tubería	CS	SS	SS	SS	CS	CS	SS	CS	CS	CS
Diámetro de tubería (mm)	40.9	40.9	40.9	40.9	40.9	40.9	40.9	40.9	40.9	40.9
Presión (kPa)	101.3	85	85	85	85	85	85	85	101.3	250
Temperatura (°C)	26	375	150	87	40	40	55	45	30	570

PLANO DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE PILOTO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA

APROBACION COMISION REVISORA DE PERMISOS DE CONSTRUCCION

PROYECTO: Gasificación de biomasa

PROPIETARIO:

PROVINCIA	CANTON	DISTRITO
Cartago	Cartago	Cartago

DIBUJO: MARCO CHAVES FLORES

PROFESIONAL RESPONSABLE:
Nombre:
Firma: No. de Reg:

PROFESIONAL RESPONSABLE DE DIRECCION TECNICA:
Nombre: Ing. Cindy Torres Quirós

INFORMACION REGISTRO PUBLICO:
PROPIETARIO:
No. DE CATASTRO:
SITIO:

CONTENIDO:

Diagrama de instrumentación y control de proceso de gasificación de biomasa para generación de energía eléctrica

ESCALA	FECHA	LAMINA
S / E	18-11-2017	PID-100-002