



Universidad de
La Sabana

**Producción de energía eléctrica a partir de la gasificación
de raquis de maíz blanco (*Zea mays*) producidos en la
Central de abastos de Bogotá – Corabastos**

Laura Viviana Martínez Caballero

Universidad de La Sabana
Facultad de Ingeniería
Maestría en Diseño y Gestión de Procesos
Chía, Colombia
2017

Producción de energía eléctrica partir de la gasificación de raquis de maíz blanco (*Zea mays*) producidos en la Central de abastos de Bogotá – Corabastos

Laura Viviana Martínez Caballero

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Magister en Diseño y Gestión de Procesos

María Fernanda Gómez Galindo

Ph.D. en Energy Technology

Codirector:

MEng. Manuel Alfredo Figueredo

Línea de Investigación:

Energías Renovables

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Energías, Materiales y Ambiente (GEMA)

Universidad de La Sabana

Facultad de Ingeniería,

Maestría en Diseño y Gestión de Procesos

Chía, Colombia

2017

(Dedicatoria o lema)

Enfrentar los retos y desafíos importantes de la vida, nunca será tarea fácil. Y menos aún sin el apoyo de nadie.

En estas líneas puedo plasmar el resultado de uno de los retos más grandes de mi vida profesional hasta ahora. Resultado de la unión del trabajo duro, el apoyo de personas que Dios puso en mi camino y el conocimiento adquirido en la maestría en Diseño y Gestión de Procesos.

Este trabajo es dedicado a mi familia y a todas aquellas personas que fueron mi fortaleza y que de una u otra manera contribuyeron a cumplir este objetivo.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por tantas bendiciones y por poner a las personas indicadas en mi camino. A mi familia y a Juan David por su amor, fortaleza, apoyo incondicional y voces de aliento en este proceso.

A la doctora María Fernanda Gómez Galindo, al profesor Manuel Figueredo, Mauricio Agudelo y Edgar Benítez por su confianza, asesoría y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

Al Ingeniero Jairo Enrique Rubiano, la ingeniera Lili Vega, el ingeniero Fidas, la ingeniera Vivian Beltrán y el técnico Olman Vargas por su colaboración y apoyo en las extensas jornadas del desarrollo experimental del proyecto

A mis compañeros asistentes graduados y a la facultad de Ingeniería de la Universidad de La Sabana por la asistencia Graduada.

Los resultados de investigación se socializaron en:

“3er Congreso Internacional de Energía Sostenible” del 24 al 26 de octubre de 2016 en Bogotá, Colombia (Modalidad Póster).

Las memorias fueron publicadas en:

<http://www.congresoenergiasostenible.org/libs/pdf/Memorias3erCES.pdf>



- Título:
Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y comportamiento térmico del raquis de maíz blanco (*Zea mays l.*) con potencial para la generación de energía eléctrica mediante gasificación
- ISBN versión digital: 978-958-57711-2-3
- Páginas: 64 -67.

“25th European Biomass Conference and Exhibition” del 12 al 15 de junio de 2017 en Estocolmo- Suecia (Modalidad Ponencia)

Las memorias fueron publicadas en:

- <http://www.etaflorence.it/proceedings/index.asp?message=ko>
- Título:
Power Generation Based on Agricultural Residues Gasification: The Potential of Corncoobs
- Páginas: 90 -95



“Conferencia ECAR 2017: Escuela de computación de alto desempeño del 12 al 29 de septiembre de 2017 en Buenos Aires- Argentina (Modalidad: Póster)”

Las memorias fueron publicadas en:

<http://ecar2017.hpclatam.org/program/>

- Título:
“Development of a thermodynamic model for power generation using small-scale gasification technologies in Colombia”

Resumen

En el presente trabajo, se estudió la producción de energía eléctrica a partir de la gasificación de raquis de maíz blanco (*Zea Mays*) producidos en la Central de abastos de Bogotá – Corabastos. Una especie que genera alrededor de 9500 toneladas anuales de residuos cuya disposición principal se da en el relleno sanitario Doña Juana. Existe una necesidad identificada de diversificar las fuentes de biomasa que garanticen al menos una relación costo-beneficio similar a la de los procesos de gasificación de la madera y promover su implementación en distintas zonas a nivel nacional

Como punto de partida del trabajo de investigación, se realizó la caracterización física, química y análisis termogravimétrico de los residuos de raquis de maíz. Y basados en los enfoques Isoconversionales de Kissinger-Akahira – Sunose (KAS) y Flynn Wall Osawa (FWO), se analizó la energía de activación con el fin de comprender algunos aspectos de la degradación térmica de la biomasa estudiada. Seguido a esto, se evaluó el efecto del contenido de finos en la biomasa (0 -15%) y la conexión de cargas resistivas externas al dispositivo (4, 8 y 12 kWe). Los experimentos se realizaron en un gasificador de lecho fijo – corriente descendente de capacidad nominal de 20kWe ubicado en la Universidad de La Sabana. Los resultados fueron analizados mediante el software SAS (Statistical Analysis Software)® e indicaron que un contenido de finos de 15% y cargas eléctricas cercanas a la capacidad nominal del dispositivo, generan mayores temperaturas, consumo específico de biomasa (kWe h/kg) y mayores concentraciones de H₂ y CO en el gas de síntesis, incrementando su poder calorífico y eficiencia del proceso.

Por último, se realizó el modelado de una planta de gasificación de biomasa para la producción de gas de síntesis que pudiera alimentar un motor de combustión interna para la generación de energía eléctrica a pequeña escala. Se utilizó el software de simulación Aspen Plus con el objetivo de conocer las mejores condiciones de operación que permitieran la máxima eficiencia del proceso. El modelo se basó en minimización de la energía libre de Gibbs con un flujo de biomasa de 18 kg/h. La simulación del sistema resultó útil para la predicción de parámetros como la composición del gas generado, la potencia generada y el flujo del gas. Se evaluó el efecto de la relación de equivalencia (ER) (relación molar entre el aire real suministrado para oxidación parcial de biomasa y el aire estequiométrico) y la temperatura

sobre la concentración de H₂, CO y CH₄ en el gas de síntesis. El gas generado fue pasado por motor de combustión interna para la producción de 7.55 kWe.

Contenido

Introducción	1
1. Justificación	3
2. Objetivos	6

2.1	Objetivo general	6
2.2	Objetivos específicos	6
3.	Marco teórico.....	8
3.1	Biomasa	8
3.1.1	Raquis de maíz blanco	8
3.1.2	Composición estructural de la biomasa	9
3.1.3	Propiedades de la biomasa	10
3.2	Conversión de biomasa.....	13
3.2.1	Principios de gasificación.....	14
3.3	Análisis de la descomposición térmica de biomasa	16
4.	Metodología.....	19
4.1	Fase I: Potencial energético teórico	19
4.1.1	Obtención de biomasa	20
4.1.2	Preparación de muestra de biomasa para caracterización.....	20
4.1.3	Análisis de propiedades físicas: densidad de biomasa	20
4.1.4	Análisis próximo.....	21
4.1.5	Análisis último.....	23
4.1.6	Análisis termogravimétrico.....	23
4.1.7	Determinación de Parámetros Cinéticos	23
4.2	FASE II: Gasificación de Biomasa- Efecto de tamaño de partícula y carga eléctrica demandada.....	24
4.2.1	Diseño Experimental.....	25
4.2.2	Análisis de composición de gas de síntesis	29
4.2.3	Análisis Estadístico	30
4.3	FASE III: Diseño Conceptual de Planta de Gasificación.....	30
4.3.1	Simulación computacional en Aspen Plus.....	30
4.3.2	Análisis Económico – costo nivelado de energía	32
5.	Resultados y análisis.....	34
5.1	FASE I: Potencial Energético Teórico.....	34
5.1.1	Caracterización de Biomasa	34
5.1.2	Análisis Termogravimétrico.....	38
5.1.3	Análisis de parámetros cinéticos.....	41
5.2	FASE II: Gasificación de biomasa- Efecto de tamaño de partícula y carga eléctrica demandada.....	44
5.2.1	Acondicionamiento de Biomasa.....	44
5.2.2	Diseño experimental	46
5.3	FASE III: Diseño conceptual de planta de gasificación.....	53
5.3.1	Descripción de la simulación.....	53
5.3.2	Validación del Modelo:.....	59
5.3.3	Análisis económico de la gasificación de raquis de maíz blanco.....	63
6.	Conclusiones.....	66

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Fuentes de Biomasa. Imagen tomada de [27]	8
Figura 2. Partes de la planta de maíz (Zea mays). Imagen modificada de [28].	9
Figura 3. Diagrama Van Krevelen [34]	12
Figura 4. Procesos de transformación de biomasa, principales productos y usos. Modificado de [36] [33][37]	13
Figura 5. Curva TGA y curva DTG para la degradación térmica bajo cuatro tasas de calentamiento (5,10,20,40 K/min). Tomado de [12].	17

Figura 6. Síntesis de la metodología planteada para el cumplimiento de los objetivos planteados en el proyecto	19
Figura 7. Método termogravimétrico para el análisis próximo de la biomasa (Elaboración propia).....	21
Figura 8. Esquema del sistema de gasificación de lecho fijo – corriente descendente usado en la experimentación (Elaboración propia)	24
Figura 9. Variables de medición durante el diseño experimental en el gasificador de lecho fijo – Corriente descendente. Donde Δ_{cb} : consumo de biomasa (kg/h), m_b : masa de material alimentado, t: tiempo de operación (h), C_{eb} : consumo específico de biomasa (kg/KWe), m_b : masa de material alimentado, P_e : Electricidad consumida (KWe).....	27
Figura 10. Resultados de análisis último para la biomasa usada en este estudio (raquis de maíz blanco) junto con otras muestras de biomasa agrícola y muestras de carbón nacional. (a) Diagrama ternario (b) Diagrama Van Krevelen. CAM: Caña de azúcar molida, RM: Raquis, CCA: Cáscara de café, PR: Raquis de palma, PA: Paja de arroz, FAP: Fruto de aceite de palma, (Coal-Coke, Coal 1, Coal 2, Coal 3): Carbón vegetal. Referencias: [1][71] [72]	37
Figura 11. (a) Curva TGA y (b) Curva DTG para para descomposición térmica de raquis de maíz blanco a 5°min ⁻¹ , 20°C min ⁻¹ y 50°C-1	38
Figura 12. Regresión Lineal para la Energía aparente de activación según el modelo de OFW (a), KAS (b) y Starink (c) para el raquis de maíz blanco a tasas de calentamiento de ($\beta = 5^\circ\text{C min}^{-1}$, 10°Cmin^{-1} y 50°Cmin^{-1}).	42
Figura 13. Etapas de acondicionamiento de biomasa para el proceso de gasificación de raquis de maíz blanco.	45
Figura 14. Fracciones obtenidas durante el proceso de reducción de partícula de biomasa (a) uso exclusivo de procesador industrial Trapp Tr200 (b) reducción de partícula mediante herramienta de corte manual.....	46
Figura 15 Perfil de temperatura para la gasificación de mezclas de raquis de maíz y diferentes cargas resistivas. A: % de finos contenido en la mezcla de biomasa, B: Carga resistiva conectada al dispositivo.....	49
Figura 16. Comportamiento del consumo específico de biomasa (RCEB) vs la carga aplicada para las mezclas con 0% y 15% de contenido de finos respectivamente.	50
Figura 17. Composición de Gas de síntesis producido en la gasificación de raquis de maíz blanco para cada uno de los tratamientos y su poder calorífico inferior LHV (MJ/ m ³). Tratamientos (% de gruesos – carga demandada): T1: (0% - 4kWe) T2: (0%-8kWe) T3: (0%-12kWe), T4: (15%-4kWe), T5 (15%-8 kWe), T6 (15%-12 kWe). Tred: Temperatura promedio en cada uno de los tratamientos.....	51
Figura 18. Comportamiento de la eficiencia energética (REF) vs la carga aplicada para las mezclas con 0% y 15% de contenido de finos respectivamente.....	52
Figura 19. Diagrama de bloques y balance de masa (Planta de gasificación de biomasa). Desarrollado en Software Visio ®.....	54
Figura 20. Representación de proceso de acondicionamiento de biomasa (Molienda y secado)	¡Error! Marcador no definido.
Figura 21. Rendimientos (YIELD) para cada componente en el bloque de Devolatilización (DEVOL).....	56

Figura 22. Diagrama de flujo de planta de gasificación de raquis de maíz blanco.....	59
Figura 23. Composición de gas experimental y predicho (modelo). T: 750°C, ER:0.24...	60
Figura 24. Efecto de la temperatura de gasificación sobre la fracción molar (%) de H ₂ , CO y CH ₄ y la potencia generada(kWe).....	61
Figura 25. Efecto del ER sobre la fracción molar (%) de H ₂ , CO y CH ₄ y la potencia generada(kWe)	61
Figura 26. Efecto de la temperatura de enfriamiento del gas sobre la potencia generada por el motor de combustión interna.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 27. Diagrama Sankey Proceso de gasificación de raquis de maíz blanco	62
Figura 28. Distribución de Planta de gasificación de raquis de maíz	86
Figura 29 Configuración del sistema de filtración de gas de síntesis del gasificador a escala piloto - Power Pallet de 18kWe. Imagen modificada [86].	78
Figura 30. Detalle del plano interno de la tolva de alimentación de biomasa, dibujada en software Inventor 2015 ® (cotas en milímetros).	85

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Reacciones del proceso de gasificación de biomasa.....	14
Tabla 2 Tipos de agente gasificante usados en la gasificación de biomasa [40], [41].....	15
Tabla 3 Normas empleadas durante la determinación del análisis próximo de la biomasa.	22
Tabla 4. Modelos utilizados para la estimación de parámetros cinéticos para la degradación térmica de raquis de maíz blanco.....	23
Tabla 5. Factores y niveles Diseño Experimental	26
Tabla 6. Descripción de los bloques de operación utilizados en la simulación en ASPEN PLUS.....	31
Tabla 7. Análisis último y próximo de muestras de raquis de maíz blanco.....	35
Tabla 8. Parámetros de degradación térmica de raquis de maíz blanco.....	39
Tabla 9. Energía de activación estimada para la combustión de raquis de maíz blanco mediante el método de FWO, KAS y Starink.	41
Tabla 10. Datos experimentales para las respuestas obtenidas en la gasificación de raquis de maíz blanco.	46
Tabla 11. Resumen de pruebas de normalidad de datos que se llevó a cabo en el software SAS 9.4®,.....	47
Tabla 12. Condiciones iniciales para el diseño de la planta de gasificación de raquis de maíz blanco.....	53
Tabla 13. Parámetros de motor de combustión interna utilizados en la simulación del ciclo de Otto.	58
Tabla 14. Priorización de criterios para selección del molino para el acondicionamiento de raquis de maíz blanco	87
Tabla 15 Características Molino de corte seleccionado para el acondicionamiento de los raquis de maíz blanco Marca Retsch ®.....	87
Tabla 16. Especificaciones del equipo de gasificación usado durante la experimentación.	77
Tabla 17. Detalle de la cantidad de datos y tratamiento para cada variable de respuesta.	80
Tabla 18. Análisis de varianza (ANOVA)	82
Tabla 19. Análisis de varianza, efectos lineales, cuadráticos e interacciones.....	83
Tabla 20. Modelos estadísticos para las variables de respuesta evaluadas.	47
Tabla 21. Análisis Ridge para obtener la respuesta máxima en la variable de eficiencia de gasificación (REF).....	84

Introducción

Una cantidad considerable de biomasa susceptible de aprovechamiento energético es generada anualmente en Colombia, proveniente de actividades agrícolas, pecuarias y de residuos sólidos urbanos cuya disposición se realiza mediante procesos de quema de biomasa, en aplicaciones de calefacción o cocción doméstica, o finalmente en rellenos sanitarios [1]. Bogotá cuenta con alrededor de 36 plazas de mercado cuya central mayorista corresponde a la central de abastos Corabastos, con un volumen de ingreso diario de alimentos de 11.000 toneladas. Las actividades diarias dejan una cifra aproximada de 70.5 toneladas de biomasa residual depositada en el relleno sanitario de Doña Juana y que equivale aproximadamente al 1.4% del total de residuos depositados diariamente [2].

La utilización de esta biomasa residual en procesos como la gasificación, representa una de las alternativas más prometedoras para la producción de energía a pequeña escala que contribuye a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, al aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía como residuos forestales y agrícolas, a la disminución de emisiones de CO_2 , NO_x y SO_2 y al desarrollo de la agricultura nacional [3,4]. Durante la gasificación, la biomasa es convertida en gas de síntesis compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), nitrógeno (N_2), agua (H_2O) y algunas fracciones de hidrocarburos como etileno (C_2H_4) y etano (C_2H_6) [5]. El gas de síntesis puede ser utilizado para la producción de energía térmica o eléctrica en dispositivos como motores de combustión interna, celdas de combustible o turbinas de gas, después de un previo proceso de acondicionamiento.

La gasificación ofrece ventajas en cuanto a fácil manejo, flexibilidad de materias primas, altas eficiencias y generación de gas de síntesis con la calidad adecuada para su uso en motores de combustión interna [6], [7]. Durante los últimos años, la gasificación en lecho fijo de flujo descendente ha sido el centro de investigación en torno a la generación de energía eléctrica a pequeña escala. Dicho proceso, está regido por diversos factores como: tamaño de partícula de biomasa, contenido de humedad, temperatura de gasificación y relación de equivalencia (relación molar entre el aire real suministrado para oxidación parcial de la biomasa y el aire estequiométrico)[8]–[10]. Conocer el efecto de dichos factores sobre la gasificación de biomasa no es tarea fácil mediante el uso exclusivo de experimentación, por lo tanto,

involucrar herramientas de modelado y simulación, pueden facilitar el entendimiento de las complejas reacciones generadas durante los procesos de conversión termoquímica de biomasa y la predicción y optimización de los procesos de gasificación [11], [12].

El presente proyecto propuso evaluar la generación eléctrica a partir de la gasificación de raquis de maíz blanco mediante el análisis de la operación de un gasificador de lecho fijo-corriente descendente de 18 kWe que permitiera el uso de la electricidad generada in situ (autogeneración) o el posible suministro eléctrico al sistema interconectado nacional bajo los límites de potencia establecidos por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). En ese sentido, el proyecto es importante en la medida en que apoya la iniciativa del gobierno para promover no solamente el uso de fuentes de energía alternativas sino también la integración de las tecnologías de energías renovables al sistema interconectado nacional.

El análisis incluyó dos fases experimentales: la Fase I correspondió a la determinación del potencial energético teórico del raquis de maíz blanco, a partir de su caracterización física, química y análisis termogravimétrico. La Fase II consistió en el desarrollo de un diseño experimental en un gasificador de lecho fijo, corriente descendente de 18 kWe para evaluar la combinación de fracciones distintas de tamaño de partícula y la variación de cargas eléctricas externas conectadas al dispositivo. En la Fase III se desarrolló un modelo en estado estacionario mediante el software de simulación ASPEN Plus v 7.3 compuesto por un sistema de alimentación y adecuación de biomasa, un reactor de gasificación, un sistema de limpieza del gas de síntesis y un bloque de generación eléctrica. Los resultados de la simulación fueron comparados con los datos experimentales obtenidos en la Fase II, para la validación exacta del modelo. El análisis suministró la información de las condiciones operativas necesarias para la generación del gas de síntesis de mayor calidad para la generación eléctrica. A partir de dichas condiciones, se realizó la evaluación económica del costo de generación de energía mediante la tecnología estudiada y su comparación con el precio de la electricidad actualmente cobrada. Se presentó la topología del proceso, es decir, al diagrama de flujo básico que presenta la secuencia de operaciones necesarias para transformar el raquis de maíz blanco en electricidad y que permitiera un acercamiento a lo que sería su posible reproducción posterior en las instalaciones de la Central de abastos de Bogotá – Corabastos.

1. Justificación

Según el Plan Energético Nacional de Colombia, Ideario Energético 2050, la meta del país para el 2020 frente a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, es contar con una capacidad instalada de al menos el 77% de la generación eléctrica nacional a partir de fuentes renovables de energía [13]. En su esfuerzo por cumplir la meta establecida, el Congreso Colombiano emitió la Ley No. 1715 del 2014 por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Interconectado Nacional – SIN. Las fuentes de energía no convencionales incluyen energía eólica, biomasa, pequeñas hidroeléctricas y energía solar. La ley pretende promover la implementación de tecnologías a partir de dichas fuentes mediante su integración al mercado eléctrico y otros usos energéticos que permitan un desarrollo económico sostenible, la seguridad de abastecimiento energético nacional y la disminución del impacto ambiental generado por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [14].

Sin embargo, las fuentes convencionales de energía siguen siendo la principal fuente de energía nacional. Para Noviembre de 2016 la capacidad instalada en Colombia llegó a 16597,7 MW donde el mayor aporte lo tuvieron las grandes centrales hidroeléctricas con el 69,93% del total generado, seguido de las termoeléctricas cuyo aporte fue del 20,78% [15]. La elevada dependencia de las fuentes hidroeléctricas en la canasta energética Colombiana ha generado vulnerabilidad del sistema de generación eléctrico nacional, que se ha evidenciado en hechos como los presentados durante el fenómeno “El Niño” de los años 2015 y 2016, periodo durante el cual los embalses llegaron a niveles tan bajos que obligaron al incremento del aporte energético por parte de las termoeléctricas ocasionando picos de hasta el 60% de la generación diaria con recursos fósiles durante los últimos meses del año 2015[15]. Así mismo, el incendio ocurrido en la central de Guatapé ocasionó que las reservas del sistema interconectado nacional SIN, pasaran de 47.4% a 34.1% generando alerta nacional de apagón nacional por desabastecimiento de energía [16], [17]. La incorporación de nuevos actores al SIN, estaría acompañado de beneficios representados en la diversificación de la matriz energética, reducción de costos, la posible mitigación de una crisis energética derivada de la fuerte dependencia de las centrales hidroeléctricas, así como la posible reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

En Colombia, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) per cápita, consideradas una de las principales causas del efecto invernadero, incrementaron en un 12,2% en la última década [18]. Para finales del 2016 se emitieron cerca de 478.224 TonCO₂ atribuidas principalmente a la quema de combustibles, donde los mayores volúmenes fueron emitidos por las centrales de gas natural, seguidas de las centrales de carbón y por último la producción de combustibles líquidos como ACPM y Jet-A1 aportando el 53,23%, 44,29% y 2,48% del total de emisiones respectivamente [15]. El uso de biomasa como fuente renovable de energía no representa un aumento en las emisiones de CO₂ ya que la absorción del mismo en el proceso de fotosíntesis es el equivalente al producido durante su combustión, razón por la cual la gasificación de biomasa tiene grandes ventajas ambientales sobre los combustibles fósiles, traducidas en menores emisiones de CO₂ y otros gases como H₂S, SO₂ y NOX. Por ejemplo, las plantas generadoras de electricidad a partir de biomasa pueden reducir significativamente las emisiones de partículas por kWh generado, por un factor de 4.5 en comparación con los procesos de generación de electricidad basados en carbón [19], [20].

Las fuentes de biomasa residual agrícola a nivel nacional son variadas y se estima que se generan alrededor de 72 millones de toneladas por año con un potencial energético cercano a 332.000 TJ [21]. El aprovechamiento nacional de biomasa se ha centrado principalmente en residuos leñosos y bagazo de caña de azúcar, con una participación en la generación eléctrica nacional de tan solo un 0,01% para finales del 2016, lo que indica un amplio espacio para la inclusión de nuevos recursos como raquis de maíz, objeto del presente estudio [15]. La Federación Nacional de cultivadores de Cereales (FENALCE), indicó que para el 2013, la producción total de maíz blanco fue de 709.267 toneladas cuyos residuos de raquis en la principal plataforma de abastecimiento agropecuario de Bogotá, CORABASTOS, representaron alrededor de 9500 toneladas [22]. Actualmente, dichos residuos son utilizados esporádicamente para alimentación animal en épocas de sequías o finalmente dispuestos en los rellenos sanitarios. Bajo este marco, la implementación de tecnologías de aprovechamiento de biomasa residual constituye una alternativa de alto potencial para la generación eléctrica o térmica, donde la gasificación puede considerarse como una de las tecnologías más prometedoras para la obtención de combustible gaseoso con las propiedades aceptables para el uso en motores de combustión interna (MCI) y turbinas de gas (TG).

La generación eléctrica a partir de gasificación de biomasa a través de este tipo de dispositivos no es una tecnología nueva en Colombia. Ejemplos de su aplicación, se pueden ver en el Jardín Botánico “José Celestino Mutis” en Bogotá, y en el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) en Caldas. Ambos centros generan electricidad a partir de residuos leñosos en un

gasificador de lecho fijo corriente descendente para accionar un motor de combustión interna y por medio de un generador, producir hasta 20kWe respectivamente. De igual forma, algunas universidades como la Universidad Nacional ha incursionado en el ámbito de la gasificación mediante la construcción y diseño de un sistema de gasificación cuyo funcionamiento ha sido probado con distintos tipos de biomasa residual, obteniendo gases susceptibles de uso en motores de combustión interna para la generación eléctrica [23]. Sin embargo, uno de los principales problemas de la tecnología, se relaciona con el rendimiento del proceso, que depende de los parámetros de operación y la variabilidad en las características de la biomasa, su origen, generación y concentración. La investigación de gasificación de raquis de maíz en el país es limitada. Pocos estudios se han realizado sobre el particular y por lo tanto se requieren esfuerzos en investigación científica y tecnológica que permitan un mejor aprovechamiento energético de estos residuos de biomasa.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la producción de energía eléctrica a partir de la gasificación de raquis de maíz blanco generado en la central de abastos de Bogotá – Corabastos mediante el análisis de la operación de un gasificador de lecho fijo-corriente descendente con una capacidad instalada de 18 kWe.

2.2 Objetivos específicos

- ❖ Determinar el potencial energético teórico de raquis de maíz blanco producido en la central de abastos de Bogotá –Corabastos mediante su caracterización física, química, análisis termogravimétrico y determinación de parámetros cinéticos asociados.
- ❖ Determinar el efecto del tamaño de partícula de la biomasa y la carga eléctrica demandada sobre el rendimiento de la gasificación de raquis de maíz blanco en un gasificador de lecho fijo-corriente descendente de 18 kWe.
- ❖ Desarrollar el diseño conceptual de una planta de generación eléctrica a pequeña escala a partir de la gasificación de raquis de maíz blanco producido en la central de abastos de Bogotá – Corabastos.

Mediante los objetivos propuestos se pretende responder a la **pregunta global**: *¿Cuál es el potencial técnico¹ para la generación eléctrica a partir de la gasificación de raquis de maíz blanco producido en la central de abastos Corabastos que permite el uso de la electricidad generada in situ (autogeneración) o el suministro eléctrico al sistema interconectado nacional bajo los límites de potencia establecidos por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME).?*

¹ Potencial técnico (para el proyecto): Estimación tecnológica de generación eléctrica renovable basada en calidad de materia prima (caracterización física y química) y rendimientos del sistema técnico.

3. Marco teórico

3.1 Biomasa

La biomasa es definida como materia orgánica procedente de un proceso biológico cuyo origen puede ser animal o vegetal. Esta puede ser clasificada como de origen natural, que es producida en la naturaleza sin intervención humana, o de origen residual, correspondiente a transformaciones industriales de materiales orgánicos como los obtenidos en los residuos municipales, residuos agroindustriales, residuos de la silvicultura y residuos industriales [24]. Los tipos de biomasa se ilustran en la Figura 1.

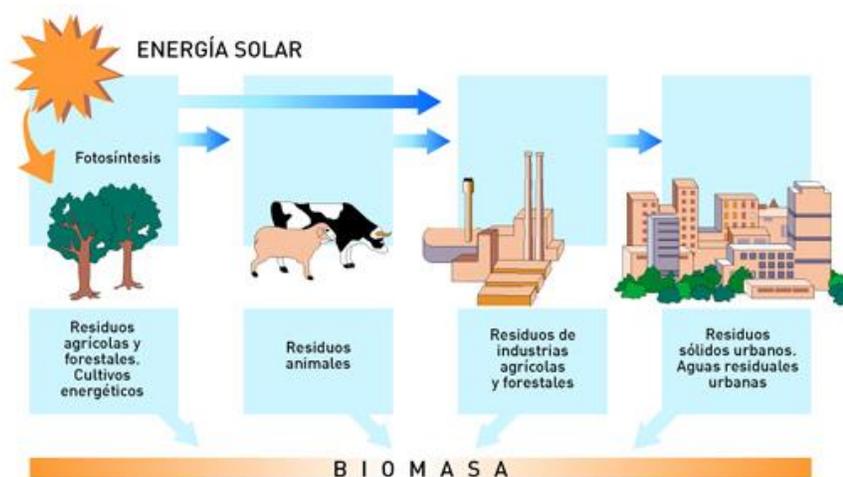


Figura 1. Fuentes de Biomasa. Imagen tomada de [25]

3.1.1 Raquis de maíz blanco

El maíz (*Zea mays*) es comúnmente utilizado con fines de alimentación humana y animal o como materia prima para la generación de productos industriales como el aceite, en el sector de bebidas alcohólicas, farmacéutica y textil. En general, las aplicaciones del maíz blanco pueden partir de cualquier parte de la morfología de la planta, como las hojas, los tallos, los granos y los raquis (Figura 2). Generalmente los residuos pueden generarse en campo (cosecha) o en tratamientos posteriores. Los residuos generados en campo corresponden comúnmente a hojas, tallos y granos, mientras que los residuos generados en tratamientos

posteriores, son principalmente granos y raquis concentrados en centros de distribución alimenticia o en industrias alimentarias donde la mazorca sea materia prima [26].

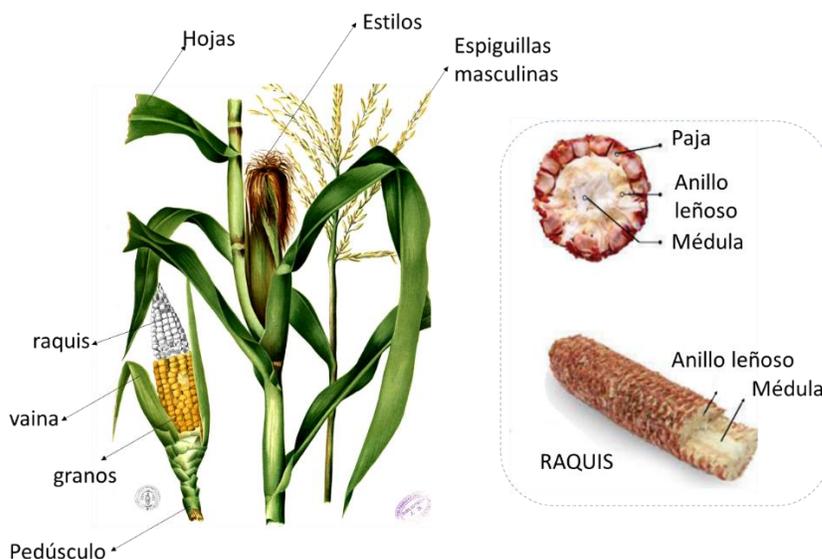


Figura 2. Partes de la planta de maíz (*Zea mays*). Imagen modificada de [26].

3.1.2 Composición estructural de la biomasa

La composición de la biomasa determina su utilización en procesos de transformación con fines energéticos. La biomasa se encuentra compuesta principalmente por tres polímeros: Celulosa, hemicelulosa y lignina.

El componente mayoritario de la biomasa es comúnmente la celulosa. La celulosa es un polisacárido representado por la fórmula $(C_6H_{10}O_5)_n$, con alto grado de polimerización y peso molecular. Corresponde al 40 -50% de la composición de la biomasa, proporcionando la estructura esquelética de la mayoría de la biomasa terrestre [24], [27].

El segundo componente, es la hemicelulosa, que corresponde a un polisacárido de estructura amorfa y de baja resistencia y está representada por la fórmula $(C_5H_8O_4)_n$. Es soluble en soluciones alcalinas a diferencia de la celulosa y fácilmente hidrolizado. Corresponde entre el 20 y 30% de la composición de la biomasa [24].

Por último, la lignina es un polímero altamente ramificado de naturaleza aromática, altamente insoluble y de alto peso molecular. Resultante de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos. Su estructura varía dependiendo de su origen y método de extracción y representa entre el 20 y 40% de la composición en biomásas leñosas y entre el 10 y 40% en biomásas herbáceas [28], [29].

Durante la conversión de la biomasa, se generan etapas que involucran reacciones exotérmicas y endotérmicas para la obtención de productos susceptibles de aprovechamiento energético. La temperatura de estas etapas y la composición de los productos finales, dependen de la transferencia de calor y las reacciones químicas generadas en el proceso. Estos factores se ven influenciados directamente por la composición estructural de la biomasa, ya que sus componentes poliméricos difieren notablemente en su estabilidad térmica y poseen distintos valores de energía interna y poderes caloríficos [30]. Una de las técnicas más usadas para la evaluación del comportamiento térmico de la biomasa, es el análisis termogravimétrico (Para más detalle ver Sección 4.4).

3.1.3 Propiedades de la biomasa

Con el fin de conocer el potencial de la biomasa como combustible, es necesario realizar un análisis de las propiedades físicas, análisis último, análisis próximo y determinación de poder calorífico del mismo.

Propiedades físicas: El análisis de propiedades físicas puede incluir análisis de tamaño de partícula análisis de aptitud de molienda, densidad, fluidez, absorción de humedad del material y propiedades térmicas. Las propiedades físicas determinan la elección de la tecnología de transformación termoquímica de la biomasa [31].

La medida de densidad de la biomasa se divide en dos: densidad de partícula o real y densidad aparente. La densidad de partícula corresponde a la masa de las partículas dividida el volumen que ocupan las partículas sin incluir el volumen que ocupan los poros. Mientras que la densidad aparente incluye el volumen que ocupan los poros entre y dentro de las partículas de biomasa [31]. Para aplicaciones de gasificación, la biomasa debe cumplir con

criterios mínimos en cuanto a sus propiedades físicas donde la densidad aparente debe ser superior a 200 kg/m³[11].

Poder calorífico: El poder calorífico expresa la energía contenida que se libera en la combustión de la biomasa. Este valor es medido en términos de contenido energético por unidad de masa o volumen. El poder calorífico se puede expresar como poder calorífico superior (HHV) o poder calorífico inferior (LHV). El HHV corresponde al contenido energético total obtenido de la quema del combustible que incluye el calor latente contenido en el vapor de agua y el LHV corresponde al calor liberado con el agua en forma de vapor [32]. Una biomasa se considera apta para aplicaciones de gasificación si su poder calorífico superior es mayor a 10 MJ/kg [11].

Análisis último: El análisis último expresa la composición de la biomasa con base a sus componentes básicos. Constituye la suma de los porcentajes de carbono (*C*), hidrógeno (*H*), oxígeno (*O*), nitrógeno(*N*), azufre (*S*), Cenizas (*Ash*) y humedad (*M*) contenidos en la biomasa como lo muestra la Ecuación 1 [24].

$$C + H + O + N + S + Ash + M = 100\% \quad (1)$$

Uno de los medios de comparación de biomasa frente a los combustibles fósiles, es el diagrama Van Krevelen, que se basa en las relaciones O:C y H:C, donde a medida que disminuyen las relaciones, mayor es el poder calorífico del material [32]. Por ejemplo, en la Figura 3 se muestra un diagrama Van Krevelen, donde la antracita, el carbón mineral mayormente conocido por su elevado contenido de carbono, se ubica en el origen de la gráfica, lo que se asocia a un elevado poder calorífico. Por otra parte, la biomasa tiene menor contenido de carbono y consecuentemente un valor calorífico inferior con respecto al carbón situándose en el lugar más alejado del origen en el diagrama Van Krevelen.

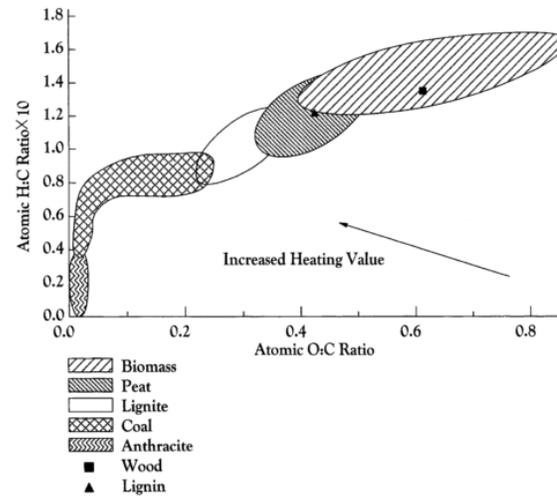


Figura 3. Diagrama Van Krevelen [32]

Análisis Próximo: El análisis próximo representa la biomasa en términos de humedad (M), materia volátil (MV), cenizas (Z) y carbono fijo (CF) como lo indica la Ecuación 2 [24].

$$M + MV + Z + CF = 100\% \quad (2)$$

La humedad en la biomasa es un componente que no se puede aprovechar energéticamente. Se puede encontrar en dos formas: libre o externa correspondiente a la contenida entre las paredes de la biomasa y la humedad en equilibrio o inherente correspondiente al agua contenida en el interior de las células [24].

La materia volátil (MV) es la fracción liberada como gas (incluida la humedad), que se obtiene después del calentamiento de la biomasa. El contenido de carbono fijo (CF) corresponde a la masa remanente posterior a liberación de la materia volátil (excluyendo cenizas y humedad). La relación MV/CF se usa para determinar la reactividad de la biomasa asociada a la su facilidad de uso en procesos de conversión termoquímica [3], [24], [33].

Las cenizas corresponden a la fracción inorgánica contenida en la biomasa después de su combustión completa [3]. Un alto contenido de cenizas en la biomasa es indeseable en los

procesos de conversión termoquímica ya que pueden incrementar la formación de escoria, reducir el rendimiento de los procesos e incrementar los costos de operación [32].

3.2 Conversión de biomasa

La biomasa constituye una fuente de energía de altas proporciones a nivel mundial cuyo aprovechamiento se puede dar por medio de distintas transformaciones ya sean bioquímicas o termoquímicas. Dichos procesos permiten el aprovechamiento energético de la biomasa mediante la generación de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. En la Figura 4 se ilustran los procesos de transformación de biomasa y los principales productos.

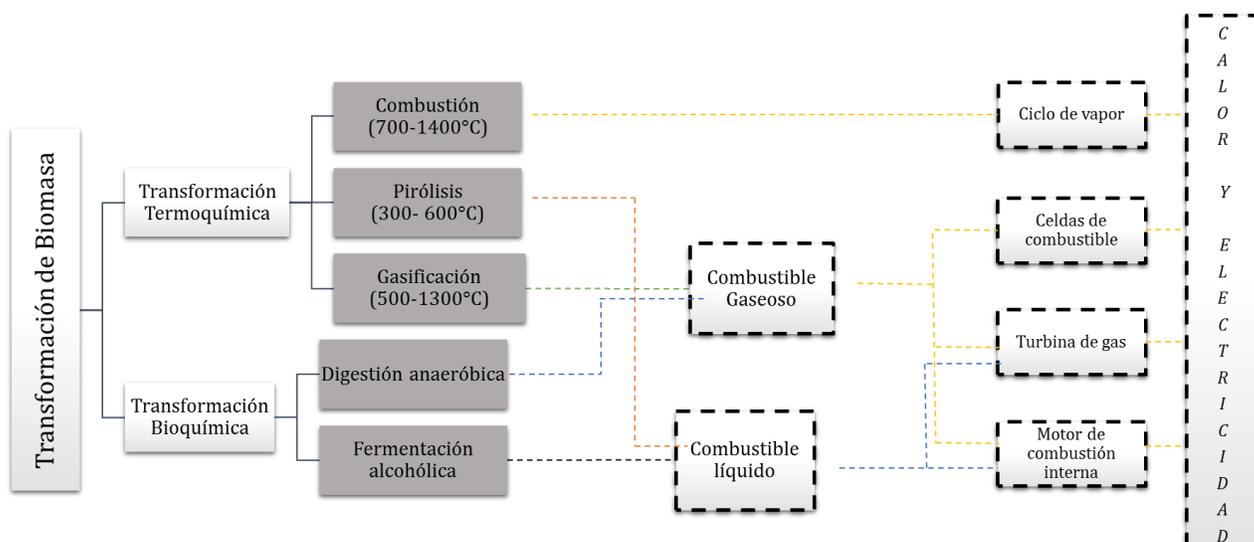


Figura 4. Procesos de transformación de biomasa, principales productos y usos. Modificado de [34] [31][35]

Los principales productos obtenidos de los procesos de transformación bioquímica mediante digestión anaeróbica son: el biogás, usado en procesos de generación de energía eléctrica o térmica y el bio-abono usado como fertilizante. Durante el proceso de fermentación alcohólica se obtienen combustibles líquidos usados como aditivos en motores de combustión interna o como sustitutos de la gasolina.

En las transformaciones termoquímicas, la biomasa es convertida en combustibles sólidos líquidos y gaseosos. La combustión es la transformación más antigua de biomasa y consiste en la oxidación exotérmica de la biomasa para su aprovechamiento en forma de calor,

potencia mecánica o electricidad usando estufas, calderas, turbinas, etc. La quema de biomasa genera gases de temperaturas entre 800 y 1000°C [32].

El proceso de pirólisis corresponde a la degradación térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno. Este proceso térmico descompone la biomasa en una fracción sólida (carbonizado) utilizado como combustible o para la producción de carbón activo, una fracción líquida compuesta principalmente de alquitranes de distinto peso molecular y agua y por último una fracción gaseosa compuesta principalmente de CO, CO₂, CH₄, C₂H₆, H₂ y algunos hidrocarburos pesados [36].

3.2.1 Principios de gasificación

La gasificación es el proceso termoquímico de conversión de biomasa en una mezcla de gases combustibles y no combustibles mediante la oxidación parcial de la biomasa a elevadas temperaturas y en presencia de un agente gasificante que puede ser aire, oxígeno, vapor o una mezcla de ellos [37] [32]. El proceso típico de la gasificación inicia con una etapa de secado, seguida de una etapa de pirólisis o devolatilización donde el combustible se degrada térmicamente en gas, compuestos condensables y carbonizado. Los productos de la etapa de pirólisis reaccionan entre sí, junto con el agente gasificante para formar los productos finales del proceso de gasificación. Las principales reacciones durante el proceso se enuncian en la Tabla 1.

Tabla 1. Reacciones del proceso de gasificación de biomasa.

<i>Reacciones</i>		
$C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$	Combustión	(R1)
$2C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)}$	Combustión	(R2)
$C_{(s)} + CO_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)}$	Boudouard	(R3)
$C_{(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{(g)} + H_2_{(g)}$	Agua-gas	(R4)
$CO_{(g)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + H_2_{(g)}$	CO Shift	(R5)
$CH_{4(g)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{(g)} + 3H_2_{(g)}$	Reformado de metano	(R6)
$CH_{4(g)} + 2H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + 4H_2_{(g)}$	Metanación	(R7)
$C_{(s)} + 0,5 O_{2(g)} \rightarrow CO_{(g)}$	Combustión Incompleta o combustión de hidrógeno	(R8)
$C_{(s)} + 2H_2_{(g)} \rightarrow CH_{4(g)}$	Metanación	(R9)

El producto de la gasificación es un gas de síntesis que está compuesto principalmente de hidrógeno (H₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), fracciones de hidrocarburos como etileno (C₂H₄) y etano (C₂H₆), nitrógeno (N₂), agua (H₂O), partículas de carbonizado y alquitranes [5]. La capacidad calorífica del gas de síntesis está regida principalmente por el tipo de biomasa y el agente gasificante utilizado. La Tabla 2 muestra los rangos de concentraciones obtenidos en el gas de síntesis con el uso de diferentes agentes gasificantes, así como su poder calorífico asociado.

Tabla 2 Tipos de agente gasificante usados en la gasificación de biomasa [38], [39]

	Aire	Vapor	Oxígeno	Oxígeno/Vapor
HHV (MJ/Nm³)	4-7	10-18	12-28	9-11
H₂	14-19%	20-35%	30-50%	26-30%
CO	15-21%	40-45%	45-50%	35-39%
CO₂	10-15%	10-15%	5-35%	27-32%
CH₄	1-3%	5-10	<2%	3-4%
N₂	45-55%	-	-	-

Los gases con bajo poder calorífico generalmente son utilizados en motores de combustión interna, mientras que los gases de poder calorífico medio/alto son utilizados como materia prima para posteriores procesos de conversión en productos como el metano y metanol [40]. A pesar de que el uso de aire genera un gas de síntesis con bajo poder calorífico debido al alto contenido de nitrógeno, éste constituye el agente gasificante mayormente usado para la generación de electricidad mediante gasificación, ya que representa la alternativa más económica en comparación con los demás agentes gasificantes.

El agente gasificante comúnmente se cuantifica mediante la *Relación de Equivalencia* (ER). Esta relación se define como la relación entre la cantidad real de aire que se ingresa para la combustión de la biomasa con respecto a la relación estequiométrica de aire para la combustión completa. ER indica el grado de combustión en el proceso de gasificación y está definida como se indica en la Ecuación 3 [24], [41].

$$ER = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{Air}}{\dot{m}_{Syngas}}\right)_{Real}}{\left(\frac{\dot{m}_{Air}}{\dot{m}_{Syngas}}\right)_{Stoic}} \quad (3)$$

Donde \dot{m}_{Air} indica el flujo másico de aire (kg/s), $\dot{m}_{\text{Syngas de síntesis}}$ indica el flujo másico de gas de síntesis (kg/s). El numerador indica la condición real y el denominador se refiere a la condición estequiométrica.

3.3 Análisis de la descomposición térmica de biomasa

La información sobre la cinética de descomposición de biomasa es necesaria para conocer algunos mecanismos que ocurren durante procesos de transformación termoquímica. Dichos procesos, comprenden la descomposición de gran cantidad de compuestos presentes en la biomasa, a través de reacciones que se pueden dar en serie o en paralelo. El estudio de dichas reacciones puede ser un proceso altamente complejo, por lo que se utilizan modelos simplificados para conocer parámetros cinéticos de procesos como la gasificación de biomasa.

El estudio cinético se realiza dependiendo de si el proceso de descomposición es isotérmico o no isotérmico. En los estudios isotérmicos la temperatura se eleva rápidamente hasta una temperatura establecida y posteriormente es mantenida durante determinado tiempo, donde se dan las principales reacciones de descomposición. Por otro lado, en los estudios no-isotérmicos, el proceso de descomposición térmica es más lento y las reacciones tienen lugar mientras se incrementa progresivamente la temperatura. Estos últimos, ofrecen ventajas sobre los estudios isotérmicos en cuanto a que se pueden eliminar errores generados en el periodo de inducción térmica, además que se requieren menos datos experimentales y permiten ver la influencia de la velocidad de calentamiento en la cinética de reacción en todo el rango de temperatura de forma continua [42], [43].

El análisis termogravimétrico (TGA) de la biomasa es una técnica que consiste en medir el cambio de masa a un perfil de temperatura establecido. Los resultados permiten la construcción de una curva de termogravimetría diferencial que indica la tasa de cambio en masa de la biomasa con respecto a la temperatura [44]. La Figura 5 muestra un ejemplo de las curvas obtenidas bajo termogravimetría a diferentes tasas de calentamiento, la curva TGA indica la pérdida de masa en función de la temperatura y la curva DTG es la derivada de la curva TGA, donde se amplifican los ruidos y es posible conocer fácilmente los picos de degradación del proceso.

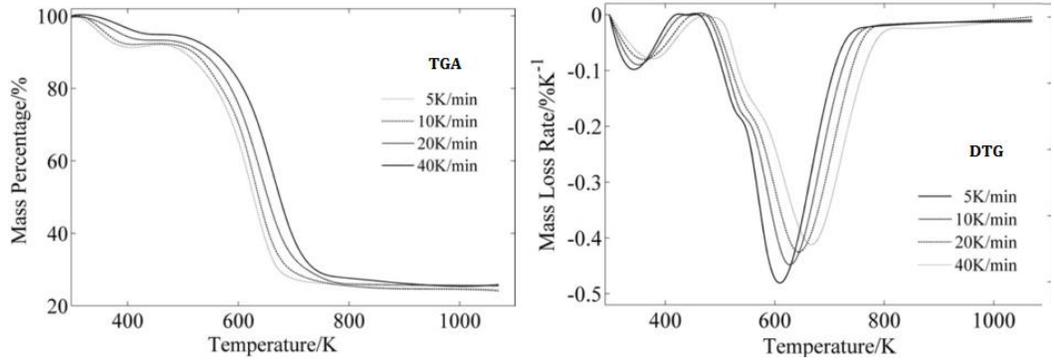


Figura 5. Curva TGA y curva DTG para la degradación térmica bajo cuatro tasas de calentamiento (5,10,20,40 K/min). Tomado de [12].

En los experimentos de termogravimetría bajo condiciones no isotérmicas desarrollados bajo presión constante, la velocidad del proceso de descomposición depende de la temperatura T y del grado de conversión α . El grado de conversión α se puede obtener de los resultados de pérdida de masa y está definido por la Ecuación 4.

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_f} \quad (4)$$

Donde m_0 es la masa inicial, m_t es la masa en el tiempo t y m_f es la masa de la muestra al finalizar la degradación térmica por termogravimetría. Así, la degradación térmica de biomasa bajo experimentos de termogravimetría y condiciones no isotérmicas está descrita por la Ecuación 5 y es comúnmente utilizada para el cálculo de parámetros cinéticos [45], [46]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \rightarrow \beta \frac{d\alpha}{dt} = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot f(\alpha) \quad (5)$$

Donde $f(\alpha)$ es la función diferencial de conversión de biomasa, $k(T)$ es la constante de velocidad descrita por la Ecuación de Arrhenius definida en la Ecuación 6 y β representa la tasa de calentamiento establecida ($\beta = dT/dt = \text{constante}$).

$$k(T) = A \exp\left[-\frac{E}{RT}\right] \quad (6)$$

Donde A es el factor pre- exponencial (min^{-1})(frecuencia de las colisiones entre moléculas), E es la energía de activación (kJ mol^{-1}) (energía necesaria para que la reacción pueda iniciar), R es la constante universal de los gases ($8,314 \text{ J K mol}^{-1}$) y T es la temperatura absoluta (K).

La obtención de los parámetros como el factor pre-exponencial, la energía de activación y la velocidad de reacción dependerá del modelo cinético seleccionado. Los modelos cinéticos más comunes para la evaluación de los parámetros cinéticos en biomasa son los modelos iso-conversionales, donde se evalúa una conversión entre 0 y 1 y los parámetros son obtenidos en función de la conversión o de la temperatura y no en función de la velocidad de calentamiento. El método de Friedman, el método de Kissinger y el método de Flynn-Wall-Ozawa son algunos de los métodos destacados en esta categoría[12], [47], [48].

4. Metodología

En este capítulo se describe la metodología que se utilizó para desarrollar la investigación. La Figura 6 muestra la secuencia de actividades establecidas en cada una de las fases.

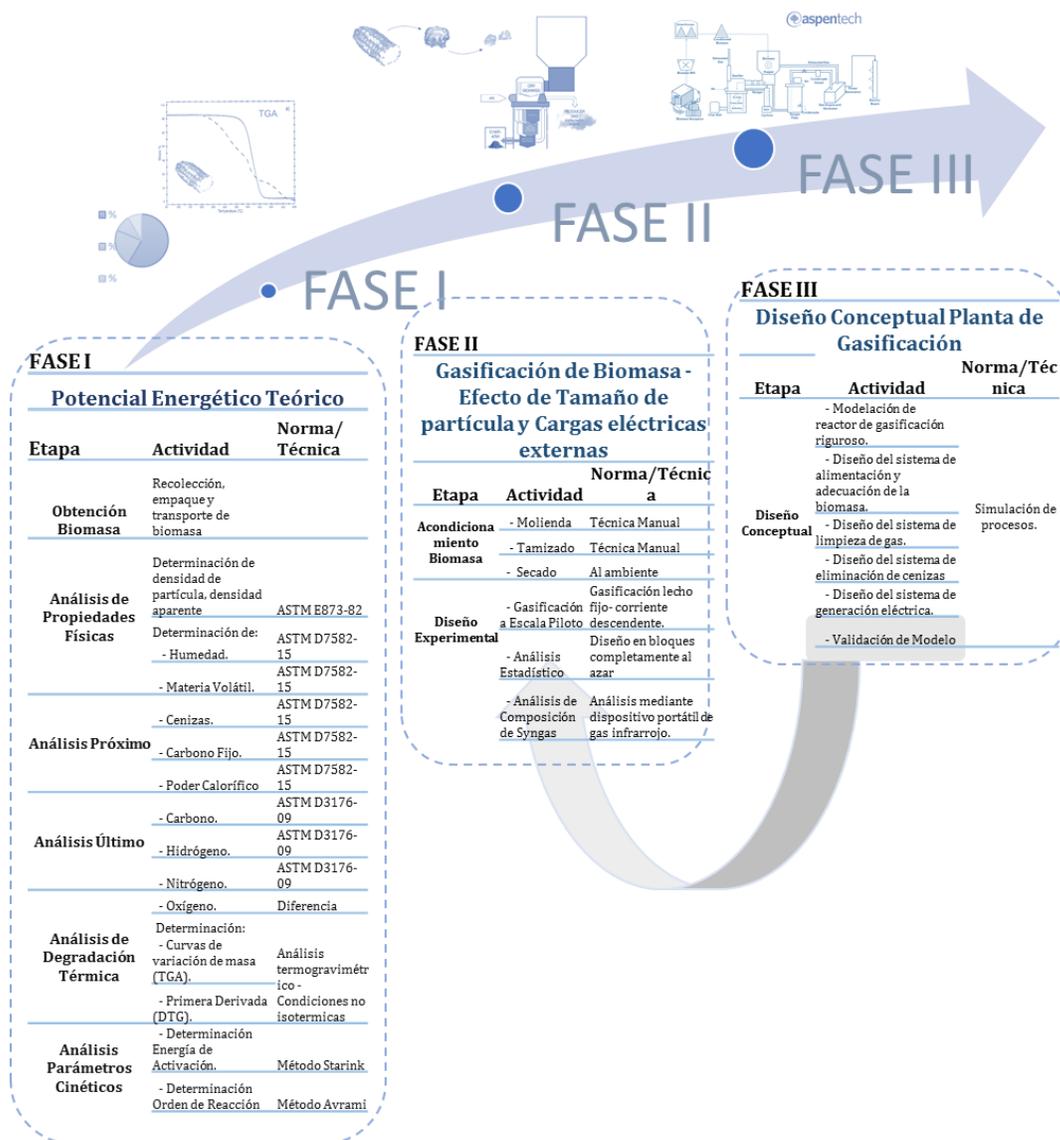


Figura 6. Síntesis de la metodología planteada para el cumplimiento de los objetivos planteados en el proyecto

4.1 Fase I: Potencial energético teórico

El objetivo de esta fase correspondió a la determinación del potencial energético teórico de los raquis de maíz blanco producidos en la central de abastos de Bogotá –Corabastos mediante su

caracterización física, química, análisis termogravimétrico y determinación de parámetros cinéticos asociados.

4.1.1 Obtención de biomasa

La biomasa utilizada fue el raquis de maíz blanco obtenido de actividades de desgrane en la principal Central de abastos de Bogotá, Colombia CORABASTOS. La biomasa fue recolectada y transportada a un invernadero situado en los laboratorios de Ingeniería de la Universidad de La Sabana, en Chía, Colombia a una altitud de 2.564 m, temperatura media de 18°C donde se llevó a cabo el estudio. La recolección de las muestras de biomasa se realizó en diferentes temporadas del año, por lo que el contenido de humedad varió entre el 40-60% conforme a las condiciones climáticas de recolección y almacenamiento.

4.1.2 Preparación de muestra de biomasa para caracterización

Se tomó una muestra de biomasa de 1 kg y se pasó por un procesador industrial Trapp Tr200 hasta obtener partículas < 1cm. Posteriormente la muestra se secó en horno a temperatura de 70°C hasta obtener una humedad inferior a 30%. Posteriormente se redujo el tamaño de partícula en un molino fino MF 10 Basic, IKA ® y se tamizó la muestra en tamizadora analítica AS 200 Basic ®, hasta alcanzar un tamaño de partícula menor a 250µm (Tamiz ASTM 11/95 N° 60) acorde al estándar ASTM E1757.

4.1.3 Análisis de propiedades físicas: densidad de biomasa

Para el cálculo de la densidad de partícula y densidad aparente, se utilizó un recipiente de madera de tamaño estándar (305 mm x 305 mm x 305 mm) y volumen interno de 16,39 cm³. Se determinó la densidad de partícula (Ecuación 7). El cálculo de la densidad aparente se realizó bajo la norma ASTM E873-82 teniendo en cuenta la (Ecuación 8). Los ensayos fueron realizados por triplicado y se reportó el promedio de las mediciones junto con la desviación estándar [49].

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} = \frac{\text{masa del recipiente con muestra} - \text{masa del recipiente vacío}}{\text{volumen de la caja}} \quad (7)$$

Donde ρ_p es la densidad de la partícula, m_p es la masa de las partículas, y V_p es el volumen real de la partícula.

$$\rho_b = \frac{m_p}{V_b} = \frac{\text{masa del recipiente con muestra sedimentada} - \text{masa del recipiente vacío}}{\text{volumen de la caja}} \quad (8)$$

Donde ρ_b es la densidad aparente, m_p es la masa de las partículas, y V_b es el volumen aparente de las partículas de biomasa que incluye los espacios intersticiales del lecho de biomasa.

4.1.4 Análisis próximo

El análisis próximo se llevó a cabo utilizando el equipo METTLER TOLEDO TGA/DSC 1 STARE System disponible en el laboratorio de la Universidad de La Sabana. Se utilizaron muestras en un rango de masa de 20-23mg y se llevaron a cabo los experimentos por triplicado bajo la norma ASTM D7582-15. La Figura 7 muestra el detalle de la rampa de calentamiento utilizada en el análisis termogravimétrico para la determinación de humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas.

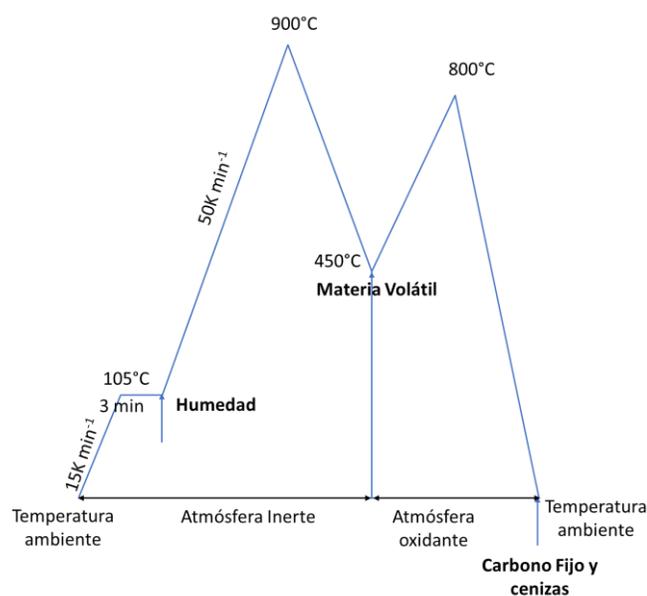


Figura 7. Método termogravimétrico para el análisis próximo de la biomasa (Elaboración propia).

✓ Humedad

Las muestras se introdujeron en crisoles de alúmina y se llevaron a temperatura de 105°K a una velocidad de calentamiento de (15K min⁻¹) bajo atmosfera inerte de nitrógeno (130 ml min⁻¹). Se mantuvo la temperatura por un periodo 3 minutos y el cálculo del contenido de humedad se realizó con la Ecuación 9 de la Tabla 3.

✓ Materia Volátil

El cálculo del contenido de materia volátil se realiza con la Ecuación 10 de la Tabla 3. Para ello se inicia una rampa de calentamiento hasta 900°C a una velocidad de 50K min⁻¹ y un posterior proceso de enfriamiento hasta llegar a una temperatura de 400°K.

✓ Cenizas

Para la determinación de las cenizas, se realiza el cambio de la atmosfera de nitrógeno, a atmosfera de oxígeno a una velocidad de 130 ml min⁻¹. Se inicia una rampa de calentamiento hasta 800°C manteniendo durante 3 minutos. El cálculo del contenido de materia volátil se realiza con la Ecuación 11 de la Tabla 3.

✓ Carbono Fijo

El cálculo del contenido de materia volátil se realizó con la (Ecuación 12) de la Tabla 3.

Tabla 3 Normas empleadas durante la determinación del análisis próximo de la biomasa.

Componente	Técnica	Ecuación	No.	Referencia
Humedad (<i>M</i>)	ASTM D7582-15	$M = \frac{W_0 - W_{MT}}{W}$	(9)	[31]
Materia Volátil (<i>MV</i>)	ASTM D7582-15	$M = \frac{W_{MT} - W_{MVT}}{W_0}$	(10)	[31]
Cenizas (<i>Z</i>)	ASTM D7582-15	$Z = \frac{W_{ZT}}{W_0}$	(11)	[31]
Carbono Fijo (<i>CF</i>)	Por diferencia	$CF = 1 - M - Z - MV$	(12)	[31]

M: Humedad, *MV*: Materia volátil, *Z*: Cenizas, *CF*: Carbono Fijo, *W*₀: Masa inicial de la muestra, *W*_{MT}: Masa de la muestra seca después del test de humedad, *W*_{MVT}: Masa de la muestra después del calentamiento en el test de materia volátil, *W*_{ZT}: Masa de la muestra después del calentamiento en el test de cenizas.

4.1.5 Análisis último

Para la determinación de carbono, hidrógeno y nitrógeno se utilizó el analizador Truspec marca LECO bajo la norma ASTM D3176-09 y el azufre bajo la norma ASTM D4239-14e2. El porcentaje de oxígeno fue determinado por diferencia teniendo en cuenta la Ecuación 1.

4.1.6 Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico se llevó a cabo mediante equipo METTLER TOLEDO TGA/DSC 1 *STARe System*. Se utilizaron muestras en un rango de masa de 20-23mg y se llevaron a cabo los experimentos por triplicado a velocidades de calentamiento de 5, 20 y 50°C/min respectivamente. Las muestras se llevaron a temperatura de 105°C por 15 minutos para eliminar trazas de humedad y posteriormente a una temperatura de 900°C. El análisis se realizó bajo una atmosfera inerte de nitrógeno a velocidad de 130 ml min⁻¹ para evitar reacciones secundarias producidas por volátiles [48]. Se obtuvieron las curvas de variación de masa con respecto al tiempo y cambio de temperatura (TGA) y su primera derivada (DTG) para cada tasa de calentamiento respectivamente.

4.1.7 Determinación de Parámetros Cinéticos

Los parámetros cinéticos de la degradación térmica de los raquis de maíz blanco se evaluaron empleando los resultados del análisis termogravimétrico. Se calculó la energía de activación por medio del método de Flynn Wall Ozawa (FWO), Kissinger -Akhira- Sunose (KAS) y el método cinético isoconversional de Starink partiendo del supuesto de que la velocidad de reacción está en función únicamente de la temperatura a una conversión α fija. Se emplearon seis niveles de conversión de biomasa entre el 20% y 70% para las tres tasas de calentamiento aplicadas en el análisis termogravimétrico ($\beta = 5^\circ\text{C min}^{-1}$, $10^\circ\text{C min}^{-1}$ y $50^\circ\text{C min}^{-1}$). La energía de activación se obtuvo a través de la pendiente de la línea recta obtenida al realizar la regresión lineal acorde al método establecido (Ver Tabla 4).

Tabla 4. Modelos utilizados para la estimación de parámetros cinéticos para la degradación térmica de raquis de maíz blanco.

Modelo	Ecuación	Gráfica	Referencia
FWO	$\log(\beta) = \left[\log \frac{AE}{g(\alpha)R} - 2.315 - 0.457 \frac{E}{RT} \right]$	(13) $\log(\beta)$ vs $1/T$	[50]

KAS	$\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = \ln\left[\frac{AR}{g(\alpha)E} - \frac{E}{RT}\right]$	(14)	$\ln(\beta/T^2)$ vs $1/T$	[43]
Starink	$\ln\left(\frac{\beta}{T^{1.8}}\right) = \left[C - 1.0037 \frac{E}{RT}\right]$	(15)	$\ln(\beta/T^{1.8})$ vs. $1/T$	[51]

$g(\alpha)$ está en función del grado de conversión, β : tasa de calentamiento, A: Factor pre-exponencial, E es la energía de activación [kJ mol⁻¹], R es la constante universal de los gases (8,314 J K mol⁻¹), T es la temperatura absoluta (K).

4.2 FASE II: Gasificación de Biomasa- Efecto de tamaño de partícula y carga eléctrica demandada.

El objetivo de esta fase fue evaluar el efecto del tamaño de partícula y la carga eléctrica sobre el rendimiento del proceso de gasificación. Para lograr este objetivo se evaluó el comportamiento de mezclas de raquis con diferente tamaño de partícula y cargas resistivas variadas acopladas al equipo de gasificación.

El equipo de gasificación usado en este estudio correspondió a un sistema a escala piloto de lecho fijo - Downdraft de la compañía ALL Power Labs, California, USA, acoplado a un motor de combustión interna y un generador (Figura 8). El sistema consta de 4 etapas posteriores al acondicionamiento de la biomasa: a) Alimentación de biomasa b) Gasificación de biomasa, c) Acondicionamiento o limpieza de Gas de síntesis y d) Generación eléctrica. Las especificaciones y el detalle de la operación se describen en el Anexo A.

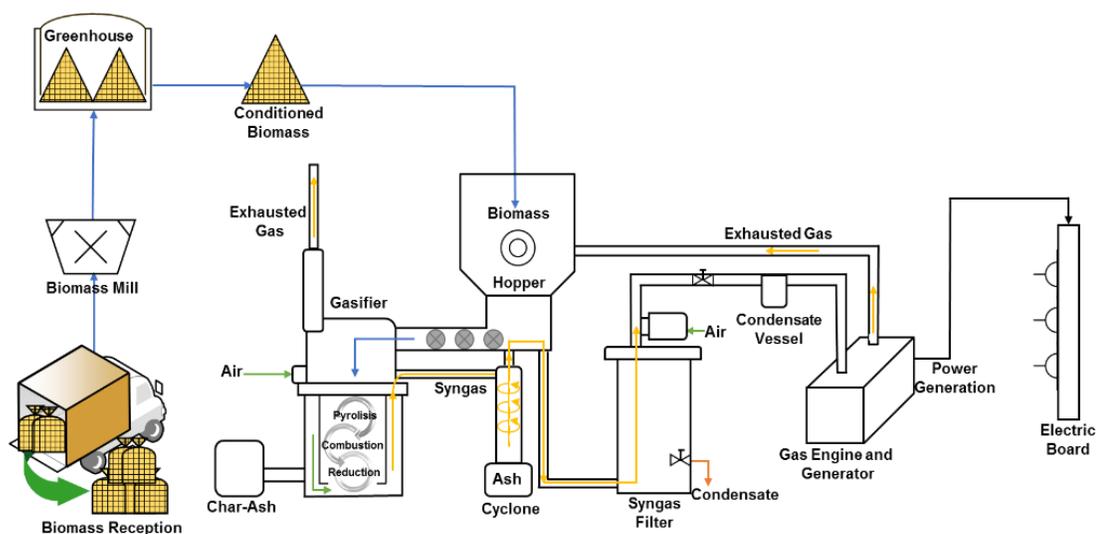


Figura 8. Esquema del sistema de gasificación de lecho fijo - corriente descendente usado en la experimentación (Elaboración propia)

Acondicionamiento de biomasa para gasificación

Para la obtención de la muestra, se realizó una primera fase de reducción de tamaño mediante herramienta de corte manual. Se preparó una primera muestra cuyo tamaño de partícula correspondió al sugerido por el fabricante del gasificador (entre 1 y 4 cm). La muestra fue tamizada mediante un tamiz de ½ pulgada para eliminar trazas de material fino. La segunda muestra correspondió a biomasa de tamaño de partícula <1cm (finos). Una fracción de esta muestra fue obtenida del proceso de tamizado y otra mediante el proceso de molienda en procesador industrial Trapp Tr200.

Las fracciones fueron separadas y se dejaron secar en invernadero durante 60 días hasta obtener una humedad inferior al 30%. Una vez preparadas las muestras, se efectuaron mezclas con diferentes proporciones de gruesos (tamaño recomendado) y finos, tomando como límite la mezcla 85% - 15% respectivamente. El numeral 4.2.1 da cuenta del detalle del diseño experimental.

Antes de cada ensayo, se tomó una muestra aleatoriamente por cada tratamiento y se llevó a tamaño de partícula < 1mm mediante molino Referencia fino MF 10 Basic, IKA ®. El cálculo de humedad se realizó por triplicado bajo la norma DIN 51718, en horno de secado a 106°C hasta no detectar cambios de masa. El contenido de humedad se calculó según la Ecuación 17 [52].

$$HR = \frac{m_0 - m_f}{m_0} \quad (17)$$

Donde HR: Humedad relativa (%), m_0 : masa inicial de la biomasa, m_f : masa final de la biomasa.

4.2.1 Diseño Experimental

Se realizó un diseño en bloques completamente al azar (3 bloques) para evaluar el efecto del contenido de finos en la mezcla de biomasa alimentada al gasificador y la variación de cargas resistivas conectadas al dispositivo (Tabla 5.). Cada ensayo se llevó a cabo por triplicado y la toma de datos se realizó por un periodo de dos horas después del encendido del equipo, una

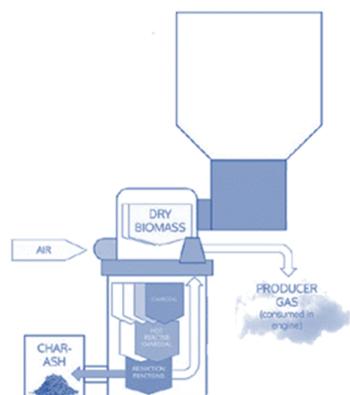
vez se estabilizó la operación del motor. El diseño experimental se basó en el diseño planteado en el informe "Evaluation of a gasifier using coffee Wood" (2015) [53].

Tabla 5. Factores y niveles Diseño Experimental

Factor	Niveles		
Factor A: (Porcentaje de finos en la mezcla de biomasa)	Nivel 1: Mezcla sin finos	Nivel 2: Mezcla con 15 % de finos.	
	100% chips con tamaño de partícula recomendado por el proveedor (1cm -4 cm)	Mezcla de chips, 85% con el tamaño recomendado y 15% de finos (<1cm)	N/A
Factor B: (Carga resistiva externa conectada al dispositivo)	Carga 1 (4 kWe)	Carga 2 (8 kWe)	Carga 3 (12 kWe)

Variables de Respuesta:

Las variables de respuesta fueron calculadas para cada uno de los 6 tratamientos con sus respectivas réplicas. A continuación, se presenta la descripción de las variables de respuesta tenidas en cuenta en el análisis estadístico de los datos (ver Figura 9).



DISEÑO EXPERIMENTAL

Variables de medición y control	Unidad	Forma de Medición/Método/Herramienta	Variable Respuesta	Unidad	Cálculo
Volumen interno de tolva	m ³	Software de diseño Inventor 2015®	Consumo de Biomasa (Δ_{cb})	kg/h	$T_{cb} = \frac{m_b}{\Delta t}$
Masa de Biomasa Alimentada (m_b)	Kg	Medición de masa en balanza de suelo. Rango de 0 -100 kg	Consumo Específico de Biomasa C_{eb}	kg/kWh	$C_{eb} = \frac{m_b}{P_e}$
Tiempo de operación (t)	h	Cronómetro Digital	Flujo de Gas	m ³ /h	
Densidad aparente de biomasa	kg/m ³	ASTM E873-82	Producción de Gas	m ³ syngas/kg biomasa	$G_p = \frac{m_b}{P_e}$
Δ volumen de biomasa durante operación	m ³	Δ_{cm} medido desde la superficie de la alimentación hasta la parte superior de la tolva y su posterior equivalencia en m ³ .	Eficiencia Gasificador	%	$\eta_G = \frac{\dot{m}_{gas} * LHV_{gas}}{\dot{m}_{biomasa} * LHV_{biomasa}} * 100$
Potencia Consumida por carga	kW	Medición de potencia a través de tablero eléctrico Referencia:	Temperatura	°C	
Temperatura de restricción	°C	Panel de Control de gasificador ALL POWER LABS	Humedad de Biomasa	%	
Temperatura de Reducción	°C	Panel de Control de gasificador ALL POWER LABS			
Humedad de Biomasa	%	DIN 51718			
Temperatura del syngas	°C	Dispositivo electrónico de medición de flujo de gas.			
Flujo de syngas	m ³ /h				

Figura 9. Variables de medición durante el diseño experimental en el gasificador de lecho fijo – Corriente descendente. Donde Δ_{cb} : consumo de biomasa (kg/h), m_b : masa de material alimentado, t : tiempo de operación (h), C_{eb} : consumo específico de biomasa (kg/KWe), m_b : masa de material alimentado, P_e : Electricidad consumida (kWe)

Consumo de biomasa T_{cb} (kg/h):

Para el cálculo del consumo de biomasa, se midió el volumen interno de la tolva y se graficó en el software Inventor 2015® (ver Anexo C.), posteriormente se realizó el seguimiento controlado del cambio de altura en centímetros de la biomasa al interior de la tolva. Se realizaron mediciones por triplicado en diferentes zonas de la alimentación cada 30 minutos mediante una vara de medición de dos metros de longitud y se tomó el promedio para su posterior equivalencia en metros cúbicos. La masa de material alimentada (m_b) se calculó como muestra la Ecuación 18.

$$m_b = \rho_b \times v_b \quad (18)$$

Donde ρ_b es la densidad aparente de la biomasa (kg/m³) y v_b es el volumen de biomasa alimentado (m³).

Finalmente, el consumo de biomasa (T_{cb}) se calculó como muestra la Ecuación 19.

$$T_{cb} = \frac{m_b}{\Delta t} \quad (19)$$

Donde T_{cb} : m_b : masa de material alimentado(kg), Δt : intervalo de operación (h).

Consumo específico de biomasa C_{Eb} (kg/kWh):

El consumo específico de biomasa corresponde a la relación entre los kg de biomasa consumida y la electricidad consumida (kWe). Dicha variable se puede asociar con la eficiencia que tiene el motor para transformar el combustible (biomasa) en energía mecánica expresada en kg de biomasa consumida/ potencia en kWh según la Ecuación 20 [53], [54].

$$C_{eb} = \frac{m_b}{P_e} \quad (20)$$

Donde C_{eb} : corresponde a la tasa de consumo específico de biomasa (kg/kW), m_b : flujo de material alimentado (kg/h), P_e : Electricidad consumida (kW).

Eficiencia de gas frío (%)

La medida de la eficiencia de gas frío representa una medida del rendimiento del gasificador y está descrita por la Ecuación 21 [55], [56].

$$\eta_{CG} = \frac{M_{Syng} * LHV_{syng}}{M_{biomasa} * LHV_{biomasa}} * 100 \quad (21)$$

Donde η_{cg} : corresponde a la eficiencia del gas frio, $M_{Gas\ de\ síntesis}$ y $M_{biomasa}$ son el flujo de gas de síntesis (Nm^3/s) y biomasa respectivamente (Kg/s), LHV_{syng} : Poder calorífico inferior del gas (MJ/Nm^3) y $LHV_{biomass}$: Poder calorífico inferior de la biomasa (MJ/Kg). LHV_{syng} fue calculado mediante la Ecuación 22, usando la composición del gas generado(%vol), descrita en esta misma sección. Y $LHV_{biomass}$ fue calculado a partir de la Ecuación 23 [57], [41].

$$LHV_{syng} = \frac{(126.36 X_{CO} + 358.18 X_{CH_4} + 107.98 X_{H_2})}{1000} \quad (MJ/Nm^3) \quad (22)$$

Donde X_{CO} , X_{CH_4} y X_{H_2} son las fracciones volumétricas o molares de CO, CH₄ y H₂ contenidas en el gas de síntesis producido.

$$LHV_{biomass} = HHV_b - H_{fg} \left(\frac{F_{Agua}}{F_{Biomasa}} \right) \quad (23)$$

Donde HHV_b corresponde al poder calorífico superior de la biomasa (MJ/Kg), H_{fg} a la entalpía de vaporización del agua tomada como 2.26 MJ/Kg [57], y $(F_{Agua}/F_{Biomasa})$ es la relación entre el contenido de humedad de la biomasa y la cantidad de biomasa alimentada.

Flujo de gas (m^3/h):

Corresponde al caudal del gas en m^3/h . Se obtuvo un registro de mediciones por segundo, durante las dos horas de operación con encendido del motor.

4.2.2 Análisis de composición de gas de síntesis

El gas producido en el proceso de gasificación fue analizado mediante un analizador portátil de gas infrarrojo (Gasboard-3100P, Wuhan Cubic Optoelectronics Co., Ltd., China) conectado a la salida del filtro. La toma de la muestra se realizó por triplicado durante el procedimiento de gasificación antes y después de encendido del motor. La muestra se extrajo mediante una bomba pequeña acoplada al motor del tornillo sinfín. Las pruebas fueron realizadas a través de la contratación del servicio de análisis de gases de la Universidad Nacional.

Las composiciones detectadas por el medidor son hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), oxígeno (O_2) y C_nH_m . Así mismo, el medidor suministró el valor del poder calorífico del gas en MJ/kg.

4.2.3 Análisis Estadístico

El diseño experimental resultó en el desarrollo de 18 experimentos derivados de la combinación de los factores y niveles enunciados en la Tabla 5. El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el software SAS 9.4®. Se realizaron pruebas de normalidad mediante el método de Shapiro- Wilk y análisis de varianza (ANOVA) con un valor de significancia $p \leq 0,05$. Finalmente, se utilizó la opción “Ridge Max” para estimar la respuesta máxima de la variable de eficiencia de gas frío. Para profundizar en la metodología, ver Anexo B.

4.3 FASE III: Diseño Conceptual de Planta de Gasificación

4.3.1 Simulación computacional en Aspen Plus

El sistema de gasificación de raquis de maíz se modeló en Aspen Plus V7.3 mediante un modelo basado en la minimización de la energía libre de Gibbs. El sistema de gasificación contempló 3 etapas globales: Acondicionamiento de biomasa, gasificación de biomasa y generación de potencia. La Tabla 6 muestra una descripción de los bloques contenidos en el modelo, correspondientes a subprocesos internos del proceso de generación de energía a partir de gasificación. Los resultados obtenidos en esta simulación fueron comparados y calibrados con los datos experimentales obtenidos en la Fase II de este trabajo de investigación.

Para la definición de los flujos de las corrientes, se utilizó la clase MIXED para flujos gaseosos o líquidos. Y la clase NCPD para sólidos no convencionales como la biomasa (por su naturaleza residual y composición variada), y los residuos carbonosos (CHAR-ASH) (residuos obtenidos del proceso de gasificación). La estimación de las propiedades físicas y químicas (Entalpía, densidad, capacidad calorífica) de los componentes no convencionales (BIOMASS y CHAR-ASH) fueron hallados por los modelos HCOALGEN y DCOALIGH al ingresar el análisis último y próximo obtenidos en la FASE I. Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones en el desarrollo del modelo [43], [58]–[62]:

- La operación se desarrolló en estado estacionario.
- La biomasa está constituida elementalmente de carbón, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre.
- El tamaño de partícula se estableció con base en el análisis estadístico del diseño experimental planteado.
- No se consideró el efecto de la caída de presión dentro del sistema.
- Las cenizas no son involucradas en ninguna reacción dentro del sistema.
- La masa de cenizas en la biomasa se conserva en el Char-ash (carbonizado).
- El agente oxidante (aire) convirtió el carbono contenido en la biomasa en gas de síntesis, material carbonizado y alquitrán.
- Se eliminó la fracción de carbono contenida en el Char-ash que no fue convertida en gas de síntesis.
- El nitrógeno y azufre fueron considerados como inertes.
- El gas de síntesis está compuesto exclusivamente de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), oxígeno (O₂) y nitrógeno (N₂).
- Las reacciones de craqueo de alquitranes no fueron incluidas en el desarrollo del modelo. Se retiró su equivalente en masa asumiendo una conversión del 20% p/p de la biomasa en alquitrán con una composición de 60% de benceno, 20% de tolueno y 20% de naftaleno.

Tabla 6. Descripción de los bloques de operación utilizados en la simulación en ASPEN PLUS

Operación	Bloque	ID en simulación	Descripción
Secado Primario	Etapa no simulada	N/A	Pérdida de humedad del material recolectado hasta los límites de operación
Molienda	Crusher	MILLING	Disminución del tamaño de partícula de la biomasa
	Screen	SCREEN	Tamizaje de biomasa para eliminación de fracción de finos.
Secado secundario (interior de la tolva)	Rstoic	Dry- React	Reducción de la humedad en la biomasa
	Flash 2	FSECADO	Separar vapor de agua de componentes de biomasa

Devolatilización	Ryield	DEVOL	Etapa donde se realiza la descomposición de biomasa (componente no convencional) de acuerdo a su análisis próximo y último, en componentes convencionales (C, H, O, N).
Gasificación	Rgibbs	GASIFIER	Gasificación y combustión de la biomasa.
	Ssplit	SPLIT	Separación de cenizas del gas
Enfriamiento y limpieza	Heater	COOLER	Enfriamiento del gas producido
	Separator	SEPCHAR	Eliminación de carbonizado (char-ash)
	Separator	SEPTAR	Eliminación de alquitranes (% p/p que no se contemplan en reacción)
Generación de Potencia	Compresor	COMP	Elevación de la presión de la mezcla aire- gas de síntesis para ingreso a cámara de combustión
	Rgibbs	COMB	Combustión del gas
	Compresor	TURB	Simulación del proceso de expansión adiabática.

4.3.2 Análisis Económico – costo nivelado de energía

Para las tecnologías de generación energética a partir de fuentes renovables, donde los costos y beneficios varían de forma considerable según la tecnología, es importante realizar estudios que permitan conocer la viabilidad de un proyecto en términos económicos. Un indicador comúnmente utilizado en el mercado energético para comparar distintas tecnologías de generación energética o distintas instalaciones de la misma tecnología es el costo nivelado de energía (LCOE)[63]. Este indicador es una medida conveniente para comparar las tecnologías de generación de energía sobre la base de costos promedio ponderados. También proporciona una estimación preliminar del precio mínimo de la electricidad que deben pagar los usuarios finales para que el sistema sea rentable. [64].

En el caso de una tecnología como la gasificación a partir de biomasa, el cálculo del costo nivelado de energía comprende el costo del gasificador, el motor de generación, la construcción civil, el sistema de pretratamiento de la biomasa y el consumo específico de combustible. Además de otros aspectos como el factor de capacidad, la vida útil del equipo, el precio del combustible y el precio suplementario del combustible (por ejemplo, diésel)[65]. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la modelación de la planta de gasificación descrito en la sección anterior, se realizó el cálculo de los costos de generación de electricidad

basada en el indicador del costo nivelado de energía- LCOE. Se realizó el cálculo LCOE mediante la Ecuación 24:

$$LCOE = \frac{\text{Costo total de ciclo de vida}}{\text{Tiempo de vida de la producción energética}} = \frac{I - D + C - S}{E} \quad (24)$$

Donde:

I = Costos de inversión inicial (USD)

D = Costos de depreciación (USD), $D = \sum_{t=1}^T d_t \gamma^t * \alpha$

C = Costos anuales (USD), $C = \sum_{t=1}^T d c_t \gamma^t * (1 - \alpha)$

S = Valor de salvamento de los activo al final del ciclo de vida, (USD), $S = \gamma^T$

E = Producción total de energía (kWh), $E = \eta \sum_{t=1}^T \gamma^t x_t$

El factor γ representa el valor temporal del dinero $\gamma = \frac{1}{(1+r)}$, α es la tasa del impuesto corporativo, η es la producción de energía, T es el ciclo de vida del proyecto; d_t , c_t y x_t representan el calendario de depreciación en el año t , el costo operativo en el año t , y la degradación del sistema en el año t , respectivamente.

Para estimar los costos del proceso, se utilizaron los datos de operación real, datos comerciales y algunas fuentes teóricas. Las siguientes consideraciones fueron tomadas en cuenta:

- Los costos nivelados de inversión comprendieron: el valor real de compra del equipo de gasificación de la compañía ALL POWER LABS y el costo comercial teórico de un molino con las características recomendables para su uso en el proceso de gasificación.
- Para el propósito de este trabajo de investigación, se definió una vida útil de 20 años para la red de gasificador de biomasa, obras civiles y electricidad.
- Para el grupo electrógeno del motor, el período de vida útil se definió como 3840 h.
- Se utilizó un enfoque de depreciación lineal.

5. Resultados y análisis

A continuación, se describen los resultados obtenidos en cada una de las fases del proyecto desarrollado, junto con su respectivo análisis por fase.

5.1 FASE I: Potencial Energético Teórico

5.1.1 Caracterización de Biomasa

Los residuos de biomasa fueron caracterizados después de su acondicionamiento en términos de tamaño de partícula y humedad requerida para la operación. Los resultados de la caracterización física, análisis próximo y análisis último del raquis de maíz blanco se muestran en la Tabla 7. Los resultados del análisis próximo difieren levemente con resultados previamente reportados por otros autores, específicamente en relación con el contenido de humedad y materia volátil [66], [4], [26].

De acuerdo con algunos autores, el contenido de cenizas del raquis de maíz (<5%) podría facilitar la velocidad de combustión y evitar problemas de aglomeración durante la combustión ya que los principales componentes de las cenizas son óxido alcalinos y alcalinotérreos cuyas altas concentraciones provocan la disminución de temperatura de fusión y consecuentes problemas de aglomeración [45], [67], [68].

Tabla 7. Análisis último y próximo de muestras de raquis de maíz blanco.

Análisis Próximo (% Masa)	Base Húmeda	Base Seca	Estándar
Humedad	23.57	0	ASTM E-871-82
Materia Volátil	62.76	82.09	ASTM E-872
Carbono Fijo <i>b</i>	11.61	15.19	Por Diferencia
Cenizas	2.08	2.72	ASTM E-1755-01
Análisis último (% Masa LHC) <i>a</i>			
Hidrógeno	4.51	5.9	ASTM D3176-09
Nitrógeno	0.58	0.76	ASTM D3176-09
Azufre	0.04	0.05	ASTM D4239-14e2
Carbono	35.87	46.92	ASTM D3176-09
Oxígeno <i>b</i>	40.92	43.65	Por Diferencia
Poder calorífico (Kcal/kg)	3363	4398	ASTM D5865-13
(KJ/kg)	14074.7	18401.2	
Poder calorífico (GJ/ton)	14.08	18.42	ASTM D5865-13
Densidad aparente $B_{0\%}$ * (Kg/m³)	210.1		
	*Desviación Estándar: 39 kg/m ³		
Densidad aparente $B_{15\%}$ ** (Kg/m³)	226.1		
	*Desviación Estándar: 33.1 kg/m ³		

a BS: Base seca, *b* Calculado por diferencia, * Densidad aparente de mezcla con 100% de tamaño recomendado por el fabricante (1-4cm de diámetro), ** Densidad aparente de mezcla de 85% de tamaño recomendado por el fabricante y 15% de finos (<1cm de diámetro)

Así mismo, la relación del contenido de materia volátil y carbono fijo (MV/CF) determinó el grado de reactividad de las muestras correspondiente a 5.50. Autores como Aboyade et al, (2013) [69], Biagini et al, (2015) [70] y Gai et al, (2013) [12] encontraron valores de índices de reactividad para raquis de maíz blanco similares a los encontrados en el presente estudio (5.37, 4.49 y 5.67 respectivamente) que en comparación con otros residuos agrícolas como la cascarilla de arroz con índices inferiores al 4.5[12], representan características de mayor favorabilidad para la combustión debido a que altos contenidos de materia volátil facilitan el encendido a bajas temperaturas proporcionando mayor reactividad o rapidez en la conversión de biomasa en gas [71].

A partir de los resultados obtenidos del análisis último se puede inferir que el contenido de nitrógeno y azufre en base seca (0.76% y 0.05% respectivamente), conduce a la

formación de menor cantidad de óxidos de nitrógeno (NO_x) y azufre (SO_x) en comparación a lo que reporta la literatura para otros residuos de biomasa agrícolas como hojas de maíz blanco (N: 0.97%), granos de cacao (N:2.64%, S: 0.29%), corteza de limón (N:1.08%, S: 0.42%) y semillas de durazno (N:3.94%, S: 0.30%) [3], [12].

La Figura 9a muestra un diagrama ternario con la comparación de la composición de la biomasa usada en este estudio junto con otras muestras de biomasa agrícola y muestras de carbón nacional caracterizadas en previos estudios. Se observó que el contenido de carbono presenta similitud con otros residuos agrícolas como la caña de azúcar molida [1] donde los contenidos de carbono eran cercanos al 45%, mientras que para los combustibles fósiles los valores comúnmente se acercan al 80%. De acuerdo con el diagrama Van Krevelen que representa gráficamente las relaciones atómicas de H:C en función de las de O:C correspondiente a los residuos de raquis de maíz blanco, la mayor proporción de hidrógeno y oxígeno en comparación con el contenido de carbono se traduce en menor contenido energético del material como se muestra en la Figura 10b, donde los residuos de biomasa se encuentran alejados del origen en comparación con las muestras de carbón. Esto se debe a que los enlaces C-O y C-H contienen menos energía que los enlaces C-C [33]. Sin embargo, aunque el contenido energético de los raquis de maíz blanco, no se igualan al del carbón, si presentan mejores características que las de otros residuos de origen agrícola como cáscaras de coco (CCO) y cáscara de arroz (CAZ).

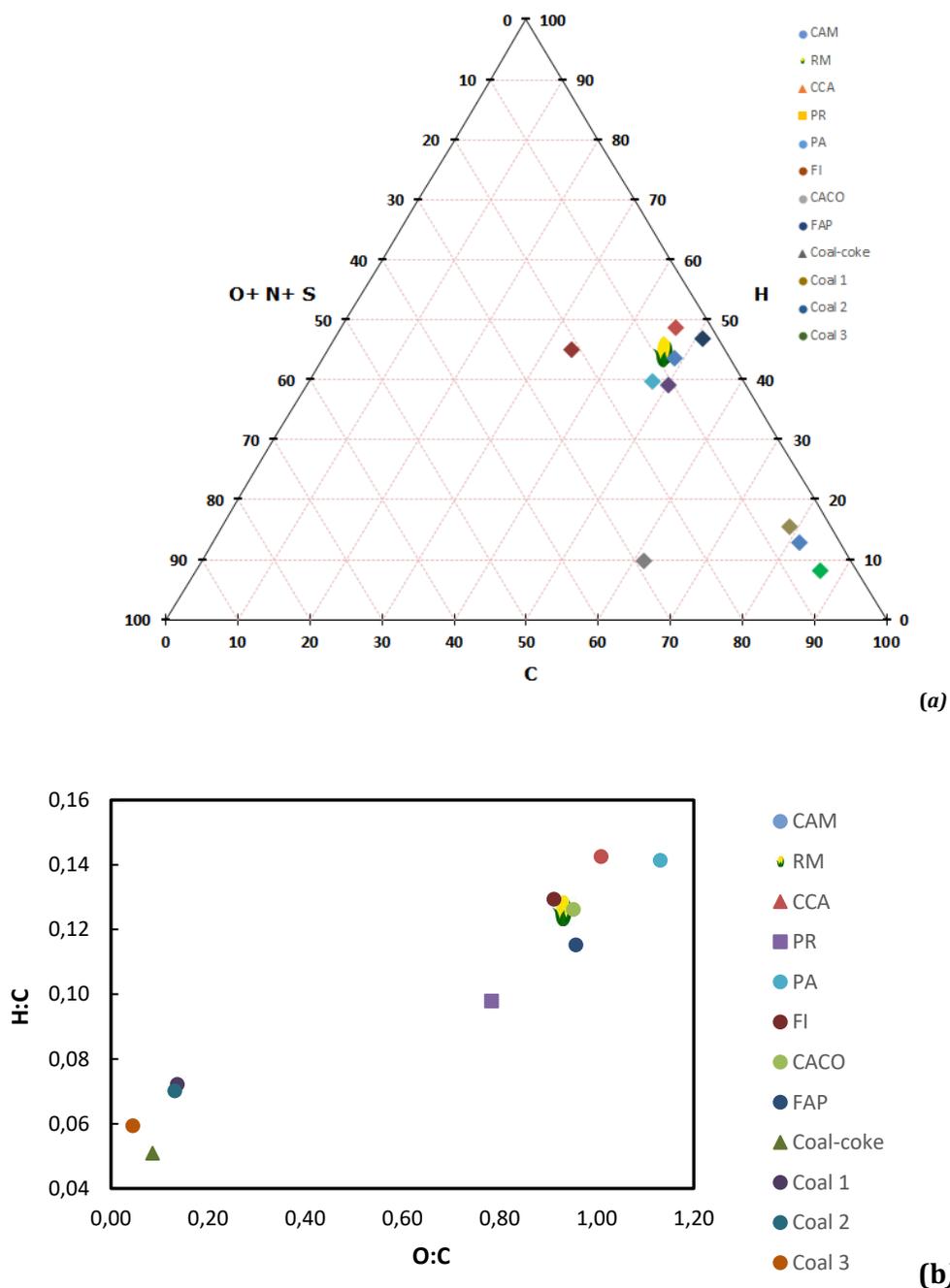


Figura 10. Resultados de análisis último para la biomasa usada en este estudio (raquis de maíz blanco) junto con otras muestras de biomasa agrícola y muestras de carbón nacional. (a) Diagrama ternario (b) Diagrama Van Krevelen. CAM: Caña de azúcar molida, RM: Raquis, CCA: Cáscara de café, PR: Raquis de palma, PA: Paja de arroz, FAP: Fruto de aceite de palma, (Coal-Coke, Coal 1, Coal 2, Coal 3): Carbón vegetal. Referencias: [1], [71], [72].

5.1.2 Análisis Termogravimétrico

La Figura 10 (a) muestra las curvas de pérdida de masa con respecto al tiempo (Termogramas -TGA), de raquis de maíz blanco para las tres tasas de calentamiento evaluadas. A partir de las curvas TGA, se construyó una curva de termogravimetría diferencial (DTG), derivando el porcentaje de pérdida de masa con respecto al tiempo (Figura 10(b)).

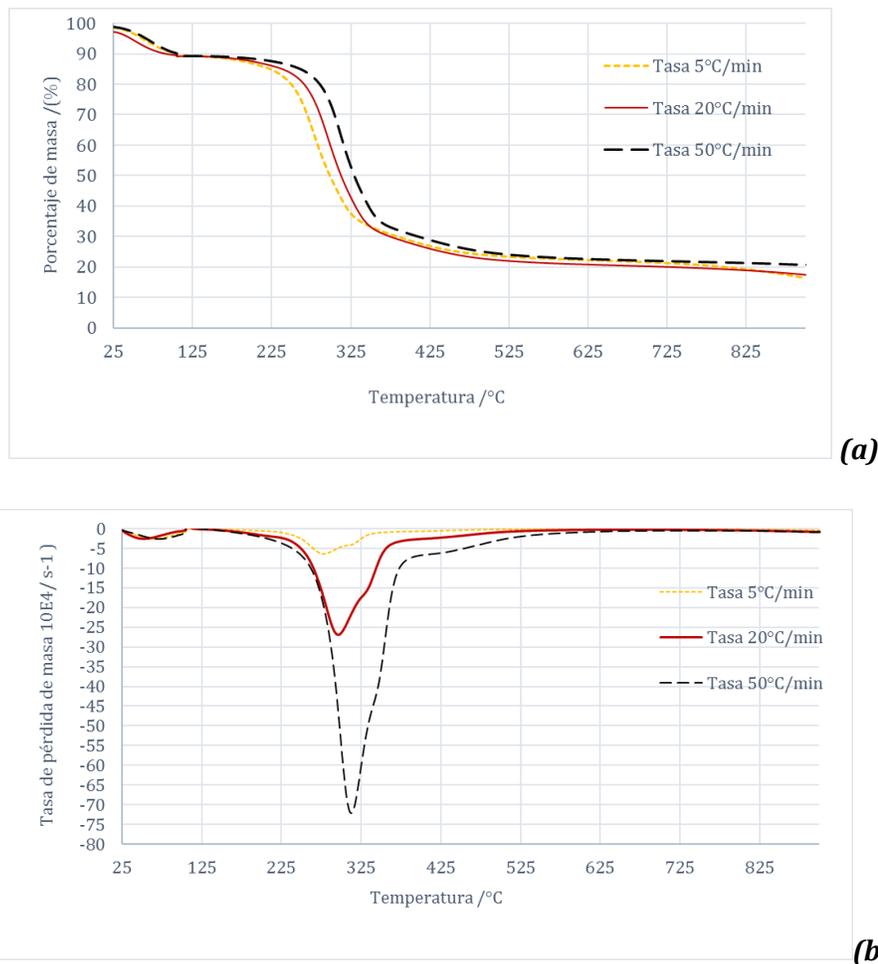


Figura 11. (a) Curva TGA y (b) Curva DTG para para descomposición térmica de raquis de maíz blanco a 5°min⁻¹, 20°C min⁻¹ y 50°C-1

En la Tabla 8 se enumeraron las etapas definidas de pérdida de masa, donde se especifica T_r como el rango de degradación de cada etapa (°C), T_m , como la temperatura de mayor pérdida

de masa ($^{\circ}\text{C}$), DTG_{max} , la máxima derivada de pérdida de masa en cada etapa ($\%/s$), y PM, al porcentaje de mayor pérdida de masa durante cada etapa.

Tabla 8. Parámetros de degradación térmica de raquis de maíz blanco

	$\beta(\text{min}^{-1})$	Rango ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	DTG_{max}	PM (%)
Etapa I	5	25 - 110.25	68.50	-2.55	6.03
	20	25 - 105	52.17	-2.56	5.78
	50	25 - 112.5	73	-2.60	6.04
Etapa II	5	130.42 - 520.74	277.83	-6.39	35.93
	20	120.33 - 534.67	297.33	-26.85	38.66
	50	138.33 - 550	313.33	-72.07	37.60

T_r : Rango de temperatura Inicial y final de la región de degradación, DTG_m : Máxima velocidad de pérdida de masa, T_m : Temperatura de máxima pérdida de masa, PM:% Pérdida de masa por intervalo

En las curvas TG se observó un comportamiento de degradación similar para las tres velocidades de calentamiento evaluadas. Los picos de DTG_{max} de la Figura 11b, incrementaron a medida que aumentó la velocidad, y se situaron en zonas de temperatura mayores (desplazamiento leve de los picos a la derecha). Autores como Mohammed et al., (2012) [73] observaron este mismo fenómeno para residuos de la industria de aceite de palma, asociándolo a que un incremento en la velocidad de calentamiento disminuye el tiempo de reacción, generando que las temperaturas de degradación sean mayores. Así mismo, este incremento de la velocidad de calentamiento pudo generar un mayor gradiente de temperatura entre la superficie y el interior de las partículas de biomasa, lo que genera limitaciones en la transferencia de calor y un mayor tiempo para alcanzar el equilibrio entre la temperatura de gas (N_2) y la biomasa, y por lo tanto mayores picos de degradación [74]. Por otro lado, autores como Volli et al., (2014) [75] y Niu et al., (2017) [46] indicaron que a mayor velocidad de calentamiento, hay una liberación más rápida de volátiles y una menor distribución de calor a nivel molecular, que genera una mayor estabilidad térmica, es decir, mayor resistencia de la biomasa frente a los cambios físicos a medida que cambia la temperatura[48].

Para iniciar con la descripción y análisis de cada etapa, se asumió que la biomasa está compuesta por agua y los pseudocomponentes hemicelulosa, celulosa y lignina que reaccionaron de forma independiente. Se observaron dos etapas definidas de degradación térmica. La primera etapa de degradación ocurre en un rango de temperatura de 25 a 112.5°C para las tres tasas de calentamiento. Esta primera fase está asociada a la pérdida de humedad y volátiles ligeros de las muestras y correspondió una pérdida de menos del 10% de masa del material [76].

La segunda etapa estuvo entre 133°C y 600°C. Esta etapa fue atribuida a la degradación térmica de hemicelulosa y celulosa, a la formación de carbonizado resultante de reacciones exotérmicas y formación de volátiles durante la pirólisis [30], [73], [76], [77]. Aunque no es posible diferenciar claramente la degradación independiente de hemicelulosa y celulosa y es común que los picos observados en la curva DTG para estos pseudocomponentes, tiendan a superponerse [30], [73], [78], [79]. Autores como Aboyade et al., (2011)[76] y Mohammed et al., (2012)[73] han evidenciado que la degradación de hemicelulosa se da a temperatura menor que la celulosa, en rangos de temperatura de 160 -360 °C. Los valores de DTG_{max} para la segunda etapa corresponden a temperaturas máximas de 277.83, 297.33 y 313.33°C para cada tasa de calentamiento respectivamente y pueden ser asociados a la degradación de celulosa teniendo en cuenta que su degradación se da en rangos de temperatura de 240 - 390°C [76].

No es posible ver claramente otra etapa de degradación durante el análisis del raquis de maíz blanco. Aunque autores como Zhou et al., (2014) [45] y López et al., (2013) [77] reportan la presencia de una tercera etapa asociada a la degradación de lignina y oxidación de carbonizado a temperaturas entre 420°C y 700°C aproximadamente. La falta de claridad en los picos de degradación observados en la curva DTG es atribuida a la descomposición de los pseudocomponentes de forma simultánea generando la unión de picos adyacentes como el de la celulosa y hemicelulosa) [73].

5.1.3 Análisis de parámetros cinéticos

Los valores de energía de activación y el coeficiente de correlación de mínimos cuadrados (R^2) obtenido se muestran en la Tabla 9 para cada método de análisis utilizado. Según los modelos de FWO, KAS y Starink se realizaron las regresiones lineales representadas en la Figura 12.

Tabla 9. Energía de activación estimada para la combustión de raquis de maíz blanco mediante el método de FWO, KAS y Starink.

α (%) conversión)	FWO			KAS			Starink		
	Pendiente	E (kJ/mol)	R^2	Pendiente	E (kJ/mol)	R^2	Pendiente	E (kJ/mol)	R^2
20	-8.81	162.06	0.995	-19.45	161.74	0.995	-19.56	162.02	0.995
30	-9.55	173.73	0.997	-20.88	173.63	0.996	-20.99	173.91	0.996
40	-10.32	187.82	0.996	-22.64	188.27	0.996	-22.76	188.51	0.996
50	-11.37	206.89	0.996	-25.04	208.16	0.996	-25.15	208.35	0.996
60	-13.28	241.64	0.995	-29.41	244.54	0.995	-29.53	244.61	0.995
70	-16.24	295.46	0.996	-36.20	300.93	0.995	-36.32	300.82	0.995

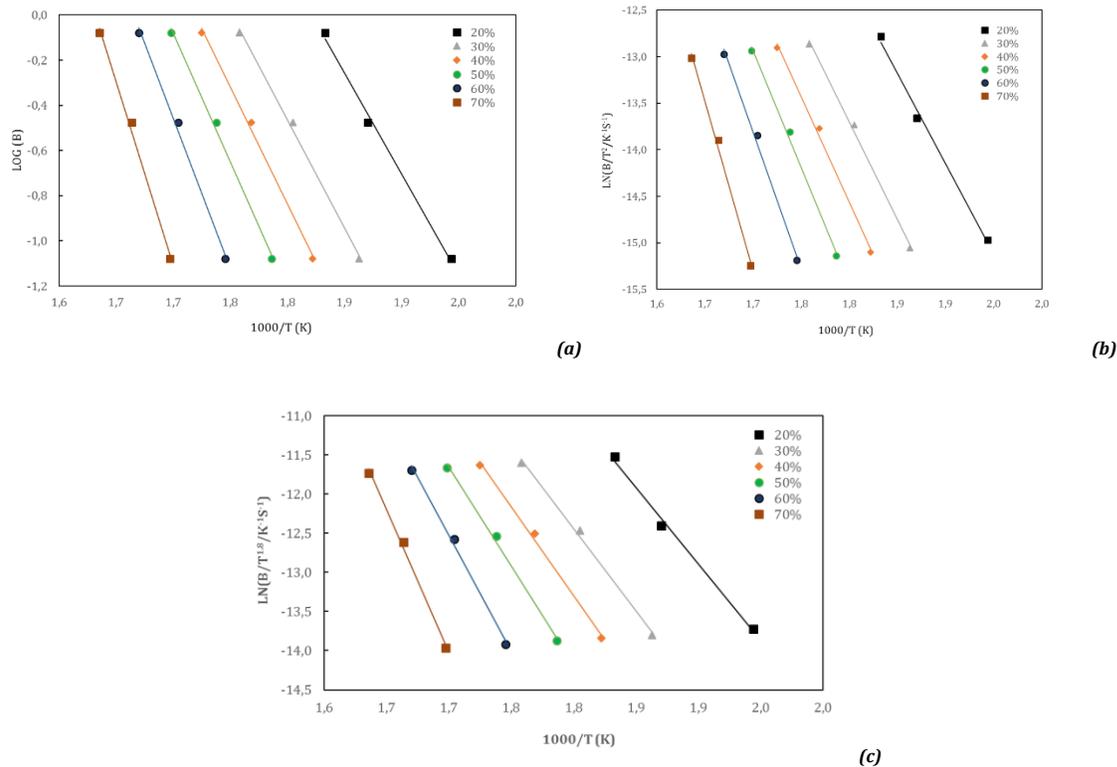


Figura 12. Regresión Lineal para la Energía aparente de activación según el modelo de FWO (a), KAS (b) y Starink (c) para el raquis de maíz blanco a tasas de calentamiento de ($\beta = 5^\circ\text{C min}^{-1}$, $10^\circ\text{C min}^{-1}$ y $50^\circ\text{C min}^{-1}$).

La selección de los niveles de conversión α , se hizo entre el rango de 20 y 90% debido a que valores fuera de este rango, están asociados con la generación de errores experimentales [46],[75]. La tendencia lineal indicó que la degradación de la biomasa estudiada sigue el mismo mecanismo durante las tasas de calentamiento aplicadas en este estudio. Se presentaron mayores valores de energía de activación a medida que el porcentaje de conversión aumentaba, con valores desde $162.06 \text{ kJmol}^{-1}$ a $295.46 \text{ kJmol}^{-1}$, $161.74 \text{ kJmol}^{-1}$ a $300.93 \text{ kJmol}^{-1}$ y $162.02 \text{ kJmol}^{-1}$ a $300.82 \text{ kJmol}^{-1}$ para los métodos de FWO, KAS y Starink respectivamente (ver Tabla 9.) con coeficientes de correlación $R^2 > 0,99$ para todos los métodos.

La energía de activación representa la energía mínima necesaria para romper los enlaces entre átomos y dar inicio a una reacción. Autores como Leng et al., (2015) [50] han usado los valores de energía de activación como indicador del retardo en la ignición de un combustible. Se han considerado dos etapas de retardo de ignición, una conocida como el retardo físico (a valores iniciales de conversión α), y otra conocida como retardo químico (a

valores altos de conversión α). En la Figura 13 se realizó la comparación de los valores de energía de activación obtenidos por el método de FWO para los raquis de maíz, y los valores obtenidos para el diésel en el estudio de Leng et al., (2015) [50] bajo el mismo método. Se observó que, los valores de energía de activación obtenidos para el proceso de degradación térmica de raquis de maíz aumentaron con el porcentaje de conversión, es decir que, el retardo químico de la ignición es mayor que el retardo físico, de lo que se puede inferir que se requiere más energía a medida que avanza la degradación del material. Un efecto contrario se observó para el diésel, donde el retardo físico fue mayor que el retardo químico, indicando que se requiere un poco más de energía en la etapa de pre-ignición.

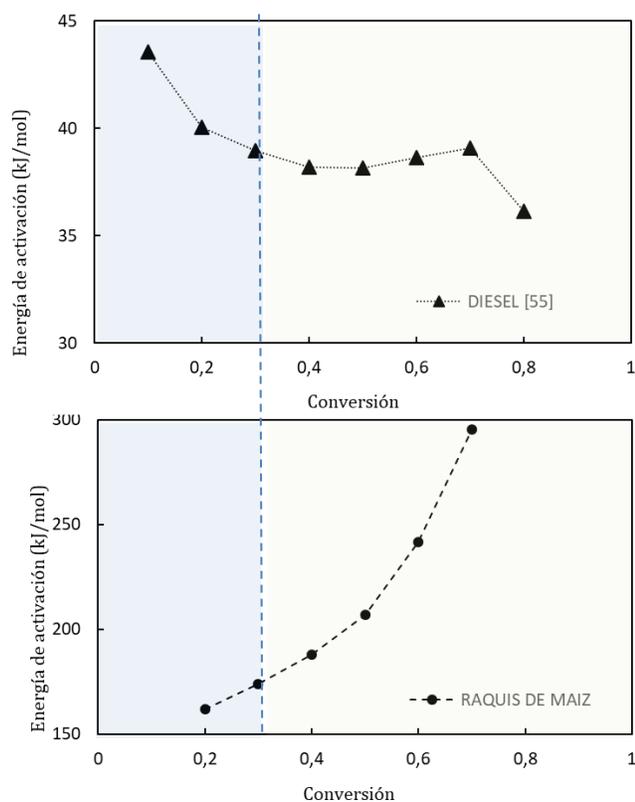


Figura 13. Valores de energía de activación para el raquis de maíz en comparación con el diésel [50] calculados por el método de FWO a diferentes niveles de conversión α .

Aunque los valores de energía de activación obtenidos para el raquis de maíz, se encuentran alejados de los del diésel con valores entre 30 y 45 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Estos son comparables con valores obtenidos bajo los mismos métodos para residuos como la paja de maíz (98.71

kJmol^{-1} y $148.06 \text{ kJmol}^{-1}$) [12] o para lodos papeleros (188 kJmol^{-1} y 257 kJmol^{-1}) [51]. Sin embargo, son significativamente mayores en comparación con residuos de industria de palma como los evaluados por Mohammed et al., (2012) [73], con valores entre 40.06 kJmol^{-1} y 73.76 kJmol^{-1} o de especies herbáceas como el Cardo, evaluado por Damartziz et al., (2011) [43], con valores entre 51.9 kJmol^{-1} y 150 kJmol^{-1} . La mayor energía de activación obtenida para los raquis de maíz blanco con respecto a otros tipos de residuos le confiere características de menor calidad para la combustión (mayor tiempo de encendido) [50].

5.2 FASE II: Gasificación de biomasa- Efecto de tamaño de partícula y carga eléctrica demandada.

En esta sección se analizan los resultados obtenidos para la gasificación de raquis de maíz blanco. Los resultados se dividieron en dos etapas: la primera correspondió al acondicionamiento de la biomasa y la segunda a los resultados del diseño experimental planteado.

5.2.1 Acondicionamiento de Biomasa

Se acondicionó una cantidad de alrededor de 2.8 toneladas de biomasa con humedad entre el 40 y 60% con el fin de cumplir con los requisitos exigidos por el diseño experimental. La Figura 14 ilustra las actividades de acondicionamiento realizadas.



Figura 14. Etapas de acondicionamiento de biomasa para el proceso de gasificación de raquis de maíz blanco.

Para la reducción de tamaño de la muestra se utilizaron dos técnicas. La primera, consistió en el uso exclusivo de un procesador industrial Trapp Tr200. La segunda consideró herramienta de corte manual para disminuir la pérdida de material. La Figura 15 muestra las fracciones obtenidas durante el proceso de reducción del tamaño de partícula de biomasa con las dos técnicas. La fracción 1 corresponde a tamaños de partícula de 2 a 4 cm, la fracción 2 a partículas con un tamaño inferior a 1 cm. Como se observa en la Figura 15, la técnica manual permitió reducir la producción de finos y por lo tanto aprovechar una mayor cantidad del residuo disponible. A partir de estos resultados, se toma la decisión de realizar el acondicionamiento mediante la técnica manual para evitar la pérdida de material durante su molienda.

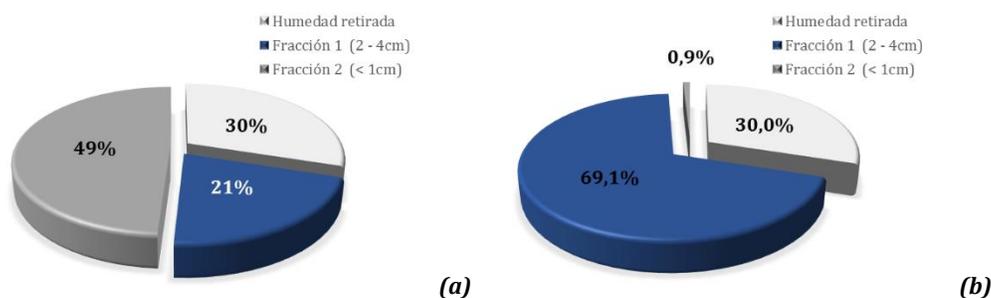


Figura 15. Fracciones obtenidas durante el proceso de reducción de partícula de biomasa (a) uso exclusivo de procesador industrial Trapp Tr200 (b) reducción de partícula mediante herramienta de corte manual.

5.2.2 Diseño experimental

El diseño experimental, resultó en el planteamiento de 18 experimentos con dos factores: cantidad de finos en la mezcla de biomasa (A) (Niveles: 0% -15%) y carga eléctrica demandada (B) (Niveles: 4 kWe, 8 kWe y 12 kWe) (Tabla 10).

Tabla 10. Datos experimentales para las respuestas obtenidas en la gasificación de raquis de maíz blanco.

No.	Factor A (Porcentaje de finos en mezcla de biomasa)	Factor B (Carga eléctrica kWe)	Área bajo la curva de variable: Flujo de gas (m ³ /h)	Área bajo la curva de variable: Temperatura (°C)	Consumo de biomasa (Kg/h)	Consumo específico de biomasa (Kg/kWe)	Eficiencia de gas frío (%)
1	0	4	105105.75	4559960.5	10.996	2.74	21.45
2	0	4	89815.03	4586846.5	8.777	2.21	22.89
3	0	4	104432.66	4608443.5	10.491	2.59	22.27
4	0	8	118680.15	4845841.5	15.206	2.72	26.38
5	0	8	117424.21	4823879.5	15.295	2.83	25.93
6	0	8	117120.58	4822103.5	15.295	2.78	25.84
7	0	12	124616.57	4934569.0	15.276	1.90	34.52
8	0	12	131682.60	4927109.5	18.447	2.46	30.26
9	0	12	128299.18	4925199.5	15.147	1.92	35.86
10	15	4	118464.55	4617737.0	12.282	3.00	29.07
11	15	4	139156.57	4647860.5	15.703	3.93	26.84
12	15	4	163348.87	4618714.0	14.906	3.64	33.22
13	15	8	127362.45	4813444.0	17.429	2.49	28.66
14	15	8	104180.56	4886586.5	12.451	1.75	32.82
15	15	8	131569.38	4896892.0	18.427	2.63	27.99

16	15	12	136026.97	5523140.5	18.039	2.10	37.60
17	15	12	123929.49	5387194.0	17.041	2.10	36.28
18	15	12	141509.01	5296810.5	18.906	2.00	37.37

Los resultados de la prueba de normalidad de residuales se muestran en la Tabla 11. Se observa que los datos presentan una distribución normal según la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) para todas las variables de respuesta.

Tabla 11. Resumen de pruebas de normalidad de datos que se llevó a cabo en el software SAS 9.4®,

Variable	Unidades	Abreviatura	Prueba de Shapiro- Wilk	
			Estadístico W	Valor de P (Pr < W)
Flujo de Gas	m ³ /h	RFLU	0.978	0.9240
Temperatura de gasificación	°C	RTEM	0.922	0.1415
Consumo de Biomasa (ΔC_b)	kg/h	RCB	0.924	0.1550
Consumo Específico de Biomasa	kg/kWe	RCEB	0.923	0.1471
Eficiencia de gas frío	%	REF	0.9420	0.3138

Acorde a un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0,05$), el p-value asociado a las variables estudiadas, indicó que sí hay efecto estadísticamente significativo del porcentaje de finos en la mezcla (A) y/o por la carga conectada al dispositivo (B) sobre esas variables de respuesta (Detalle del ANOVA en Tabla 18 del Anexo B). La Tabla 12 muestra los modelos obtenidos para cada variable, obtenidos de la evaluación de los efectos lineales y/o cuadráticos causados por A y/o B, y sus interacciones (Detalle en Tabla 19. del Anexo B). Los resultados indicaron que los modelos obtenidos en este estudio describen adecuadamente el efecto de A y B sobre las variables de temperatura de biomasa (RTEM), consumo específico de biomasa (RCEB) y eficiencia de gas frío (REF) con $R^2 > 0.8$ teniendo en cuenta que se trabajó con un material biológico altamente heterogéneo y experimentos con diversas fuentes de variación. Los efectos sobre cada variable estudiada son descritos a continuación:

Tabla 12. Modelos estadísticos para las variables de respuesta evaluadas, coeficiente de correlación R^2 obtenidos en el software SAS 9.4®,

Variable	Modelo estadístico	R-Cuadrado
----------	--------------------	------------

RFLU (índice: área bajo la curva)	$R_{FLU} = 115242 + 1532.48A - 54.18AB$	0.7472
RTEM (índice: área bajo la curva)	$R_{TEM} = 4437675 + 16806A + 42984B - 6386.79AB + 623.34B^2A$	0.9765*
RCB	$R_{CB} = 8.93 + 0.15A + 0.62B$	0.7587
RCEB	$R_{CB} = 3.19 - 0.09B + 0.007AB - 0.0007B^2A$	0.8650*
REF	$R_{EF} = 15.92 + 1.42B + 0.59A - 0.03B^2$	0.8956**

Significante al 5%. A: Contenido de finos en la mezcla de biomasa, B: Carga eléctrica demandada

El área bajo la curva para la respuesta de *temperatura de gasificación* (RTEM) fue mayor para el tratamiento 6 (A:15%, B: 12kWe). De igual forma, los perfiles de temperatura para cada tratamiento (Figura 15) muestran que la temperatura aumentó para los tratamientos con 15% de finos en la mezcla, manteniéndose en un rango de 350 y 815°C. De lo anterior, se puede inferir que el contenido de finos en la biomasa puede favorecer en cierta medida el incremento de temperatura. Autores como Patel et al, (2014)[80] encontraron resultados similares para el lignito donde la presencia de partículas de menor tamaño generaban el incremento de temperatura por el aumento del área de superficie, generando mayor reactividad con el oxígeno durante la gasificación. Por otro lado, es posible decir que, aunque la presencia de partículas finas en la biomasa tiene un efecto positivo sobre la temperatura de gasificación, éstas no ocasionan la formación evidente de clinkers, resultado de la fusión de cenizas y pequeñas partículas de carbonizado a elevadas temperaturas de combustión, y que son favorecidas cuando la biomasa está compuesta exclusivamente por partículas finas. Lo anterior se puede ver en el perfil de temperatura presentado en la Figura 16, donde no se presentan reducciones drásticas de temperatura para los tratamientos con contenido de finos, en comparación con los otros tratamientos [10].

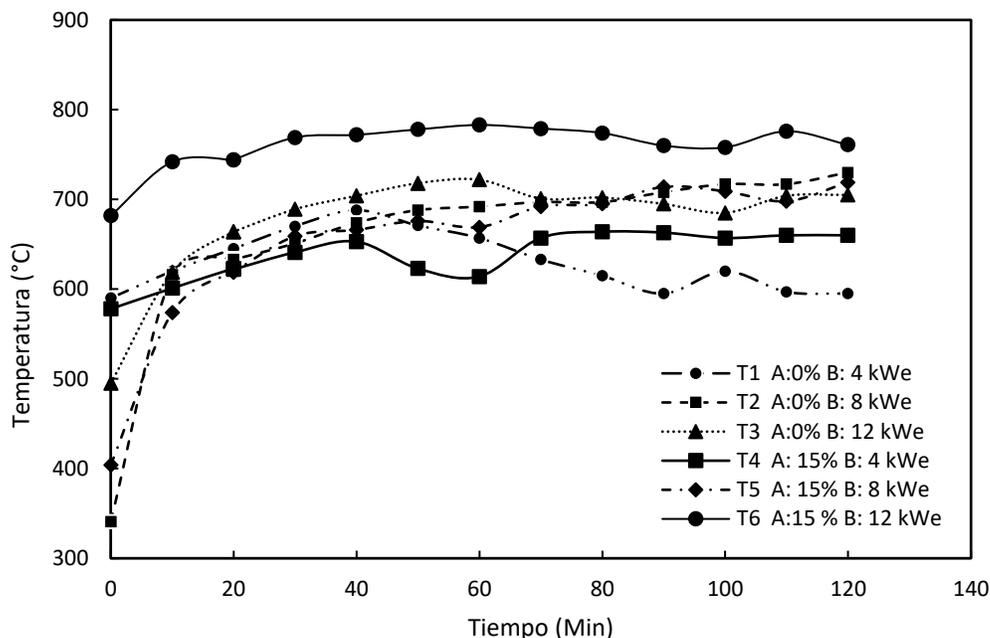


Figura 16 Perfil de temperatura para la gasificación de mezclas de raquis de maíz y diferentes cargas resistivas. A: % de finos contenido en la mezcla de biomasa, B: Carga resistiva conectada al dispositivo.

De igual forma, para la variable de *flujo de gas (RFLU)*, el tratamiento que mayor área bajo la curva presentó fue el tratamiento 6 con A: 15% y B:12 kWe, manteniéndose en un rango de 10 y 22.5 m³/h. Se evidenció una variación significativa en los datos obtenidos para esta variable al interior de cada tratamiento, que se puede atribuir a taponamientos en la zona de combustión de la biomasa, que pudieron inhibir el flujo de gas durante la operación. Autores como Biagini et al, (2015) [4], encontraron que la disminución del flujo de gas puede atribuirse a factores como la estructura del lecho, permeabilidad, y a caídas de presión que generan alteraciones en el flujo de gas. Por otro lado, autores como Ramzan et al., (2011) [58] asocian la disminución de temperatura con la menor producción de gas, ya que a bajas temperaturas el carbono no reacciona completamente disminuyendo la velocidad de conversión y consecuentemente la producción de gas. Estos resultados coinciden con los resultados obtenidos en el presente estudio, donde el perfil de mayor temperatura fue observado para el tratamiento con mayor contenido de finos y mayor carga y se vio reflejado en el incremento del flujo de gas producido en el proceso.

El *consumo de biomasa (RCB)* estuvo entre 8.77 y 18.906 kg/h indicando mayor consumo con A:15% y B:12kWe. Esto se debe según Pérez et al., (2012) [10] y Patel et al., (2014) [80] a que

una reducción del tamaño de partícula, representa el aumento de la superficie efectiva de reacción favoreciendo la transferencia de masa y calor ocasionando mayor consumo de biomasa. Por otro lado, según se muestra en la Figura 17, el *consumo específico de biomasa (RCEB)* varió entre 1.75 y 3.92 kg/kWe h presentando valores menores para los tratamientos con (A: 15%), lo que indica que hay un efecto positivo de A sobre el consumo específico de biomasa. Este comportamiento se puede asociar en parte a que la densidad de la mezcla combustible con contenido de finos es mayor (226.1 kg/m^3), es decir que hay una mayor inyección de masa hacia el motor para el mismo volumen de gas, en comparación con la biomasa sin contenido de finos (A:0%), lo que se ve representado en mayor consumo de biomasa (kg/h) [54]. Por otro lado, se puede apreciar que la tendencia del consumo específico de biomasa es inversamente proporcional a la carga aplicada lo que coincide con resultados obtenidos por estudios realizados previamente, donde se observa que a medida que aumenta la carga resistiva, el valor del consumo específico de la biomasa se acerca más a valores obtenidos para el diésel en motores de combustión interna ($0.3\text{-}0.5 \text{ kg/kWe h}$ para cargas entre 2 y 5 kWe h) [81],[54].

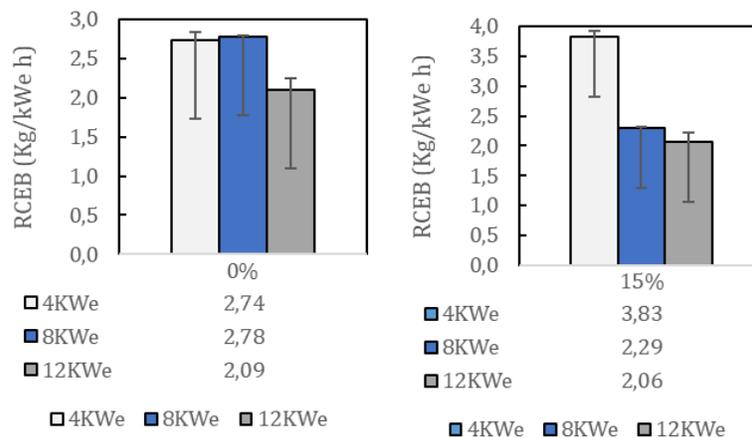


Figura 17. Comportamiento del consumo específico de biomasa (RCEB) vs la carga aplicada para las mezclas con 0% y 15% de contenido de finos respectivamente.

El análisis realizado anteriormente para las variables de: temperatura de gasificación (RTEM), flujo de gas (RFLU), consumo de biomasa (RCB) y consumo específico de biomasa (RCEB) se vio reflejado en los resultados obtenidos para la composición de gas de síntesis generado por tratamiento (ver Figura 18). Se observó que el tratamiento 6 (A:15%, B: 12kWe)

con el mayor perfil de temperatura alcanzado y los menores valores para el consumo específico de biomasa, generó las mayores concentraciones de H₂ y CO (16.80 y 16.67% respectivamente) con un poder calorífico de 5.06 MJ/kg.

Lo anterior se puede asociar a que, a medida que la temperatura incrementa, el carbono que no ha reaccionado, se convierte en monóxido acorde a la reacción de Boudouard y el metano presente en el gas se convierte en hidrógeno por reacción de metanación, lo que se ve representado en aumento de la concentración de estas especies en el gas de síntesis [58]. Dichos resultados concuerdan con estudios realizados por Arun et al., (2016) [26] y Chaurasia et al., (2016)[82], quienes evaluaron la influencia de la temperatura de reacción sobre la gasificación de raquis de maíz blanco y cascarilla de arroz respectivamente. Los autores reportaron que a medida que incrementaba la temperatura, se observaba un incremento en el contenido de H₂ y CO para los raquis de maíz blanco y de CO para la cascarilla de arroz.

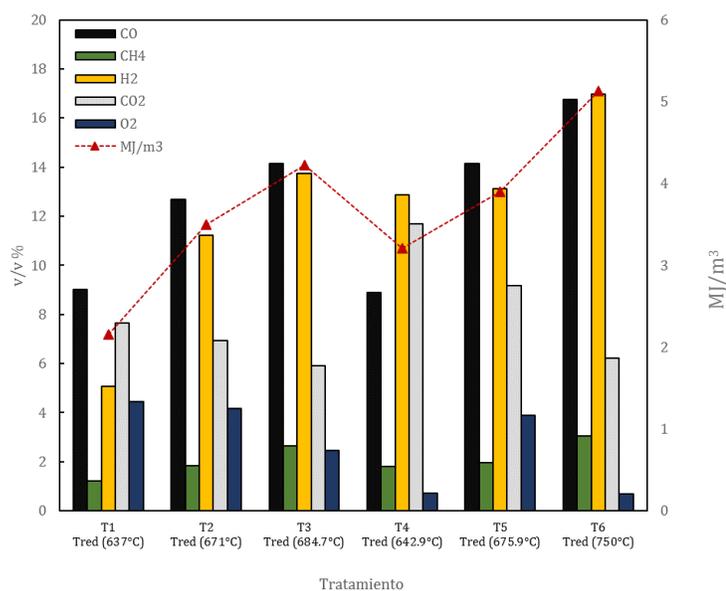


Figura 18. Composición de Gas de síntesis producido en la gasificación de raquis de maíz blanco para cada uno de los tratamientos y su poder calorífico inferior LHV (MJ/ m³). Tratamientos (% de gruesos – carga demandada): T1: (0% - 4kWe) T2: (0%-8kWe) T3: (0%-12kWe), T4: (15%-4kWe), T5 (15%-8 kWe), T6 (15%-12 kWe). Tred: Temperatura promedio en cada uno de los tratamientos.

El aumento de las especies de H₂ y CO presentes en el gas de síntesis generado con 15% de finos y la mayor carga resistiva, se vio reflejado en el mayor poder calorífico y por lo tanto un incremento en la eficiencia de gas frío[80]. La Figura 19 muestra el efecto lineal tanto del

contenido de finos en la mezcla como de la carga sobre la *eficiencia de gas frío(REF)*, donde se evidencia un incremento del 17.33% y el 0.33% en la variable REF pasando de la carga de 4 kWe a la carga de 8 kWe para las muestras con A: 0% de finos y A:15% de finos respectivamente. De igual forma, se observa un posterior incremento del 28.77% y 24.34% para las mismas muestras respectivamente, pasando de la carga de 8 kWe a la carga de 12 kWe. Esto indica una tendencia de mayor aumento de la eficiencia a medida que aumenta la carga resistiva o a medida que se acerca a la capacidad nominal del equipo de gasificación correspondiente a 18kW. Este efecto se atribuye según Rigotte et al., (2017) [54] a que se generan menores pérdidas de calor y un incremento de la potencia generada.

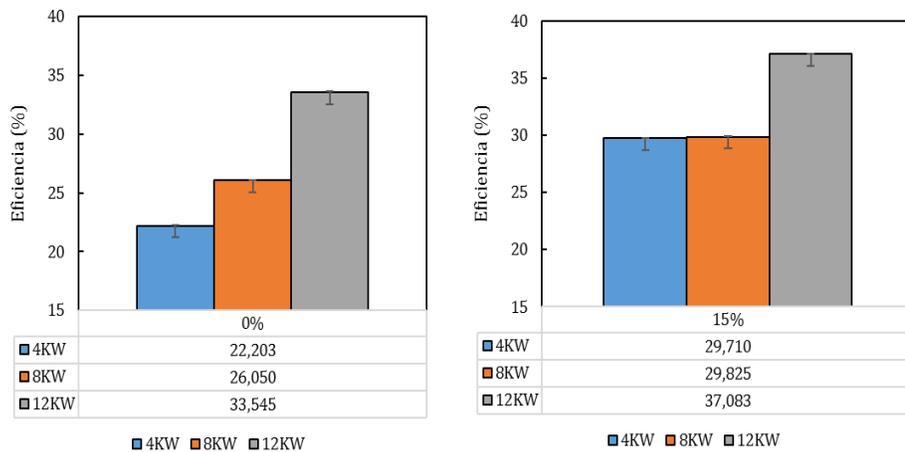


Figura 19. Comportamiento de la eficiencia de gas frío(REF) vs la carga aplicada para las mezclas con 0% y 15% de contenido de finos respectivamente

En este capítulo se estudió el efecto del contenido de finos en la biomasa, y la carga eléctrica demandada sobre las variables de temperatura, flujo de gas, consumo de biomasa, consumo específico de biomasa y eficiencia de gas frío. Los resultados revelaron que un contenido de finos del 15% en la mezcla de biomasa genera mayores perfiles de temperatura, representados en mayores concentraciones de H_2 y CO en el gas de síntesis, incrementando su poder calorífico. Además, la mezcla con contenido de 15% de finos, puede generar una mayor inyección de gas hacia el motor y un aumento de la superficie efectiva de reacción favoreciendo la transferencia de masa y calor y por tanto un incremento en el consumo de biomasa. Así mismo, se puede decir que la eficiencia del proceso de gasificación se incrementa a medida que la carga resistiva conectada a dispositivo se acerca a la capacidad nominal del equipo de gasificación.

5.3 FASE III: Diseño conceptual de planta de gasificación

A partir de los resultados obtenidos en la Fase I y II, se establecieron las condiciones iniciales para el diseño conceptual de la planta de gasificación de raquis de maíz blanco descritas en la Tabla 12.

Tabla 13. Condiciones iniciales para el diseño de la planta de gasificación de raquis de maíz blanco.

Variable	
Flujo biomasa acondicionada	18 kg/h
Humedad Relativa Biomasa	14%
Distribución de tamaño de partícula	
1- 4 cm	0.85
>1 cm	0.15
Temperatura de gasificación	750°C

5.3.1 Descripción de la simulación

El sistema de gasificación contempló 3 etapas globales: Acondicionamiento de biomasa, gasificación de biomasa y generación de potencia (Ver Figura 20). La primera etapa comprendió un secado primario y molienda de la biomasa antes de ingreso al reactor de gasificación:

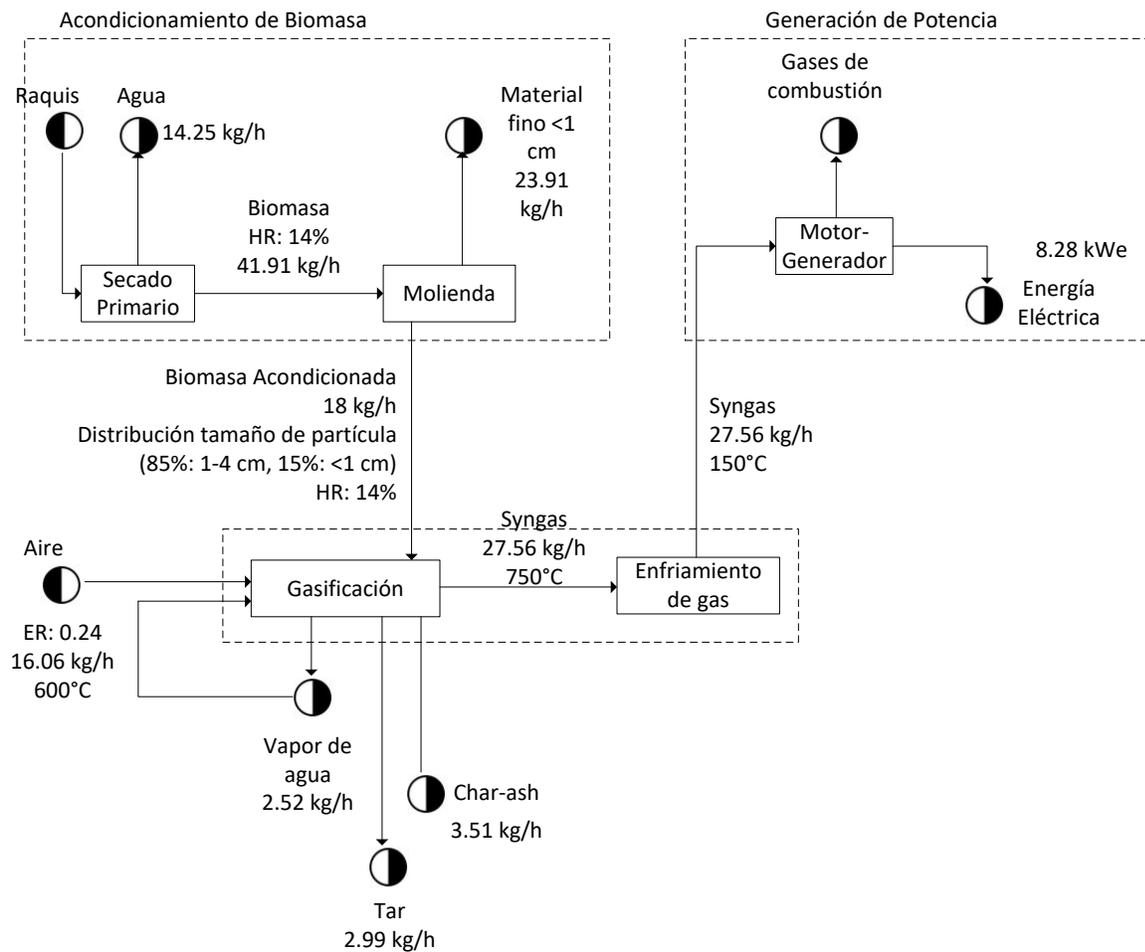


Figura 20. Diagrama de bloques y balance de masa (Planta de gasificación de biomasa). Desarrollado en Software Visio ®

Acondicionamiento:

Para el acondicionamiento de la biomasa se realizó una primera fase de secado, que correspondió a la disminución de la humedad del material recolectado (Humedad promedio inicial: 52%) a las condiciones de humedad promedio utilizadas en la Fase II: 14%. Se asumió un secado natural en invernadero a temperaturas promedio de 38°C (Este bloque no fue simulado en Aspen). En segundo lugar, se consideró una fase de molienda representada por un bloque de trituración *CRUSHER* para disminuir el tamaño de partícula de la biomasa a tamaños de 1-4 cm.

Para la etapa de molienda se consideró un flujo de biomasa de 34,41 kg/h con un tamaño de partícula entre 7 y 10 cm (tamaño de partícula inicial) y humedad del 14%. Una vez se redujo el tamaño de partícula, la biomasa pasó por un bloque de tamizado *SCREEN* para remover los finos contenidos en el material pasando por un tamiz de ½ pulgada.

La segunda etapa, correspondió al proceso de gasificación de biomasa. Esta etapa comprendió un primer bloque donde se llevó a cabo un secado secundario de la biomasa al interior de la tolva del gasificador. En segundo lugar, se incorporó un bloque de remoción de alquitrán para la eliminación del porcentaje en masa que no sería considerado en el diseño. Seguido de un bloque de devolatilización o descomposición de la biomasa en sus elementos constituyentes para ingresar al cuarto y último bloque de esta etapa, correspondiente al reactor de gasificación de biomasa:

Secado secundario:

Para simular el proceso de secado de la biomasa dentro de la tolva del gasificador, se utilizó un bloque *RStoic (DRY-REAC)* con una instrucción en FORTRAN a través de un bloque de cálculo cuya función fue especificar la humedad contenida en la biomasa seca (DRY-BIOMASS) y calcular la conversión correspondiente de biomasa en agua descrita por la Ecuación 15. Seguido, se incorporó un bloque de separación *Flash2 (DRYFLSH)* para eliminar el vapor de agua (STEAM) de los demás componentes de la biomasa. El vapor de agua retirado fue incorporado nuevamente al reactor de gasificación. La biomasa ingresó con un contenido de humedad del 14%.

$$CONV = \frac{(H2OIN - H2OOUT)}{(100 - H2OOUT)} \quad (15)$$

Remoción de alquitrán:

Se retiró el equivalente en alquitranes que no reaccionarían para formación de gas de síntesis (20% p/p de la biomasa) [56] mediante un bloque tipo *SEP (TARLESS)* y un bloque de cálculo programado en Fortran con la especificación mencionada en la Ecuación 16, donde se expresa el contenido de alquitrán como el 20% de la fracción en peso diferente de cenizas, nitrógeno y azufre.

$$TAR = DRYBIO * 0.2 * (1 - (ULT(1) + ULT(4) + ULT(6)) / 100) \quad (16)$$

Donde *TAR* es la cantidad de masa que se remueve de la corriente acondicionada (*DRYBIO*). Y los términos *ULT(1)*, *ULT(4)* y *ULT(6)* corresponden a las fracciones máscas de cenizas, nitrógeno y azufre respectivamente, obtenidas del análisis último de la biomasa.

Devolatilización:

La corriente de biomasa con la humedad especificada DRY-BIOMASS ingresa al reactor de devolatilización representado por un bloque ***RYield (DEVOL)*** que descompone el sólido no convencional en volátiles y Char-Ash. Los rendimientos finales de la materia volátil se determinaron construyendo un balance de masa en Excel® sobre los elementos carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y azufre (S) a partir de los datos de análisis próximo y último de la biomasa. Se obtiene la matriz de coeficientes que representa la materia volátil expresada como fracciones molares de biomasa, C, H, O, N, S y Char-Ash. Los rendimientos encontrados para cada componente se muestran en la Figura 21.

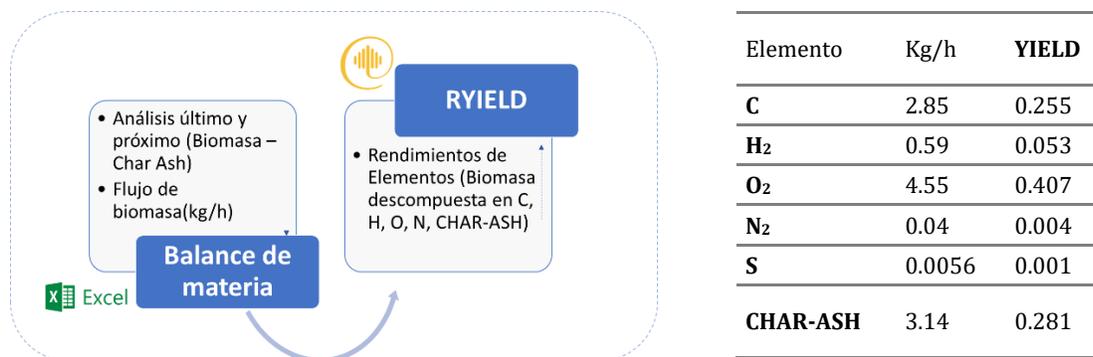


Figura 21. Rendimientos (YIELD) para cada componente en el bloque de Devolatilización (*DEVOL*)

El char-ash es separado de los componentes convencionales mediante un bloque ***Sep (SEP-CHAR)*** que simula la extracción del carbonizado o biomasa que no reacciona para convertirse en gas de síntesis.

Reactor de gasificación:

Se realizó la determinación de la independencia lineal de un arreglo estequiométrico de 7 reacciones que representan el proceso de gasificación. Seguido, se realizó un

procedimiento de reducción del arreglo mediante el comando *rref* en MATLAB® que produce una forma reducida escalonada por filas de la matriz usando la eliminación de Gauss- Jordan [83]. El arreglo de reacciones linealmente independientes obtenido fue utilizado para la construcción del bloque de gasificación donde se estableció una matriz de 4 reacciones linealmente independientes.

Los volátiles fueron introducidos a un reactor ***RGibbs (GASIFIER)*** junto con el vapor de agua obtenido en la etapa de secado y una corriente de aire (agente gasificante) a condiciones atmosféricas, definida por una relación de ER: 0.24 mediante una instrucción en FORTRAN para el cálculo del flujo de aire. El reactor calculó la composición de gas de síntesis minimizando la energía libre de Gibbs mediante un método de equilibrio en el bloque de RGIBBS definiendo los posibles productos de gasificación: (CO₂, C, O₂, CO, H₂, H₂O, CH₄, N₂, S) [84], [58], [7].

Posteriormente el gas de síntesis pasó por proceso de enfriamiento antes de su paso por el motor de combustión interna, simulada a través de un ***cooler (COOLING)*** para el enfriamiento del gas a temperatura de 150°C con el fin de reducir la energía consumida por el compresor y aumentar la densidad de energía del gas, representado en mayor potencia generada [41].

La tercera y última etapa correspondió a simulación del motor de combustión interna. Esta etapa se realizó mediante el conjunto de 4 procesos que representan el comportamiento de un ciclo de Otto: compresión isentrópica, expansión isentrópica y enfriamiento a volumen constante [41].

Motor

Una vez el gas ha sido enfriado y liberado de impurezas, se combina con aire e ingresa a un compresor (***COMP***) que eleva la presión lo suficiente para que pueda ingresar a una cámara de combustión representada por un RGIBBS (***COMB***), y pueda ser quemado. Los gases de escape se expanden en una turbina isentrópica que trabaja adiabáticamente (***TURB***) para la extracción del trabajo *W*, que representa la potencia generada en Watts.

Para el bloque de compresión (**COMP**), se realizó una especificación de diseño, para encontrar el valor de la presión que cumpla con la relación de compresión de un motor de combustión interna referencia GM- PSI. La eficiencia mecánica del bloque de expansión (**TURB**) se fijó en un 87% y la eficiencia isentrópica en 95% [85]. Las características del motor se enumeran en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros de motor de combustión interna utilizados en la simulación del ciclo de Otto.

Característica de motor	
Volumen	3.0 L POWER SOLUTION, INC [86]
Potencia	50 hp a 1800 rpm
Relación de compresión	9.25:1
Temperatura de combustión	1200 °C [41]
Presión de combustión	1 atm
Presión de descarga de la turbina	1 atm
Eficiencia Isentrópica de la turbina	95%
Eficiencia mecánica de la turbina	87%

La Figura 22 muestra el diagrama de flujo del modelo obtenido para la planta de gasificación de raquis de maíz blanco en Aspen Plus.

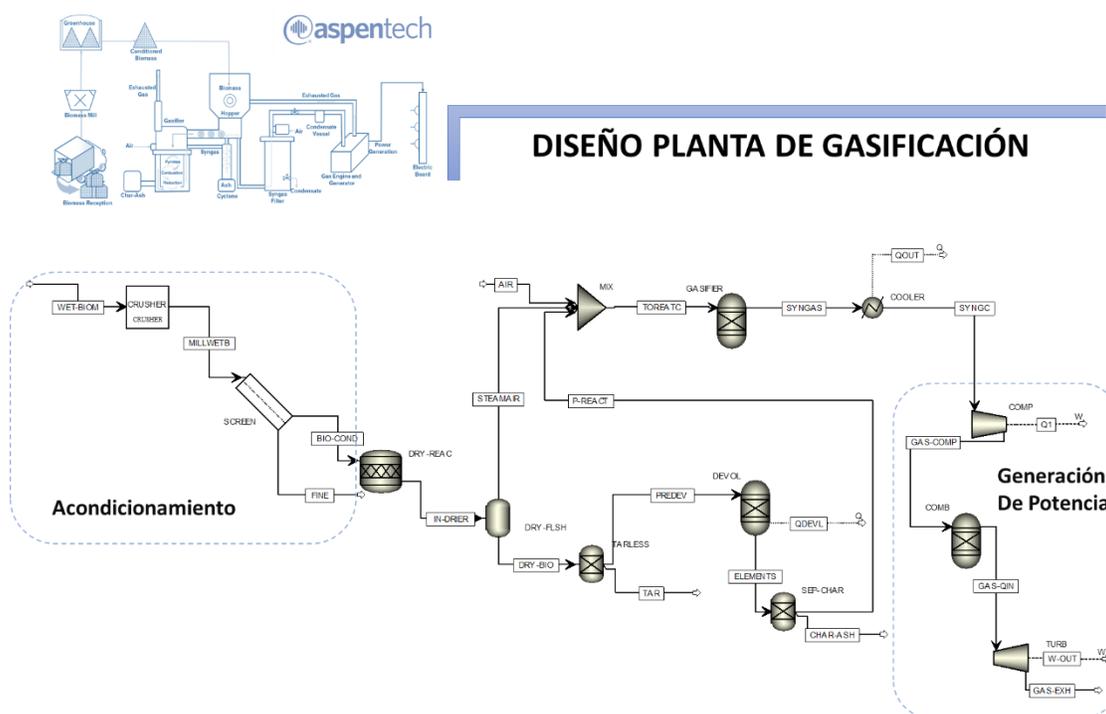


Figura 22. Diagrama de flujo de planta de gasificación de raquis de maíz blanco

5.3.2 Validación del Modelo:

La validación del modelo presentado se realizó a partir de datos experimentales obtenidos en la Fase II de este trabajo de investigación. La Figura 23 muestra la comparación de los datos experimentales y el modelo de simulación sobre la composición de gases y la potencia generada por el motor de combustión interna a temperatura de 750°C y ER: 0,24. Se observó que, el modelo desarrollado es capaz de representar los datos obtenidos experimentalmente y coincide con valores obtenidos por autores como Arun et al., (2016)[11] y Biagini et al., (2015) [70] para la gasificación de raquis de maíz blanco, con desviaciones del 1.3%, 3.7% y 0.6% para las concentraciones de CH_4 , CO e H_2 respectivamente. De lo anterior se puede inferir, que a pesar de que los modelos de equilibrio termodinámico presentan algunas limitaciones termodinámicas, estas limitaciones no se evidencian en plantas a pequeña escala donde los modelos como el presentado en este estudio, pueden representar adecuadamente los datos experimentales del proceso de gasificación [41],[60].

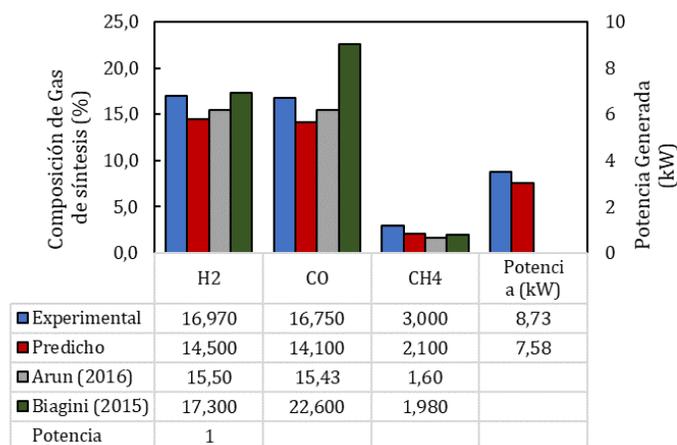


Figura 23. Composición de gas experimental y predicho (modelo). T: 750°C, ER:0.24

Se utilizó el modelo para predecir el efecto de algunos parámetros operativos sobre la composición del gas producido y la comparación con los efectos encontrados en la Fase II. Se realizó la variación de temperaturas y ER (Relación de equivalencia), evaluando su efecto sobre la concentración molar de H₂, CO y CH₄ y la potencia generada por un motor de combustión interna. La Figura 24 muestra los resultados de las concentraciones obtenidas a través de un análisis de sensibilidad con temperaturas entre 500 y 1000°C, flujo de alimentación de biomasa: 18 kg/h y ER: 0.24. Se observó una tendencia de incremento con la temperatura en las concentraciones de H₂ y CO₂, lo que coincide con los resultados experimentales obtenidos en la Fase II, donde se observa el mismo comportamiento. La Figura 25 muestra los resultados obtenidos a través de un análisis de sensibilidad variando los valores de ER entre 0.2 y 0.5, con flujo constante: 18 kg y temperatura de 800°C.

Por otro lado, se observó que a medida que realizó un incremento en el ER, disminuyeron las concentraciones de H₂, CO y CH₄, ya que un mayor contenido de oxígeno favorece la reacción de combustión completa (R1) generando mayor concentración de CO₂ y caídas en la concentración de CO. Mientras que, con valores menores de ER, se favorece la producción de CO a través de la reacción de Boudouard (R3) que se ve representado en el aumento del poder calorífico inferior del gas de síntesis (MJ/Nm³). Autores como Damartzis et al., (2012) [56] y Nasner et al., (2017) [41] observaron el mismo comportamiento para la gasificación de granos de oliva y residuos sólidos municipales respectivamente.

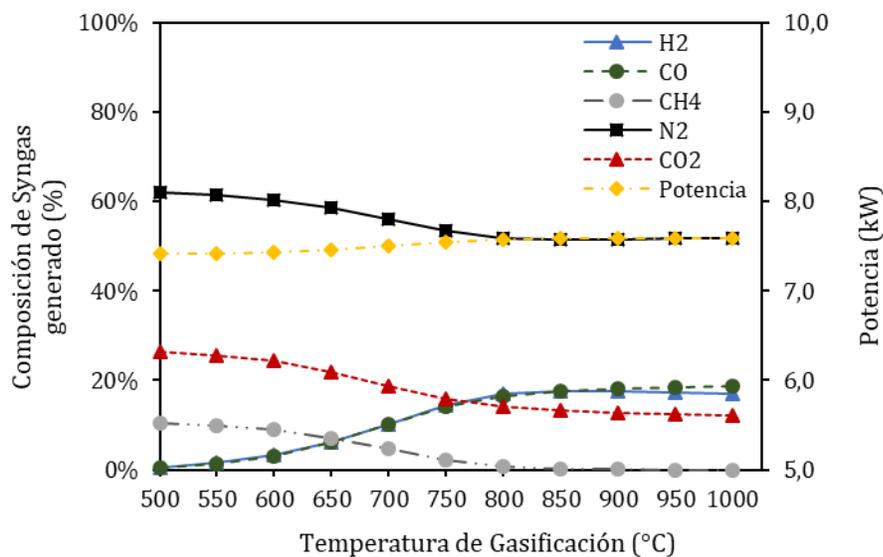


Figura 24. Efecto de la temperatura de gasificación sobre la fracción molar (%) de H₂, CO y CH₄ y la potencia generada(kWe)

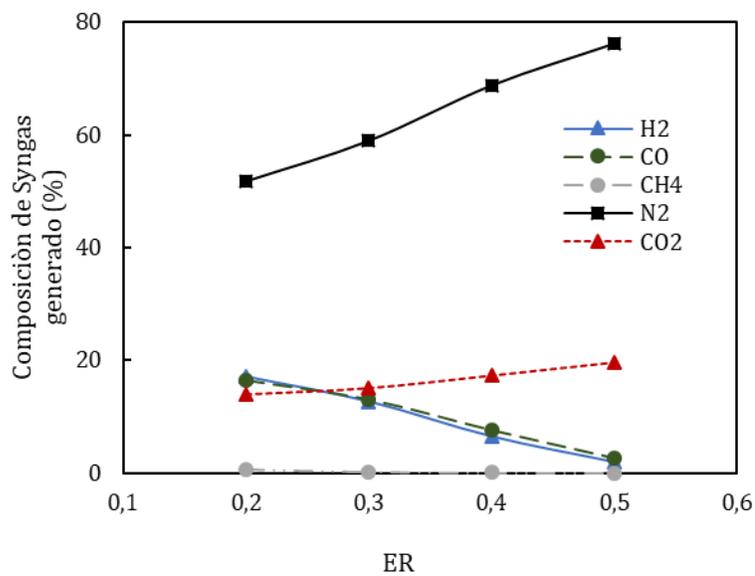


Figura 25. Efecto del ER sobre la fracción molar (%) de H₂, CO y CH₄

Se realizó un balance energético representado por un diagrama Sankey (Figura 26), permitiendo visualizar los flujos de energía (kWe) en tres etapas: Acondicionamiento, gasificación y generación de potencia. Cada etapa conlleva pérdidas irreversibles y potencias obtenidas aprovechables en las etapas y sub-etapas del proceso. El diagrama inició con la potencia disponible total en forma de biomasa y finalizó con las fuentes aprovechables energéticamente. Se encontró que el 24.3% de la energía de los raquis de maíz blanco, fue convertido en biomasa apta para ingreso al gasificador, 76% se convirtió en gas de síntesis, y finalmente el 20% en energía eléctrica.

Se evidenció una fuente importante de energía durante la fase de generación eléctrica, que se atribuye principalmente al poder calorífico de los gases de escape y otra fuente atribuida al proceso de enfriamiento del gas de síntesis antes de su ingreso al motor de combustión interna. Se hace evidente la posibilidad de integración energética en el proceso de gasificación que permita el aprovechamiento energético integral de la planta.

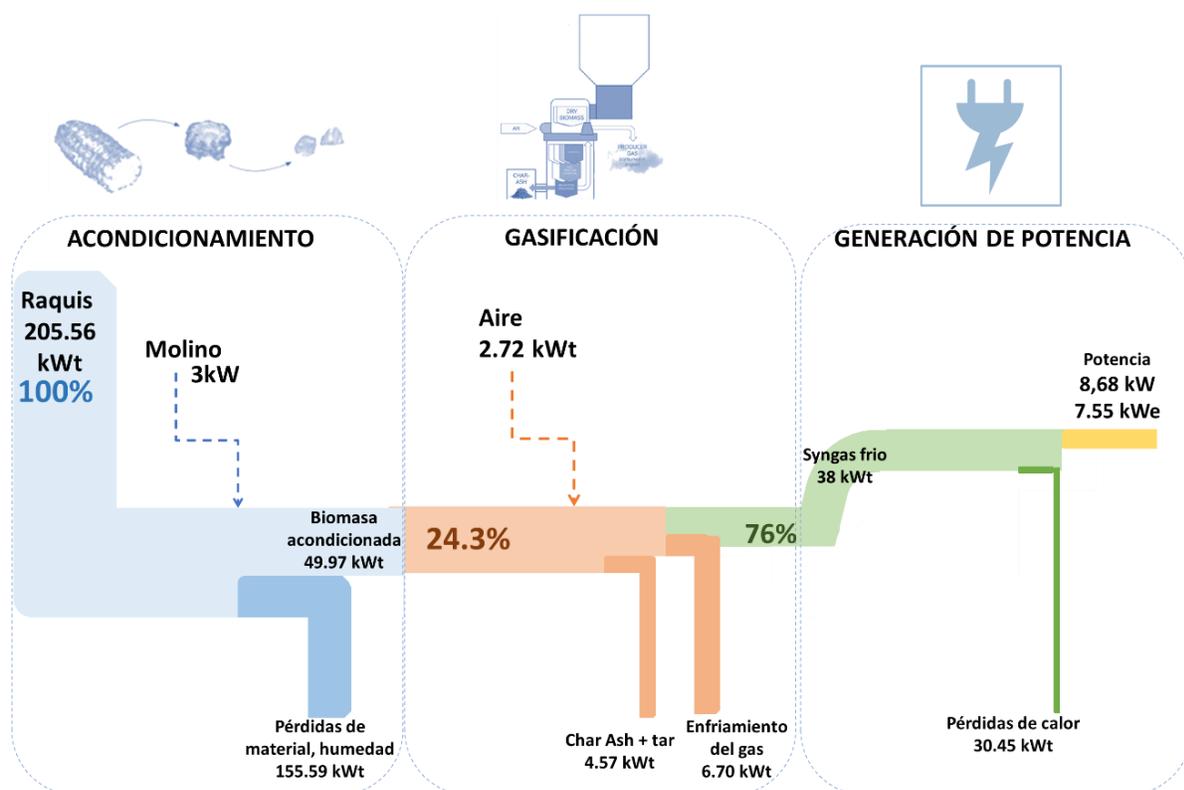


Figura 26. Diagrama Sankey Proceso de gasificación de raquis de maíz blanco

5.3.3 Análisis económico de la gasificación de raquis de maíz blanco

En esta sección se presenta el análisis de costos utilizando el Costo nivelado de electricidad (LCOE). Este índice fue calculado a partir de condiciones reales de operación y parámetros obtenidos en la simulación de la planta de gasificación. Los parámetros obtenidos de las fases anteriores y que fueron utilizados para el cálculo del LCOE se describen en la Tabla 15.

Tabla 15. Parámetros para el cálculo del costo nivelado de energía -LCOE

Parámetro	Valor
Capacidad eléctrica bruta (kWe)	18
Capacidad eléctrica neta (kWe)	7.55 - 12
Carga parasitaria (kWe)	6
Factor de capacidad (%)	85
Horas anuales	7446
Generación anual de electricidad neta (kWh)	89352
HHV de la biomasa (kJ/kg)	18401.2
Contenido de humedad de la biomasa antes de ingresar al gasificador. (%)	14,0

Los costos calculados para el sistema de generación de electricidad a partir de la gasificación de raquis de maíz se resumen en la Tabla 16.

Tabla 16. Costos de Capital, combustible, operación y mantenimiento para el sistema de gasificación de raquis de maíz blanco.

COSTOS DE CAPITAL (USD)	Gasificador	34546
	Sistema de pretratamiento de la biomasa	5 758
	Generación de potencia/Sistema de distribución	13818
	Costo de trabajo civil	59122
Total Costos de Capital		62576
COSTOS DE COMBUSTIBLE, OPERACIÓN	Costos de combustible (biomasa)	3618
	Costo laboral	9823
	Costos de mantenimiento	1433

Tratamiento de residuos/Disposición de material carbonizado y cenizas	982
Insumos auxiliares	72
Costos de administración	49
Otros gastos operativos	80
Costos totales de combustible, operación y mantenimiento - Base: 1 año 16058	

Si bien el componente principal del costo de capital correspondió a la inversión inicial del gasificador, el principal factor de costo que afecta la operación y el mantenimiento es la mano de obra. Es importante resaltar que el costo del combustible se consideró como un valor negativo dado que evita la necesidad de pagar por la disposición final.

Bajo este escenario de costos, el Costo nivelado de electricidad - LCOE asciende a 0.1704 USD / kWh. El valor obtenido, coincide con estudios realizados por IRENA (International Renewable energy Agency) para diferentes tecnologías de conversión de biomasa, donde el costo nivelado de energía para sistemas de gasificación estuvo en un rango de 0.11 y 0.28 USD/ kWh [87]. Este valor estuvo por debajo del costo actual de la electricidad que se paga a la empresa de servicios públicos local- Codensa correspondiente a 0.19 USD/kWh [88]. Ciertamente, desde una perspectiva puramente económica, el sistema de gasificación tiene el potencial de suministrar electricidad de forma sostenible y es importante mencionar que el impacto de este esquema va más allá de la economía ya que hay ganancias ambientales y nuevas oportunidades de creación de empleo.

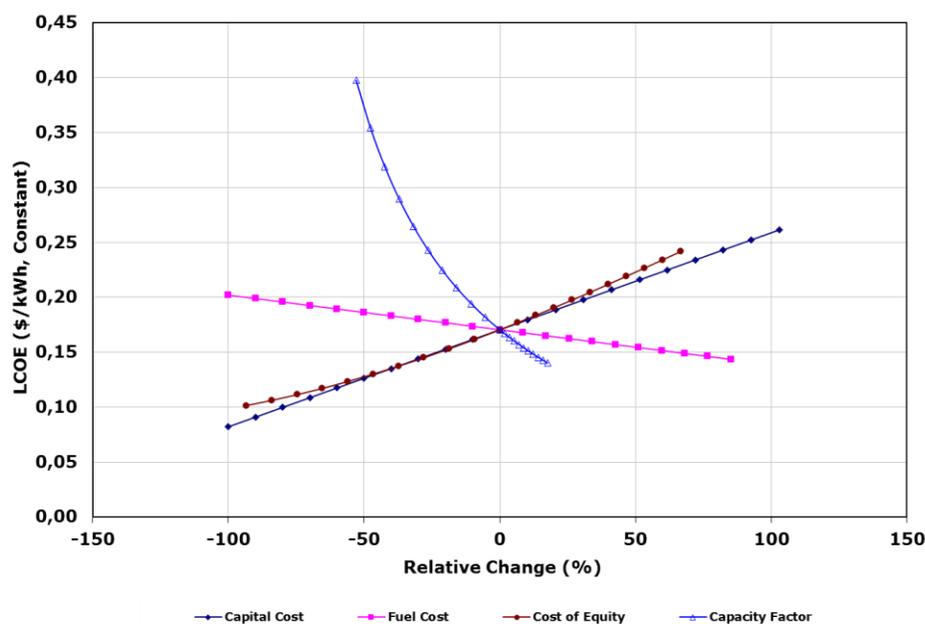


Figura 27. Costo nivelado de energía para la generación de energía eléctrica a partir de la gasificación de raquis de maíz

Para comprender las implicaciones de LCOE, fue crucial conocer el factor de capacidad neto o factor de planta tomado como el 85% en este estudio y que correspondió al cociente entre la energía real generada durante un periodo y la energía generada por la planta de gasificación si estuviese trabajando con carga plena durante el mismo período. En la Figura 27 se observa que, un factor de baja capacidad habría resultado en una subutilización de la capacidad del sistema de gasificación de biomasa y habría producido impactos negativos en el consumo específico de combustible y, por lo tanto, en el LCOE. En consecuencia, la dependencia de LCOE del factor de capacidad proporciona una indicación de los posibles impactos de la demanda de electricidad en el costo de la electricidad. Por otro lado, la Figura 27 mostró una fuerte influencia de los costos de combustible en LCOE. Claramente, tener el residuo en el sitio evita los costos de transporte y eliminación e impacta favorablemente el LCOE del sistema.

6. Conclusiones

Durante este proyecto de investigación se evaluó la degradación térmica de raquis de maíz blanco a través de termogravimetría. La cinética de degradación térmica se modeló con éxito para los tres métodos isoconversionales usados en el estudio (KWO, KAS y Starink). Los valores de energía de activación aumentaron conforme aumentó el porcentaje de conversión, lo que indica la necesidad de una posible adición energética en la etapa de pre-ignición de la biomasa durante el proceso de gasificación. Así mismo, comparados con el diésel, los raquis de maíz representan casi 7 veces más su energía de activación, lo que le confiere menor estabilidad térmica y mayor tiempo de ignición para los raquis, pero que, comparados con otros residuos de biomasa, constituyen un material prometedor y que puede ser competitivo en sector de generación eléctrica a partir de fuentes renovables de energía

Se estudió el efecto del contenido de finos en la biomasa, y la carga eléctrica demandada sobre las variables de temperatura, flujo de gas, consumo de biomasa, consumo específico de biomasa y eficiencia de gas frío. Los resultados revelaron que un contenido de finos del 15% en la mezcla de biomasa genera mayores perfiles de temperatura, representados en mayores concentraciones de H_2 y CO en el gas de síntesis, incrementando su poder calorífico. Además, la mezcla con contenido de 15% de finos, puede generar una mayor inyección de gas hacia el motor y un aumento de la superficie efectiva de reacción favoreciendo la transferencia de masa y calor y por tanto un incremento en el consumo de biomasa. Así mismo, se puede decir que la eficiencia del proceso de gasificación se incrementa a medida que la carga resistiva conectada a dispositivo se acerca a la capacidad nominal del equipo de gasificación.

El sistema analizado ofrece una solución adecuada para el suministro de electricidad en Corabastos, que podría cubrir aproximadamente el 42% de la demanda de electricidad en la ubicación. Sin embargo, los suministros seguros y el precio de las materias primas son fundamentales para la economía de la planta de energía. A pesar de que se puede mejorar la eficiencia, el sistema ya ofrece un LCOE competitivo de aproximadamente 0,17 USD / kW y tiene un potencial tecnoeconómico atractivo para la generación de energía basada en biomasa utilizando raquis de maíz. Sin embargo, el apoyo de los sectores público y privado se requiere para crear las condiciones para la replicación y el desarrollo de la tecnología.

7. Recomendaciones y Trabajos Futuros

Los procesos de transformación termoquímica son ampliamente estudiados, y la biomasa constituye una fuente prometedora que requiere la atención de los investigadores para evaluar su potencial y el desarrollo de tecnologías que permitan su adecuado aprovechamiento energético. La investigación desarrollada en este trabajo permitió en parte conocer el potencial de utilización de residuos de origen agrícola como los raquis de maíz blanco, evaluando diferentes variables críticas del proceso de operación en una planta de gasificación de biomasa de lecho fijo, corriente descendente. Entre las consideraciones y recomendaciones para trabajos futuros, se pueden destacar:

- Se requiere el desarrollo y/o mejoras del sistema de limpieza del gas de síntesis para la obtención de una mayor calidad del gas producido. El material carbonizado y alquitrán constituyen un problema que ocasiona fallas operativas y posibles daños de los componentes del equipo, principalmente del motor (Para ver las fallas presentadas en este estudio, ver Anexo E). Así mismo, se requiere mayor tiempo de operación y mantenimiento, y aumentan las fuentes de variación en los experimentos, causadas por taponamientos en las mangueras, ensuciamiento del filtro y otras zonas de recorrido del gas. Entre las alternativas está, el evaluar distintos materiales para la construcción del lecho filtrante, diferentes de la madera y su capacidad para retener los contaminantes generados.
- Se recomienda la integración energética del proceso de gasificación de biomasa, tanto a nivel real, como mediante simulación computacional en el software Aspen Plus. Lo anterior con el objetivo de propiciar una real visualización del impacto económico de aprovechar la energía perdida principalmente durante el proceso de enfriamiento del gas y la contenida en los gases de escape del motor.
- Es necesario estandarizar las condiciones de operación, limpieza y mantenimiento para evitar daños y fallas operativas que interfieran con el desarrollo de la investigación. Se pueden generar planes de mantenimiento preventivo incorporando áreas de ingeniería mecánica y electrónica.
- Se resalta la importancia del planteamiento de un diseño experimental con la evaluación de diferentes porcentajes de finos contenidos en la biomasa. Aunque en el

trabajo de investigación, los resultados mostraron un comportamiento favorable en el proceso con mezclas con un contenido de finos del 15%. No fue posible obtener un óptimo con tan solo dos niveles, como se planteó en el diseño experimental de este trabajo (0 y 15% de finos). Por lo tanto, se recomienda realizar una evaluación más amplia teniendo en cuenta los límites de seguridad del equipo y el tipo de material utilizado. Además de la comparación del comportamiento de distintas mezclas bajo las mismas condiciones sobre el rendimiento global del equipo.

- El proceso de acondicionamiento de la biomasa constituye una de las labores de mayor dedicación con largas jornadas de molienda, tamizado y secado. Teniendo en cuenta que el proceso es susceptible a tamaños de partícula y humedad, se debe realizar un riguroso proceso de acondicionamiento. Aunque trabajos de investigación como el desarrollado en este estudio, constituyen un avance en el aprovechamiento de los finos obtenidos en molienda, este porcentaje sigue siendo muy elevado, lo que provoca la disminución de la eficiencia global del sistema por pérdidas de material durante el acondicionamiento. Es importante, aumentar esfuerzos en la evaluación de distintos métodos de molienda a diferentes condiciones, que generen el menor desperdicio posible durante el proceso.
- Teniendo en cuenta la experiencia adquirida durante la experimentación y simulación del proceso general. Se propone realizar mayor investigación haciendo uso de herramientas de simulación basadas en modelos más rigurosos como los modelos cinéticos.

Bibliografía

- [1] G. Marrugo, C. F. Valdés, and F. Chejne, "Characterization of Colombian Agroindustrial Biomass Residues as Energy Resources," *Energy and Fuels*, vol. 30, no. 10, pp. 8386–8398, 2016.
- [2] PNUD, NAM, and VELZEA, "Gestión de residuos orgánicos en las plazas de mercado de Bogotá," pp. 1–76, 2011.
- [3] R. García, C. Pizarro, A. G. Lavín, and J. L. Bueno, "Characterization of Spanish biomass wastes for energy use," *Bioresour. Technol.*, vol. 103, no. 1, pp. 249–258, 2012.
- [4] E. Biagini, F. Barontini, and L. Tognotti, "Gasification of agricultural residues in a demonstrative plant: Corn cobs," *Bioresour. Technol.*, vol. 173, pp. 110–116, 2015.
- [5] B. Fortunato, G. Brunetti, S. M. Camporeale, M. Torresi, and F. Fornarelli, "Thermodynamic model of a downdraft gasifier," *Energy Convers. Manag.*, vol. 140, pp. 281–294, 2017.
- [6] E. Balu and J. N. Chung, "System characteristics and performance evaluation of a trailer-scale downdraft gasifier with different feedstock," *Bioresour. Technol.*, vol. 108, pp. 264–273, 2012.
- [7] P. C. Kuo, W. Wu, and W. H. Chen, "Gasification performances of raw and torrefied biomass in a downdraft fixed bed gasifier using thermodynamic analysis," *Fuel*, vol. 117, no. PARTB, pp. 1231–1241, 2014.
- [8] Y. Choi, T. Mun, M. Cho, and J. Kim, "Gasification of dried sewage sludge in a newly developed three-stage gasifier: Effect of each reactor temperature on the producer gas composition and impurity removal," *Energy*, vol. 114, pp. 121–128, 2016.
- [9] R. Yin, R. Liu, J. Wu, X. Wu, C. Sun, and C. Wu, "Influence of particle size on performance of a pilot-scale fixed-bed gasification system," *Bioresour. Technol.*, vol. 119, pp. 15–21, 2012.
- [10] J. F. Pérez, A. Melgar, and P. N. Benjumea, "Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study," *Fuel*, vol. 96, pp. 487–496, 2012.
- [11] K. Arun and M. V. Ramanan, "Experimental studies on gasification of corn cobs in a fixed bed system," vol. 8, no. 7, pp. 667–676, 2016.

-
- [12] C. Gai, Y. Dong, and T. Zhang, "The kinetic analysis of the pyrolysis of agricultural residue under non-isothermal conditions," *Bioresour. Technol.*, vol. 127, pp. 298–305, 2013.
- [13] Upme, "Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2015," p. 184, 2015.
- [14] M. de M. y E. MME, "Energía Eléctrica," *Memorias al Congr. la República Colomb. 2012-2013*, vol. 1, p. 48, 2012.
- [15] UPME, "Informe Mensual De Variables De Generación Y Del Mercado Eléctrico Colombiano - Diciembre de 2016," no. 69, pp. 1–16, 2016.
- [16] XM, "Boletín de XM para los agentes del sector eléctrico Edición 17 - Marzo de 2017," 2017. [Online]. Available: <http://www.xm.com.co/EnMovimiento/Pages/Sostenibilidad-Mar2017.aspx>. [Accessed: 10-Jul-2017].
- [17] Sistema Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, "Fenómeno El niño Análisis Comparativo 1997-1998 // 2014-2016," 2016.
- [18] B. Mundial, "No Title," *Emisiones de CO2 (toneladas métricas per cápita)*, 2014. [Online]. Available: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC>.
- [19] G. Gallagher, "Biomass for electricity generation," *Chem. Eng.*, no. 725, pp. 32–33, 2001.
- [20] L. Jiang, S. Hu, Y. Wang, S. Su, L. Sun, B. Xu, L. He, and J. Xiang, "Catalytic effects of inherent alkali and alkaline earth metallic species on steam gasification of biomass," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 45, pp. 15460–15469, 2015.
- [21] H. Escalante, J. Orduz, J. Zapata, M. Cardona, and M. Duarte, *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. 2011.
- [22] J. Ospina and F. Villamizar, "Consumo En Centrales De Abastos En Colombia," *Asoc. Iberoam. Tecnol. Postcosecha*, vol. 5, pp. 1–7, 2003.
- [23] S. R. Rubio, F. E. Sierra, and A. Guerrero, "Gasificación de materiales orgánicos residuales Gasification from waste organic materials," vol. 31, no. 3, pp. 17–25, 2011.
- [24] P. Basu, "Chapter 3 Biomass Characteristics," Elsevier Inc., 2010, pp. 27–63.
- [25] HEURA, "Heura Medio Ambiente," 2012. [Online]. Available: <https://heuramedioambiente.wordpress.com/2012/04/23/que-es-la-biomasa/>.
- [26] K. Arun, M. Venkata Ramanan, and S. Sai Ganesh, "Stoichiometric equilibrium modeling of corn cob gasification and validation using experimental analysis," *Energy and Fuels*, vol. 30, no. 9, pp. 7435–7442, 2016.

-
- [27] Y. Gao, X. H. Wang, H. P. Yang, and H. P. Chen, "Characterization of products from hydrothermal treatments of cellulose," *Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 457–465, 2012.
- [28] D. L. Klass, "Chapter 3: Photosynthesis of Biomass and Its Conversion related Properties," in *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*, 1998, pp. 51–90.
- [29] V. Dhyani and T. Bhaskar, "A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass," *Renew. Energy*, 2017.
- [30] L. Burhenne, J. Messmer, T. Aicher, and M. P. Laborie, "The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 101, pp. 177–184, 2013.
- [31] J. Cai, Y. He, X. Yu, S. W. Banks, Y. Yang, X. Zhang, Y. Yu, R. Liu, and A. V. Bridgwater, "Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, no. March, pp. 309–322, 2017.
- [32] P. Mckendry, "Energy production from biomass (part 2): conversion technologies," vol. 83, no. July 2001, pp. 47–54, 2002.
- [33] P. Mckendry, "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass," vol. 83, no. July 2001, pp. 37–46, 2002.
- [34] P. Basu, *Chapter 1 - Introduction*. Elsevier Inc., 2010.
- [35] E. Pieratti, "Biomass gasification in small scale plants: experimental and modelling analysis," Universita Degli Studi Di Trento, 2011.
- [36] H. J. García Patiño, "Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo," 2011.
- [37] A. A. P. Susastriawan, H. Saptoadi, and Purnomo, "Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, no. March, pp. 989–1003, 2017.
- [38] A. Viviana and R. Salcedo, "Evaluación del Potencial Energético y Bioactivo de los Residuos Generados por la Producción y Transformación de la Uva Angela Viviana Ruales Salcedo," 2015.
- [39] C. Andrés and G. Velásquez, "Hydrogen production through gasification and dark fermentation," 2016.
- [40] P. Mckendry, "Energy production from biomass (part 3): gasification technologies," vol. 83, no. July 2001, pp. 55–63, 2002.

-
- [41] A. M. L. Násner, E. E. S. Lora, J. C. E. Palacio, M. H. Rocha, J. C. Restrepo, O. J. Venturini, and A. Ratner, "Refuse Derived Fuel (RDF) production and gasification in a pilot plant integrated with an Otto cycle ICE through Aspen plus™ modelling: Thermodynamic and economic viability," *Waste Manag.*, 2017.
- [42] M. C. Torrente and M. A. Gala, "Kinetics of the thermal decomposition of oil shale from Puertollano (Spain)," vol. 80, pp. 0–7, 2001.
- [43] T. Damartzis, D. Vamvuka, S. Sfakiotakis, and A. Zabaniotou, "Thermal degradation studies and kinetic modeling of cardoon (*Cynara cardunculus*) pyrolysis using thermogravimetric analysis (TGA)," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 10, pp. 6230–6238, 2011.
- [44] P. Basu, "Chapter 13 - Analytical Techniques," *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*, pp. 439–455, 2013.
- [45] C. Zhou, G. Liu, S. Cheng, T. Fang, and P. K. S. Lam, "Thermochemical and trace element behavior of coal gangue, agricultural biomass and their blends during co-combustion," *Bioresour. Technol.*, vol. 166, pp. 243–251, 2014.
- [46] S. Niu, Y. Zhou, H. Yu, C. Lu, and K. Han, "Investigation on thermal degradation properties of oleic acid and its methyl and ethyl esters through TG-FTIR," *Energy Convers. Manag.*, vol. 149, no. 17923, pp. 495–504, 2017.
- [47] A. A. Jain, A. Mehra, and V. V. Ranade, "Processing of TGA data: Analysis of isoconversional and model fitting methods," *Fuel*, vol. 165, no. October, pp. 490–498, 2016.
- [48] A. I. Mabuda, N. S. Mamphweli, and E. L. Meyer, "Model free kinetic analysis of biomass/sorbent blends for gasification purposes," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 1656–1664, 2016.
- [49] S. C. Capareda, *Introduction to biomass energy conversions*. 2013.
- [50] L. Leng, X. Yuan, G. Zeng, H. Wang, H. Huang, and X. Chen, "The comparison of oxidative thermokinetics between emulsion and microemulsion diesel fuel," *Energy Convers. Manag.*, vol. 101, pp. 364–370, 2015.
- [51] Y. Lin, X. Ma, Z. Yu, and Y. Cao, "Investigation on thermochemical behavior of co-pyrolysis between oil-palm solid wastes and paper sludge," *Bioresour. Technol.*, vol. 166, pp. 444–450, 2014.
- [52] S. L. Rincón, A. Gómez, and W. Klose, *Gasificación de biomasa residual de procesamiento*

- agroindustrial*. 2011.
- [53] C. Eugenio and O. Tascón, "Evaluation of a gasifier using coffee wood," pp. 0–44, 2015.
- [54] M. R. Rigotte, D. Secco, H. A. Rosa, S. N. M. de Souza, R. F. Santos, F. Gurgacz, and T. R. B. da Silva, "Energy efficiency of engine-generator set using biofuels under varied loads," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. April, pp. 520–524, 2017.
- [55] N. P. Pérez, E. B. Machin, D. T. Pedroso, J. J. Roberts, J. S. Antunes, and J. L. Silveira, "Biomass gasification for combined heat and power generation in the Cuban context: Energetic and economic analysis," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 90, pp. 1–12, 2015.
- [56] T. Damartzis, S. Michailos, and A. Zabaniotou, "Energetic assessment of a combined heat and power integrated biomass gasification-internal combustion engine system by using Aspen Plus®," *Fuel Process. Technol.*, vol. 95, pp. 37–44, 2012.
- [57] C. A. García, J. Moncada, V. Aristizábal, and C. A. Cardona, "Techno-economic and energetic assessment of hydrogen production through gasification in the Colombian context: Coffee Cut-Stems case," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 9, pp. 5849–5864, 2017.
- [58] N. Ramzan, A. Ashraf, S. Naveed, and A. Malik, "Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 9, pp. 3962–3969, 2011.
- [59] M. Formica, S. Frigo, and R. Gabbrielli, "Development of a new steady state zero-dimensional simulation model for woody biomass gasification in a full scale plant," *Energy Convers. Manag.*, vol. 120, pp. 358–369, 2016.
- [60] I. Adeyemi and I. Janajreh, "Modeling of the entrained flow gasification : Kinetics-based ASPEN Plus model," pp. 1–8, 2014.
- [61] D. Vera, B. De Mena, F. Jurado, and G. Schories, "Study of a downdraft gasifier and gas engine fueled with olive oil industry wastes," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 51, no. 1–2, pp. 119–129, 2013.
- [62] C. Li and K. Suzuki, "Resources, properties and utilization of tar," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, no. 11, pp. 905–915, 2010.
- [63] G. Araya, "Análisis, comparación y evaluación económica de tecnologías termosolares," Universidad de Chile, 2013.
- [64] Fededesarrollo, "Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia." 2013.

-
- [65] B. Buragohain, P. Mahanta, and M. Vijayanand, "Biomass gasification for decentralized power generation: The Indian perspective," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2009.
- [66] Y. Lu, L. Guo, X. Zhang, and C. Ji, "Hydrogen production by supercritical water gasification of biomass: Explore the way to maximum hydrogen yield and high carbon gasification efficiency," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 4, pp. 3177–3185, 2012.
- [67] W. van Swaaij, S. Kersten, and W. Palz, "Biomass Power for the World: Transformations to Effective Use," in *Pan Stanford Series on Renewable Energy*, W. van Swaaij, S. Kersten, and W. Palz, Eds. PAN STANFORD PUBLISHING, 2015, pp. 199–202.
- [68] R. García, C. Pizarro, A. G. Lavín, and J. L. Bueno, "Spanish biofuels heating value estimation. Part I: Ultimate analysis data," *Fuel*, vol. 117, no. PARTB, pp. 1130–1138, 2014.
- [69] A. O. Aboyade, J. F. Gorgens, M. Carrier, E. L. Meyer, and J. H. Knoetze, "Thermogravimetric study of the pyrolysis characteristics and kinetics of coal blends with corn and sugarcane residues," *Fuel Process. Technol.*, vol. 106, pp. 310–320, 2013.
- [70] E. Biagini, F. Barontini, and L. Tognotti, "Gasification of agricultural residues in a demonstrative plant: Corn cobs," *Bioresour. Technol.*, vol. 173, pp. 110–116, 2015.
- [71] J. J. Hernández, G. Aranda-Almansa, and A. Bula, "Gasification of biomass wastes in an entrained flow gasifier: Effect of the particle size and the residence time," *Fuel Process. Technol.*, vol. 91, no. 6, pp. 681–692, 2010.
- [72] J. A. Orrego-Ruiz, R. Cabanzo, and E. Mejía-Ospino, "Study of Colombian coals using photoacoustic Fourier transform infrared spectroscopy," *Int. J. Coal Geol.*, vol. 85, no. 3–4, pp. 307–310, 2011.
- [73] M. A. A. Mohammed, A. Salmiaton, W. A. K. G. Wan Azlina, and M. S. Mohamad Amran, "Gasification of oil palm empty fruit bunches: A characterization and kinetic study," *Bioresour. Technol.*, vol. 110, pp. 628–636, 2012.
- [74] G. Wang, W. Li, B. Li, and H. Chen, "TG study on pyrolysis of biomass and its three components under syngas," *Fuel*, vol. 87, no. 4–5, pp. 552–558, 2008.
- [75] V. Volli and M. K. Purkait, "Physico-chemical properties and thermal degradation studies of commercial oils in nitrogen atmosphere," *Fuel*, vol. 117, no. PARTB, pp. 1010–1019, 2014.
- [76] A. O. Aboyade, T. J. Hugo, M. Carrier, E. L. Meyer, R. Stahl, J. H. Knoetze, and J. F. Gorgens, "Non-isothermal kinetic analysis of the devolatilization of corn cobs and

- sugar cane bagasse in an inert atmosphere," *Thermochim. Acta*, vol. 517, no. 1–2, pp. 81–89, 2011.
- [77] D. López González, M. Fernandez Lopez, J. L. Valverde, and L. Sanchez Silva, "Thermogravimetric-mass spectrometric analysis on combustion of lignocellulosic biomass," *Bioresour. Technol.*, vol. 143, pp. 562–574, 2013.
- [78] M. García-Pérez, A. Chaala, J. Yang, and C. Roy, "Co-pyrolysis of sugarcane bagasse with petroleum residue. Part I: Thermogravimetric analysis," *Fuel*, vol. 80, no. 9, pp. 1245–1258, 2001.
- [79] W. H. Chen and P. C. Kuo, "Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass," *Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 803–811, 2011.
- [80] V. R. Patel, D. S. Upadhyay, and R. N. Patel, "Gasification of lignite in a fixed bed reactor: Influence of particle size on performance of downdraft gasifier," *Energy*, vol. 78, pp. 323–332, 2014.
- [81] P. Raman and N. K. Ram, "Design improvements and performance testing of a biomass gasifier based electric power generation system," *Biomass and Bioenergy*, vol. 56, pp. 555–571, 2013.
- [82] A. Chaurasia, "Modeling, simulation and optimization of downdraft gasifier: Studies on chemical kinetics and operating conditions on the performance of the biomass gasification process," *Energy*, vol. 116, pp. 1065–1076, 2016.
- [83] A. Rakhshi and T. Wiltowski, "A framework for devolatilization breakdown in entrained flow gasification modeling," *Fuel*, vol. 187, pp. 173–179, 2017.
- [84] A. Shehzad, M. J. K. Bashir, and S. Sethupathi, "System analysis for synthesis gas (syngas) production in Pakistan from municipal solid waste gasification using a circulating fluidized bed gasifier," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1302–1311, 2016.
- [85] N. P. G. Lumley, D. F. Ramey, A. L. Prieto, R. J. Braun, T. Y. Cath, and J. M. Porter, "Techno-economic analysis of wastewater sludge gasification: A decentralized urban perspective," *Bioresour. Technol.*, vol. 161, pp. 385–394, 2014.
- [86] PSI, "3.0 L Industrial Engine Service Manual," no. 36100010. 2002.
- [87] IRENA, "Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series," *Biomass Power Gener.*, vol. 1, no. 1/5, p. 60, 2012.

- [88] CODENSA, "Tarifas de energía Codensa," 2017. [Online]. Available:
<https://www.codensa.com.co/hogar/tarifas>.
- [89] ALL POWER LABS, "Best Practice Update : NEW FILTER - PACKING SPECIFICATION
ALL Power Labs Technical Bulletin : # TB -795-000xx," pp. 15-16, 2016.

A. Anexo: Especificaciones y descripción de la operación del equipo de gasificación

El equipo de gasificación utilizado durante la experimentación corresponde a un gasificador de lecho fijo, corriente descendente de la compañía ALL Power Labs, California, USA, acoplado a un motor de combustión interna y un generador. Las especificaciones del equipo se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Especificaciones del equipo de gasificación usado durante la experimentación.

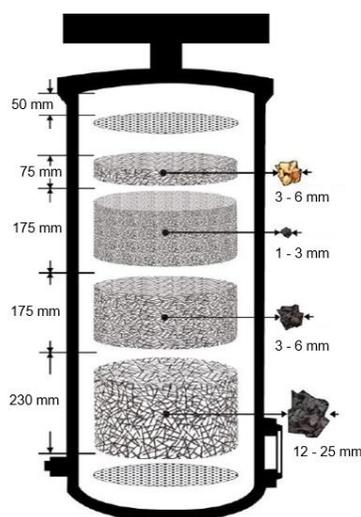
	Especificaciones de sistema	Gasificador ALL POWER LABS PP20 V1.09
	Capacidad Eléctrica	Generador industrial fácilmente reconfigurable para: 120 V a 480 V a 50 Hz o 60 Hz en modo individual, doble o trifásico. 1500 RPM: 4-20 KWE
	Caudal del gasificador	11-52 m ³ /h
	Condiciones térmicas de salida del gas	330,000 BTU/h 97kWe
	Tasa de consumo de biomasa	50Hz: 4.8-19.2 kg/h 60Hz: Sin información
	Medidas (l x a x h)	136 cm x 178 cm x 193 cm
	Peso del sistema	893 kg (1969 lbs)

La operación del equipo inicia con la alimentación de la biomasa en la tolva. La biomasa fluye a través de un cubo de secado o intercambiador de calor que ayuda con el secado de la biomasa aprovechando el calor proporcionado por el gas de síntesis. Posteriormente, la biomasa pasa por el tornillo sinfín hacia el reactor, donde ocurren las etapas de pirólisis, combustión y reducción. Este tornillo sinfín está controlado por un interruptor que mantiene el motor del sinfín encendido hasta que la biomasa alcanza el nivel superior del reactor, empujando una

pala de acero inoxidable presente en su interior, que funciona como un control de nivel de biomasa en el reactor.

El equipo cuenta con 3 termocuplas tipo k, que permiten monitorear la temperatura en la zona de restricción (Trst), en la zona de reducción (Tred) y durante el proceso de enfriamiento del motor (Tcoolant). El rango de temperaturas debe estar entre 800- 1000°C, 700- 800°C y <100°C respectivamente.

El aire que ingresa para la combustión se precalienta a una temperatura de 600°C usando el calor recuperado del gas de síntesis. Las piezas de charcoal consumidas por las reacciones de reducción, se encogen y se acumulan inhibiendo el flujo de gas. Estas piezas reducidas, denominadas “Char-ash”, son removidas a través de una canastilla vibratoria y un tornillo sinfín hacia un recipiente externo. Posteriormente, el gas de síntesis es acondicionado mediante un sistema de limpieza compuesto por un ciclón para eliminación de polvo y cenizas mediante fuerza centrífuga y un filtro compuesto por 4 capas de carbón vegetal como medio filtrante donde los gases de alquitrán se condensan para evitar su acumulación en el motor (Figura 28.). La medida de flujo de gas se toma a través de un dispositivo electrónico de medición de flujo de gas que funciona bajo el principio de tubo de Venturi. Este medidor fue conectado a la salida del filtro.



Filtro de Gas de síntesis

Previene que partículas pequeñas de carbonizado lleguen al motor.

Absorbe alquitrán y hollín fino.

Absorbe alquitrán y hollín en altas concentraciones sin taponamientos.

Previene el taponamiento de los agujeros de la rejilla ubicada en la parte inferior.

Figura 28 Configuración del sistema de filtración de gas de síntesis del gasificador a escala piloto - Power Pallet de 18kWe. Imagen modificada [89].

Conjunto Motor – Generador

Después de la filtración del gas de síntesis y una vez se han alcanzado los rangos de temperatura requeridos, se da el paso del gas de síntesis hacia el conjunto motor -generador. El motor usado correspondió a un motor de 3 litros marca PSI Power Solutions, INC ® y generador MeccAlte ® NPE32 E/4 de 4 polos, con 20 kWe de potencia.

Se realizó la conexión de un tablero eléctrico compuesto por dos tomas bifásicas de 30 amperios, tres tomas trifásicas de 30 amperios y cinco tomas monofásicas de 20 amperios cada una. La energía generada por el equipo se usó para el consumo de tres resistencias eléctricas de capacidad nominal de 4kWe cada una, conectadas según el diseño experimental planteado en la sección 4.2.1.

B. Anexo: Análisis Estadístico

El análisis estadístico se llevó a cabo en el software SAS 9.4®. Se realizaron pruebas de normalidad mediante el método de **Shapiro- Wilk**, usando el código a continuación:

```
PROC UNIVARIATE DATA=RES NORMAL PLOT;
VAR RFLU RTEM RCB RCEB REF; #variables de respuesta
TITLE 'NORMALIDAD DE RESIDUALES';
RUN;

QUIT;
```

La prueba de Shapiro- Wilk se aplica a muestras de tamaño ($n \leq 30$) y fue aplicada en este estudio teniendo en cuenta que la muestra fue equivalente a 18 experimentos. La toma de datos se realizó por un periodo de dos horas después del encendido del equipo, una vez se estabilizó la operación del motor y el detalle del tratamiento y cantidad de datos obtenidos se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Detalle de la cantidad de datos y tratamiento para cada variable de respuesta.

Variable	Unidades	Cantidad de datos/Tratamiento
Flujo de Gas (área bajo la curva)	m ³ /h	Perfil de flujo de gas por segundo para cada tratamiento. (Total: 7200 datos): Obtención de área bajo la curva
Temperatura de gasificación (área bajo la curva)	°C	Perfil de temperatura de gasificación por segundo para cada tratamiento. (Total: 7200 datos): Obtención de área bajo la curva
Consumo de Biomasa (ΔC_b)	kg/h	Consumo de biomasa (Promedio de 4 mediciones por tratamiento). (Total: 18 datos)
Consumo Específico de Biomasa	kg/kWe h	Consumo específico de biomasa (kg/kWe h). kWe: Promedio de las mediciones tomadas cada 10 minutos durante las dos horas de operación. (Total: 18 datos).
Eficiencia de gas frío	%	Cálculo de eficiencia de gas frío (Total: 18 datos)

El área bajo la curva para las variables de flujo de gas y temperatura de gasificación fue determinada teniendo en cuenta el amplio número de lecturas para estas variables de respuesta (7200 datos respectivamente) y su comportamiento irregular a través del tiempo

haciendo que se dificulte su modelación. El código utilizado para la obtención del área bajo la curva para la variable de flujo de gas se enuncia a continuación (el mismo código es utilizado para la variable de temperatura de gasificación realizando el cambio del nombre de la variable):

```

DO TIE=1 TO 7200; #TIE: Tiempo (segundos)
  DO BLO=1 TO 3; #BLO: Bloque (réplica)
    DO A=0,15; #A: Porcentaje de finos
      DO B=4,8,12; #B: Carga resistiva (kWe)
        INPUT RFLU@@; OUTPUT;
      END;
    END;
  END;
END;

IF A=0 AND B=4 THEN TRA=1;
IF A=0 AND B=8 THEN TRA=2;
IF A=0 AND B=12 THEN TRA=3;
IF A=15 AND B=4 THEN TRA=4;
IF A=15 AND B=8 THEN TRA=5;
IF A=15 AND B=12 THEN TRA=6;

DATALINES;

#Insertar datos

PROC SORT DATA=RFLU;
  BY A B BLO;
RUN;
QUIT;

DATA ABC_RFLU (KEEP=A B BLO ABC_RFLU);
  SET RFLU;
  BY A B BLO;
  ABC_RFLU + DIF(TIE) * (RFLU+LAG(RFLU)) / 2;
  IF FIRST.BLO THEN ABC_RFLU=0;
  IF LAST.BLO THEN OUTPUT;
RUN;
QUIT;

```

El procesamiento estadístico de las variables de respuesta obtenidas en el diseño experimental, se realizó mediante el análisis de varianza (ANOVA) con un valor de significancia $p \leq 0,05$ por el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS. Se plantea la hipótesis nula donde $H_0: \mu_A = \mu_B$, es decir que las medias de las variables independientes son iguales y que el porcentaje de finos en la mezcla de biomasa (A) y la carga eléctrica demandada (B) no afectan significativamente a las variables estudiadas.

Acorde a un nivel de significancia del 5% ($\alpha=0,05$) el p-value asociado a las variables de flujo de gas, temperatura de gasificación (RTEM), consumo de biomasa(RCB), consumo específico de biomasa (RCEB) y eficiencia de gas frío (REF) indican fuerte evidencia de sí hay efecto estadísticamente significativo de A y/o B sobre esas variables de respuesta, es decir que la hipótesis nula se rechaza. (Tabla 19).

Tabla 19. Análisis de varianza (ANOVA)

Variable	Unidades	Abreviatura	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Value	Pr>F
Flujo de Gas (área bajo la curva)	m ³ /h	RFLU	7	3602805645	514686521	4.22	0.020
Temperatura de gasificación (área bajo la curva)	°C	RTEM	7	1,28571E+19	1,83673E+11	59.55	<.0001
Consumo de Biomasa (ΔC_b)	kg/h	RCB	7	112.276	16.039	4.49	0.0165
Consumo Específico de Biomasa	kg/kWe	RCEB	7	6.5599	0.6514	5.28	0.0095
Eficiencia de gas frío	%	REF	7	421.38	60.19	12.26	0.0003

Se analiza más a fondo este efecto mediante contrastes polinomiales, examinando la interacción bloque por tratamiento para probar la tendencia en las medias. Se evaluó si había un efecto lineal o cuadrático causado por el % de finos en la mezcla (A) y/o por la carga conectada al dispositivo (B), además de sus interacciones lineales y/o cuadráticas (Ver Tabla 20.). El código utilizado se presenta a continuación:

```

ROC GLM DATA=FIN;
CLASS TRA BLO;
MODEL ABC_RFLU ABC_RTEM RCB RCEB REF =TRA BLO/SS3;
OUTPUT OUT=RES R=RFLU RTEM RCB RCEB REF;
ESTIMATE 'LINEAL PORCENTAJE' TRA +1 +1 +1 -1 -1 -1;
ESTIMATE 'LINEAL CARGA' TRA -1 +0 +1 -1 +0 +1;
ESTIMATE 'CUADRATICO CARGA' TRA +1 -2 +1 +1 -2 +1;
ESTIMATE 'INTE LINEAL' TRA -1 +0 +1 +1 +0 -1;
ESTIMATE 'INTE CUADRA' TRA +1 -2 +1 -1 +2 -1;
TITLE 'ANOVA PARA BCA';
RUN;

```

QUIT;

Tabla 20. Análisis de varianza, efectos lineales, cuadráticos e interacciones.

Variable de Respuesta	Lineal A	Lineal B	Pr> t		
			Cuadrática B	Interacción Lineal	Interacción Cuadrática
<i>Flujo de Gas (RFLU)</i>	0.0100*	0.1164	0.2919	0.0209*	0.1034
<i>Temperatura de gasificación (RTEM)</i>	<0.0001*	<0.0001*	0.2010	<0.0001*	0.0024*
<i>Consumo de Biomasa (RCB)</i>	0.0300*	0.0011*	0.3073	0.2779	0.2880
<i>Consumo Específico de Biomasa (RCEB)</i>	0.3408	0.0009*	0.9299	0.0285*	0.0192*
<i>Eficiencia de gas frío (REF)</i>	0.0008*	<0.0001*	0.0351*	0.1518	0.4484

*Significante al 5%. A: Contenido de finos en la mezcla de biomasa, B: Carga eléctrica demandada

Se observa que para todas las variables, hubo efecto lineal del contenido de finos en la biomasa (A), exepctuando la variable de consumo específico de biomasa (RCEB). Por otro lado, se evidenció un efecto lineal de la carga (B) sobre todas las variables, exceptuando la variable de *flujo de gas (RFLU)*. Se presentó interacción lineal para las variables de *flujo de gas (RFLU)*, *Temperatura de gasificación (RTEM)* *consumo específico de biomasa (RCEB)* y *Eficiencia de gas frío (REF)*. E interacción cuadrática para las variables de *Temperatura de gasificación (RTEM)* y *consumo específico de biomasa (RCEB)*.

Análisis canónico de superficie de respuesta

Del análisis canónico de superficie para la variable de eficiencia de gas frío, se presentan puntos estacionarios de silla, de lo que se puede inferir que no existe un único punto óptimo. Sin embargo, se realizó un analisis Ridge max para determinar los niveles críticos que podrían producir una respuesta máxima en la variable de eficiencia de gas frío (REF). La Tabla 21 indica que los mayores valores de eficiencia son el resultado de cantidad de finos equivalente al: A: 8.62% con cargas relativamente altas (B: 11.95 kWe).

Tabla 21. Análisis Ridge para obtener la respuesta máxima en la variable de eficiencia de gasificación (REF)

Respuesta estimada (REF)	Error estándar	Valores de factor no codificado	
		A	B
24.87	0.79	7.50	8.0
25.35	0.79	7.82	8.4
25.87	0.77	8.07	8.7
26.43	0.75	8.26	9.1
27.03	0.72	8.40	9.5
27.67	0.68	8.51	9.9
28.35	0.65	8.58	10.3
29.07	0.63	8.62	10.7
29.84	0.64	8.64	11.1
30.66	0.69	8.64	11.5
31.53	0.78	8.62	12.0

C. Detalle- Plano interno de la tolva de alimentación de biomasa (Software Inventor 2015 ®)

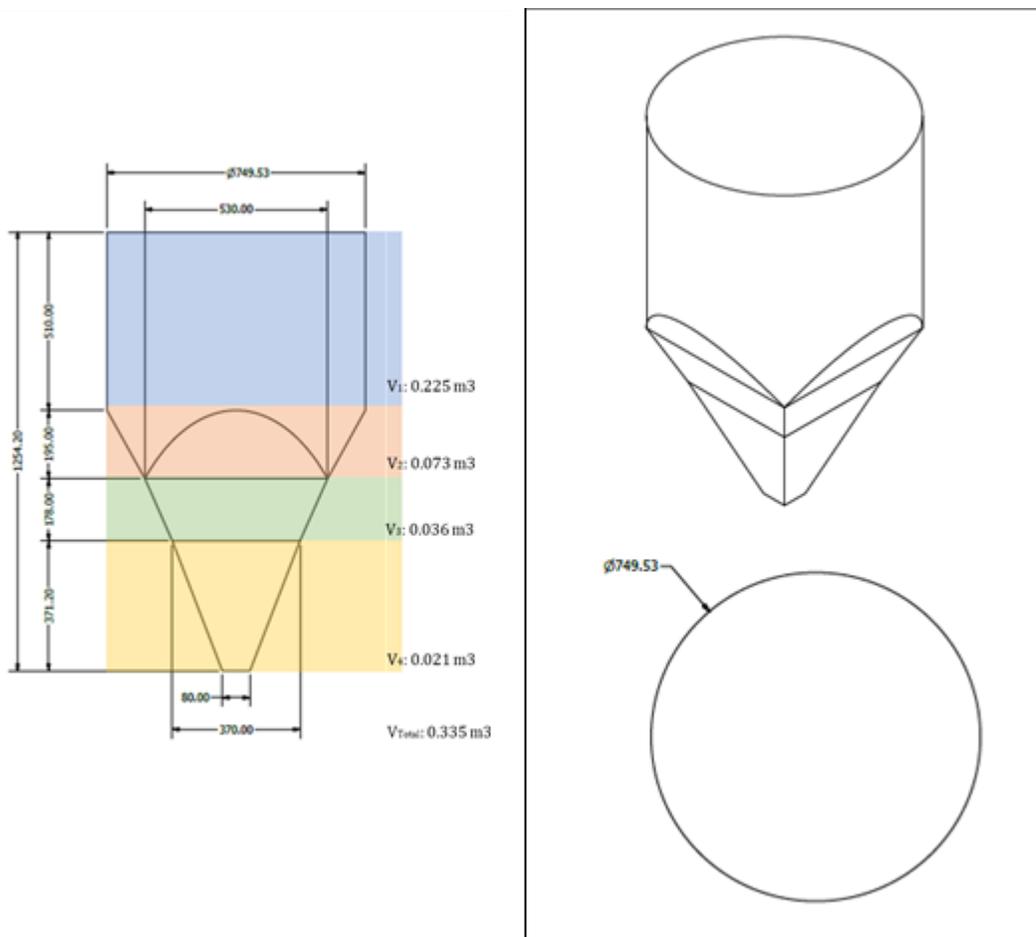


Figura 29. Detalle del plano interno de la tolva de alimentación de biomasa, dibujada en software Inventor 2015 ® (cotas en milímetros).

D. Consideraciones generales de distribución de planta

A continuación, se propone un área de la planta de gasificación planteada en el diseño previo con un área aproximada de 60m². La planta estaría conformada por 4 zonas.

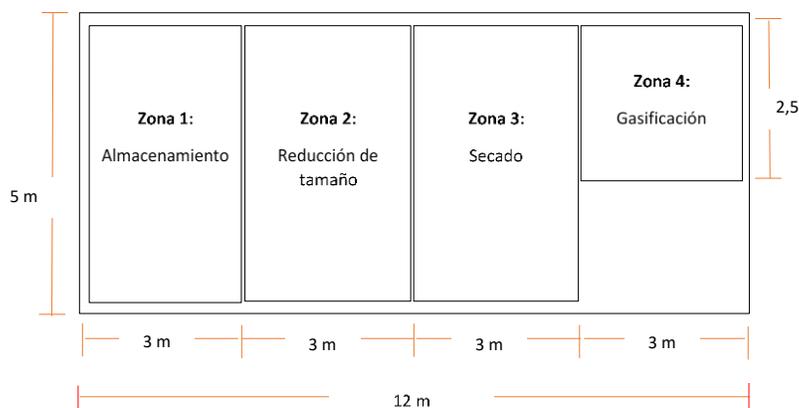


Figura 30. Distribución de Planta de gasificación de raquis de maíz

La zona 1 corresponde al sector de almacenamiento de materia prima, en la que se estima el almacenamiento de 500 kg de raquis de maíz blanco, es decir, el material para aproximadamente 3 días de operación de la planta, operándola 8 horas al día.

La zona 2 es donde se lleva a cabo la reducción de tamaño de la biomasa mediante un proceso de molienda. A partir de una revisión comercial y técnica de diferentes tipos de molinos disponibles en el mercado, se construyó la Tabla 22 usando una priorización de criterio. Se pre-seleccionaron cuatro tipos de molinos, asignándoles un valor de relevancia en escala de 1-5 siendo 1 la menor valoración y 5 la máxima valoración. Cuatro atributos fueron seleccionados para esta evaluación a los que se les asignó un porcentaje de importancia. Estas ponderaciones fueron designadas teniendo en cuenta la experiencia durante este trabajo de investigación.

Tabla 22. Priorización de criterios para selección del molino para el acondicionamiento de raquis de maíz blanco

	Molino				
	Peso	mandíbula	Corte	Cuchillas	Bolas
Costo	0,2	4	4	5	3
Tamaño de entrada	0,2	2	4	4	3
Tamaño de salida	0,3	1	4	1	2
Tipo de material	0,3	5	5	5	5
Total	1	3	4,3	3,6	3,3

El molino seleccionado correspondió al molino de corte con la puntuación más alta en la priorización de criterios. Las especificaciones del molino seleccionado se muestran en la Tabla 21.

Tabla 23 Características Molino de corte seleccionado para el acondicionamiento de los raquis de maíz blanco Marca Retsch ®

Característica	
Granulometría inicial*	< 170 x 220 mm
Granulometría final*	1 - 20 mm
Diámetro del rotor	152 mm
Motor	motor trifásico
Potencia motriz	3 kWe, con masa móvil

La zona 3 es la etapa de secado de la tusa, durante la investigación el proceso de secado de la biomasa se realizó mediante secado natural, exponiéndola al ambiente. Por último, la zona 4 es la zona de gasificación en la que se genera la energía eléctrica mediante un motor-generator a partir del gas de síntesis obtenido de la gasificación de raquis de maíz.

E. Principales problemas durante la experimentación

Taponamiento de válvulas y ductos por generación de alquitrán durante el proceso.

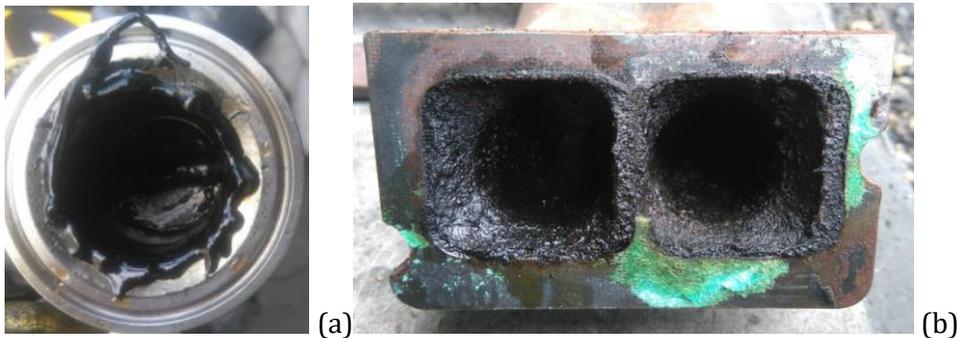


Figura 31. (a) Ensuciamiento excesivo de válvula de paso (gobernador) del gas de síntesis al motor generando problemas de encendido. (b) Múltiple de admisión del motor con residuos de alquitrán.

Escapes del gas de síntesis por ruptura de mangueras y huecos en alimentación de material

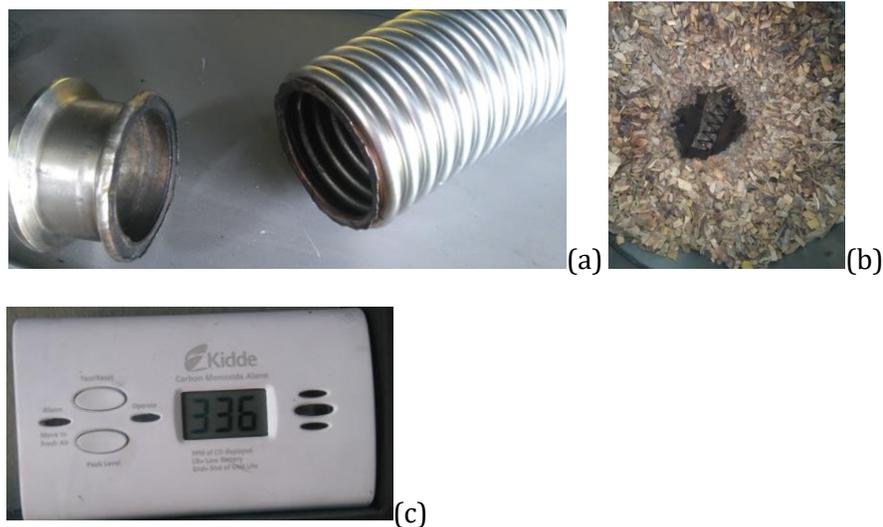


Figura 32. (a) ruptura de manguera de paso del gas al motor, por exceso de vibración. (b) Preliminar de experimentación con madera, generación de huecos en la alimentación al interior de la tolva. (c) Lector de concentración de monóxido de carbono (PPM)* Niveles peligrosos: superior a 101 PPM (Estos niveles fueron ocasionados por la abertura de la tapa de la tolva por huecos en la alimentación y falta de ventilación en el área de ubicación del equipo.