

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE ESQUEMAS TECNOLÓGICOS PARA EL
PROCESO DE GASIFICACIÓN EN REACTORES DE LECHO FIJO UTILIZANDO
ASPEN PLUS

JULIANA MORA MOSQUERA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE ESQUEMAS TECNOLÓGICOS PARA EL
PROCESO DE GASIFICACIÓN EN REACTORES DE LECHO FIJO UTILIZANDO
ASPEN PLUS

JULIANA MORA MOSQUERA

Proyecto de investigación para optar al título de
INGENIERA QUÍMICA

Director:
JAIME EDUARDO ARTURO CALVECHE
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018

Nota de Aceptación (Dirección de Investigaciones)



Firma Docente Investigador



Firma Docente Jurado 1



Firma Docente Jurado 2

Bogotá, D.C., Marzo 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrector Académico y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano general Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director de Investigaciones

Ing. ARMANDO FERNÁNDEZ CÁRDENAS

Director del programa de química

Ing. LEONARDO DE JESUS HERRERA GUTIERREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por mostrarme la carrera que me apasiona y será parte de mi vida de ahora en adelante; gracias por haberme puesto en este camino, junto a mis seres queridos y por todas las bendiciones brindadas a lo largo de mi carrera, por darme fortaleza en momentos difíciles y la capacidad para desarrollar este proyecto.

Al semillero de investigación en procesos de separación no convencionales, a mi director y co-director de proyecto de grado por permitirme desarrollar este trabajo con su guía y colaboración. Agradezco a mi director el ingeniero Jaime Arturo Calvache por su paciencia, ayuda y tiempo dedicado.

A mis padres y hermano, por su apoyo y confianza incondicional a lo largo de mi vida, en especial en mis proyectos académicos, sin ustedes este proceso no hubiese sido posible, son mi motivación hacia un futuro exitoso.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	
OBJETIVOS	
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1 GASIFICACIÓN	19
1.1.1 Biomasa	20
1.1.2 Métodos de conversión de biomasa en energía	23
1.1.3 Agente gasificante	24
1.1.4 Gas de síntesis	25
1.1.5 Fases del proceso de gasificación	26
1.1.6 Tecnologías para la gasificación	29
1.1.7 Alquitranes	33
2. SELECCIÓN DE REACTORES DE LECHO FIJO PARA EL PROCESO DE GASIFICACIÓN	37
2.1 CASOS DE ESTUDIO	37
2.1.1 Caso 1: (figura 8)	38
2.1.2 Caso 2: (Figura 9)	39
2.1.3 Caso 3: (figura 10)	40
2.1.4 Caso 4: (figura 11 y 12)	42
2.1.5 Caso 5: (figura 13)	44
2.2 MATRIZ DE SELECCIÓN	45
3. IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DE ESQUEMAS TECNOLÓGICOS EN ASPEN PLUS	51
3.1 IMPLEMENTACIÓN ESQUEMAS TECNOLÓGICOS DE GASIFICACIÓN	51
3.1.1 Reactor de lecho fijo	51
3.1.2 Consideraciones modelo matemático	52
3.1.3 Termodinámica del sistema	53
3.1.4 Especificaciones generales	53
3.2 SIMULACIÓN DE ESQUEMAS DE GASIFICACIÓN	57
3.2.1 Pretratamiento para la producción de gas de síntesis en un proceso de gasificación	58
4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y CONSUMO ENERGÉTICO	62
4.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA CONCENTRACIÓN DE CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ EN EL GAS DE SÍNTESIS	62
4.2 CONSUMO ENERGÉTICO	65
5. CONCLUSIONES	71

6. RECOMENDACIONES	72
BIBLIOGRAFÍA	73

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Gasificadores alrededor del mundo.	20
Figura 2. Métodos de conversión de biomasa en energía	23
Figura 3. Procesos termoquímicos de conversión de la biomasa en energía	24
Figura 4. Aplicaciones industriales del gas de síntesis obtenido en la gasificación	26
Figura 5. Pirólisis de una partícula de biomasa	27
Figura 6. Clasificación de las tecnologías para la gasificación de biomasa.	30
Figura 7. Gasificador de lecho fijo "downdraft" (Izquierda) y "updraft" (derecha).	32
Figura 8. Caso 1: Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen Plus	38
Figura 9. Caso 2: Modelling and Simulation of Coal Gasification Plant	40
Figura 10. Caso 3: A numerical investigation of municipal solid waste gasification using Aspen Plus	41
Figura 11. Caso 4 a: Simulation of municipal solid waste gasification in two different types of fixed bed reactors	42
Figura 12. Caso 4 b: Simulation of municipal solid waste gasification in two different types of fixed bed reactors	43
Figura 13. Caso 5: Study of optimal conditions of a palm waste fixed bed gasifier for power generation	44
Figura 14. Árbol de decisión método termodinámico gases.	53
Figura 15. RE1	55
Figura 16. RE 2	55
Figura 17. Esquema general de gasificación de biomasa para la producción de gas de síntesis	58
Figura 18. Esquema 1 de gasificación en reactor de lecho fijo	60
Figura 19. Esquema 2 de gasificación en reactor de lecho fijo	61
Figura 20. Esquema1: Temperatura vs Flujo agente oxidante vs fracción molar CO	62

Figura 21. Esquema2: Temperatura vs Flujo agente oxidante vs fracción molar CO	63
Figura 22. Esquema1: Temperatura vs Flujo agente oxidante vs fracción molar H ₂	64
Figura 23. Esquema 2: Temperatura vs Flujo agente oxidante vs fracción molar H ₂	65
Figura 24. Energía en un gasificador	67
Figura 25. Temperatura vs Flujo agente oxidante vs % Eficiencia global.	69
Figura 26. Temperatura vs Flujo agente oxidante vs Potencia kW.	70

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Análisis inmediato residuos	21
Tabla 2. Composición de un alquitrán.	34
Tabla 3. Matriz de selección esquemas tecnológicos	47
Tabla 4. Composiciones del gas combustible obtenido a partir del reactor modelado por el artículo “Study of optimal conditions of a palm waste fixed bed gasifier for power generation”.	56
Tabla 5. Validación composiciones RE2.	57
Tabla 6. Perdidas de presión y altura promedio en reactor de lecho fijo	59
Tabla 7. HHV de diferentes tipos de biomasa	68

UNIDADES, TÉRMINOS Y SÍMBOLOS

<i>%wt</i>	<i>Porcentaje de la composición en base seca.</i>
<i>kg</i>	<i>Kilogramo.</i>
<i>kJ/kmol</i>	<i>KiloJoule por kilomol.</i>
<i>kg/s</i>	<i>Kilogramo por segundo.</i>
<i>kmol/s</i>	<i>Kilomol por segundo.</i>
<i>kW</i>	<i>Kilowatts.</i>
<i>MJ/Nm³</i>	<i>Mega Joule/Newton metro cúbico.</i>
<i>kJ/m³</i>	<i>Kilo Joule sobre metro cúbico.</i>
<i>PMA</i>	<i>Análisis matricial Pugh</i>
<i>CHAR</i>	<i>Carbonizado, carbón reducido.</i>
<i>PAH</i>	<i>Hidrocarburos aromáticos polinucleares.</i>
<i>TAR</i>	<i>Alquitrán.</i>
<i>MC</i>	<i>Humedad</i>
<i>VM</i>	<i>Materia Volátil.</i>
<i>FC</i>	<i>Carbón Fijo.</i>
<i>PCS</i>	<i>Poder Calorífico Superior.</i>
<i>PCI</i>	<i>Poder Calorífico Inferior.</i>
<i>HHV</i>	<i>Poder Calorífico Superior.</i>
<i>LHV</i>	<i>Poder Calorífico Inferior.</i>
<i>SNG</i>	<i>Gas de síntesis.</i>
<i>RE1</i>	<i>Reactor Esquema1. Adaptación de: DAHMANI, Manel. PÉRILHON, Christelle. MARVILLET, Christelle. Study of optimal conditions of a palm waste. <u>En: Sciences de l'ingénieur [physics]. 2017.601-606p.</u></i>
<i>RE2</i>	<i>Reactor Esquema 2. Adaptación de: RAMZAN, N., ASHRAF, A., USMAN, J., SHABBIR, H. Modelling and Simulation of Coal Gasification Plant. <u>En: Revista Del Instituto De Ingenieros Químicos De Pakistán. 2010.Vol. 38. 33-38P.</u></i>

<i>T</i>	<i>Temperatura.</i>
<i>PR-BM</i>	<i>Peng Robinson – Boston Mathias.</i>
<i>C</i>	<i>Carbono.</i>
<i>H</i>	<i>Hidrógeno monoatómico.</i>
<i>O</i>	<i>Oxígeno monoatómico.</i>
<i>H₂</i>	<i>Hidrógeno.</i>
<i>O₂</i>	<i>Oxígeno.</i>
<i>N₂</i>	<i>Nitrógeno.</i>
<i>CH₄</i>	<i>Metano.</i>
<i>CO</i>	<i>Monóxido de Carbono.</i>
<i>CO₂</i>	<i>Dióxido de Carbono.</i>
<i>NH₃</i>	<i>Amoniaco.</i>
<i>H₂O</i>	<i>Agua.</i>
<i>NO_x</i>	<i>Óxidos de Nitrógeno.</i>
<i>C₆H₆</i>	<i>Benceno.</i>
<i>C₂H₈</i>	<i>Tolueno.</i>
<i>C₁₀H₈</i>	<i>Naftaleno.</i>

RESUMEN

La gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato rico en carbono como lo es la biomasa, el carbón o el plástico (en esta investigación biomasa residual), es transformado en un gas combustible¹. Para el año 2014, habían 69 plantas de gasificación alrededor del mundo con 677 gasificadores de los cuales solo el 7% utiliza biomasa como materia prima². En países en desarrollo, como Colombia, en zonas rurales, sin servicios básicos, o con un alto índice de pobreza muchas veces el único recurso disponible es la biomasa residual, es por ello que vale la pena seguir investigando con el objetivo de generar conocimiento de estas tecnologías para su aplicación con biomasa residual. En Necoclí, Antioquia para el año 2008 por medio del instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas para las zonas no interconectadas y con ayuda de la universidad nacional de Antioquia se implementó un reactor de lecho fijo de fabricación hindú, para la gasificación de madera que llega a las playas de este territorio y que en esta zona se considera desperdicio³. Esta planta genera energía aproximadamente para 40 familias del territorio que antiguamente no tenían electricidad⁴. En vista del gran potencial que tiene generar energía a partir de desperdicios, y más con tecnologías como los gasificadores, en el presente trabajo se desarrolla por medio del simulador de procesos Aspen Plus el análisis energético de dos esquemas tecnológicos para la producción de gas de síntesis en reactores con lecho fijo. Inicialmente se preseleccionan cinco casos de estudio de especificaciones de reactores de lecho fijo que cumplan con un mínimo de parámetros necesarios; luego utilizando un análisis matricial de Pugh, el cual favorece las propuestas con suficiencia de parámetros que permitan desarrollar la simulación, se seleccionan dos especificaciones de reactores de lecho fijo, los cuales son validados y posteriormente, implementados en dos esquemas tecnológicos para la producción de gas de síntesis. Finalmente, se desarrolla un análisis de sensibilidad y evaluación energética de los procesos seleccionados, los cuales tienen un enfoque hacia la disminución de alquitranes encontrando al aumentar la temperatura del proceso hay más producción de hidrógeno y monóxido de carbono e inversamente hay una disminución en la producción de metano y dióxido de carbono.

PALABRAS CLAVE: Agente gasificante, reactor lecho fijo, alquitranes, programación Fortran, poder calorífico mínimo, análisis de sensibilidad.

¹ PUIG-ARNAVAT. Op. cit., p. 2844.

² GSTC. The Gasification Industry. Gasification & Syngas Technologies Council [en línea], 16 de marzo de 2016 [revisado 10 octubre 2017]. Disponible en Internet: <http://www.gasification-syngas.org/resources/the-gasification-industry>.

³CUEVAS, Angélica. La madera que dejó de generar energía. En: El Espectador. Bogota D.C.25 septiembre 2013.Sec. Medio Ambiente

⁴Ibid., p. 1

INTRODUCCIÓN

La búsqueda y adaptación de diversas fuentes de energías renovables, como la biomasa residual, hacen que el proceso de gasificación sea atractivo principalmente por ser más amigable con el medio ambiente, ya que la biomasa residual, que es la materia prima del proceso a trabajar, produce la misma cantidad de dióxido de carbono en su proceso de degradación, comparado a cuando se le da un valor energético⁵, esto representa una opción de tratamiento de residuos urbanos.

La evolución de biomasa al gas de interés se denomina “Gasificación”, éste es un proceso termoquímico en el cual un sustrato carbonoso se convierte en un gas combustible, denominado gas de síntesis, compuesto principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y trazas de hidrocarburos pesados también denominados alquitranes⁶, Estos últimos son indeseados en el proceso ya que limitan la aplicabilidad posterior del gas producido.

La finalidad de este proyecto es evaluar energéticamente esquemas tecnológicos para el proceso de conversión de biomasa a gas de síntesis llevado a cabo en reactores; donde el gas producido es una fuente significativa de energía térmica y eléctrica que se da a partir de tecnologías de bajo costo como los gasificadores de lecho fijo⁷ con un uso posterior en motores de combustión interna o turbinas de vapor, para ello se utiliza el software Aspen Plus, el cual permite efectuar cálculos energéticos; encontrar las variables del proceso que permitan la obtención del gas de interés con mayor poder energético y mínimo contenido de impurezas, aportando así una solución económica, debido a que al realizar el proceso por medio de una simulación, se suple un sistema físico que implica costos, además, es posible realizar correcciones al sistema sin incurrir en gastos adicionales energéticos o excesivos de tiempo. Finalmente, es importante aclarar que este proyecto se desarrolla hasta la generación del gas de síntesis, no contempla ningún proceso posterior para el aprovechamiento de éste, ya sea para generar electricidad o calor.

La base de este trabajo es desarrollar dos esquemas tecnológicos de gasificación en reactores de lecho fijo extraídos de la literatura; estos serán implementados en el software Aspen Plus. Adicionalmente por medio del artículo “Review of kinetic

⁵ BURGOS, Jimmy. Gasificación de cuesco de palma para la obtención de gas combustible en un reactor de lecho fijo. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magíster en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. 22p

⁶ Ibid., p.96

⁷ PÉREZ, Juan, BORGE, David, AGUDELO, John. Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico – experimentales. En: Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia. Marzo, 2010. Vol. 1, no. 52, p. 95-107.

and equilibrium concepts for biomass tar modeling by using Aspen Plus”⁸ surge el propósito de tratar las impurezas, en este caso alquitranes o hidrocarburos pesados del gas producido en la simulación deseada, ya que menciona que si bien hay incremento en la intención de estudio de esta impureza dependiente de la composición de la biomasa, del agente gasificante y de las condiciones de operación del sistema, son muy pocos los documentos que hacen análisis sobre estos, este artículo basándose en los mismos fenómenos hace una simulación en el software de interés bajo el supuesto de que el alquitrán es benceno, tolueno y naftaleno utilizando diferentes reactores para la gasificación.

Basados en el trabajo de Juan Pérez denominado “Gasificación de Biomasa, Estudios teórico – experimentales en lecho fijo equicorriente”⁹ el cual menciona diferentes modelos para efectuar la gasificación de biomasa con distintos niveles de dificultad, se conoce que el proceso químico deseado se puede elaborar por medio del equilibrio químico y termodinámico en un enfoque estequiométrico y no estequiométrico, si se desea un diseño del sistema más robusto se puede utilizar un modelo de la cinética del proceso¹⁰. Para complementar la información es necesario ir al artículo “Review and analysis of biomass gasification models”¹¹ de Maria Puig-Arnavat y Joan Carles Bruno que presenta el diseño, la simulación en Aspen Plus, la optimización y el análisis del proceso, utilizando los modelos mencionados anteriormente en estado estacionario¹², por esto se tienen en cuenta estos modelos en la selección de los esquemas y en el análisis de sensibilidad que se aplica al proyecto.

Posteriormente se ejecuta un análisis energético de los procesos, debido a que es importante determinar si los esquemas obtenidos después del modelamiento son eficientes¹³ y se han desarrollado de manera adecuada; para esto se evaluará el consumo energético de las dos tecnologías.

El grupo de investigación en Procesos de Separación no Convencionales, desea en un futuro desarrollar experimentalmente un gasificador para el aprovechamiento de residuos, generando un gas combustible con un uso posterior en la generación eléctrica, para ello se requiere de estudios previos. Por tal razón y gracias a los

⁸PUIG-ARNAVAT, María; BRUNO, Joan Carles; CORONAS, Alberto. Review and analysis of biomass gasification models. En: Renewable And Sustainable Energy Reviews. Vol. 14, no. 9 (2010) p. 2843

⁹PÉREZ, Juan. Gasificación de biomasa: Estudios teórico-experimentales en lecho fijo equicorriente. 1 ed. Medellín: Universidad de Antioquia, 2009. 230 p. ISBN 978-958-714-263-1.

¹⁰ Ibid., p. 230.

¹¹PUIG-ARNAVAT. Op. cit., p. 2844.

¹²Ibid., p. 2844.

¹³WANG, Jiang-Jiang, YANG, Kun, XU, Zi-Long, FU, Chao. Energy and exergy analyses of an integrated CCHP system with biomass air gasification. En: Applied Energy. El sevier. Marzo, 2015. Vol. 142, no. 12, p. 317-327.

avances tecnológicos que se han adquirido en los últimos tiempos, nace la alternativa de simular este proceso químico, ya que el uso de simuladores tiene una ventaja; la cual es, que no es necesario tener los recursos físicos, como tiempo atrás para predecir el comportamiento de una sustancia o realizar un análisis de sensibilidad en algún caso específico.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el consumo energético de la producción de gas de síntesis del proceso de gasificación en reactores de lecho fijo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar dos esquemas tecnológicos del proceso de gasificación con reactores de lecho fijo, con suficiencia de parámetros cinéticos, termodinámicos y experimentales.
- Implementar en el simulador de procesos los esquemas tecnológicos seleccionados, con un enfoque hacia la disminución de alquitranes en la producción de gas de síntesis.
- Desarrollar un análisis de sensibilidad a las variables de operación del proceso de gasificación.
- Determinar el consumo energético de los procesos de gasificación seleccionados

1. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentarán algunas generalidades además de conceptos que comprende un sistema de gasificación y de simulación de un proceso químico. Estas revisiones fueron necesarias para la elección de la tecnología del proceso y el funcionamiento del software Aspen Plus.

1.1 GASIFICACIÓN

La gasificación es un proceso termoquímico en el cual un sustrato carbonoso sólido se convierte en un gas combustible denominado gas de síntesis¹⁴ compuesto principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y trazas de hidrocarburos pesados también denominados alquitranes¹⁵ en presencia de un agente gasificante. La composición de este gas combustible está directamente relacionada con el modelo del reactor, características de la biomasa, temperatura, presión de operación y agente oxidante¹⁶. El producto de interés tiene varias aplicaciones industriales; puede ser “utilizado en calderas de carbón pulverizados con el objetivo de que se dé una combustión directa o con un tratamiento posterior es posible que se de empleo en motores de combustión interna y turbinas de gas o además se puede emplear para la producción de combustibles líquidos u otros productos químicos”¹⁷. En la actualidad en el mundo hay más de 269 plantas de gasificación con 677 gasificadores, de las cuales solo el 7% utiliza biomasa como materia prima¹⁸, es por ello que vale la pena seguir investigando con el objetivo de generar más conocimiento de estas tecnologías para su aplicación con biomasa residual, en la figura 1 se pueden observar las ubicaciones de diferentes gasificadores alrededor del mundo para el año 2014.

¹⁴ SÁNCHEZ, Nuria. Obtención de gas de síntesis a partir de biomasa utilizando catalizadores de níquel. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Valladolid. Universidad de Valladolid.2014.23p.

¹⁵ PUIG-ARNAVAT. Op. cit., p. 28.

¹⁶ARTEAGA, Luis, CASAS, Yannay, CABRERA, Jagni, RODRÍGUEZ, Lizet. Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación. En: Afinidad LXXII. Junio, 2015. Vol. 72, no. 570, p. 138-145.

¹⁷ TRUJILLO, Sandra. Ingeniería de detalle y construcción de un sistema de gasificación en tres etapas. Proyecto fin de carrera para optar el título de ingeniería química y ambiental. Sevilla. Universidad de Sevilla.2013. p. 10.

¹⁸ GSTC. The Gasification Industry. Gasification & Syngas Technologies Council [en línea], 16 de marzo de 2016 [revisado 10 octubre 2017]. Disponible en Internet: <http://www.gasification-syngas.org/resources/the-gasification-industry>.

contribución energética global de esta materia prima será del orden de 100 y 400 EJ/año²¹.

1.1.1.1 Caracterización de la biomasa. Caracterizar la biomasa permite encontrar la energía que se puede obtener a partir de esta materia prima que depende directamente de su composición. La evaluación para encontrar los componentes constituyentes se da a partir de un análisis próximo o inmediato, un análisis último y el examen del poder calorífico de la misma.

✓ **Análisis inmediato.** El objetivo es encontrar las fracciones de cada componente constituyente mediante una separación que se da al variar las temperaturas basándose en las diferentes volatilidades de los compuestos²² como puede verse en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis inmediato residuos

Tipo de biomasa	Humedad (%masa)	Volátiles (%masa)	Cenizas (%masa)	Carbono fijo (%masa)
Industria maderera	12,00	71,23	0,40	16,37
Paja cereal	12,00	66,92	5,17	15,91
Restos poda	12,00	63,08	7,32	17,60
Mezcla	12,00	67,06	4,38	16,56

Fuente: VAL GENTO, Verónica, GIRALDO, Gregorio. Planta de cogeneración mediante gasificación de biomasa residual. En: Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Octubre, 2010.

Este análisis aporta las fracciones másicas de:

- Humedad (MC).
- Cenizas (“compuestos inorgánicos que pueden actuar como catalizador propiciando las reacciones químicas en procesos termoquímicos”²³. Sin embargo, estas pueden “ocasionar problemas de operación, relacionados con la posibilidad de fundición de este residuo, lo cual ocasiona obstrucción de los equipos”²⁴).

²¹BERNDES, Göran; HOOGWIJK, Monique y VAN DEN BROEK, Richard. The Contribution Of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. [1]:2003. 1-28.

²²VAL GENTO, Verónica, GIRALDO, Gregorio. Planta de cogeneración mediante gasificación de biomasa residual. En: Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Octubre, 2010.

²³RAVEENDRAN, K.; GANESH, Anuradda y KHILAR, Kartic C. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. En: FUEL. vol. 74, 1995, no. 12. 1812-1822 p.

²⁴FERNÁNDEZ, Eduardo. Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Tesis presentada como requisito parcial para optar al

- Material volátil (VM).
 - Carbono fijo (FC) residuo después de la liberación de gases.
- ✓ **Análisis último.** Tiene el mismo formato del análisis inmediato con la disimilitud de que en lugar de determinar la cantidad de humedad, cenizas, material volátil y carbón fijo se evalúan los contenidos en peso de las fracciones de cada componente (C, H, O, S, CL, N).
- ✓ **Poder calorífico.** Obtenido mediante una bomba calorimétrica que permite el cálculo de la capacidad calorífica del material orgánico a trabajar²⁵.

El poder calorífico de una mezcla puede ser calculado mediante el poder calorífico máximo (HHV) o el valor de calentamiento mínimo (LHV), este último también es conocido como el valor calorífico neto (NCV), se define como: “la cantidad de calor liberado cuando se somete a combustión completa una cantidad específica menos el calor de vaporización del agua en la combustión producto”²⁶, sin embargo, cuando se tiene en cuenta el calor latente del agua a esta propiedad se le denomina HHV.

1.1.1.2 Influencia de la composición de biomasa en el gas de síntesis

- ✓ **Contenido de Humedad.** Altas concentraciones de esta variable en la biomasa a alimentar afectan la eficiencia del proceso, ya que disminuye el poder calorífico del gas, lo que tiene que ver directamente con la composición de este, por esta razón debe ser eliminada, la energía que se utiliza para este efecto no se recupera²⁷.
- ✓ **Presión y Temperatura.** Normalmente en las tecnologías utilizadas para el proceso de gasificación la presión de trabajo es la atmosférica, pero se puede trabajar con presiones hasta de 3MPa²⁸. Aumentar la presión favorece las reacciones de gasificación aumentando el contenido de hidrocarburos²⁹. “La temperatura influye directamente en el equilibrio de las reacciones del proceso, lo cual va ligado al rendimiento del proceso pues al aumentar esta variable se

título de: Magíster en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. p.10

²⁵FERNÁNDEZ, Op.cit., p.12.

²⁶BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design. 1 ed. Elsevier, 2010. 365 p. ISBN 978-0-12-374988-8.

²⁷FERNÁNDEZ, Op.cit., p.12.

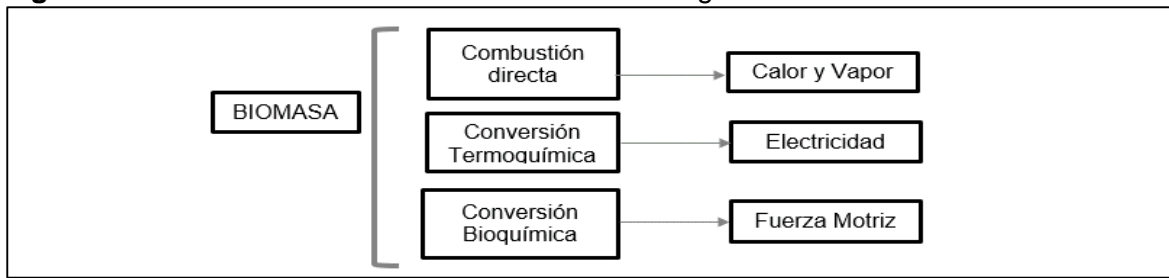
²⁸AGRO WASTE. Agro waste gasificación, En: Centro tecnológico nacional de conserva y alimentación [en línea] [revisado 13 octubre 2017]. Disponible en Internet: <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/GASIFICACIONC3%93N.pdf>.

²⁹ Ibid., p. 3

incrementa el hidrógeno y el monóxido de carbono en el gas pobre obtenido; de la misma forma disminuyen las cantidades de metano y vapor de agua”.³⁰

1.1.2 Métodos de conversión de biomasa en energía. Los tratamientos utilizados para dar un valor agregado energético y económico a la biomasa se dividen principalmente en tres métodos como se expondrá enseguida:

Figura 2. Métodos de conversión de biomasa en energía



Fuente: REVISTA ENERGIZA. Proceso de conversión de biomasa en energía. [En línea]. Modificado por autora. [Revisado 7 julio 2017]. Disponible en Internet: <http://www.energiza.org/index.php/biomasa-2/56-procesos-de-conversion-de-biomasa-en-energia>.

1.1.2.1 Combustión directa. El objetivo de este método es generar calor por medio de vapor a partir de hornos o calderas³¹, este producto con contenido energético en forma de calor puede ser utilizado como insumo para procesos químicos.

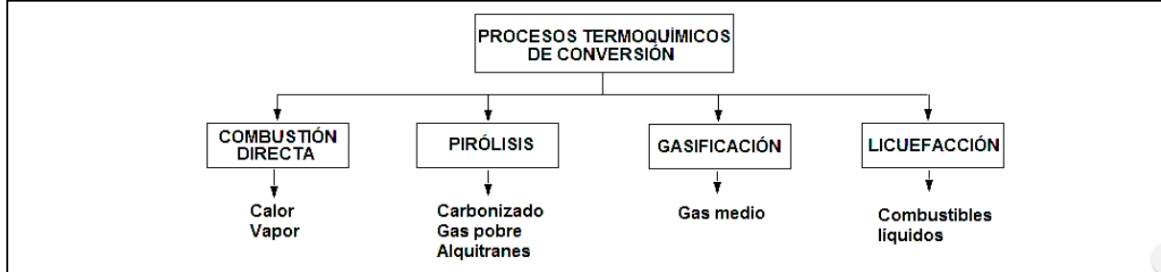
1.1.2.2 Conversión termoquímica. El principio básico de este método es aplicar calor para que la biomasa se descomponga. Generalmente se utiliza en biomasa seca (humedad < 60%)³², ya que una alta humedad representa, baja eficiencia en el poder calorífico del producto deseado ya que se debe emplear energía en que se dé la evaporización del vapor de agua contenido en el gas combustible. Existen diferentes fases que abarcan procesos termoquímicos los cuales son; pirólisis, gasificación, licuefacción y combustión como se puede ver en la figura 3. y se explicará más adelante.

³⁰Ibid., p. 2

³¹ Ibid., p. 18..

³²ENERGÍAS RENOVABLES. Energía-biomasa, En: Coordinación de Energías Renovables, Subsecretaría de Energía Eléctrica. República argentina. [En línea] [revisado 7 julio 2017]. Disponible en Internet: http://www.inti.gob.ar/renova/erTO/pdf/libro_energia_biomasa.pdf.

Figura 3. Procesos termoquímicos de conversión de la biomasa en energía



Fuente: FERNÁNDEZ, Eduardo. Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magíster en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. Modificado por autora. 29p.

1.1.2.3 Conversión bioquímica. El pilar de estos procesos es aprovechar la acción metabólica de los organismos microbiales para producir combustibles. Dentro de este enfoque se encuentra “la fermentación anaeróbica que utiliza como tecnologías biodigestores, obteniendo biogás y el otro método es la fermentación alcohólica para producir combustibles alcohólicos”³³.

1.1.3 Agente gasificante. También llamado agente oxidante o agente de reacción, es una corriente gaseosa (compuesta por aire, oxígeno, vapor de agua, hidrógeno, dióxido de carbono o una mezcla de estos³⁴) que entra al gasificador aportando el calor inicial para que se den las reacciones correspondientes al proceso, dependiendo del tiempo requerido para que se dé la conversión final, sin embargo, de la elección de este tipo de gas depende el tipo de reacciones que tienen lugar. “Generalmente se utiliza aire, ya que es más económico de obtener. La principal desventaja radica en el bajo poder calorífico del gas obtenido, debido a la presencia de nitrógeno en el syngas (aproximadamente ente 3 - 6 MJ/Nm³)”³⁵.

El uso de oxígeno puro genera un gas con poder calorífico de 10 a 15 MJ/Nm³ y al emplear H₂O se obtiene una mezcla de gases con un poder calorífico de 13 a 20 MJ/Nm³ ³⁶; con estas dos materias primas se obtiene mayor proporción de hidrógeno en el gas producido lo cual mejora la eficiencia, sin embargo, se consume más energía que con O₂. Emplear hidrógeno produce valores energéticos de hasta

³³REVISTA ENERGIZA. Proceso de conversión de biomasa en energía. [En línea] [revisado 7 julio 2017]. Disponible en Internet: <http://www.energiza.org/index.php/biomasa-2/56-procesos-de-conversion-de-biomasa-en-energia>.

³⁴DURÁN, Martín, RUIZ, Ricardo. Diseño de equipos de contacto sólido-líquido a elevadas presiones en el procesamiento de la biomasa. En: Ciencia y Tecnología. Univ. De Palermo. 2015. Vol. 15, p. 25-40.

³⁵ Ibid., p.26

³⁶ Ibid., p.26

40 MJ/Nm³, lo que posibilitaría su uso como sustituto del gas natural³⁷. La gasificación con H₂ es viable a presiones elevadas. Cuando se realiza la gasificación con oxígeno; además de la reacción de gasificación ocurre simultáneamente la reacción de combustión total, eliminándose la producción de CO³⁸ lo cual es indeseado en este proceso.

En la tabla 2 se puede encontrar un resumen de los efectos en el poder calorífico, composición del gas de síntesis, la temperatura a la cual se lleva el proceso de gasificación y el costo de estos sistemas de lecho fijo al variar el tipo de agente gasificante utilizado, mostrando que se debe lograr un equilibrio entre estos factores para obtener un proceso eficiente.

1.1.4 Gas de síntesis. Es el gas de interés del proceso, contiene monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, metano, alquitrán, agua y pequeñas cantidades de hidrocarburos como etano.³⁹ “La composición más común del gas de síntesis es de 15% de monóxido de carbono (CO), 12% hidrógeno (H₂), 5% metano (CH₄), 50% de nitrógeno (N₂), 15% dióxido de carbón (CO₂) y 3% de otros hidrocarburos, donde los tres primeros determinan el poder calorífico del gas (1300 a 1500 Kcal/Nm³), casi una sexta parte de él que posee el gas natural si se utiliza el aire como agente gasificante. El valor de la densidad también puede variar, pero en promedio está alrededor de 1.18 kg/Nm³ a temperatura ambiente y 0.519 kg/m³ a 400°C⁴⁰.”

En la siguiente figura se pueden observar los productos que se obtienen a partir de esta materia prima a partir del proceso de gasificación, que normalmente tiene como fuente energética biomasa residual de bajo valor comercial, provocando así una valorización de esta, disminuyendo la dependencia de fuentes no renovables al ser utilizado para la producción de electricidad, combustible y productos químicos.

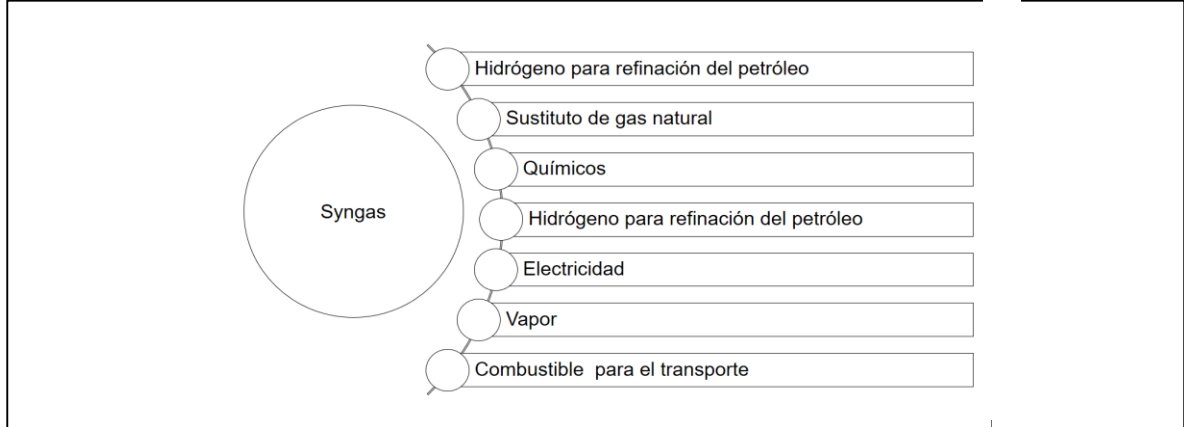
³⁷ Ibid., p.27

³⁸Ibid., p.1406

³⁹BELTRÁN Martínez, Mauricio. Estudio de un sistema de gasificación de biomasa a pequeña escala en lecho fluidizado burbujeante. Bucaramanga, 2005.Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas.

⁴⁰ BOLOGNA, Tecnologia dei Materiali Ceramici. Placas Cerámicas de bajo espesor: Tecnologías, aplicaciones y problemas. 1-15 p.

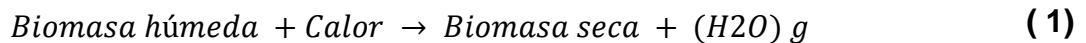
Figura 4. Aplicaciones industriales del gas de síntesis obtenido en la gasificación



Fuente: BURGOS, Jimmy. Gasificación de cuesco de palma para la obtención de gas combustible en un reactor de lecho fijo. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. Modificado por autora.25p

1.1.5 Fases del proceso de gasificación. En este proceso de conversión hay una serie de reacciones de óxido reducción que pueden ser endotérmicas o exotérmicas, homogéneas o heterogéneas y se dan a lo largo de las diferentes fases o fenómenos de un proceso de gasificación en función de la temperatura como se mostrara en esta sección

1.1.5.1 Secado. La finalidad del secado es disminuir el contenido de humedad o agua en la biomasa, se da a temperaturas no menores de 100 y 200°C⁴¹, además se absorbe el calor sensible para elevar la temperatura del equipo cuando es de calentamiento directo, generándose así la liberación de gases de bajo peso molecular. Se estima que por cada kilogramo de humedad presente en la biomasa es necesario 2260 kJ de energía para vaporizar el agua. En reactores de lecho fijo se requiere que la biomasa alimentada al proceso sea seca con un contenido de humedad entre 10 y 20%.⁴²La zona de secado está representada por la siguiente reacción:

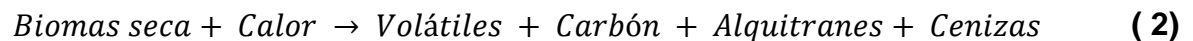


⁴¹IDEA-Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). Biomasa: gasificación.Madrid.[enlínea]http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_gasificacion_07_d2adcf3b.pdf [citado en 20 de junio del 2017]

⁴²BURGOS. Op.cit., p.28.

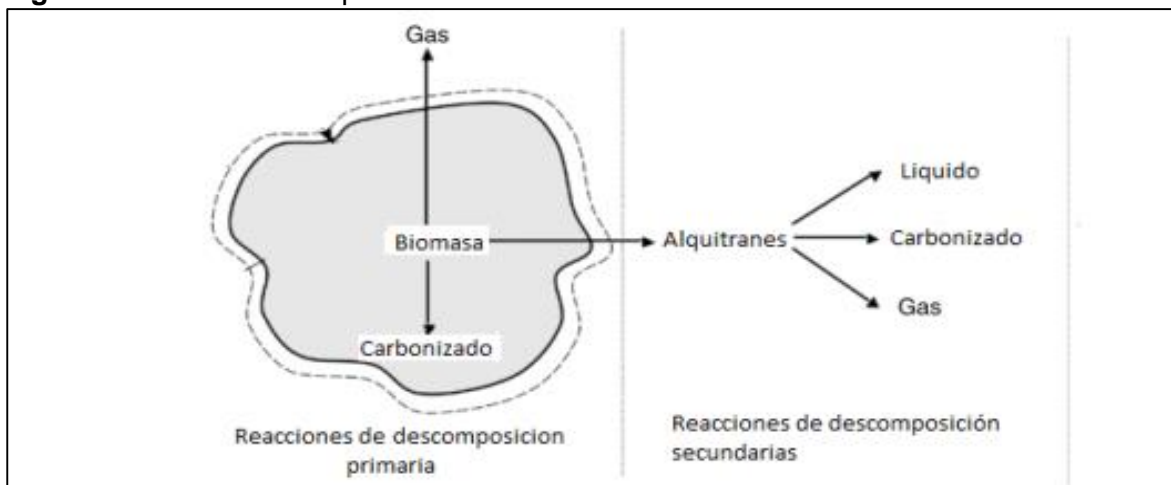
1.1.5.2 Pirólisis. A esta fase del proceso también se le llama carbonización, no es más que la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno que produce parte de los gases que componen el gas de síntesis deseado, carbón, cenizas y alquitrán, estos últimos pueden tratarse en una etapa posterior para generar CH₄, CO₂, CO, H₂, líquidos y carbonizado⁴³.

Este fenómeno de descomposición térmica se da a bajas temperaturas; entre 200 y 700°C⁴⁴, las reacciones son endotérmicas, homogéneas y heterogéneas (gas-sólido) pero dependen de la temperatura, presión, velocidad de calentamiento y puede ser representado por la siguiente reacción:



A continuación, puede verse el proceso de pirólisis representado en una partícula de biomasa.

Figura 5. Pirólisis de una partícula de biomasa



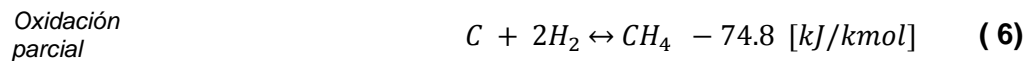
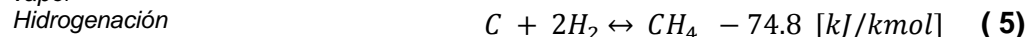
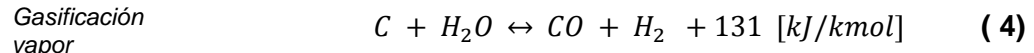
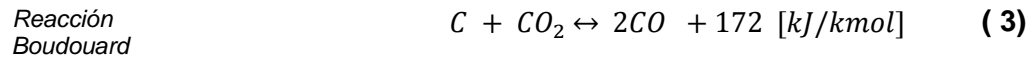
Fuente: BURGOS, Jimmy. Gasificación de cuesco de palma para la obtención de gas combustible en un reactor de lecho fijo. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magíster en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. 28p.

⁴³BARCO Burgos, J. Gasificación de cuesco de palma. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia 2015

⁴⁴Ibid., p. 29

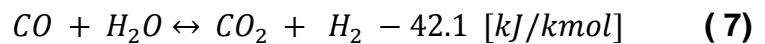
1.1.5.3 Reducción. Se dan a altas temperaturas reacciones químicas complejas donde hay carencia de oxígeno unida a la disponibilidad de carbono mineral, dióxido de carbono y vapor de agua, produciéndose hidrógeno molecular y monóxido de carbono⁴⁵. Las principales reacciones en este proceso se pueden ver a continuación:

- *Reacciones de carbón.*

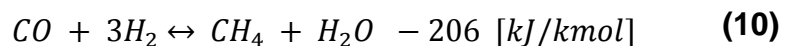
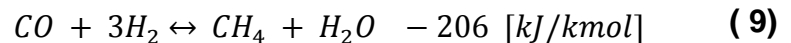
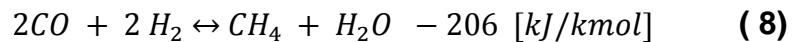


Fuente: BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design. 1 ed. Elsevier, 2010. Modificado por autora. 365 p. ISBN 978-0-12-374988-8.

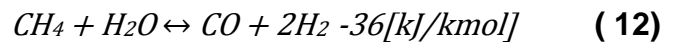
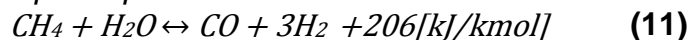
- *Reacción Shift.*



- *Reacciones de metanización.*



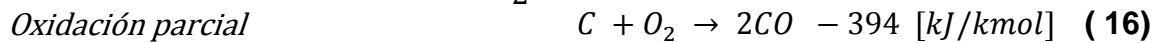
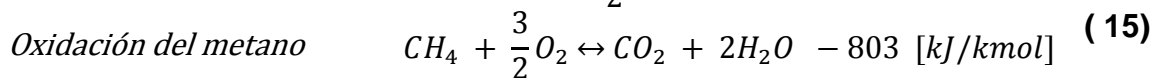
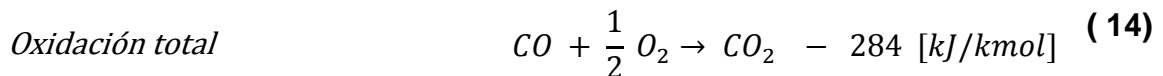
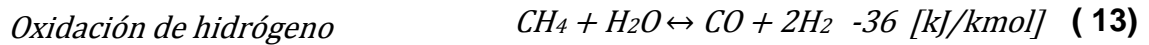
- *Reacciones de reformación por vapor.*



Fuente: BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design. 1 ed. Elsevier, 2010. Modificado por autora. 365 p. ISBN 978-0-12-374988-8.

⁴⁵IDEA.Op.cit.,p.3

1.1.5.4 Oxidación. Corresponde a la última etapa, es la combustión mediante una serie de reacciones exotérmicas, por ende, hay generación de calor; entre los volátiles, el agente de oxidación y el carbonizado. Esta sección se introduce después de la de gasificación para favorecer la combustión completa del carbón no carbonizado o residual, aumentando el rendimiento del gas de síntesis con la generación de gases de bajo peso molecular y cenizas o carbón puro no volátil con rangos de temperaturas aproximados de 700 a 1500°C, donde principalmente se dan las siguientes reacciones⁴⁶:



Fuente: MACHORRO, Ricardo. Estudio de la producción de hidrógeno a partir de los residuos sólidos de la ciudad de México mediante la tecnología de gasificación. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: maestro en ingeniería de la energía. México D.C. Universidad Nacional Autónoma de México. 2016. Modificado por autora. 83p.

1.1.6. Tecnologías para la gasificación. Existen diferentes tipos de reactores para la gasificación de biomasa; del tipo de tecnología utilizada para este proceso también va a depender los productos obtenidos, estos equipos pueden clasificarse de acuerdo a la forma en que se da el contacto biomasa-agente gasificante y según el calentamiento del equipo como se ve en el esquema de la figura 6. En esta última clasificación un equipo con calentamiento directo es en el cual el calor que requiere el sistema se consigue a partir de la combustión parcial de la biomasa; en el indirecto, el calor se consigue por una fuente externa⁴⁷. Dependiendo del contacto que se da entre las materias primas utilizadas los reactores pueden clasificarse entre lecho fijo (potencias medias-bajas) o reactores de lecho fluidizado con tecnología más exigente y con mayor capacidad de generación⁴⁸. En los primeros las partículas se encuentran en un estado estacionario sobre una rejilla perforada a través de la cual los gases fluyen ejerciendo una fuerza de arrastre sobre la fase

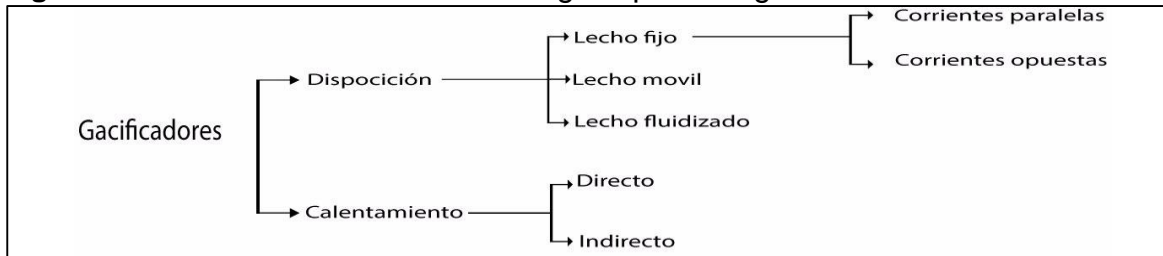
⁴⁶HUSAIN, Mazhar. Simulation of effects of various parameters in solid. Proyecto para obtener título de tecnólogo en ingeniería química. Instituto nacional de tecnología, Rourkela, India. Instituto tecnológico Rourkurela. 2012-2013. 7p.

⁴⁷FERNÁNDEZ, Op.cit., p.16-19.

⁴⁸ PÉREZ, Juan. Gasificación de biomasa: Estudios teórico-experimentales en lecho fijo equicorriente. 1 ed. Medellín: Universidad de Antioquia, 2009. 230 p. ISBN 978-958-714-263-1.

sólida y produciendo un caída de presión cambiante a lo largo del lecho⁴⁹ y en los segundos el agente gasificante circula por el interior del reactor a una velocidad ascensional tal que un lecho de sólido inerte, que se añade a su interior, se encuentra en estado de fluidificación, existiendo en el interior del gasificador una retro mezcla que favorece la transferencia de materia y energía entre el combustible y el gas⁵⁰. A continuación, se profundizará en los primeros puesto que son los que se van a utilizar en esta investigación.

Figura 6. Clasificación de las tecnologías para la gasificación de biomasa.



Fuente: FERNÁNDEZ, Eduardo. Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magíster en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia.16-19p.

1.1.6.1 Reactores de lecho fijo. En este equipo la biomasa cae por acción de la gravedad mientras va gasificándose, puede encontrarse con el agente gasificante de forma ascendente (contracorriente) o descendente (isocorriente). Son de construcción simple, apropiados para pequeña escala; generalmente operan con alta conversión de carbono, largos tiempos de residencia, baja velocidad del gas y bajo transporte de cenizas⁵¹. Esta clase de equipos opera con biomasa que tenga un tamaño uniforme en sus partículas y un contenido de humedad y cenizas menor de 20 % y 5 % respectivamente⁵².

⁴⁹ HERNÁNDEZ, Ulises. Modelado orientado al control de gasificadores. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Maestro en ingeniería. México D.F.2009. Universidad Nacional Autónoma de México.18-20p.

⁵⁰ GRACE, J.R.; KNOWLTON, T.M.; AVIDAN, A.A.Circulating Fluidized Beds, 1st Edition; Chapman & Hall: London (UK), 1997.

⁵¹ FERNÁNDEZ, Eduardo. Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magíster en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. 17p.

⁵² *Ibíd.*, p.18

✓ **Gasificador en isocorriente.** En los gasificadores de flujo descendente el gas de síntesis producido es expulsado por la parte inferior del gasificador a temperaturas mayores a 800 °C⁵³. El agente de reacción se introduce ya sea en la parte superior del equipo o directamente en la zona de gasificación. Los gasificadores con operación downdraft presentan las siguientes características⁵⁴:

- Conversión de biomasa elevada.
- Temperatura de salida alta, debido a su configuración que atraviesa la zona de oxidación antes de salir del reactor.
- Capacidad de operación baja.
- Baja concentración de alquitranes.⁵⁵
- Baja eficiencia térmica consecuencia de altas temperaturas de escape en los gases producidos⁵⁶

Para esta investigación se escogió este arreglo como tecnología de gasificación, debido a que se desea trabajar en la disminución del contenido de alquitranes.

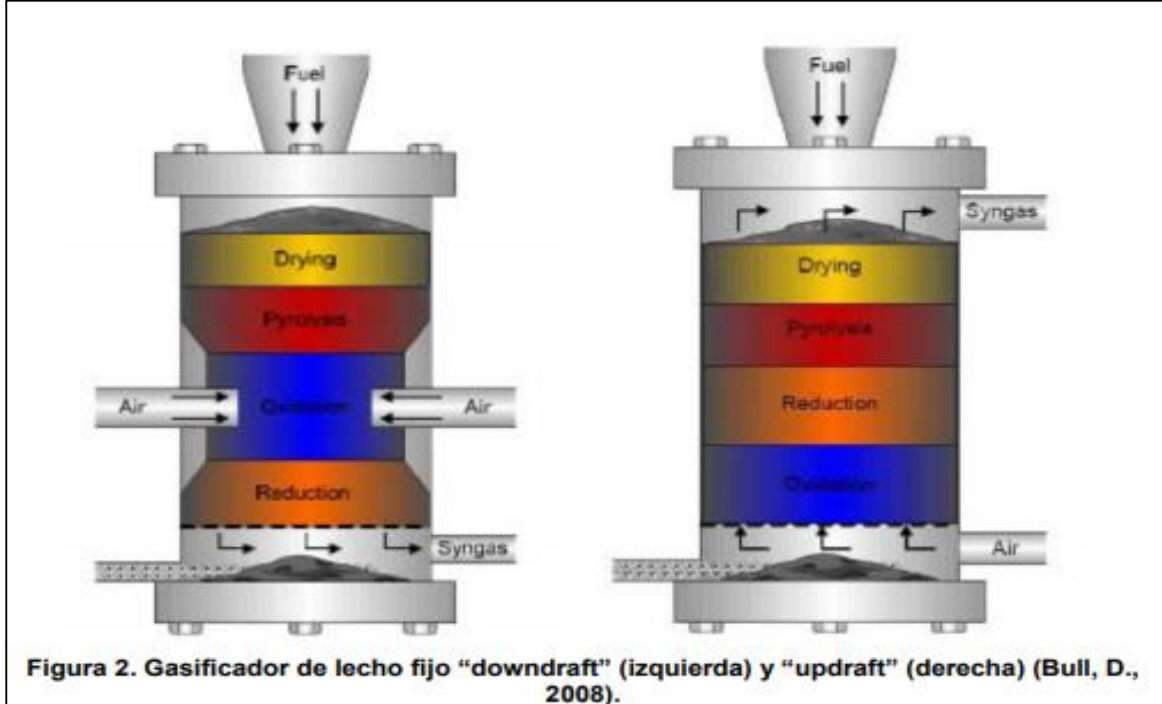
⁵³ ESTRADA, Carlos, Meneses, Alberto. Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. En: Scientia et Technica. Agosto 2004. No 25. 155-159p.

⁵⁴NARANJO, Manuel. Gasificación de biomasa y residuos en lecho fluidizado: estudios en planta piloto. Sevilla, Mayo2009. Memoria presentada para obtener el título de Doctor. Universidad de Sevilla.4p

⁵⁵ ESTRADA. Op.cit.,p.158.

⁵⁶ BURGOS. Op.cit.,p.32

Figura 7. Gasificador de lecho fijo "downdraft" (Izquierda) y "updraft" (derecha).



Fuente: BULL, Dog. Performance Improvements to a Fast Internally Circulating Fluidized Bed (FICFB) Biomass Gasifier for Combined Heat and Power Plants. University de Canterbury, 2008. 56-57p.

✓ **Gasificador en contracorriente.** En los gasificadores de flujo en contracorriente el gas producido se entrega en la parte superior del gasificador a temperaturas menores a 300 °C⁵⁷ y el agente gasificante ingresa por la parte inferior de este equipo. Los reactores de lecho fijo updraft contemplan los siguientes factores:⁵⁸

- Mayor eficiencia térmica respecto a los gasificadores de lecho fijo en isocorriente, consecuencia de la temperatura menor temperatura de salida del gas de interés⁵⁹.
- Capacidad de operación baja.

⁵⁷ ESTRADA. Op.cit.,p.156

⁵⁸NARANJO. Op.cit.,p.5-7.

⁵⁹ LÓPEZ, Ismael. Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación. En: CONAMA, Congreso nacional de medio ambiente.2014.7-11p.

- Alto contenido de alquitranes, puesto que como estos son generados en la fase pirolisis, no pueden ser descompuestos después en las otras zonas con mayor temperatura, ya que como el gas de síntesis producido sale por la parte superior del equipo, este solo tiene contacto con la fase secado⁶⁰.

1.1.7 Alquitranes. Consiste en una mezcla de diferentes hidrocarburos condensables formados en procesos termoquímicos como la gasificación y la pirólisis⁶¹, se han identificado cerca de 230 compuestos presentes en estos⁶². Su composición varía con las condiciones operativas del proceso; por la temperatura a la que son sometidos y por el tiempo de residencia en los ambientes de reacciones exotérmicas⁶³. Tienen un alto contenido de agua proveniente de la humedad del combustible y de las reacciones de descomposición. Esta mezcla comprende diferentes puntos de ebullición y es un producto limitante en el uso posterior del gas de síntesis en procesos en los que el gas deba tener una temperatura más baja, comparada con la salida del proceso de gasificación, puesto que causan obstrucción en tuberías; esto no quiere decir que no pueda usarse, pero si debe hacerse una limpieza lo cual incrementa costos, como en los procesos de producción de electricidad por medio de motores de combustión interna alternativos.⁶⁴ En la tabla 2 puede verse una caracterización desarrollada a este compuesto.

Los alquitranes pueden clasificarse en tres grupos según su etapa de formación:

1.1.7.1 Alquitrán primario. Son moléculas formadas tras la fragmentación del combustible producto de la pirólisis dada en rangos de temperatura de 400 a 700°C, están formados principalmente por compuestos polares y son solubles en agua⁶⁵. Se ha reportado que la gasificación a partir de biomasa genera más porcentaje de estos compuestos indeseados, en comparación con la del carbón mineral, debido a que, la biomasa tiene generalmente el doble de material volátil respecto al carbón mineral, que puede ser precursor del alquitrán a baja temperatura.⁶⁶

⁶⁰ BURGOS. Op.cit.,p.32

⁶¹AHMED, A. SALMIATON, A., CHOONG, W., WANG, A. Review of kinetic and equilibrium concepts for biomass tar modeling by using Aspen Plus. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Diciembre, 2015.vol. 52, p. 1623-1644

⁶² HERNÁNDEZ. Op. cit., p. 15.

⁶³Ibid., p. 34

⁶⁴NARANJO. Op. cit., p. 6.

⁶⁵GONZÁLES, Jesús. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Mundi-prensa. 2015. ISBN: 9788484766742.2. 210p.

⁶⁶PATINO, Alberto. Implantación de metodología SPA de captura de alquitranes y desarrollo de dispositivo de dopado de alquitranes. Proyecto final de carrera. Sevilla. Universidad de Sevilla.15p.

1.1.7.2 Alquitrán secundario. Su formación se da a partir de los alquitranes primarios en reacciones secundarias (recombinación, polimerización, aromatización y condensación⁶⁷) a temperaturas mayores de 500°C, donde comienza a reorganizarse formando estructuras aromáticas y poliaromáticas de mayor peso molecular; de carácter apolar y más resistentes a tratamiento térmico y/o catalítico; su formación se ve favorecida a altas temperaturas y tiempos de residencia; dentro de este grupo se encuentran los fenoles y las olefinas⁶⁸.

1.1.7.3 Alquitrán terciario. A partir de las reacciones secundarias que generan hidrocarburos livianos, aromáticos, compuestos oxigenados y olefinas⁶⁹, llamados alquitranes secundarios en la sección anterior, se producen condensados que generalmente son una mezcla de hidrocarburos poli aromáticos no sustituidos tales como benceno, naftaleno, antraceno, fenantreno y píreno⁷⁰ denominados alquitranes terciarios.

Tabla 2. Composición de un alquitrán.

Componente	%wt
Benceno	37,9
Tolueno	14,3
Con 1 anillo aromático	13,9
Naftaleno	9,6
Con 2 anillos aromáticos	7,8
Con 3 anillos aromáticos	3,6
Con 4 anillos aromáticos	0,8
Componentes fenólicos	4,6
Componentes heterocíclicos	6,5
Otros	1,0

Fuente: AHMED, A. SALMIATON, A., CHOONG, W., WANG, A. Review of kinetic and equilibrium concepts for biomass tar modeling by using Aspen Plus. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Diciembre, 2015.vol. 52. p. 1623-1644.

1.1.7.4 Tratamientos para la disminución de alquitranes

⁶⁷ Ibid., p. 210

⁶⁸ AHMED. Op cit. 1630

⁶⁹ Ibid., p. 1631

⁷⁰ GONZÁLES. Op. cit., p. 253

✓ **Tratamientos térmicos.** También llamado craqueo térmico, consiste en la transformación de alquitrán en gases ligeros mediante el calentamiento a una temperatura determinada durante cierto tiempo⁷¹. Puede ser necesario operar a altas temperaturas para lograr altos índices de craqueo de alquitranes, se sugiere que la temperatura de cracking térmico debe ser de 1250°C con un tiempo de residencia de 0.5 s⁷².

✓ **Tratamientos catalíticos.** Consiste en poner en contacto los gases producidos en un proceso termoquímico con un agente catalizador a una temperatura moderada, para romper las moléculas de los alquitranes generados y formar productos de menor peso molecular.

Clases de catalizadores utilizados para el tratamiento de alquitranes⁷³:

- a) Catalizadores base-alcalinos como las de Li, Na, K, Rb, Cs⁷⁴.
- b) Base-metal, como las bases de níquel o cobalto, empleado cuando se da la gasificación a temperaturas menores de 550°C y para facilitar la formación de CO e H₂⁷⁵.
- c) Catalizadores naturales, tales como la dolomita y el olivino (Silicato de magnesio, hierro con la fórmula (Mg, Fe) 2sio4). La dolomita es el catalizador más común que elimina de forma efectiva los hidrocarburos pesados de la corriente de gas, mejorando el rendimiento de este. Además, es barato y abundante. Sin embargo, solo es significativamente activo por encima de los 800°C.

✓ **Tratamientos físicos.** Consiste en incluir una serie de equipos a la salida del proceso para disminuir el contenido de alquitranes. En primer lugar, por medio de separadores multiciclones especiales para altas temperaturas se eliminan alquitranes y partículas sólidas en suspensión presentes en el gas de síntesis obtenido, para después pasar por un intercambiador de calor con el objetivo de hacer un enfriamiento hasta aproximadamente 100°C, previo al filtrado y lavado que

⁷¹ Ibid., p. 253

⁷² GENES, Eder. Destilación secundaria de alquitranes generados en la gasificación de cuesco de palma africana. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: ingeniería química. Medellín, 2014. Universidad Nacional de Colombia. 20 p.

⁷³ Ibid., p. 36

⁷⁴ MÍGUEZ, Claudio. La eficiencia energética en el uso de la biomasa para la generación de energía eléctrica: optimización energética y exergética. Memoria para optar al grado de doctor. Madrid, 2013. Universidad Complutense de Madrid.

⁷⁵ HERGUEDAS, Lucas. Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. 2012. ISBN: 978-84-931891-5-0

generaran un gas con las condiciones necesarias para una aplicación posterior industrial⁷⁶.

⁷⁶ DÍAZ, Antonio. Estudio de una planta de cogeneración a partir del aprovechamiento de biomasa. Trabajo final de grado para obtener el título de: Ingeniero Mecánico. Universidad de la laguna.

2. SELECCIÓN DE REACTORES DE LECHO FIJO PARA EL PROCESO DE GASIFICACIÓN

En esta unidad se presenta la selección para la implementación de dos reactores tecnológicos del proceso de gasificación en reactores de lecho fijo; se realizó una búsqueda bibliográfica del sistema donde el criterio principal de selección es la suficiencia de parámetros cinéticos, termodinámicos y experimentales que permitieran la simulación en el software Aspen Plus, en la sección 2.1 se exponen las fuentes tentativas de selección, en la 2.2 el método de selección y en el 3 que corresponde a la implementación en el simulador, se especifica a profundidad las características de los modelos seleccionados.

2.1 CASOS DE ESTUDIO

Debido a que en el software Aspen Plus no existe una unidad de proceso que pueda representar por sí sola a un reactor de lecho fijo, su implementación se realiza con una combinación de diferentes equipos que representan diferentes partes o fenómenos que se llevan a cabo dentro del reactor, para algunos casos es necesario incorporar formulaciones en Fortran para cálculos específicos.

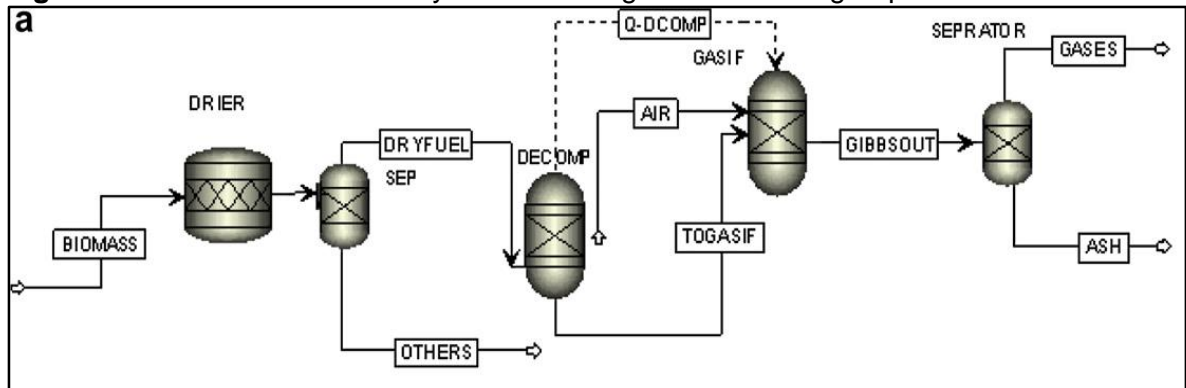
Para todos los casos se estudió se presentan las siguientes consideraciones:

- a) Estado estacionario.
- b) El reactor se divide en diferentes zonas: secado, pirólisis, combustión y gasificación.
- c) Se incluyen códigos Fortran para el cálculo de la conversión que requiere la estequiometría del proceso y para la distribución de rendimiento de biomasa.
- d) Se utiliza un enfoque cero dimensional no estequiométrico para las fases de combustión y gasificación
- e) Debido a que la biomasa es un componente no convencional (significa que no está en la base de datos de Aspen Plus), antes de alimentar la biomasa a la zona de reducción y oxidación se descompone en sus elementos (C, H, O, N, S, etc.).

A continuación, se mostrarán las referencias más significativas pre-seleccionadas que podrían cumplir con todos los requisitos establecidos:

2.1.1 Caso1: (figura 8). En la referencia “Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen Plus”⁷⁷, se desarrolla la simulación de un reactor de lecho fijo utilizando residuos sólidos municipales, desechos alimenticios y residuos de aves de corral como biomasa, con la finalidad de encontrar los datos operacionales ideales para el desarrollo de la gasificación, validando sus resultados con un desarrollo experimental.

Figura 8.Caso 1: Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen Plus



Fuente: RAMZAN, Naveed, ASMA, Ashrafet, ABDULLAH, Malik al. Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen Plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste. En: BIOMASS AND BIOENERGY. 2011 vol. 35, no. 9, 3962-3969p.

2.1.1.1 Ventajas

- No contempla la cinética del proceso.
- Enumera unidades de operación utilizadas en cada fase.
- Presenta sistema general de la simulación de un reactor de lecho fijo de corrientes paralelas, especificando en que bloques hay programación Fortran.
- Describe los métodos de solución para las propiedades físicas de los componentes en estado gaseoso y sólido.
- Muestra las fracciones molares obtenidas en el gas de síntesis producido para diferentes biomásas debidamente caracterizadas.

⁷⁷RAMZAN, Naveed, ASMA, Ashrafet, ABDULLAH, Malik al. Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen Plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste. En: BIOMASS AND BIOENERGY. 2011 vol. 35, no. 9, 3962-3969p.

2.1.1.2 Desventajas

- a) No especifica condiciones de entrada de temperaturas, presiones, flujos o reducción de humedad en la biomasa.

2.1.2 Caso 2: (Figura 9). En el artículo “Modelling and Simulation of Coal Gasification Plant”⁷⁸, los autores evalúan Aspen Plus como una herramienta de optimización, realizando análisis de sensibilidad para determinar la influencia de las condiciones de operación. Para el modelamiento de este utilizan tres tipos de reactores y dos unidades de separación (gas-sólido).

2.1.2.1 Ventajas

- a) Precisa estequiometría que debe tener el reactor que modela la fase secado que es general cuando se desea evaporar la humedad presente en la biomasa en procesos de gasificación.
- b) Especifica modelos de propiedades físicas útiles en el manejo de sólidos.
- c) Utiliza un reactor basado en modelos cero dimensionales con enfoque no estequiométrico para la combustión y gasificación del proceso, método que se caracteriza por desprestigiar la complejidad hidrodinámica del gasificador, determinando la composición en equilibrio de los productos resultantes de las reacciones que pueden tener lugar en el proceso sin necesidad de ingresar al equipo mecanismos de reacción.
- d) Establece los bloques u operaciones unitarias utilizadas para modelar el reactor de gasificación.
- e) Detalla los tipos de corrientes que se deben manejar según el estado de sustancia que se va a manejar en los fenómenos del equipo; ya sea sólido, gaseoso, líquido o una mezcla de estos.

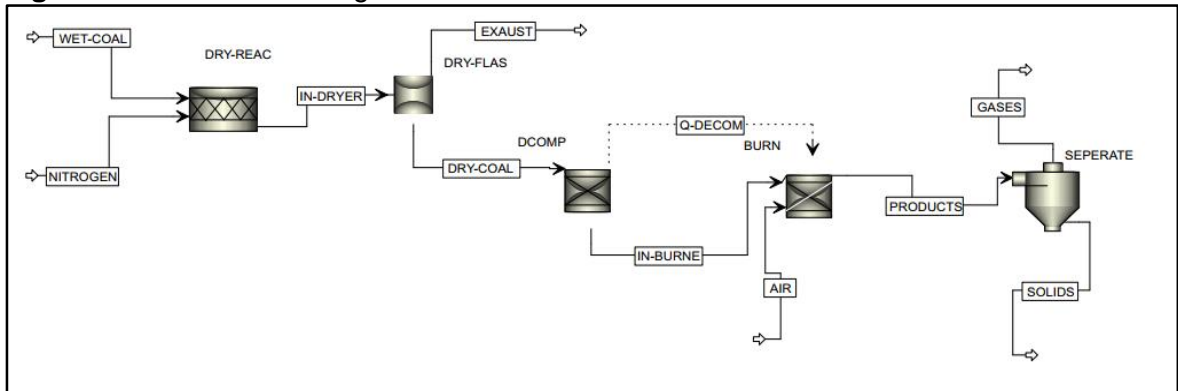
2.1.2.2 Desventajas

- a) El documento cuenta con todas las condiciones de entrada al reactor, sin embargo, no especifica las composiciones a la salida de este.

⁷⁸RAMZAN, N., ASHRAF, A., USMAN, J., SHABBIR, H. Modelling and Simulation of Coal Gasification Plant. En: Revista Del Instituto De Ingenieros Químicos De Pakistán. 2010. Vol. 38. 33-38P.

- b) La única forma de validar este documento es replicando las gráficas, sin embargo, hay insuficiencia de datos para esto.

Figura 9. Caso 2: Modelling and Simulation of Coal Gasification Plant



Fuente: RAMZAN, N., ASHRAF, A., USMAN, J., SHABBIR, H. Modelling and Simulation of Coal Gasification Plant. En: Revista Del Instituto De Ingenieros Químicos De Pakistán. 2010. Vol. 38. 33-38P.

2.1.3 Caso 3: (figura 10). En el artículo “A numerical investigation of municipal solid waste gasification using Aspen Plus”⁷⁹, los autores presentan el desarrollo de la simulación del proceso de gasificación de residuos sólidos municipales bajo el supuesto de que las reacciones que ocurren en el sistema alcanzan el equilibrio, además utilizaron datos experimentales de la literatura para validar sus respectivos cálculos encontrando un porcentaje de error del 4%. Realizaron análisis de sensibilidad evaluando la composición del gas de síntesis obtenido respecto a la relación aire-combustible y temperatura, obteniéndose que al operar con temperaturas de 700°C y aumentar la relación aire-combustible de 0.3 a 1 incrementa la concentración de CO₂ y disminuyen las concentraciones de H₂, CO y CH₄.

2.1.3.1 Ventajas

- a) Enumera secuencialmente los principales pasos para el desarrollo de la simulación:
- Especificación de clase de flujo
 - Selección del método de propiedad.

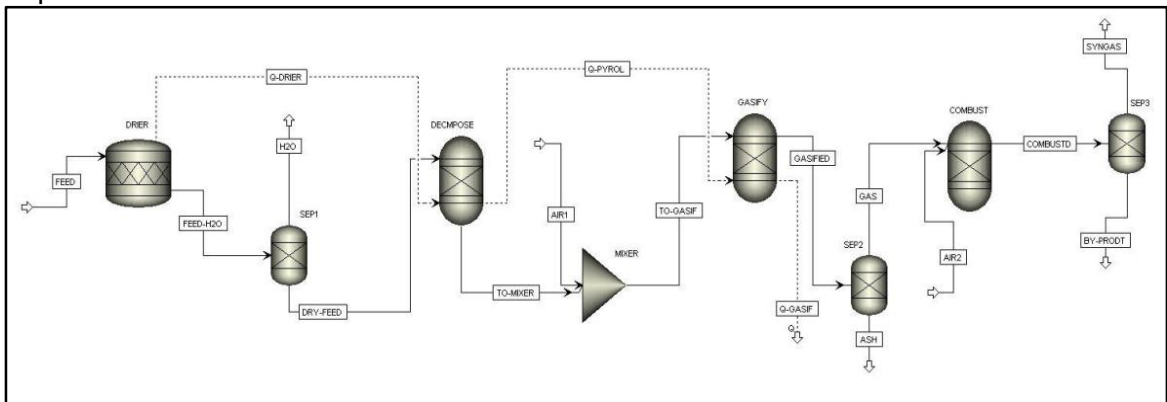
⁷⁹BEGUM, Sharmina; RASUL, Raul. y AKBAR, Delwar. A Numerical Investigation of Municipal Solid Waste Gasification Using Aspen Plus. En: Procedia Engineering. ELSEIVIER. 2014. vol. 90. p. 710-717.

- Especificación del componente del sistema (del banco de datos) e identificación de componentes que no están en la base de datos de Aspen Plus.
 - Definir diagrama de flujo del proceso (usando bloques de operación de la unidad y conectando corrientes de materia y energía).
 - Especificar flujos de alimentación (velocidad de flujo, composición y condición termodinámica).
 - Especificación de bloques de operación de la unidad (condición termodinámica, reacciones químicas, etc.).
- b) Especifica las restricciones tenidas en cuenta en la simulación (como los componentes que tendrán lugar en el proceso).
- c) Especifica condiciones de alimentación y caracterización de la biomasa.

2.1.3.2. Desventajas

- a) No hay composiciones a la salida del reactor para validar el modelo.

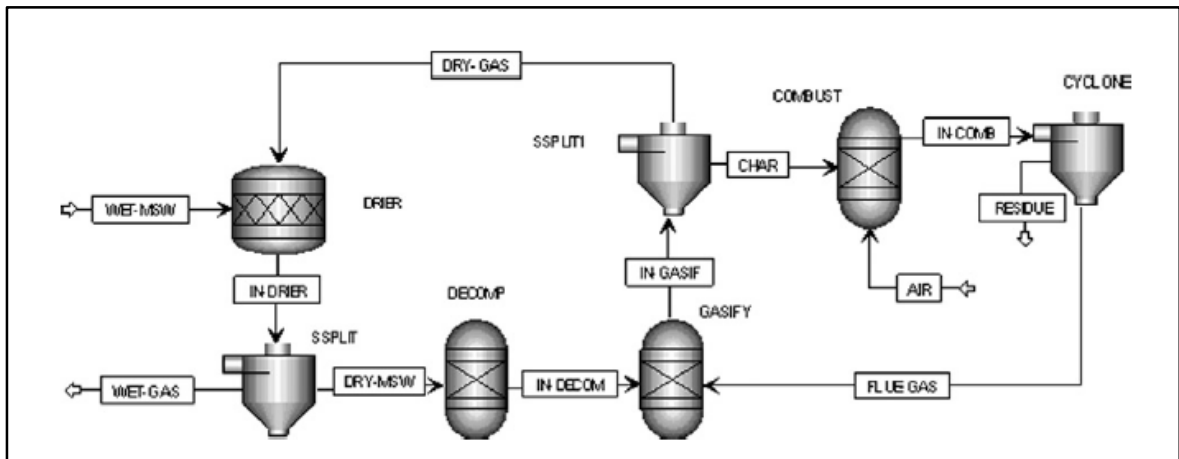
Figura 10. Caso 3: A numerical investigation of municipal solid waste gasification using Aspen Plus



Fuente: BEGUM, Sharmina; RASUL, Raul, AKBAR, Delwar. A Numerical Investigation of Municipal Solid Waste Gasification Using Aspen Plus. En: Procedia Engineering. ELSEIVIER. 2014. vol. 90. p. 710-717.

2.1.4 Caso 4: (figura 11 y 12). En el artículo “Simulation of municipal solid waste gasification in two different types of fixed bed reactors”,⁸⁰ los autores presentan el modelamiento de dos reactores de lecho fijo con variaciones en sus configuraciones. Uno de los propósitos es establecer cuál alternativa es más eficiente basándose en balances de masa y energía, bajo el supuesto de que el tiempo de residencia es lo bastante largo para que se alcance el equilibrio químico para fenómenos de combustión y gasificación; a diferencia de los otros modelos estudiados y realizados por otros autores, donde si bien no se descarta ninguna de las fases del proceso, si se modela el proceso de combustión y gasificación en un solo equipo, este modelo se diferencia en que se utilizan dos reactores; uno para oxidación y otro para reducción respectivamente como se puede observar en las figuras 11 y 12.

Figura 11. Caso 4 a: Simulation of municipal solid waste gasification in two different types of fixed bed reactors



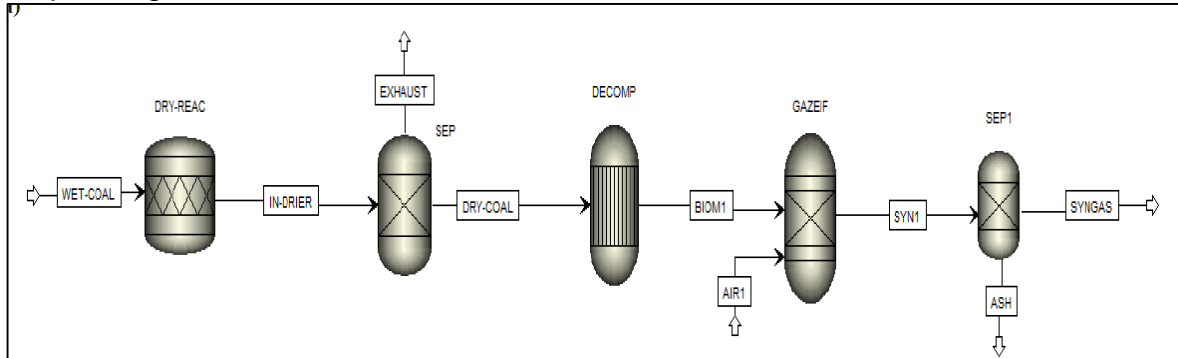
Fuente: CHEN, Chong, YU-QI, Jin, JIAN-HU, Yan. Simulation of municipal solid waste gasification in two different types of fixed bed reactors. En: FUEL. Enero, 2013. 58-63 p.

Por otro lado, (figura 11) se puede observar cómo se alimenta la biomasa que en esta investigación son residuos sólidos urbanos (MSW) por la parte superior del gasificador, donde son secados por el gas obtenido de la pirólisis; seguidamente se pasa a la fase pirólisis para ser térmicamente descompuestos; los productos sólidos de MSW que salen de la zona pirólisis se gasifican en presencia del gas producido de la sección de combustión u oxidación. Finalmente, los sólidos remanentes quemados en el proceso anterior se reducen en presencia de un agente gasificante (aire). En la figura 12 prácticamente se da la misma configuración del proceso, pero con una variación entre las secciones de gasificación y combustión. Claramente se

⁸⁰CHEN, Chong, YU-QI, Jin, JIAN-HU, Yan. Simulation of municipal solid waste gasification in two different types of fixed bed reactors. En: FUEL. Enero, 2013. 58-63 p.

2.1.5 Caso 5: (figura 13). En el artículo “Study of optimal conditions of a palm waste fixed bed gasifier for power generation”⁸², el objetivo principal es identificar los ajustes óptimos para producir un gas de síntesis obtenido en la gasificación de residuos de palma variando la temperatura del gasificador y el dosado relativo (relación combustible- aire), obteniendo que la temperatura óptima es de 900°C y la relación de equivalencia es 0.1⁸³.

Figura 13. Caso 5: Study of optimal conditions of a palm waste fixed bed gasifier for power generation



Fuente: DAHMANI, Manel. PÉRILHON, Christelle. MARVILLET, Christelle. Study of optimal conditions of a palm waste. En: Sciences de l'ingénieur [physics]. 2017. 601-606 p.

2.1.5.1 Ventajas

- Proceso está en estado estacionario.
- Intercambio de calor en el reactor de lecho fijo es ideal.
- Operación de reactor isotérmica en la misma sección.
- Especifica alimentación.
- Muestra composiciones del gas producido, por ende, se conocen las especies que tienen lugar en el proceso.

2.1.5.2 Desventajas

- Los autores no validan sus resultados con datos experimentales.

⁸²DAHMANI, Manel. PÉRILHON, Christelle . MARVILLET, Christelle. Study of optimal conditions of a palm waste. En: Sciences de l'ingénieur [physics]. 2017.p. 601-606

⁸³Ibid., p. 603

2.2 MATRIZ DE SELECCIÓN

Una vez desarrollada la búsqueda bibliográfica de los reactores disponibles en la literatura, se acude a un método de selección llamado “Análisis matricial Pugh” (PMA) que es usado cuando hay múltiples criterios que deben ser tomados en cuenta para la selección en este caso de un sistema de gasificación⁸⁴.

Este método requiere seguir los siguientes pasos para obtener la matriz que se puede ver en la tabla 3⁸⁵:

- a) Elaborar o elegir criterios de comparación: parámetros necesarios para desarrollar la simulación.
- b) Seleccionar factores a comparar: se refiere a las diferentes fuentes bibliográficas encontradas o casos de estudio tentativos para el desarrollo del sistema de gasificación.
- c) Dibujar la matriz.
- d) Asignar pesos a factores:
 - **1:** No es necesario en la simulación (en la matriz no hay ningún criterio con esta puntuación, ya que al no ser requerido es posible despreciarlo para simplificar la matriz).
 - **2:** Suposición del dato.
 - **3:** Es posible realizar el cálculo a partir de otros datos.
 - **4:** Necesario.
 - **5:** Muy necesario.
- e) Definir una línea de base (como se puede observar en la tabla 3 la columna 3 que corresponde a la máxima puntuación que podría tener alguna fuente).
- f) Generar puntuaciones de factores: Donde 1 significa que se cuenta con el dato y -1 que hay carencia de este.

⁸⁴CERVONE, H. Frank. Applied digital library project management. En: OCLC Systems & Services: International Digital Library Perspectives. Octubre, 2009, vol. 25, no. 4, p. 228-232

⁸⁵Ibíd.,p.230

- g) Calificar criterios computacionales: se debe realizar la sumatoria de los valores que se generan a partir de multiplicar cada peso por la puntuación de los factores para cada fuente, para así obtener la referencia con más puntaje y así poder hacer una correcta selección.

Tabla 3. Matriz de selección esquemas tecnológicos

Factor								
Variable	Peso		<i>Simulation of municipal solid waste gasification in two different types of fixed bed reactors</i>	<i>Modelling and Simulation of Coal Gasification Plant</i>	<i>Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen Plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste</i>	<i>Study of optimal conditions of a palm waste fixed bed gasifier for power generation</i>	<i>A Numerical investigation of municipal solid waste gasification using Aspen Plus</i>	
Método Termodinámico	4	1	-1	-1	1	-1	1	
Componentes	5	1	1	1	1	1	1	
Alquitranes	2	1	-1	-1	-1	-1	-1	
<i>Biomasa</i>								
Modelo HCOALGEN	2	1	1	1	1	1	1	
Opciones de código	3	1	-1	-1	-1	-1	-1	
Modelo DCOALINGT	2	1	1	1	1	1	1	
Análisis Inmediato	5	1	1	1	1	1	1	
Análisis Final	5	1	1	1	1	1	1	
Análisis de Azufre	5	1	1	1	1	1	1	
Distribución tamaño partícula	3	1	-1	-1	-1	-1	-1	
<i>Especificación corriente No convencional</i>								
Presión	5	1	1	1	1	1	1	
Temperatura o Calor	5	1	1	1	-1	1	1	
Flujo	5	1	-1	1	-1	1	1	
Tamaño partícula	3	1	-1	-1	-1	-1	-1	
<i>Especificación corriente No convencional</i>								
Presión	5	1	1	1	-1	1	1	
Temperatura o Calor	5	1	1	1	-1	1	1	

Tabla 3. (Continuación)

Factor							
Variable	Peso		<i>Simulation of municipal solid waste gasification in two different types of fixed bed reactors</i>	<i>Modelling and Simulation of Coal Gasification Plant</i>	<i>Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen Plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste</i>	<i>Study of optimal conditions of a palm waste fixed bed gasifier for power generation</i>	<i>A Numerical investigation of municipal solid waste gasification using Aspen Plus</i>
Flujo másico	5	1	1	1	1	1	1
Secado							
Tipo Reactor	5	1	1	1	1	1	1
Presión	5	1	1	1	1	1	1
Temperatura o Calor	5	1	1	1	-1	-1	-1
Separador							
Tipo Separador	5	1	1	1	1	1	1
Presión	5	1	1	1	1	1	1
Temperatura o Calor	5	1	-1	-1	-1	1	-1
Combustión y gasificación							
Ceniza							
Modelo HCOALGEN	5	1	1	1	1	1	1
Modelo DCOALINGT	5	1	1	1	1	1	1
Contenido ceniza	5	1	1	1	1	1	1
Calor de combustión	5	1	-1	1	-1	-1	-1
Especificación corriente agente oxidante							
Temperatura o Calor	5	1	1	1	1	1	1
Presión	5	1	1	1	1	1	1
Flujo	5	1	1	1	-1	-1	-1
RGibbs							
Presión	5	1	1	1	-1	1	1

Tabla 3. (Continuación)

<i>Factor</i>	<i>Peso</i>		<i>Simulation of municipal solid waste gasification in two different types of fixed bed reactors</i>	<i>Modelling and Simulation of Coal Gasification Plant</i>	<i>Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen Plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste</i>	<i>Study of optimal conditions of a palm waste fixed bed gasifier for power generation</i>	<i>A Numerical investigation of municipal solid waste gasification using Aspen Plus</i>
<i>Variable</i>							
Temperatura	5	1	1	1	-1	1	1
<i>Pirólisis</i>							
Temperatura	5	1	-1	1	-1	-1	-1
Presión	5	1	-1	1	-1	-1	-1
Rendimiento	5	1	1	1	1	1	1
Tamaño partícula	3	1	-1	-1	-1	-1	-1
Separador							
Fraciones separadas	2	1	1	1	1	1	1
Equipo	5	1	1	1	1	1	1
Composición final	5	1	-1	-1	1	1	-1
TOTAL		174	68	118	16	78	76

A partir de la matriz de selección se encuentra que el reactor que aportaría todos los datos necesarios para la simulación de proceso tendría un puntaje ideal de 174 puntos, pero en este caso ninguno arroja esta puntuación, “Study of optimal conditions of a palm waste fixed bed gasifier for power generation”⁸⁶ obtiene la segunda puntuación mayor y cuenta con la composición final del gas producido, facilitando los cálculos que certifiquen que a pesar de no contar con todos los criterios y especificaciones para la simulación del proceso esta simulación se desarrolla de manera efectiva y es una buena aproximación.

“Modelling and Simulation of Coal Gasification Plant” ofrece la puntuación más alta con 118 puntos, pero no contiene las composiciones al final del proceso para

⁸⁶DAHMANI. Op. cit., p.604.

desarrollar una comparación al final de las respectivas corridas en el simulador Aspen Plus, no obstante, se cuenta con una gráfica de la eficiencia vs la temperatura en el gasificador la cual puede ser una opción para validar los resultados.

3. IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DE ESQUEMAS TECNOLÓGICOS EN ASPEN PLUS

Como se mencionó en el capítulo anterior, no se encontró como tal un esquema completo para la simulación de un proceso de gasificación, en lugar de ello, se extrajeron dos modelos de reactores de lecho fijo para este proceso, los cuales serán modelados a continuación y posteriormente adecuados a un esquema general de gasificación para la producción de gas de síntesis.

3.1 IMPLEMENTACIÓN ESQUEMAS TECNOLÓGICOS DE GASIFICACIÓN

Para la simulación de los reactores de gasificación escogidos mediante PMA se utilizarán las siguientes consideraciones:

3.1.1 Reactor de lecho fijo

Las unidades de Aspen Plus para representar cada fase del reactor de gasificación son:

- a) Secado (Reducción de humedad en la biomasa).
 - Reactor RStoic: Se requiere especificar la reacción y se debe conocer la conversión deseada de alguno de los elementos que participan en la reacción⁸⁷.
 - Bloque calculador para el desarrollo de código Fortran con el objetivo de especificar la conversión deseada de biomasa a H₂O⁸⁸.
 - Flash 2.
- b) Pirólisis.
 - RYield: Se requiere especificar los rendimientos de la fase pirolisis.
 - Bloque calculador para la manipulación de los rendimientos del equipo RYield mediante programación Fortran a partir de los análisis correspondientes a la caracterización de la biomasa.
- c) Combustión y gasificación

⁸⁷MACHORRO, Op. cit., p.85.

⁸⁸LOZANO, Álvaro. Gasificación en Gasificadores de Flujo Arrastrado Simulación en Aspen Plus y Comparación. Proyecto final de carrera. Zaragoza. Escuela de ingeniería y arquitectura.2012.35p.

- RGibbs: reactor de equilibrio riguroso que incluye el equilibrio de fases minimizando la energía libre de Gibbs.⁸⁹
- SSplit: Separador de fases solido-gas.

3.1.2 Consideraciones modelo matemático. Con el propósito de implementar en el simulador de procesos los reactores de lecho fijo seleccionados e incluirlos en un esquema tecnológico, se siguen los siguientes lineamientos:

- a) El proceso se da en estado estacionario⁹⁰.
- b) Reactor adiabático e isobárico⁹¹.
- c) Se asume que todo el carbonizado es sólido, por ello no se incluye en los productos, como tales sólidos a la salida solo se obtendrán cenizas.
- d) El contenido de volátiles en el gas es igual al contenido de volátiles que se encontró en el análisis último correspondiente a la caracterización de la biomasa.⁹²
- e) El carbonizado obtenido después de la pirólisis solo contiene carbón sólido y cenizas (no volátiles)⁹³
- f) Reactor esquema 1 (RE1)⁹⁴: No hay formación de óxidos de nitrógeno (solo NH₃⁹⁵). Los componentes que toman lugar en el proceso son: carbón sólido, hidrógeno, nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, amoníaco, agua y metano.
- g) Reactor esquema 2 (RE2)⁹⁶: Los componentes en la base de datos de Aspen Plus que toman lugar en el proceso son: carbón sólido, hidrógeno, nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, trióxido de azufre, agua, oxígeno, ácido clorhídrico y cloro⁹⁷.

⁸⁹ MACHORRO. Op. cit., p. 52.

⁹⁰RAMZAN. Op. cit., p. 3963.

⁹¹DAHMANI. Op. cit., p. 603.

⁹²RAMZAN,N. Op. cit., p.34.

⁹³ BEGUM. Op. cit., p. 711

⁹⁴DAHMANI. Op. cit., p. 603.

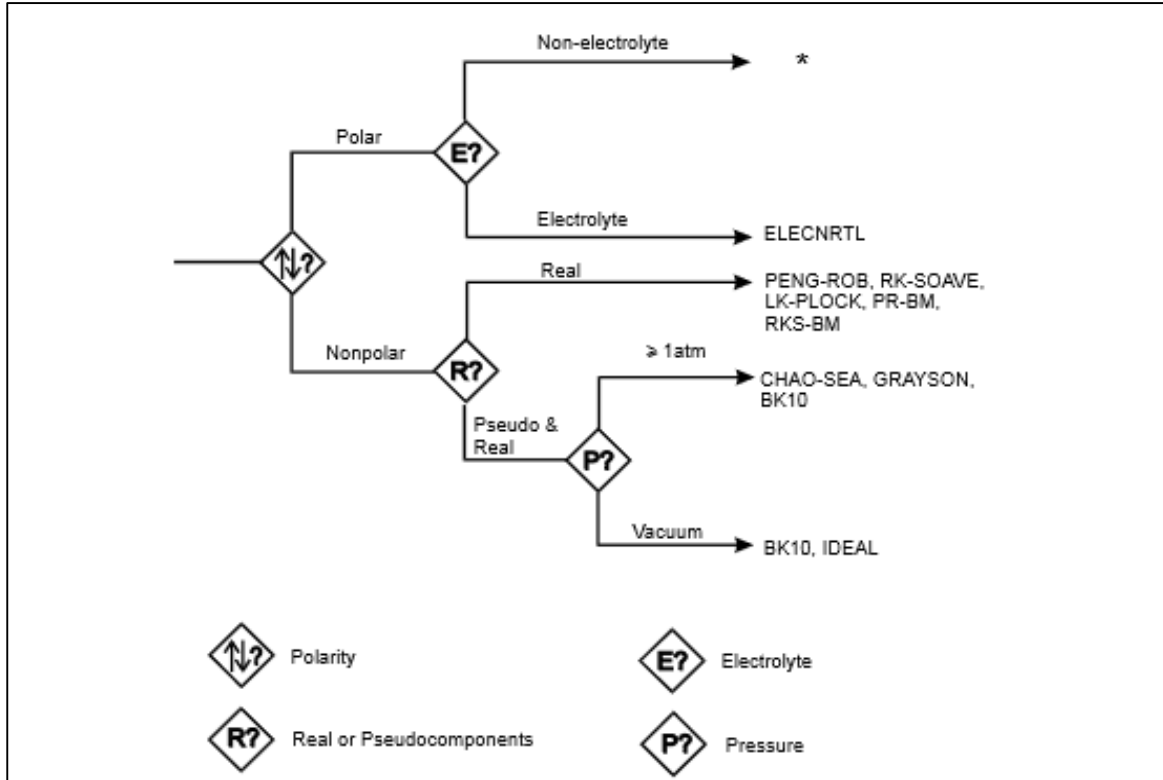
⁹⁵ RAMZAN, N. Op. cit., p. 215.

⁹⁶ Ibid., p. 213

⁹⁷RAMZAN. Op. cit., p.33

3.1.3 Termodinámica del sistema. Según el árbol de decisión (figura 14), para sustancias apolares reales como H_2 , O_2 , CH_4 , CO , CO_2 , C_6H_6 , se puede utilizar como método termodinámico la ecuación de estado de Peng-Robinson con modificaciones de Boston-Mathias (PR-BM). Que se utiliza frecuentemente para gases combustibles⁹⁸; gas de síntesis, gasificación de carbón, licuefacción de carbón, producción, separación de hidrocarburos, transporte de petróleo y gas en tuberías, procesos de combustión de carbón mineral y petróleo⁹⁹.

Figura 14. Árbol de decisión método termodinámico gases.



Fuente: ASPEN TECHNOLOGY, INC. Aspen Plus. User Guide.10.2 ed. Febrero, 2000.178p. Cambridge, MA 02141-2201.

3.1.4 Especificaciones generales

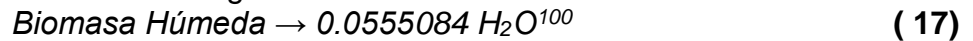
- a) Se especifica la corriente de biomasa basándose en la caracterización experimental adicionando los atributos de la biomasa por medio de un análisis inmediato o proximal y un análisis último también denominado

⁹⁸BEGUM. Op. cit., p. 712

⁹⁹ASPEN TECHNOLOGY, INC. Aspen Plus User Guide.10.2 ed. Febrero, 2000.170-178p. Cambridge, MA 02141-2201.

ultranal, el cual tiene una relación directa con los modelos para el cálculo de la entalpía y la densidad de este componente utilizados.

- b) Una vez que ingresa la biomasa húmeda al reactor, esta se somete a temperaturas aproximadamente de 130 a 200°C para que se dé la evaporación de agua mínimo hasta un 10% de humedad. Se tiene en cuenta la estequiometría de la siguiente forma:



- c) Las fases gasificación y combustión se desarrollan en el mismo equipo RGibbs, trabajando bajo el supuesto de que el tiempo es lo suficiente para que las reacciones lleguen al equilibrio termoquímico, alcanzando temperaturas entre 400 y 1600°C. Una vez se da la gasificación del sustrato carbonoso se separan las fases sólidas y gaseosas. En este caso la primera fase nombrada es la parte no volátil de la materia prima, también llamadas cenizas y la segunda son los gases de los que está compuesto el gas de síntesis.
- d) Para ajustar la conversión deseada se utiliza un bloque calculador, que computa el agua que entra presente en la biomasa y la que finalmente sale en forma de vapor, en esta parte se trabaja bajo el supuesto de que aún no hay volatilización de otros gases que no sean vapor de agua.
- e) Se debe adecuar los diagramas de las figuras 15 y 16 en el ambiente de simulación.
- f) Pirólisis: En esta etapa se da la descomposición térmica de la biomasa y está representado por la siguiente reacción de pirólisis

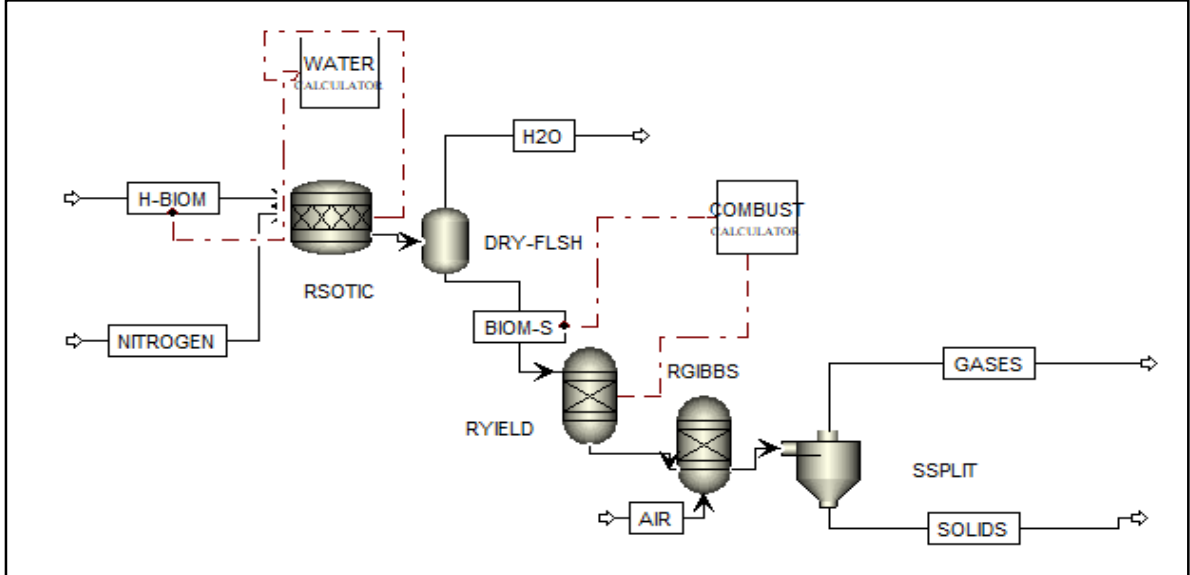


La bibliografía consultada reporta que los compuestos principales son naftaleno, tolueno o benceno, siendo la sustancia mayoritaria el benceno¹⁰¹; es por ello que para esta investigación se definió este componente como el representante de los alquitranes. La unidad seleccionada requiere que se realicen especificaciones que son establecidas con código FORTRAN.

¹⁰⁰DAHMANI.Op. cit., p.601-606

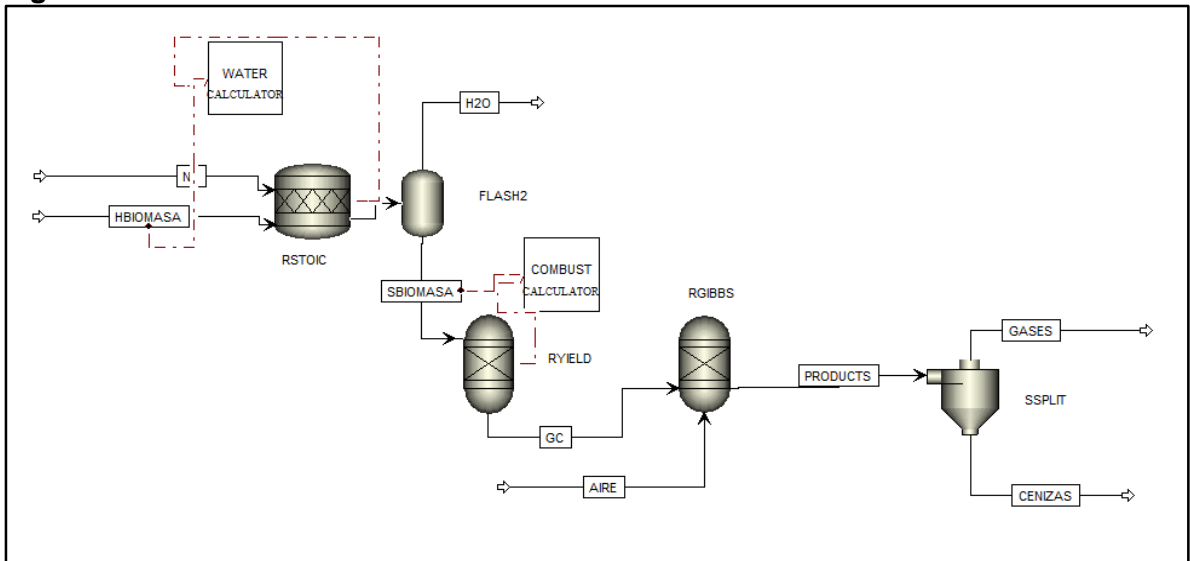
¹⁰¹AHMED. Op. cit., p. 1624.

Figura 15. RE1



Fuente: DAHMANI, Manel. PÉRILHON, Christelle. MARVILLET, Christelle. Study of optimal conditions of a palm waste. En: Sciences de l'ingénieur [physics]. 2017. Modificado por autora. p. 601-606.

Figura 16. RE 2



Fuente: RAMZAN, N., ASHRAF, A., USMAN, J., SHABBIR, H. Modelling and Simulation of Coal Gasification Plant. En: Revista Del Instituto De Ingenieros Químicos De Pakistán. 2010. Vol. 38. Modificado por autora. 33-38P.

La metodología aquí descrita se implementó para el caso de estudio RE1 y RE2. Los resultados obtenidos para el reactor del esquema 1 se observan en la tabla 4, mostrando diferencia aceptable entre los datos reportados por la bibliografía y los desarrollados en éste trabajo. Estas diferencias se deben principalmente a que no

se contaba con todos los datos necesarios para la simulación por ello se hizo una evaluación hasta encontrar la temperatura de equilibrio y el flujo de agente gasificante necesario para llegar a las composiciones másicas que se aproximan más a las reportadas por los autores. Además, para que se diera la evaporación en el equipo RStoic se tuvo que incluir una corriente que no utilizan los autores de la referencia (figura 13), responsable de aportar el calor necesario para la disminución de la humedad, donde el componente mayoritario es nitrógeno, a una temperatura mayor a los 100°C como se puede ver en la figura 16.

Tabla 4. Composiciones del gas combustible obtenido a partir del reactor modelado por el artículo “Study of optimal conditions of a palm waste fixed bed gasifier for power generation”.

Temperatura gasificador	1410	°C	
Flujo biomasa	0.0028	kg/s	
Componente	Simulación	Referencia	Diferencia
H2O	0,0237	0,0225	0,0012
N2	0,2396	0,2643	0,0247
H2	0,0393	0,0371	0,0022
CO	0,6758	0,6241	0,0517
CO2	0,0217	0,0520	0,0303
CH4	4,6387E-07	4,4821E-06	4,0183E-06
NH3	3,1095E-06	1,7309E-07	2,9364E-06

Como se mencionó anteriormente, RE2 aporta la mayor cantidad de datos en la alimentación, por tal razón, no se tuvo que suponer ningún dato de este tipo, sin embargo, no se contaba con las concentraciones a la salida del gas producido dificultando la validación. Por otro lado, la materia prima utilizada por los autores que aportan el modelo de simulación es carbón mineral, como en este trabajo el objetivo es trabajar con biomasa residual, se valida la simulación utilizando como biomasa; cascarilla de arroz y basándose en las composiciones arrojadas experimentalmente en el trabajo titulado “Determinación de la calidad energética y la composición del gas de síntesis producido con biocombustibles”¹⁰² se desarrollan las respectivas verificaciones. Las diferencias entre la simulación desarrollada y la obtenida en el artículo consultado pueden verse en la tabla 5. Las disimilitudes que se presentan entre el modelamiento desarrollado y los valores encontrados experimentalmente se deben principalmente a las diferencias en las tecnologías

¹⁰² PERÉZ, Luis, CASAS, Yannay, BERMÚDEZ, Raúl. Determinación de la calidad energética y la composición del gas de síntesis producido con biocombustibles. Parte II: Combustibles sólidos, Bagazo de caña. En: Afinidad. Enero, 2012.p35.

evaluadas para la gasificación, puesto que los autores consultados desarrollan el proceso de gasificación en un reactor de lecho fluidizado, el cual también presenta los fenómenos de secado, pirólisis, oxidación y reducción, pero contempla diferencias en la hidrodinámica del proceso, encontrando una máxima diferencia de 4.52; teniendo en cuenta el artículo “Simulation of hybrid biomass gasification using aspen plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste”¹⁰³ donde también comparan simulaciones vs resultados experimentales obteniendo diferencias de hasta 9.4, se puede afirmar que los resultados obtenidos son buenas aproximaciones y que la simulación es válida. Otros factores que afectan la exactitud en los resultados son las variables desconocidas como el método termodinámico, los modelos necesarios para especificar densidad y entalpía de la biomasa y las cenizas (compuestos que no se encuentran en la base de datos de Aspen Plus), incógnitas que se resuelven y se validan después de desarrollar la simulación RE1 ya que son generales para procesos de gasificación de biomasa.

Tabla 5. Validación composiciones RE2.

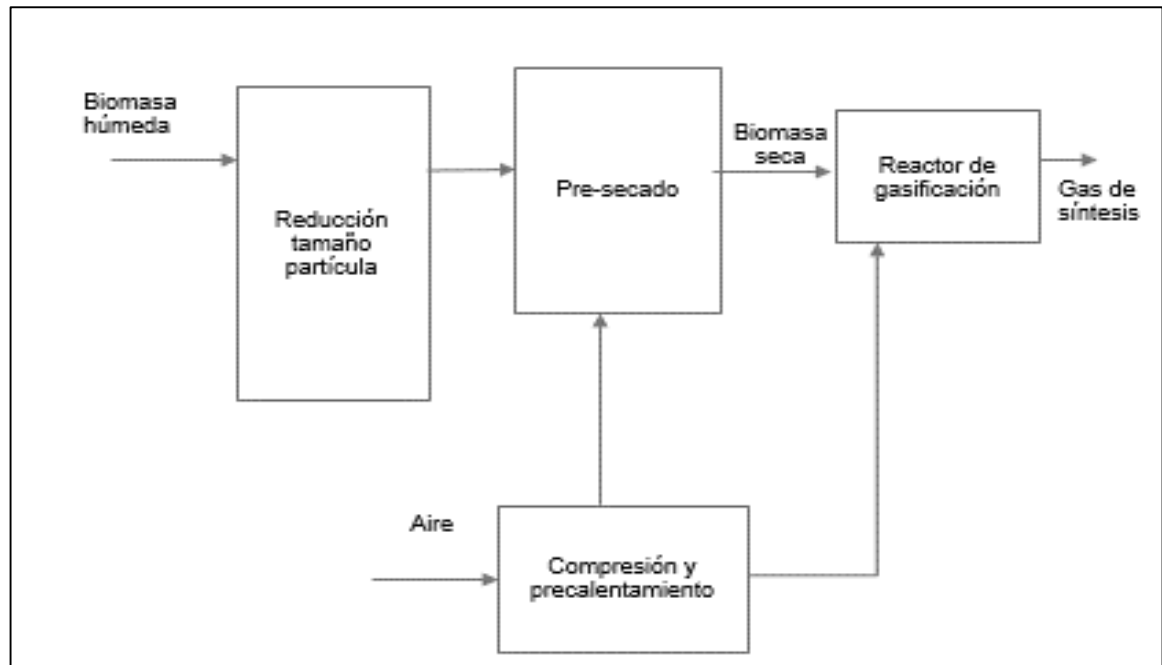
Compuesto	Modelamiento	Pérez Experimental	Diferencia
N2	58,60	55,12	3,48
O2	0,00	0,34	0,34
H2	1,23	5,75	4,52
CO	22,60	18,21	4,39
CO2	17,57	16,49	1,08
CH4	0,00	4,09	4,09

3.2 SIMULACIÓN DE ESQUEMAS DE GASIFICACIÓN

A continuación, en la figura 17 se incluye un diagrama de bloques donde se muestran los procesos que acompañan al reactor de gasificación con el objetivo de desarrollar un pretratamiento para la producción de un gas de síntesis.

¹⁰³ RAMZAN. Op. cit., p. 38.

Figura 17. Esquema general de gasificación de biomasa para la producción de gas de síntesis



3.2.1 Pretratamiento para la producción de gas de síntesis en un proceso de gasificación

3.2.1.1 Reducción de partícula. Cuando se desarrolló la simulación de los reactores de gasificación, se trabajó con la condición de que la biomasa entraba de forma ideal al reactor. Esto realmente no ocurre, es por ello que inicialmente se someterá esta materia prima a una reducción de partícula teniendo en cuenta que para un reactor de lecho fijo esta debe entrar con tamaño menor a $51\text{mm} \approx 0.051\text{m}$ ¹⁰⁴.

3.2.1.2 Pre-Secado. Se hace un pretratamiento para eliminar la humedad hasta un 30 % para que cuando está entre al reactor se dé una reducción hasta el 2%¹⁰⁵ en la fase secado a 200°C ¹⁰⁶.

¹⁰⁴BASU P. Biomass gasification and pyrolysis. Amsterdam 2010. Elsevier.

¹⁰⁵ LOZANO, Alonso. Gasificación en Gasificadores de Flujo Arrastrado Simulación en Aspen Plus y Comparación. Repositorio universidad de Zaragoza 2012. Escuela de ingeniería y arquitectura.

¹⁰⁶ Ibid., p. 26

3.2.1.3 Compresión y precalentamiento. Debe haber un precalentamiento a 200°C de la corriente de aire que entra ya que esta es la que va a aportar el calor para que se dé la evaporación de la humedad presente en la biomasa, parte de este flujo irá directamente a la zona de combustión y gasificación actuando como él como agente gasificante del proceso.

Tabla 6. Perdidas de presión y altura promedio en reactor de lecho fijo

No of exp.	ΔP_T	L
	Pa	[m]
Exp.1.1	59	0,14
Exp.1.2	78	0,17
Exp.1.3	88	0,21
Exp.2.1	1570	0,43
Exp.2.2	638	0,35
Exp.3.1	265	0,15
Exp.3.2	128	0,16
Exp.3.3	108	0,1-0,2

Fuente: DONAJ, Pawel J. Conversion of biomass and waste using highly preheated agents for materials and energy recovery. Stockholm: Division of Energy and Furnace Technology Department of Material Science and Engineering School of Industrial Engineering and Management Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, 2011. ISBN 9789175010335

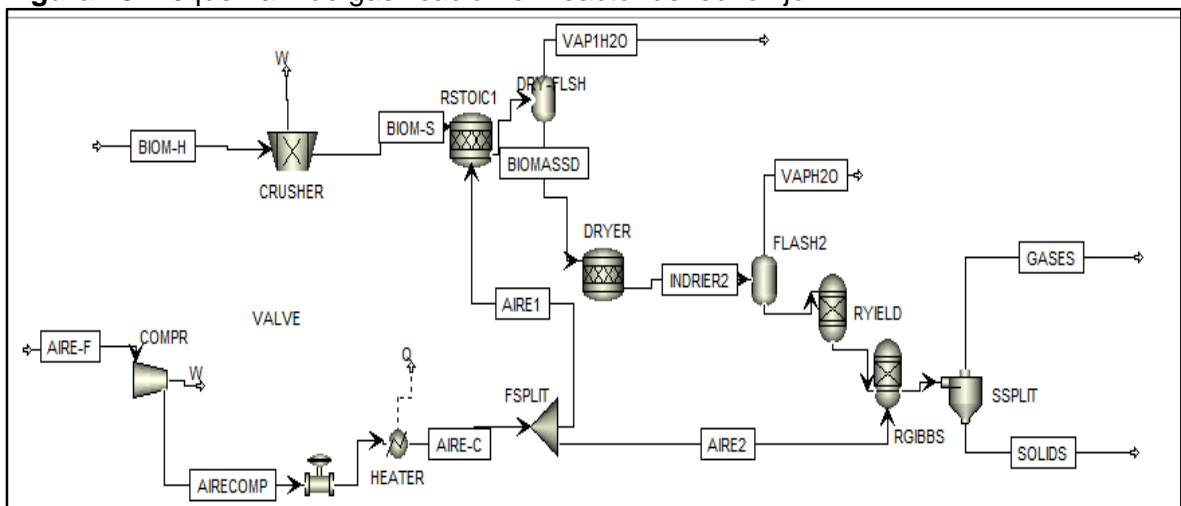
Por otro lado, se debe hacer una compresión para capturar el aire; como se había planteado anteriormente el proceso es isobárico y tiene lugar a presión atmosférica, por ende, en el estudio no se tuvo en cuenta caídas de presión, pero al evaluar el esquema en la entrada de este si se debe hacer un análisis de este factor; puesto que al tomar aire atmosférico e ingresarlo a un compresor este tendrá una salida con un valor agregado de esta variable, sin embargo no se puede como tal calcular la presión requerida a la entrada del proceso para que se dé el flujo de gases a la presión de salida del sistema que es atmosférica, porque esta se calcularía según la geometría del reactor y estos parámetros no entran en la simulación realizada, por esta razón esta variable fue asumida según la literatura que reporta pérdidas de presión promedio en un reactor de lecho fijo como se puede ver en la tabla 8. Donde uno de los cambios de presión fue de 108 Pa en 0.1m, por esta razón se tomó como presión de salida del compresor 100108 Pa.

Una vez se especificaron estos criterios se obtuvieron los siguientes esquemas de gasificación de biomasa en reactores de lecho fijo isocorriente (figuras 18-19).

Tanto el esquema uno como el dos contienen el mismo pretratamiento del que se habló arriba, pero el reactor del esquema dos es un híbrido entre el realizado por

los autores de “Modelling and Simulation of Coal Gasification Plant”¹⁰⁷ y el artículo “Performance analysis of an integrated fixed bed gasifier model for different biomass feed stocks”¹⁰⁸ que puede verse en la figura 19 y que a diferencia del esquema 1 incluye corrientes de calor entre los fenómenos que tienen lugar dentro de un reactor físico (secado, pirólisis y combustión), además el agente gasificante alimentado a la zona de combustión y gasificación es una mezcla entre aire y vapor de agua que es un efluente de la fase de secado que está al interior del reactor. Por otro lado, si bien inicialmente para el RE2 se iba a tener en cuenta la formación de óxidos de nitrógeno y azufre para el esquema se toman los mismos supuestos del RE1 en el cual desprecian la formación de estos afirmando que solo se genera NH₃ Y CH₄ con la finalidad de hacer una comparación entre estos dos.

Figura 18. Esquema 1 de gasificación en reactor de lecho fijo

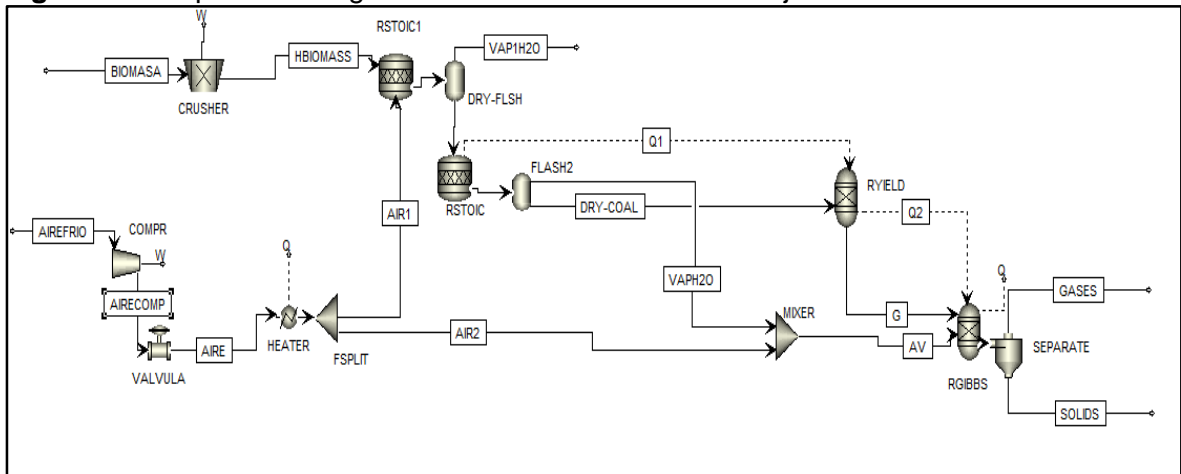


Fuente: DAHMANI, Manel. PÉRILHON, Christelle. MARVILLET, Christelle. Study of optimal conditions of a palm waste. En: Sciences de l'ingénieur [physics]. 2017. Modificado por autora. p. 601-606

¹⁰⁷RAMZAN. Op. cit., p. 34.

¹⁰⁸BEGUM. Op. cit., p.3

Figura 19. Esquema 2 de gasificación en reactor de lecho fijo



Fuente: RAMZAN, N., ASHRAF, A., USMAN, J., SHABBIR, H. Modelling and Simulation of Coal Gasification Plant. En: Revista Del Instituto De Ingenieros Químicos De Pakistán. 2010. Vol. 38. 33-38 P. & BEGUM, Sharmina; RASUL, Raul, AKBAR, Delwar. A Numerical Investigation of Municipal Solid Waste Gasification Using Aspen Plus. En: Procedia Engineering. ELSEIVER. 2014. vol. 90. Modificado por autora p. 710-717.

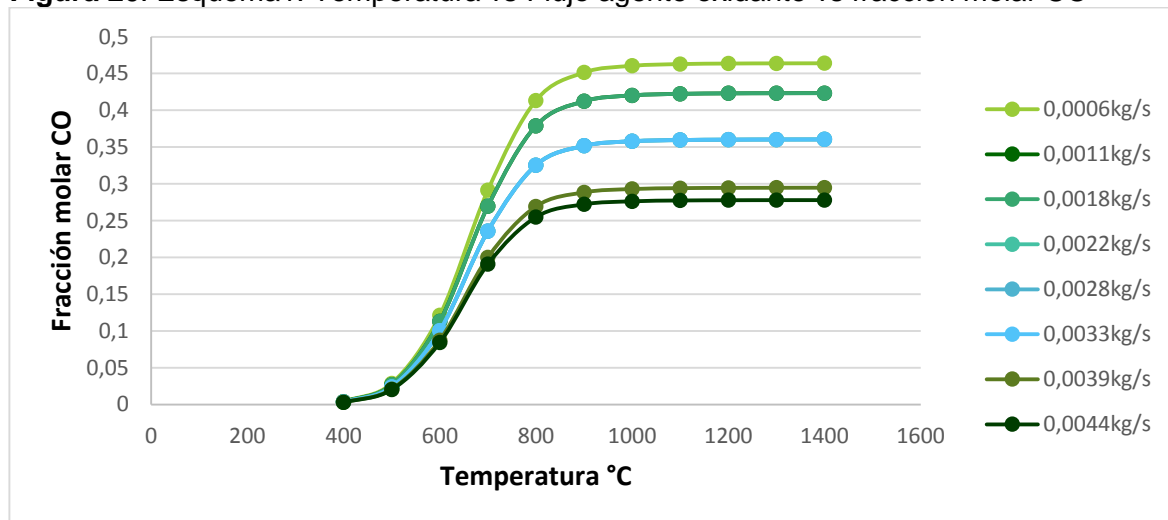
4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y CONSUMO ENERGÉTICO

A partir de los esquemas obtenidos, se pueden empezar a hacer las modificaciones necesarias para incluir en el análisis la producción de alquitranes sin incurrir en resultados que sean irreales y que no se puedan reproducir experimentalmente enfocándose en encontrar las condiciones de operación que hagan el proceso más eficiente, lo cual sería encontrando un equilibrio en las variables de un gas de síntesis que tenga alto poder calorífico, altas concentraciones de hidrógeno y/o monóxido de carbono, bajo contenido de alquitrán y dióxido de carbono. Se muestran aquí solamente algunos resultados obtenidos, enfocados a la sensibilidad de las concentraciones por efecto de la temperatura en ambos esquemas.

4.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA CONCENTRACIÓN DE CO, CO₂, CH₄, H₂ EN EL GAS DE SÍNTESIS

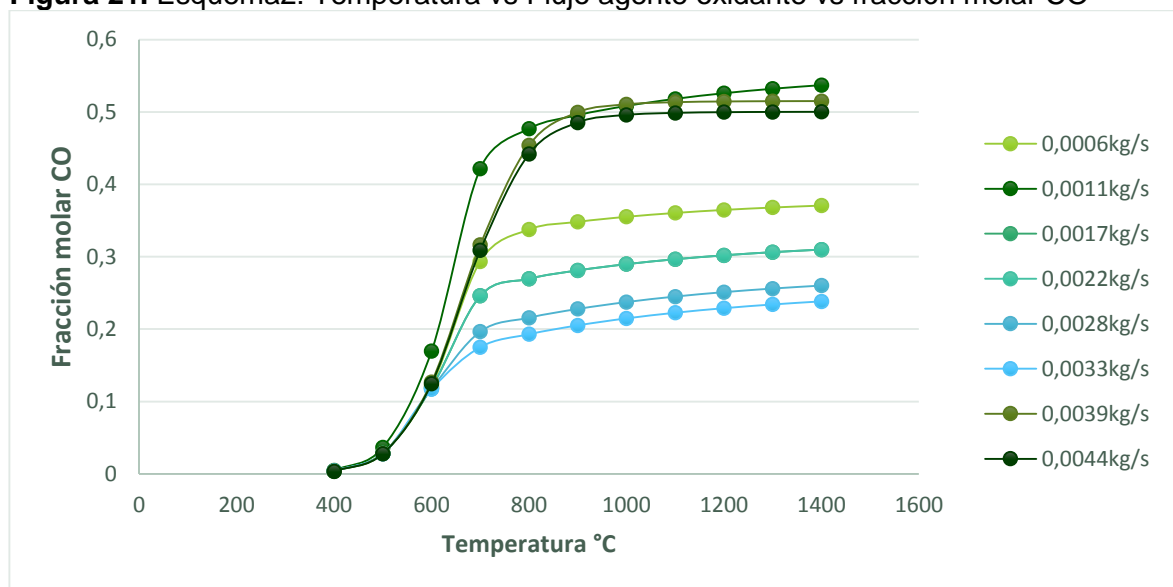
Del perfil de temperaturas dentro del reactor de lecho fijo, depende la fase en la que se encuentre el proceso de gasificación, ya que como se vio en la sección correspondiente a la descripción de las fases de este proceso (Sección 1.1.5), hay varias reacciones endotérmicas y exotérmicas, como se observa de la figura 20 a la 23, que relacionan la temperatura versus la composición de monóxido de carbono (figuras 20 y 21) o la del hidrógeno (figuras 22 y 23) a diferentes flujos de agente gasificante, donde sin importar esta última variable, al aumentar la temperatura, incrementa la composición de CO e H₂, ya sea porque son los reactivos de alguna reacción endotérmica o los productos de una exotérmica. A continuación, se hará el análisis de cuáles son las reacciones que pueden tener lugar para que se dé este comportamiento.

Figura 20. Esquema1: Temperatura vs Flujo agente oxidante vs fracción molar CO



Dentro de los productos deseados de la fase de pirólisis están los gases: CO, CH₄, H₂ y el carbonizado; mientras que en los indeseados se encuentran concentraciones de CO₂ y alquitranes; estos dos grupos de compuestos reaccionan después para dar formación a más gases no condensables (productos deseados), una de las reacciones que tiene lugar y puede explicar el comportamiento de las figuras 20 y 21 es la Boudouard (ec 3), en la cual reacciona el char o carbonizado con dióxido de carbono para producir monóxido de carbono, debe darse a altas temperaturas puesto que es una reacción endotérmica, este mismo comportamiento está presente en las reacciones de metanización, que cuando se dan de forma reversible (ec 8-10) producen hidrógeno y monóxido de carbono a partir de vapor de agua y metano.

Figura 21. Esquema2: Temperatura vs Flujo agente oxidante vs fracción molar CO

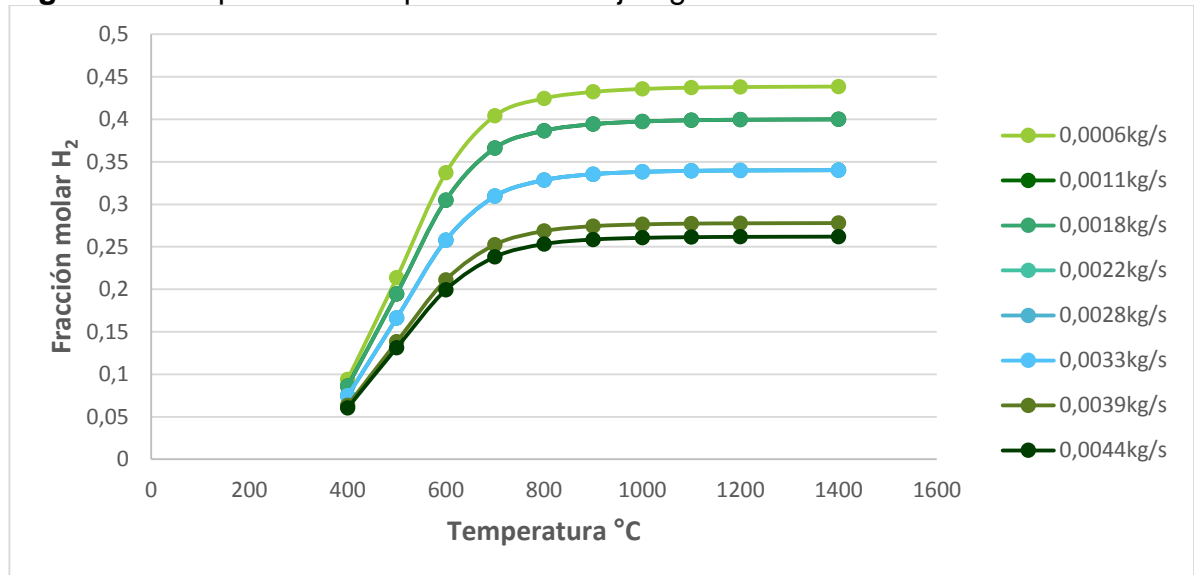


La fenomenología de la composición del monóxido de carbono y el hidrógeno concuerda con datos obtenidos a partir de una revisión bibliográfica en la cual, por medio de un modelamiento que tiene en cuenta la geometría de un reactor físico de lecho fijo y una validación experimental, se encuentra que después de los 1000°C continúa la producción de la fracción del CO y decrece la del H₂¹⁰⁹ comportamiento semejante al de la simulación desarrollada a los esquemas (figura 20 a la 23) con un claro crecimiento de monóxido de carbono a partir de la temperatura de referencia y aunque es poco el decrecimiento del hidrógeno esta afirmación si tiene lugar y la razón de este comportamiento puede ser que algunas de las reacciones de las que depende la formación del H₂, requieren carbonizado, metano y vapor de agua; estos reactivos requeridos disminuyen una vez se va llegando a los 1000°C,

¹⁰⁹ SHARMA, Avdresh. Modeling and simulation of a downdraft biomass gasifier1. Model development and validation. En: Energy conversion and management.2011.1386-1396p.

limitando la formación de este gas deseado y desplazando el equilibrio hacia la conversión de los reactivos las reacciones de reformado con vapor (ec 11 y 12) y gasificación vapor (ec4).

Figura 22. Esquema1: Temperatura vs Flujo agente oxidante vs fracción molar H₂



Existe otra hipótesis encontrada en la que los autores afirman que “las reacciones de gasificación del carbonizado se hacen apreciables a temperaturas mayores a 500°C, sin embargo a estos niveles de temperatura la velocidad de reacción es muy lenta y el proceso se hace muy demorado”¹¹⁰, al revisar los resultados obtenidos en las figuras 20 a 23, a partir de 500°C el crecimiento o decrecimiento de los componentes se da exponencialmente, hasta los 800°C donde se ve que se va estancando la reacción y no hay un cambio marcado; investigando, se encontró que puede ser debido a que cuando aumenta el flujo de los gases reactivos también llamados gasificantes, aumenta la velocidad de reacción¹¹¹, en este momento se daría el crecimiento exponencial. Por otro lado, el comportamiento en el cual la producción de estos gases empieza a estancarse puede ser validado con “el efecto de inhibición por H₂ y por CO, pues cuando las concentraciones de estos gases supera el 50%, la reacción de gasificación se para casi completamente”¹¹² esto debido a que se llega al equilibrio químico, que se da cuando la concentración de todos los reactivos y productos de un sistema cerrado dejan de cambiar con el tiempo, lo que traduce que todas las reacciones opuestas avanzan a la misma

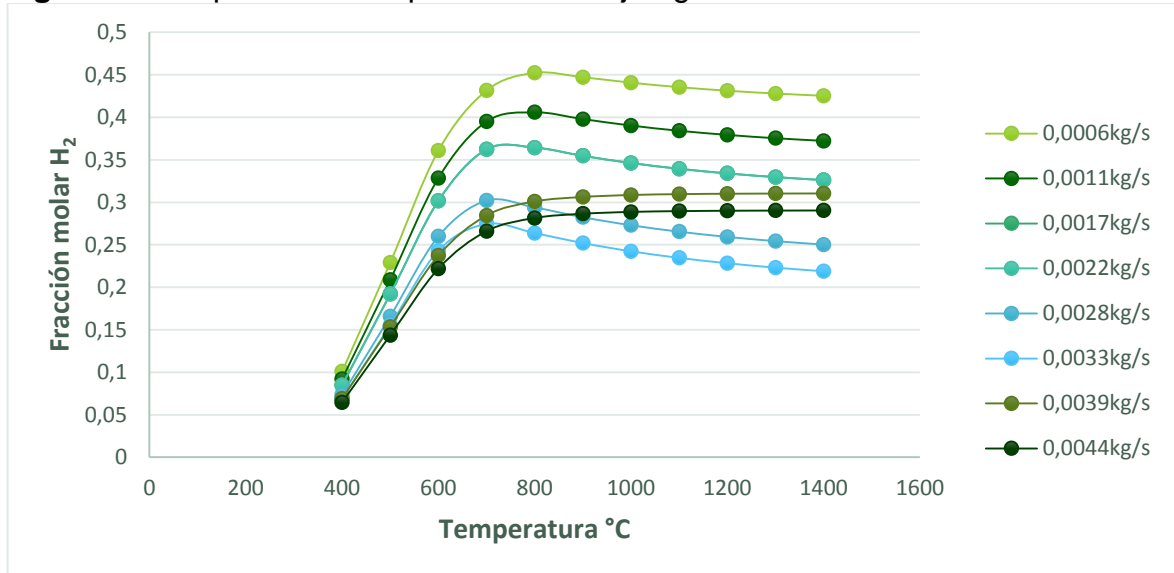
¹¹⁰ GARCIA, L. E. (2011). Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo

¹¹¹ ALMEIDA Andrés. (2010). Gasificación de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR) Retrieved from <http://oa.upm.es/3388/>

¹¹² Ibid., p. 10

velocidad¹¹³, como se puede ver en las gráficas resultantes (figuras 20 a 23) a 800°C aproximadamente cuando la composición de los gases mencionados anteriormente se acerca a 0.5 de su fracción molar.

Figura 23. Esquema 2: Temperatura vs Flujo agente oxidante vs fracción molar H₂



4.2 CONSUMO ENERGÉTICO

Los reactores extraídos y seleccionados de la literatura operan de forma adiabática e isobárica, sin embargo, se analiza el consumo energético necesario para la operación de este, teniendo en cuenta que dentro de esta unidad de operación se dan una serie de reacciones tanto endotérmicas como exotérmicas según el fenómeno del proceso, liberando calor para la siguiente fase o requiriendo un suministro de esta como se puede ver en la figura 24. Inicialmente se suministra calor a una corriente de aire que será la responsable de aportar el calor necesario para que se dé la reducción de humedad en la materia prima; proceso altamente endotérmico, una vez se ha dado el secado se desarrolla una separación para obtener la biomasa seca a 300°C, la cual es descompuesta en la fase pirolisis, consumiéndose así parte del calor presente en la materia seca. Los volátiles y el carbonizado producido en esta desvolatilización pasan al reactor RGibbs, en el cual se da la gasificación y combustión del proceso; esta última fase es de carácter exotérmico¹¹⁴ y aumenta el rendimiento del gas de síntesis con la generación de gases de bajo peso molecular y cenizas o carbón puro no volátil con rangos de temperaturas aproximados de 700 a 1500°C¹¹⁵.

¹¹³BROWN, T. L., & LeMay, E. H. (2004). Química " La ciencia central". México: Pearson Educación. doi:ISSN 970-26-0468-0

¹¹⁴HUSAIN. Op. cit., p. 7

¹¹⁵Ibid., p. 8

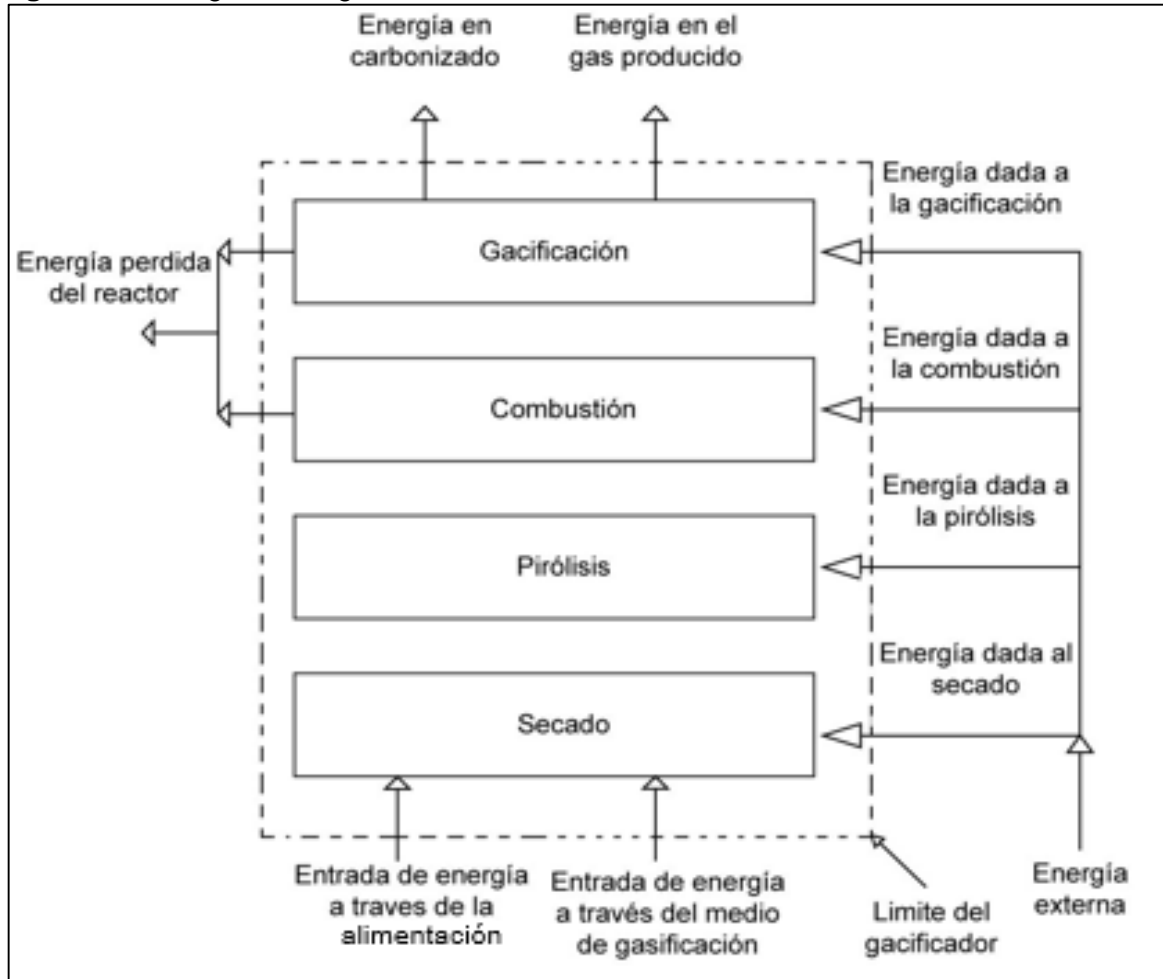
A partir de los datos obtenidos en el simulador de procesos Aspen Plus y teniendo en cuenta que se desarrolló el análisis basándose en los resultados de la sección anterior que sugieren un rango de flujo ideal de agente gasificante entre 0.0011kg/s y 0.0018kg/s; respecto a la temperatura a la que se da la combustión y gasificación se decidió que un valor con composiciones deseadas estaría entre los 850 y 1000°C desarrollando el análisis del consumo energético del proceso a partir de estos valores.

Si bien se empleó un pretratamiento para la biomasa con el objetivo de disminuir la humedad en el proceso y en el gas producido a la salida del gasificador, este secado no es del 100%, razón por la cual hay vapor de agua en el gas producto, si este producto se lleva a temperaturas cercanas a la del ambiente, esta puede condensarse y en este caso el vapor de agua entregaría el calor latente de evaporación, a lo que se le da el nombre de poder calorífico superior (HHV). Por otro lado, si la temperatura de los productos del sistema de gasificación es alta, se considera que todo el contenido de H₂O está en fase vapor y no hay energía latente destinada en este proceso (poder calorífico inferior, LHV)¹¹⁶ En aplicaciones industriales, para el uso del gas de síntesis en los motores y en otras instalaciones, en los que la temperatura de los gases de escape es alta, en los cálculos se utiliza el poder calorífico inferior del combustible. No obstante, en la práctica puede emplearse indistintamente una u otra forma de poder calorífico¹¹⁷.

¹¹⁶RODRÍGUEZ, Abelardo. El consumo de combustible en las instalaciones de generación de potencia. [en línea]. 28 de noviembre 2017. Laboratorio de Combustión INEL-UNE, Cuba. Disponible en internet: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia59/HTML/Articulo10.htm>.

¹¹⁷Ibid., p. 2

Figura 24. Energía en un gasificador



Fuente: BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design. 1 ed. Elsevier, 2010. 365 p. ISBN 978-0-12-374988-8.

El HHV y LHV de la biomasa se obtienen de forma experimental por medio de una bomba calorimétrica¹¹⁸, pero en este caso fueron calculados según las siguientes correlaciones

$$HHV_{Biomasa} = 14600C + 62000 (H + O/8) + 4050S^{119} \quad (19)$$

¹¹⁸ ARRIETA, Andres, JANNA, Farid, FORERO, Carmen. Consultoría técnica para el fortalecimiento y mejora de la base de datos de factores de emisión de los combustibles colombianos- FECOC. Informe final de proyecto incombustión natura. Medellín 2016

¹¹⁹DWIVEDI, Manish, PRAKASH, Amit. Power plant engineering. New international publishers 2006.220p. ISBN: 81-224-2333-7

$$HHV_{Biomasa} = 14600C + 62000 (H + O/8) + 4050S^{120} \quad (20)$$

$$LHV_{Biomasa} = HHV_{Biomasa} - h_{vap} \left(\frac{9H}{100} + \frac{M}{100} \right)^{121} \quad (21)$$

Donde C, H, O, S, M son los contenidos de carbón, hidrógeno, oxígeno, azufre y humedad respectivamente de la biomasa. El $HHV_{Biomasa}$ a partir de las correlaciones para el esquema 1 es de 17288 kJ/kg utilizando como biomasa bagazo de caña de azúcar y para el 2 tiene una magnitud de 15571 kJ/kg , valores que están entre los rangos registrados en la tabla 7 que corresponden a otros $HHV_{Biomasa}$ de otros estudios.

Tabla 7. HHV de diferentes tipos de biomasa

Biomasa	HHV (kJ/kg)
Arce	19958
Residuos sólidos urbanos	19879
Secoya	21028
Lodo de aguas residuales	16000
Paja de arroz	15213
Cascarilla de arroz	15376
Aserrín	20502
Papel	17613
Desechos animales	17167
Turba	21230
Carbón	26436

Fuente: BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design. 1 ed. Elsevier, 2010. 51 p. ISBN 978-0-12-374988-8.

En cuanto a los LHV, se registra que para la configuración de reactor de lecho fijo de corrientes paralelas este valor debe ser de aproximadamente de 5.5 MJ/Nm^3 , con una alimentación de biomasa de $0,155 \text{ kg/s}^{122}$, valor que no se alcanza en este trabajo y se debe a que las proporciones de alimento trabajadas son muy pequeñas respecto a las de la fuente experimental, ya que se trabaja con un alimento de materia prima de apenas 0.0028 kg/s .

A partir de los LHV calculados para el flujo de gases producidos en el gasificador con la fórmula utilizada en el análisis de sensibilidad para el gas producido, se puede calcular el HHV de este, sumándole el calor latente de vaporización h_{vap} (2257 kJ/kg) del agua por el flujo del gas m_w (kg/s) de la siguiente forma.

¹²⁰DWIVEDI, Manish, PRAKASH, Amit. Power plant engineering. New international publishers 2006.220p. ISBN: 81-224-2333-7

¹²¹BASU. Op. cit., p. 219.

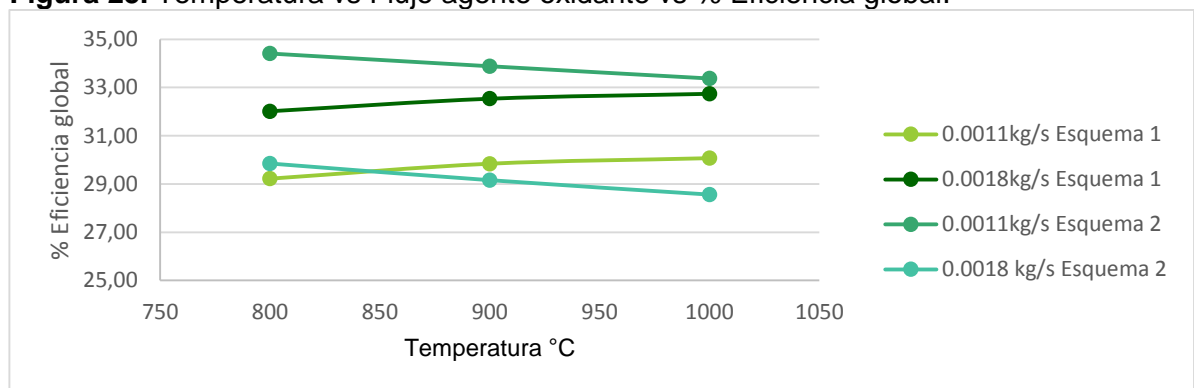
¹²² DÍAZ. Op. cit., p.67.

$$HHV_{Gas} = LHV_{Gas} + h_{vap}\dot{m}_{H_2O} \quad (22)$$

Una vez se obtienen los poderes caloríficos tanto superior como inferior, se pueden calcular las eficiencias globales de los gasificadores modelados según la fórmula mostrada a continuación, la cual representa la salida de energía sobre la entrada de energía potencial¹²⁴ lo que se traduce como la conversión de biomasa en el proceso, encontrando las eficiencias máximas del proceso cuando se emplean relaciones de aire-biomasa menores y temperaturas de 1400°C, con valores de la eficiencia en el esquema 1 de 33.14% y 37.12% en el esquema 2. Como se puede ver en la figura 36 el esquema 2 tiene mayor eficiencia respecto al esquema 1, esto debido a que como se explicó en la sección anterior el esquema 1 tiene menor disminución en la humedad, por esta razón produce un gas con un LHV menor (figuras 33-34), debido a una mayor disponibilidad de vapor de agua en el gas producido lo que repercute directamente en menos formación de metano, monóxido de carbono e hidrógeno. Se reporta que generalmente estas eficiencias son del 75%¹²⁵ y en este trabajo las máximas son de 37.12% como se expuso anteriormente, para mejorar este valor se debe partir de la potencia y eficiencia deseada, para calcular el flujo de agente gasificante y de biomasa requerido para que se den estos valores deseados y finalmente se desarrolle un análisis de sensibilidad para encontrar la temperatura de trabajo ideal.

$$n_{Global} = \frac{LHV_{Gas}\dot{m}_{gas}}{LHV_{Biomasa}\dot{m}_{Biomasa}} * 100 \quad (23)$$

Figura 25. Temperatura vs Flujo agente oxidante vs % Eficiencia global.



La potencia requerida por el gasificador es un parámetro importante en este trabajo ya que determina prácticamente el consumo energético del corazón de los esquemas tecnológicos que es el reactor, encontrando que las potencias máximas al igual que con las eficiencias se dan a 1400°C con flujo de agente gasificante de

¹²³DWIVEDI. Op. cit., p. 220

¹²⁴BASU. Op. cit., p. 219.

¹²⁵ DÍAZ. Op. cit., p.67

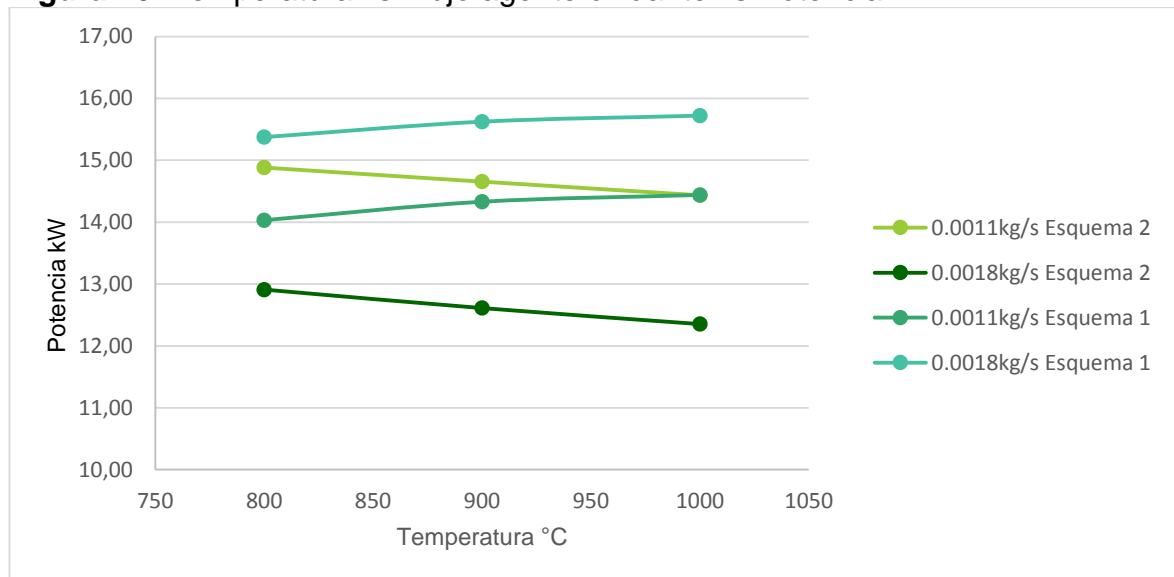
¹²⁶BASU. Op. cit., p. 219

0.0006kg/s obteniendo valores de 15.92 y 16.05 kW para el reactor del esquema 1 y 2 respectivamente. y las mínimas a 400°C y 0.004kg/s (2.80 en el reactor esquema 1 y 3.30 para esquema 2), comportamientos esperados ya que los mínimos requieren menos suministro de energía para elevar la temperatura que influye directamente en las fases del proceso

$$P = HHV_{Gas} \dot{m}_{gas} = kW^{127} \quad (24)$$

Analizando los rangos ideales de trabajo establecidos en el análisis de sensibilidad se obtuvo la figura 26, que reporta el requerimiento energético de los dos esquemas, en la cual se puede observar que el esquema 2 requiere más potencia para su funcionamiento y mayor eficiencia en la conversión de la biomasa, probablemente porque necesita más energía para eliminar la humedad residual en la materia prima comparado con el 1.

Figura 26. Temperatura vs Flujo agente oxidante vs Potencia kW.



¹²⁷ PERÉZ, Luis, CASAS, Yannay, BERMÚDEZ, Raúl. Determinación de la calidad energética y la composición del gas de síntesis producido con biocombustibles. Parte II: Combustibles sólidos, Bagazo de caña. En: Afinidad. Enero, 2012.p35.

5. CONCLUSIONES

- Por medio de un PMA se seleccionaron satisfactoriamente dos reactores de lecho fijo con los parámetros necesarios para desarrollar la simulación de estos y posteriormente adecuarlos a esquemas tecnológicos para la producción de gas de síntesis.
- En el proceso de simular los esquemas tecnológicos para la producción de gas de síntesis a partir de biomasa residual en un reactor de lecho fijo con un enfoque en la disminución de alquitranes; se encontró que hay una relación indirecta entre el flujo de agente gasificante y la concentración de estos, pues al aumentar la concentración del agente gasificante, disminuyó la fracción de estos. Además, la fracción molar de estos en el esquema no es muy significativa, ya que al variar temperatura y relación de equivalencia biomasa-agente gasificante está siempre mostró fracciones molares $\times 10^{-15}$ o menores.
- El análisis de sensibilidad mostró que al aumentar la temperatura había una tendencia al aumento de las composiciones de los gases deseados hidrógeno y monóxido de carbono, e inversa con el dióxido de carbono y metano. En cuanto a la relación de equivalencia aire- biomasa los resultados indican que al aumentar esta variable hay más producción del gas no combustible (CO_2). Encontrando que una buena alternativa de operación se encontraría a 900°C ya que después de esta temperatura hay un estancamiento debido al equilibrio de las reacciones ya sea de crecimiento o de decrecimiento. Respecto al flujo de agente gasificante es mejor trabajar a 0.0011 kg/s para que no haya ni mucha formación de productos indeseados o poca generación de deseados.
- Respecto a la parte energética del gas producido, el poder calórico mínimo y máximo, respondió indeseablemente al incremento de la temperatura a partir de los 600°C , posiblemente por la disminución del metano en el sistema; sin embargo, si se opera a este nivel, habría altas concentraciones de dióxido de carbono, que es un gas no combustible y contaminante. Aunque a menor relación de equivalencia se presente mayor LHV, HHV, eficiencia global y menor requerimiento energético, no hay que olvidar que con esta condición aumenta la concentración de alquitrán, compuesto que limita la aplicabilidad del gas de síntesis producido. Por otro lado, aunque disminuir la humedad en la biomasa alimentada genere más gastos energéticos, una reducción de esta variable aumenta los poderes caloríficos del gas obtenido. Al manejar un flujo de agente gasificante de 0.0011 kg/s a 900°C se obtiene poderes calóricos inferiores de 5180 kJ/kg , 4371 kJ/kg , eficiencias de 29.84% y 33.88% y potencias requeridas por el gasificador de 14.33 kW , 14.65 kW para los esquemas 1 y 2 respectivamente.

6. RECOMENDACIONES

- Partir de la eficiencia y potencia deseada para calcular la materia prima requerida en el esquema tecnológico o reactor de lecho fijo a simular.
- Si bien en esta simulación se utilizó benceno como el representante de los alquitranes, para el desarrollo de próximas investigaciones, se recomienda asegurarse de tomar diferentes tipos de alquitranes formados en las diferentes zonas del reactor de gasificación.
- Estudiar el comportamiento del char en el proceso, ya que en este trabajo se tomó como carbón sólido.
- Desarrollar modelos que tengan en cuenta la geometría del proceso y caídas de presión.

BIBLIOGRAFÍA

AHMED, A. SALMIATON, A., CHOONG, W., WANG, A. Review of kinetic and equilibrium concepts for biomass tar modeling by using Aspen Plus. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Diciembre, 2015.vol. 52, p. 1623-1644

ÁNGEL Daniel. Evaluación del rendimiento operacional de un gasificador para cascarilla de arroz en reactor de lecho fluidizado a escala piloto. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico. Medellín.: Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Mecánica.2005.15,19p.

ARTEAGA, Luis, CASAS, Yannay, CABRERA, Jagni, RODRÍGUEZ, Lizet. Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación. En: Afinidad LXXII. Junio, 2015. Vol. 72, no. 570, p. 138-145

AGRO WASTE. Agro waste gasificación, En: Centro tecnológico nacional de conserva y alimentación [revisado 13 octubre 2017]. Disponible en Internet: <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/GASIFICACI%C3%93N.pdf>.

ASPEN TECHNOLOGY, INC. Aspen Plus. User Guide.10.2 ed. Febrero, 2000.170-178p.Cambridge, MA 02141-2201.

BARCO Burgos, J. Gasificación de cuesco de palma. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia 2015.

BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design. 1 ed. Elsevier, 2010. 365 p. ISBN 978-0-12-374988-8.

BEGUM, Sharmina; RASUL, Raul, AKBAR, Delwar. A Numerical Investigation of Municipal Solid Waste Gasification Using Aspen Plus. En: Procedia Engineering. ELSEIVER. 2014. vol. 90. p. 710-717.

BELTRÁN Martínez, Mauricio. Estudio de un sistema de gasificación de biomasa a pequeña escala en lecho fluidizado burbujeante. Bucaramanga, 2005.Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas.

BERNDES, Göran; HOOGWIK, Monique, VAN DEN BROEK, Richard. The Contribution Of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. [1]:2003. 1-28.

BOLOGNA, Tecnologia dei Materiali Ceramici. Placas Cerámicas de bajo espesor: Tecnologías, aplicaciones y problemas. p. 1-15

BULL, Dog. Performance Improvements to a Fast Internally Circulating Fluidized Bed (FICFB) Biomass Gasifier for Combined Heat and Power Plants. University de Canterbury, 2008. 56-57p.

BURGOS, Jimmy. Gasificación de cuesco de palma para la obtención de gas combustible en un reactor de lecho fijo. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magíster en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. 22p

CERVONE, H. Frank. Applied digital library project management. En: OCLC Systems & Services: International Digital Library Perspectives. Octubre, 2009, vol. 25, no. 4, p. 228-232

CHEN, Chong, YU-QI, Jin, JIAN-HU, Yan. Simulation of municipal solid waste gasification in two different types of fixed bed reactors. En: FUEL. Enero, 2013. 58-63 p.

CUEVAS, Angélica. La madera que dejó de generar energía. En: El Espectador. Bogota D.C.25 septiembre 2013.Sec. Medio Ambiente

DE SOUZA-SANTOS, Marcio. Solid fuels combustion and gasification. CRC Press, Taylor & Francis Group.2 ed. Boca Raton, 2010 FL, ISBN 9781420047493

DAHMANI, Manel. PÉRILHON, Christelle . MARVILLET, Christelle. Study of optimal conditions of a palm waste. En: Sciences de l'ingénieur [physics]. 2017.p. 601-606

DÍAZ, Antonio. Estudio de una planta de cogeneración a partir del aprovechamiento de biomasa. Trabajo final de grado para obtener el título de: Ingeniero Mecánico. Universidad de la laguna.

DWIVEDI, Manish, PRAKASH, Amit. Power plant engineering. New international publishers 2006.220p. ISBN: 81-224-2333-7

DONAJ, Pawel J. Conversion of biomass and waste using highly preheated agents for materials and energy recovery. Stockholm: Division of Energy and Furnace Technology Department of Material Science and Engineering School of Industrial Engineering and Management Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, 2011. ISBN 9789175010335

DURÁN, Martín, RUIZ, Ricardo. Diseño de equipos de contacto sólido-líquido a elevadas presiones en el procesamiento de la biomasa. En: Ciencia y Tecnología. Univ. De Palermo. 2015. Vol. 15, p. 25-40.

ENERGÍAS RENOVABLES. Energía-biomasa, En: Coordinación de Energías Renovables, Subsecretaría de Energía Eléctrica. República argentina. [En línea]

[revisado 7 julio 2017]. Disponible en Internet: http://www.inti.gob.ar/e-renova/erTO/pdf/libro_energia_biomasa.pdf.

ESTRADA, Carlos, Meneses, Alberto. Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. En: Scientia et Technica. Agosto 2004. No 25. 155-159p.

EVANS, J. Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation, and Conversion. Noviembre 1998 Golden, Colorado 80401-3393. 85 a 93p.

FERNÁNDEZ, Eduardo. Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magíster en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. p.10

GENES, Eder. Destilación secundaria de alquitranes generados en la gasificación de cuesco de palma africana. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: ingeniería química. Medellín, 2014. Universidad Nacional de Colombia. p.

GONZÁLES, Jesús. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Mundi-prensa. 2015. ISBN: 9788484766742. 2210p.

GSTC. The Gasification Industry. Gasification & Syngas Technologies Council [en línea], 16 de marzo de 2016 [revisado 10 octubre 2017]. Disponible en Internet: <http://www.gasification-syngas.org/resources/the-gasification-industry>.

HERGUEDAS, Lucas. Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. 2012. ISBN: 978-84-931891-5-0

HERNÁNDEZ, Ulises. Modelado orientado al control de gasificadores. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Maestro en ingeniería. México D.F. 2009. Universidad Nacional Autónoma de México. 18-20p.

HUSAIN, Mazhar. Simulation of effects of various parameters in solid. Proyecto para obtener título de tecnólogo en ingeniería química. Instituto nacional de tecnología, Rourkela, India. Instituto tecnológico Rourkela. 2012-2013. 7p.

IDEA-Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). Biomasa: gasificación. Madrid. [en línea] <http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_gasificacion_07_d2adcf3b.pdf> [citado en 20 de junio del 2017].

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y DE CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El instituto, 2008. 110 p .

_____. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: El instituto, 2008, p.12.

_____. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 4490. Bogotá: El instituto, 1998, p.12.

LOPEZ, Ismael. Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación. En: CONAMA, Congreso nacional de medio ambiente. 2014. 7-11p.

LOZANO, Álvaro. Gasificación en Gasificadores de Flujo Arrastrado Simulación en Aspen plus y Comparación. Proyecto final de carrera. Zaragoza. Escuela de ingeniería y arquitectura. 2012. 35p.

MACHORRO, Ricardo. Estudio de la producción de hidrógeno a partir de los residuos sólidos de la ciudad de México mediante la tecnología de gasificación. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: maestro en ingeniería de la energía. México D.C. Universidad Nacional Autónoma de México. 2016. 83p.

MELGAR, A., PÉREZ, J., GIMÉNEZ B., HORRILLO, A. Diagnóstico del proceso de gasificación de biomasa mediante el análisis de la composición del gas pobre. 8 Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cusco, Perú. 2007. p. 12-28.

MÍGUEZ, Claudio. La eficiencia energética en el uso de la biomasa para la generación de energía eléctrica: optimización energética y exergética. Memoria para optar al grado de doctor. Madrid, 2013. Universidad Complutense de Madrid.

NARANJO, Manuel. Gasificación de biomasa y residuos en lecho fluidizado: estudios en planta piloto. Sevilla, Mayo 2009. Memoria presentada para obtener el título de Doctor. Universidad de Sevilla. 4p

PATINO, Alberto. Implantación de metodología SPA de captura de alquitranes y desarrollo de dispositivo de dopado de alquitranes. Proyecto final de carrera. Sevilla. Universidad de Sevilla. 15p.

PERÉZ, Luis, CASAS, Yannay, BERMÚDEZ, Raúl. Determinación de la calidad energética y la composición del gas de síntesis producido con biocombustibles. Parte II: Combustibles sólidos, Bagazo de caña. En: Afinidad. Enero, 2012. p35.

PÉREZ, Juan, BORGE, David, AGUDELO, John. Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico – experimentales. En: Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia. Marzo, 2010. Vol. 1, no. 52, p. 95-107.

PÉREZ, Juan. Gasificación de biomasa: Estudios teórico-experimentales en lecho fijo equicorriente. 1 ed. Medellín: Universidad de Antioquia, 2009. 230 p. ISBN 978-958-714-263-1.

PUIG-ARNAVAT, María; BRUNO, Joan Carles; CORONAS, Alberto. Review and analysis of biomass gasification models. En: Renewable And Sustainable Energy Reviews. Vol. 14, no. 9 (2010) p. 2843

RAMZAN, Naveed, ASMA, Ashrafet, ABDULLAH, Malik al. Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste. En: BIOMASS AND BIOENERGY. 2011 vol. 35, no. 9, 3962-3969p.

RAMZAN, N., ASHRAF, A., USMAN, J., SHABBIR, H. Modelling and Simulation of Coal Gasification Plant. En: Revista Del Instituto De Ingenieros Químicos De Pakistán. 2010.Vol. 38. 33-38P.

RAVEENDRAN, K.; GANESH, Anuradda y KHILAR, Kartic C. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. En: FUEL. vol. 74, 1995, no. 12. 1812-1822 p.

REVISTA ENERGIZA. Proceso de conversión de biomasa en energía. [En línea] [revisado 7 julio 2017]. Disponible en Internet: <<http://www.energiza.org/index.php/biomasa-2/56-procesos-de-conversion-de-biomasa-en-energia>>.

RODRÍGUEZ, Abelardo. El consumo de combustible en las instalaciones de generación de potencia. [en línea]. 28 de noviembre 2017. Laboratorio de Combustión INEL-UNE, Cuba. Disponible en internet: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia59/HTML/Articulo10.htm>.

ROHAN, Fernando, Developments in modelling and simulation of coal gasification. En: IEA CLEAN COAL CENTRE. Febrero, 2014. 17-20p. ISBN978-92-9029-552-5

ROMERO, Arturo. Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. En: Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. España,2010. Vol. 104, N^o. 2

SÁNCHEZ, Nuria. Obtención de gas de síntesis a partir de biomasa utilizando catalizadores de níquel. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Valladolid. Universidad de Valladolid.2014.23p.

SHARMA, Avdhesh. Modeling and simulation of a downdraft biomass gasifier1. Model development and validation. En: Energy conversion and management.2011.1386-1396p.

TERAN, William. "La Biomasa: Una alternativa energética proveniente de la vida misma" Las Energías sustentables y sostenibles en el departamento de Nariño. Colombia. ed: UNIMAR .2015. 84-85 p. v.1. ISBN: 978-958-8579-18-4.

TRUJILLO, Sandra. Ingeniería de detalle y construcción de un sistema de gasificación en tres etapas. Proyecto fin de carrera para optar el título de ingeniería química y ambiental. Sevilla. Universidad de Sevilla. 2013. p. 10.

VAL GENTO, Verónica, GIRALDO, Gregorio. Planta de cogeneración mediante gasificación de biomasa residual. En: Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Octubre, 2010.

WANG, Jiang, YANG, Kun, XU, Zi-Long, FU, Chao. Energy and exergy analyses of an integrated CCHP system with biomass air gasification. En: Applied Energy. Elsevier. Marzo, 2015. Vol. 142, no. 12, p. 317-327.