

ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA
PARA LA PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS

LAURA ANDREA GARCÍA RAMÍREZ
LAURA DANIELA LEÓN SUÁREZ

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

ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA
PARA LA PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS

LAURA ANDREA GARCÍA RAMÍREZ
LAURA DANIELA LEÓN SUÁREZ

Trabajo de investigación para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
Libardo Mendoza Geney
Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

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

Decano general Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director de Investigaciones

Ing. Armando Fernández

Director del Departamento de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

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.

DEDICATORIA

Dedicamos este Proyecto de Grado a Dios por permitirnos alcanzar nuestros logros, a nuestros padres y hermanos por acompañarnos en este proceso y brindarnos su apoyo, su amor y palabras de aliento para avanzar en nuestra carrera y crecer personal y profesionalmente.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por permitirnos culminar esta etapa, porque nos dio la sabiduría e inteligencia, la dirección y la entereza necesaria para cumplir con nuestros objetivos.

A nuestros padres y hermanos quienes nos acompañaron en el transcurso de la carrera brindándonos su apoyo incondicional, su amor, su voz de aliento y colaboración.

Queremos agradecer al nuestro director Libardo Enrique Mendoza Geney por su orientación, disposición, acompañamiento y colaboración en el desarrollo del proyecto.

Por último, agradecer a los docentes de la Fundación Universidad América quienes nos guiaron y brindaron sus conocimientos a lo largo de la carrera permitiéndonos realizar el Trabajo de Grado.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS	22
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
1. MARCO CONCEPTUAL	28
1.1 BIOMASA	28
1.1.1 <i>Definición</i>	28
1.1.2 <i>Tipos y fuentes de biomasa</i>	28
1.2 PRE-TRATAMIENTOS	32
1.2.1 <i>Tipos de pre-tratamientos</i>	32
1.2.1.1 <i>Molienda</i>	33
1.2.1.2 <i>Torrefacción</i>	33
1.2.1.3 <i>Secado</i>	33
1.2.1.4 <i>Peletización</i>	33
1.3. PIRÓLISIS DE BIOMASA	33
1.3.1 <i>Definición</i>	33
1.3.2 <i>Tipos de procesos de pirólisis</i>	34
1.3.3 <i>Parámetros del proceso de pirólisis</i>	34
1.4. GASIFICACIÓN	36
1.4.1 <i>Proceso de gasificación</i>	37
1.4.2 <i>Parámetros influyentes</i>	38
1.4.3. <i>Tipos de gasificadores</i>	39
1.4.4 <i>Reacciones generadas en el proceso de gasificación</i>	40
1.5 ADECUACIÓN DEL GAS DE SÍNTESIS	41
1.5.1 <i>Gas de síntesis</i>	41
1.5.2 <i>Adecuación de alquitranes</i>	42
1.5.3 <i>Reacciones de la formación de alquitranes</i>	43
1.6. ESQUEMAS TECNOLÓGICOS DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN	43
2. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA	45
2.1 ANÁLISIS PRÓXIMO	45
2.1.1 <i>Contenido de humedad</i>	45
2.1.2 <i>Contenido de cenizas</i>	45
2.1.3 <i>Material volátil</i>	45
2.2 ANÁLISIS ELEMENTAL	45
2.3 <i>PODER CALORÍFICO</i>	46
2.4 TIPOS DE BIOMASA UTILIZADOS EN EL PROYECTO DE GRADO	46
2.4.1 <i>Cascarilla de café</i>	46

2.4.2 Madera	47
2.4.3 Caucho	47
2.5 CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA BIOMASA	48
2.5.1 Contenido de humedad	48
2.5.2 Contenido de cenizas	49
2.5.3 Comparación del estudio realizado	50
2.5.3.1 Cascarilla de café	51
2.5.3.2 Madera	51
2.5.3.2 Neumático	52
2.6 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LA BIOMASA	53
3. ESQUEMA TECNOLÓGICO	55
3.1 SECADO	55
3.2. PIRÓLISIS	57
3.2.1 Cinética de reacción	58
3.2.2 Productos de pirólisis	60
3.3 GASIFICACIÓN	61
3.4 ADECUACIÓN DE ALQUITRANES	63
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	66
4.1 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA CONDICIONES PRINCIPALES	66
4.1.1 Secado	67
4.1.2 Pirólisis	68
4.1.3 Gasificación	71
4.1.4 Alquitranes	74
4.2 CASOS DE ESTUDIO	79
4.2.1 Variación de humedad	80
4.2.2 Variación de la temperatura de pirólisis	82
4.2.3 Variación de la temperatura y agente gasificante en el proceso de gasificación	84
4.2.4 Variación de la temperatura en la de adecuación de alquitranes	87
5. CONCLUSIONES	91
6. RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	94

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfica 1. Curva de velocidad de calentamiento	50
Gráfica 2. Variación de la masa vs temperatura	68
Gráfica 3. Material orgánico vs temperatura (K)	69
Gráfica 4. Composición de los productos de la pirólisis	69
Gráfica 5. Formación de productos gaseosos	70
Gráfica 6. Descomposición del carbonizado	72
Gráfica 7. Reacción de gasificación	72
Gráfica 8. Reacción del naftaleno	74
Gráfica 9. Formación del CO	76
Gráfica 10. Formación del H ₂	76
Gráfica 11. Formación del CO ₂	77
Gráfica 12. Formación del CH ₄	77
Gráfica 13. Formación de alquitranes	78
Gráfica 14. Formación del agua	78
Gráfica 15. Cantidad de H ₂ producida respecto al tiempo	81
Gráfica 16. Cantidad de CO, CO ₂ y CH ₄ , producida respecto al tiempo	81
Gráfica 17. Descomposición del material orgánico respecto a la Temperatura para el caso 4	82
Gráfica 18. Descomposición del material orgánico respecto a la Temperatura para el caso 5	83
Gráfica 19. Productos generados en el proceso de pirólisis para el caso 4	83
Gráfica 20. Productos generados en el proceso de pirólisis para el caso 5	84
Gráfica 21. Descomposición del carbonizado en el proceso de gasificación para el caso 6	85
Gráfica 22. Descomposición del carbonizado en el proceso de gasificación para el caso 7	85

Gráfica 23. Descomposición de reactantes y producción de productos en el proceso de gasificación <i>caso 6</i>	86
Gráfica 24. Descomposición de reactantes y producción de productos en el proceso de gasificación <i>caso 7</i>	86
Gráfica 25. Producción de CO y H ₂ en la adecuación de alquitranes para el <i>caso 8</i>	88
Gráfica 26. Producción de CO y H ₂ en la adecuación de alquitranes para el <i>caso 9</i>	88

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Porcentaje de humedad contenida en la materia prima	49
Tabla 2. Porcentaje de cenizas contenida en la materia prima	49
Tabla 3. Comparación de los datos estudiados de Cascarilla de café	51
Tabla 4. Comparación de los datos estudiados de Madera	52
Tabla 5. Comparación de los datos estudiados de Neumático	53
Tabla 6. Caracterización fisicoquímica de la biomasa utilizada en el proyecto	54
Tabla 7. Valores de las constantes cinéticas de reacción	59
Tabla 8. Coeficientes para la determinación de la capacidad calorífica	60
Tabla 9. Parámetros cinéticos para CO	60
Tabla 10. Parámetros cinéticos para CO ₂	61
Tabla 11. Parámetros cinéticos para CH ₄	61
Tabla 12. Parámetros cinéticos para H ₂	61
Tabla 13. Parámetros cinéticos para la variación de masa de la gasificación	63
Tabla 14. Parámetros cinéticos para el Naftaleno	64
Tabla 15. Coeficientes para la determinación de la capacidad calorífica del Naftaleno	65
Tabla 16. Parámetros iniciales para el caso BASE	66
Tabla 17. Variación de parámetros para cada uno de los casos estudiados	79
Tabla 18. Resultados obtenidos para los casos 2 y 3	80
Tabla 19. Resultados obtenidos para los casos 4 y 5	82
Tabla 20. Resultados obtenidos para los casos 6 y 7	84
Tabla 21. Resultados obtenidos para los casos 8 y 9	87
Tabla 22. Estudio de la energía requerida para cada proceso	89
Tabla 23. Producción de masa en cada uno de los procesos	90

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Clasificación de la biomasa	28
Figura 2. Tecnologías de transformación de la biomasa	31
Figura 3. Métodos de pre-tratamiento de la biomasa	32
Figura 4. Proceso de gasificación en una o varias etapas	36
Figura 5. Tipos de gasificadores	39
Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de gasificación en lecho arrastrado para la obtención de un syngas útil para la producción de combustibles líquidos y productos químicos	44
Figura 7. Esquema tecnológico general para el desarrollo de la herramienta tecnológica	55
Figura 8. Proceso de secado en el esquema tecnológico	55
Figura 9. Proceso de pirólisis en el esquema tecnológico	57
Figura 10. Modelo de tres reacciones independientes y paralelas	58
Figura 11. Proceso de gasificación en el esquema tecnológico	61
Figura 12. Proceso de adecuación de alquitranes en el esquema tecnológico	63
Figura 13. Esquema del proceso de secado	67
Figura 14. Esquema del proceso de pirólisis	71
Figura 15. Esquema del proceso de gasificación	73
Figura 16. Esquema de la adecuación de alquitranes	75

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Reacción heterogénea de gasificación	40
Ecuación 2. Reacción heterogénea de gasificación	41
Ecuación 3. Reacción heterogénea de gasificación	41
Ecuación 4. Reacción de conversión agua-gas	41
Ecuación 5. Reacción de reformado	41
Ecuación 6. Porcentaje de humedad	48
Ecuación 7. Porcentaje de cenizas	50
Ecuación 8. Balance general	56
Ecuación 9. Balance biomasa	56
Ecuación 10. Balance aire caliente	56
Ecuación 11. Balance agua	56
Ecuación 12. Cantidad de energía	56
Ecuación 13. Cantidad de energía	57
Ecuación 14. Temperatura inicial	57
Ecuación 15. Variación de la masa	58
Ecuación 16. Calor específico de la madera	59
Ecuación 17. Cantidad de calor requerido	59
Ecuación 18. Calor específico para los productos	59
Ecuación 19. Cinética de reacción para los productos	60
Ecuación 20. Reacción de gasificación para el carbonizado	62
Ecuación 21. Reacción balanceada	62
Ecuación 22. Reacción de gasificación para el carbonizado	62
Ecuación 23. $W_{\text{carbonizado}}$	63
Ecuación 24. Reacción de reformado de naftaleno	64
Ecuación 25. Modelo de reacción simple de primer orden	64
Ecuación 26. $W_{\text{alquitranes}}$	64
Ecuación 27. Calor específico	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
C _p	Calor específico a presión constante	kJ/kgK
E _A	Energía de activación	kJ/mol
K ₀	Factor preexponencial	s ⁻¹
n ₁	Orden de reacción	
Q	Calor	kJ
R	Constante gases ideales	J/molK
T	Temperatura	K
T	Tiempo	S
W _{bm}	Cantidad de material orgánico muestra	mi/m _o
y ₀	Máxima fracción másica presente en i	
y ₁	Fracción de masa total en j	
ṁ	Flujo másico	Kg/s

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
Θ	Temperatura madera seca	K

Subíndices

Subíndice	Término
BM	Material que se descompone

GLOSARIO

BIOMASA: materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, macadamia), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas Negras, basura orgánica y otros).

CARBONIZADO: material obtenido a partir de la biomasa con alto contenido de carbono, que se ha pirolizado en un entorno de oxígeno nulo o muy bajo y mediante procesos sostenibles.

CINÉTICA DE REACCIÓN: relación entre la velocidad de una reacción química y las variables que influyen en ella.

CONTENIDO DE HUMEDAD (H.R.): el contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca.

LIGNOCELULOSA: la lignocelulosa es el principal componente de la pared celular de las plantas. Es producida mediante la fotosíntesis.

MATERIAL PARTICULADO: conjunto de partículas sólidas o líquidas presentes en suspensión en la atmósfera.

MATERIAL VOLÁTIL: son los desprendimientos gaseosos de la materia orgánica e inorgánica durante el calentamiento.

PORCENTAJE DE CENIZAS: el porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material.

SECADO: es la eliminación de un líquido por conversión en vapor, que se separa del sólido.

TERMOGRAVIMETRÍA: es una técnica de análisis térmico en la que se determina la pérdida o ganancia de masa de una muestra en función de la temperatura.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza el balance de masa y energía de un esquema tecnológico para analizar y evaluar el proceso de gasificación. Se desarrolla una herramienta computacional, estudiando las variables y parámetros que influyen en el proceso de gasificación para la obtención de gas síntesis. Para llevar a cabo este objetivo, es necesario realizar la caracterización de la biomasa que se va a someter en el proceso de descomposición y transformación; dentro de la caracterización está el análisis proximal, análisis elemental y poder calorífico. En el proyecto se estudian tres tipos de materia prima como lo son la cascarilla de café, la madera y el caucho.

El proceso de gasificación se puede dividir en varias etapas. La primera etapa corresponde al secado, que es el pre-tratamiento que se le realiza a la biomasa para sus posteriores procesos. La siguiente etapa es el proceso de pirólisis, aquí la biomasa se descompone para formar productos gaseosos, líquidos y sólidos, además, es necesario conocer la cinética de reacción para cada uno de los componentes de la biomasa. Una vez formados estos productos, los carbonizados se someten al proceso de gasificación teniendo contacto con un agente de reacción, en este caso el agua, para convertir éstos productos sólidos en gas. La última etapa del esquema es la adecuación de alquitranes donde se busca minimizar la concentración de los mismos convirtiéndolos en gas, generando un gas síntesis eficiente y con un poder calorífico óptimo para la generación de biocombustibles.

Para la creación de la herramienta computacional se realizan los balances de masa y energía en cada una de las etapas del proceso de gasificación, con el fin de conocer la energía requerida para poder llevar a cabo las diferentes etapas del proceso y conocer la composición de los productos generados durante la gasificación, dando como producto final la composición del gas síntesis.

Palabras claves: alquitranes, biomasa, caracterización, gasificación, pirólisis, secado.

INTRODUCCIÓN

Según Amestoy¹, la problemática ambiental que se vive actualmente, se debe a las consecuencias derivadas del uso inapropiado de los recursos naturales, donde las actividades económicas han conllevado a un elevado consumo de suelos y recursos de todo tipo, como la obtención de combustibles fósiles para la producción de energía, la tala y quema de bosques y también algunos métodos de explotación agropecuaria, causando daños a nivel ambiental.

Como explica Aguilar Peris², uno de estos daños se ve representado en el cambio climático que es generado principalmente por el efecto invernadero, que es un proceso natural que influye en el calentamiento de la tierra, bajo la acción de radiación solar, esto es debido al hecho de que ciertos gases atmosféricos como el dióxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, el vapor de agua, el metano y ozono troposférico son capaces de modificar el balance energético de la tierra, por ejemplo, el aumento de la concentración de dichos gases evita que se reflejen los rayos del sol.

Molina³, indica que existen tres factores que generan impacto sobre el cambio climático: el primero es el crecimiento global de nuestra especie, el segundo es la demanda de energía y recursos que cada habitante requiere, y el tercero es el tipo de tecnologías usadas para el desarrollo económico e industrial del mundo. Estos factores se evidencian en gran magnitud desde el inicio de la revolución industrial, porque Amestoy⁴, explica que desde allí se incrementó progresivamente la actividad en la industria, el consumo de energía y el transporte, generando gases provenientes del petróleo, carbón y gas afectando directamente la atmosfera.

Como se mencionaba anteriormente las actividades humanas generan emisiones de gases de efecto invernadero, y Molina⁵ también indica que es por el uso de los combustibles fósiles, la actividad agrícola e industrial y por deforestación; Ciesla⁶ explica que entre mayor sea la concentración de estos gases en la atmosfera mayor será la temperatura en el planeta dando paso al calentamiento global.

Debido a esta problemática, se hace necesario investigar nuevas fuentes energéticas renovables, donde se pueda sustituir las fuentes convencionales no renovables de origen fósil, teniendo en cuenta los diferentes procesos de producción

¹ AMESTOY ALONSO José. El planeta en peligro: calentamiento global, cambio climático, soluciones. España. Club universitario. 2010. 7 p

² AGUILAR PERIS, José. El efecto invernadero, el cambio climático, la crisis medioambiental y el futuro de la tierra. Madrid. 2003. 19 p.

³ MOLINA Mario, SARUKHAN José, y CARABIAS Julia. El cambio climático. México. Fondo de cultura económica. 2017.

⁴ AMESTOY ALONSO José. El planeta en peligro: calentamiento global, cambio climático, soluciones, Op. cit., p. 14.

⁵ MOLINA Mario, SARUKHAN José, y CARABIAS Julia. El cambio climático. México. Fondo de cultura económica. 2017.

⁶ CIESLA William. Cambio climático, bosques y ordenación forestal. Roma. 1996. 16 p.

y obtención de biocombustibles. La producción de biocombustibles se puede llevar a cabo a través de procesos de conversión de naturaleza termoquímica y bioquímica. Los procesos termoquímicos incluyen principalmente la pirólisis, gasificación y combustión. A través del proceso de combustión se puede generar energía en forma de calor; el proceso de pirólisis es la descomposición térmica de la biomasa para obtener biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos; y el proceso de gasificación es un proceso de conversión para generar un gas combustible a partir de combustibles sólidos o líquidos.

El enfoque del presente proyecto de investigación es realizar un análisis de balance de masa y energía de un sistema para la producción de gas de síntesis por medio del proceso de gasificación; para ello se llevará a cabo la definición de operaciones tecnológicas y parámetros de operación de cada uno de los equipos usados en este proceso, teniendo en cuenta condiciones térmicas, de flujo y cinética de reacción para cada uno de ellos. Para el cumplimiento de este objetivo se debe partir de las técnicas de recolección de datos de acuerdo a la información disponible en la literatura, artículos y revistas científicas.

Para lograr este objetivo se debe tener en cuenta la caracterización de las materias primas y las condiciones a las que estas se deben manejar para su mayor aprovechamiento energético. Se define el conjunto de procesos que se incluyen en el esquema tecnológico.

Para llevar a cabo el análisis propuesto, se incluye una etapa de preparación y pretratamiento físico de la biomasa, siendo este el primer equipo utilizado en el esquema tecnológico, llamado secado, que según Cantalosella⁷, permite eliminar el porcentaje de humedad presente en la materia prima. Al evaporar la mayor cantidad de agua posible se obtienen buenos rendimientos energéticos en el proceso.

Así mismo, se identifican las materias primas a trabajar, en este caso, madera, cascarilla de café y caucho; seguido de esto se realiza su respectiva caracterización por medio de datos encontrados en la literatura y datos obtenidos experimentalmente. Para proceder con la caracterización de las materias primas escogidas, se realiza el correspondiente análisis próximo para conocer los porcentajes de humedad y cenizas contenidos en cada una de ellas, teniendo como guía la Norma DIN CEN/TS 147743:2004 y la Norma DIN CEN/TS 14775:2004, respectivamente.

El siguiente proceso que se utiliza en el esquema tecnológico es la pirólisis, donde Agrowaste⁸ lo define como un proceso termoquímico donde se descompone la

⁷ CANTALOSELLA, Sergi. Influencia de las condiciones de pretratamiento en la gasificación eficiente de biomasa vegetal para la producción de energía sostenible. Tesis de maestría Valencia: Universidad politécnica de Valencia. 2017. 37 p.

⁸ AGROWASTE. Pirólisis. AGROWASTE LIFE + Environment policy & Governance (LIFE10 ENV/ES/469) [en línea], febrero de 2013 [revisado 20 de marzo de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/PIROLISIS.pdf>.

biomasa por medio de la acción del calor y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles, residuos secos de carbón y agua. Como indica Gómez⁹, el desarrollo de la pirólisis define en gran medida las características y fracciones de los productos generados, por ello es importante el estudio de la cinética de reacción. En la literatura de Ordoñez¹⁰, indica esta cinética es estudiada comúnmente por medio del análisis termogravimétrico, donde el modelo de reacción utilizado es el esquema de reacciones paralelas independientes, en este sistema se asume que cada componente de la biomasa, como lo es la hemicelulosa, celulosa y lignina, reaccionan de manera independiente en un rango determinado de temperatura y la sumatoria de las reacciones define la reacción total del proceso.

El tercer proceso evaluado es el de gasificación, Pérez¹¹ indica que es el proceso termoquímico donde se degrada la biomasa mediante reacciones térmicas en presencia de un agente oxidante, siendo el vapor de agua el utilizado en este proyecto, debido a que su uso genera un gas con un poder calorífico superior. Este proceso aporta un valor agregado a la producción energética, ya que se obtiene un gas que puede ser utilizado en la generación de energía eléctrica y térmica¹². Para el análisis correspondiente de este proceso, se realizará un balance de masa y energía para el carbonizado y el gas, manteniendo constante el líquido obtenido en el proceso de pirólisis, debido a que no se tendrán en cuenta reacciones secundarias.

Enseguida, Estrada¹³ explica que el gas generado después del proceso de gasificación una mezcla de gases combustibles y contaminantes. Peña¹⁴ indica que entre ellos se encuentran los alquitranes, compuestos nitrogenados y material particulado. En este proyecto se analizará la adecuación de alquitranes, el cual comprende el cuarto proceso analizado. Como explican Milne y Evans¹⁵, los alquitranes son una mezcla compleja de hidrocarburos aromáticos, los cuales son condensados a temperatura ambiente. Según Aineto¹⁶, estos contaminantes son

⁹ GÓMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang; RINCÓN, Sonia. Pirólisis de Biomasa. Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Procesos –BIOT, de la Universidad de Colombia. Facultad de ingeniería. 2008. 11 p.

¹⁰ ORDÓÑEZ, Yesid Javier Rueda; TANNOUS, Katia K. Análisis cinético de la descomposición térmica de biomasa aplicando un esquema de reacciones paralelas independientes. Revista UIS Ingenierías, 2017, vol. 16, no 2, p. 119-128.

¹¹ PÉREZ, Juan. Gasificación de biomasa: estudios teórico-experimentales en lecho fijo equicorriente. Editorial Universidad de Antioquia, 2009. 17 p. ISBN 978-958-714-263-1.

¹² PÉREZ, Juan; BERGE, David; AGUDELO, John. Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico-experimentales. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 2010, no 52, p. 95-107.

¹³ ESTRADA, Carlos; MENESES, Alberto. Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. Agosto, 2004. Scientia et Technica Año X, No 25, p. 155-159.

¹⁴ PEÑA, J., MARTÍNEZ, P., CORTÉS, M., CHIRIVI, N., MENDOZA, L. Uso energético de la biomasa a través del proceso de gasificación. Revista de investigación facultad de Ingeniería Fundación Universidad de América, 2017. vol. 10, no 2: 165-181.

¹⁵ MILNE, T.; EVANS, R.; ABATZOGLOU, N.: Biomass gasifier tars: their nature, formation, and conversion. En: National Renewable Energy Laboratory (1998). – Midwest Research Institute.

¹⁶ AINETO, Alberto Patino. Implantación de metodología SPA de captura de alquitranes y desarrollo de dispositivo de dopado de alquitranes. Proyecto fin de carrera España: Universidad de Sevilla. 17 p.

producidos durante el proceso de pirólisis y hacen parte de la fase volátil generada. La cantidad y composición de los alquitranes está relacionada con el tipo de biomasa utilizado, teniendo en cuenta que está genera gran cantidad de alquitranes puesto que la biomasa tiene mayor composición de material volátil que otros compuestos¹⁷. Según Peña¹⁸, existen tres métodos para la eliminación de alquitranes, primarios, físicos y químicos.

Los análisis de cada uno de los equipos se hace con la finalidad de desarrollar una herramienta tecnológica que permita un fácil acceso a los parámetros necesarios para realizar un proceso de gasificación completo de acuerdo a la biomasa escogida y al balance de masa y energía global del sistema, para así dar solución al problema planteado, obteniendo un gas de síntesis purificado y con un mayor rendimiento energético para su uso como biocombustible.

De igual modo, la contribución que se realizará con el balance de masa y energía global en el sistema de gasificación a partir del análisis de la materia prima escogida, será el direccionamiento a aplicaciones futuras, proponiendo así proyectos en los cuales se pueda implementar dichos resultados.

El proyecto va dirigido a todos aquellos interesados en el desarrollo de una nueva solución para la implementación como energía alternativa, igualmente a quien quiera llevar a cabo la ejecución de las soluciones planteadas al final del proyecto.

¹⁷ Ibid., p. 15.

¹⁸ PEÑA, J., MARTÍNEZ, P., CORTÉS, M., CHIRIVI, N., MENDOZA, L. Uso energético de la biomasa a través del proceso de gasificación. Revista de investigación facultad de Ingeniería Fundación Universidad de América, 2017. vol. 10, no 2: 165-181.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis de balance de masa y energía de un sistema para la producción de gas de síntesis a partir de la gasificación de biomasa residual.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir las operaciones tecnológicas, parámetros de operación y las características de biomasa para evaluar el sistema de gasificación de biomasa.
- Definir las condiciones operacionales y los parámetros concernientes a condiciones térmicas, de flujo y cinética de reacción de cada uno de los equipos definidos de acuerdo a la información disponible en la literatura.
- Realizar el balance de masa y energía global en cada uno de los equipos del sistema de gasificación en función de las condiciones operacionales y procesos definidos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La problemática ambiental que se presenta actualmente es ocasionada por las actividades humanas y productivas sobre el ecosistema, principalmente por la producción de residuos generados por dichas actividades, situación que se refleja en la emisión de compuestos que contaminan y provocan efectos negativos, tanto para la atmósfera y el medio ambiente como para la salud de la población.

Según Calvo¹⁹, una de las actividades humanas que genera gran impacto sobre el medio ambiente, es la quema de combustibles fósiles y su utilización para la producción de energía, generando un grave problema ambiental, al aumentar el efecto invernadero por los gases de CO₂ y otros contaminantes emitidos. Como indica Reyes²⁰, los combustibles fósiles más contaminantes son el carbón, el petróleo y el gas natural, que son las fuentes que suministran alrededor del 88% de la energía consumida por el mundo, los cuales satisfacen las necesidades de la sociedad.

Según Anda²¹, los combustibles fósiles se componen de átomos de carbono e hidrógeno, que al ser quemados reaccionan con los átomos de oxígeno del aire produciendo una oxidación rápida en la que se forma dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O) liberando calor. La mayor parte de estas emisiones provienen de la energía usada en los diferentes tipos de transporte, producción eléctrica, calefacción y actividad en la industria provocando gases de efecto invernadero. Para Romeo²², las consecuencias del aumento de estos gases se ven reflejadas en los cambios de temperatura, incrementando los fenómenos climáticos como tormentas, inundaciones y sequías; también dan paso a la contaminación del agua, extinción de especies animales y vegetales, incendios forestales, entre otros.

Aguilar Peris²³, explica que uno de los fenómenos que causa el cambio climático es el efecto invernadero, que es un proceso natural que influye en el calentamiento de la superficie de la tierra, bajo la acción de la radiación solar, el aumento en la concentración de gases atmosféricos tales como el dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, vapor de agua y metano son capaces de modificar el balance energético de la tierra.

¹⁹ CALVO MARTÍN Francisco Javier y LÓPEZ CASILLAS Alberto. Energías y medio ambiente. Salamanca. Ediciones universidad de salamanca. 2004, p 98.

²⁰ REYES Torres Pedro Julio. Combustibles fósiles y contaminación. Revista de la facultad de ingeniería. 1999, p 89.

²¹ ANDA CÁRDENAS Pascual. Química 1. México. Umbral. 2006, p 43.

²² ROMEO Luis Miguel, LISBONA Pilar y GONZALEZ Ana et al. Captura y almacenamiento de CO₂. España. Prensas Universitarias de Zaragoza. 2010, p 14.

²³ AGUILAR PERIS, José. El efecto invernadero, el cambio climático, la crisis medioambiental y el futuro de la tierra. Madrid. 2003, p 19

Benavides²⁴, indica que los gases de efecto invernadero pueden ser tanto naturales como antropogénicos, donde los principales componentes presentes en la atmósfera son el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃), además existen otro tipo de gases creados íntegramente por el ser humano como los halocarbonos (compuestos que contienen cloro, bromo o flúor y carbono), hexafluoruro de azufre (SF₆), hidrofluorocarbonados (HFCs), perfluorocarbonados (PFCs).

Roldan²⁵, señala que las causas de este fenómeno son las actividades humanas que generan gran cantidad de desechos, la elevada contaminación en la generación de corriente eléctrica a partir de carbón, gas, petróleo, emisiones de gases contaminantes en transportes y en la industria en general, la deforestación, incendios, agricultura y ganadería intensiva, entre otras causas. Además, el aumento demográfico es un factor relevante, debido a que el aumento de la población eleva los procesos industriales para suplir las necesidades humanas.

Debido a esto el calor en la atmósfera se mantiene y la temperatura del planeta aumenta proporcionalmente, provocando el calentamiento global y el cambio climático. Esta problemática requiere encontrar una solución ambiental, por medio del uso de fuentes alternativas e implementar un proceso adecuado para el máximo aprovechamiento del poder calorífico para la producción óptima de energía.

Lo anteriormente expuesto evidencia la dependencia existente en el petróleo, carbón y gas, los cuales han generado conflicto en ámbitos políticos, económicos, sociales y ambientales. Según la literatura Manual sobre energía renovable²⁶ indica que para mitigar la problemática a nivel ambiental se busca fomentar la investigación en pro del desarrollo y la innovación de energías alternativas, como solar, eólica, hidráulica y demás energías renovables, las cuales provienen de recursos que están relacionados con los ciclos naturales de nuestro planeta, haciendo posible que dispongamos de éstos de manera permanente y a partir de ellos diseñar e implementar procesos adecuados para el abastecimiento energético.

Según Asorenovables²⁷, en Colombia se han propuesto metas para implementar la participación de energías renovables proponiendo líneas de acción como la caracterización de los potenciales energéticos a nivel solar, eólico, geotérmico y pequeñas hidroeléctricas promoviendo el desarrollo energético y así desarrollar y aplicar proyectos pilotos de energías renovables teniendo en cuenta los ámbitos especificados anteriormente. Según la Asociación Colombia de Energías Renovables para el año 2009 la biomasa y el carbón tuvieron un papel importante

²⁴ BENAVIDES BALLESTEROS Henry Oswaldo y LEÓN ARISTAZABAL Gloria Esperanza. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Nota técnica del IDEAM. 2007, p 22.

²⁵ ROLDÁN VILORIA Jose. Energías renovables: lo que hay que saber. España. Paraninfo. 2013, p 199.

²⁶ FOCER, (2002), Manual sobre energía renovable: Biomasa, San José, Costa Rica: BUN-CA.

²⁷ ASORENOVABLES. (2018). Qué son las Energías Renovables. [online] Available at: <https://www.asorenovables.com/que-son-las-energias-renovables/> [Accessed 7 Feb. 2018].)

constituyendo aproximadamente el 12.8 y 6.8% respectivamente de la demanda de energía final de Colombia.

Gutierrez²⁸, explica que una de las fuentes no convencionales de energías renovables usadas es la biomasa la cual es una fuente de energía de tipo renovable de origen tanto animal como vegetal, que a través de diferentes procesos de transformación genera biocombustibles para aplicaciones como la producción de energía eléctrica y térmica. La biomasa ha tenido un papel relevante en la sociedad, con un crecimiento notable en el horizonte tanto en aplicaciones térmicas, generación de electricidad y uso como carburante para el transporte.

La biomasa proviene de desechos agrícolas y forestales, residuos animales, industriales y urbanos. Para Castells²⁹, la industria agrícola es una de las fuentes donde la disponibilidad de biomasa para su valorización posee uno de los más importantes potenciales ya que se trata de actividades que se distribuyen en una amplia variedad de situaciones climáticas, económicas y tecnológicas. Según la literatura de Biomasa y otras fuentes no convencionales de energía³⁰, el sector agrícola aporta en la mayoría hasta un 30% de la energía a partir del carbón vegetal, la leña y residuos vegetales; es importante destacar que posiblemente existen variedad de recursos de origen agrícola aún no explotados y que podrían contribuir eficientemente a la solución de la problemática ambiental señalada anteriormente.

Justamente, la transformación de la biomasa hace necesaria la implementación de diferentes tecnologías (equipos y sistemas) y técnicas que permiten la obtención de altos niveles de eficiencia para la producción de energía. Por esta razón Innovaciencia³¹, indica que la biomasa debe someterse a varios procesos para obtener combustible en fase sólida, líquida y gaseosa, gracias a la transformación de la energía acumulada en forma de Carbono e Hidrogeno, para ello existen tres tipos de tecnologías, los cuales son biológicos, químicos y termoquímicos. Castels³², indica que los tratamientos termoquímicos se realizan a partir de la utilización del calor como fuente de transformación y los principales procesos son la pirólisis, gasificación y combustión. El proceso de pirólisis es la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno para la producción de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Romero³³ define el proceso de gasificación es la conversión de biomasa sólida en la cual se utiliza una mayor proporción de oxígeno a mayores temperaturas mediante su descomposición térmica a través de reacciones parciales de oxidación, con el fin de obtener gas síntesis. El proceso de

²⁸ GUTIERREZ Fernando y SAN MIGUEL Guillermo. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. España. Mundi-prensa. 2015.

²⁹ CASTELLS Xavier Elías. Biomasa y bioenergía. 2012, p 773.

³⁰ IICA. Biomasa y otras fuentes no convencionales de energía. San Jose, Costa Rica. 1980.

³¹ Revistas.udes.edu.co. (2017). INNOVACIENCIA. [online] Available at: <http://revistas.udes.edu.co/site/index.php/innovaciencia> [Accessed 7 Feb. 2018].

³² CASTELLS Xavier Elías. Aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales. España. 2012, p 716.

³³ Romero, A. Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. 2010.

gasificación se lleva a cabo en varias etapas. Según la literatura de gasificación de biomasa para la producción de combustibles de bajo poder calorífico³⁴, la primera etapa es la del secado donde se busca retirar el agua contenida de la biomasa, la siguiente etapa es la pirólisis la cual puede ser lenta o rápida, y después se produce la gasificación.

Según Arbós³⁵, la implementación de procesos para el aprovechamiento de la biomasa requiere diseñar plantas de producción a escala industrial con el fin de generar a la empresa el producto deseado con su mayor valor agregado. También para Monsalvo³⁶, se debe tener en cuenta el dimensionamiento en detalle del sistema así como el número de equipos y reactores a utilizar, buscando la optimización del diseño el cual debe estar sujeto a métodos de operación adecuados para lograr la máxima eficiencia, minimizando el tiempo y el costo del proceso.

Por consiguiente, Hernández³⁷ indica que los procesos industriales tienen como finalidad la transformación de materias primas en bienes o en productos; según la literatura de DCSBA³⁸, a lo largo de estos procesos es importante realizar balances tanto de masa como de energía, debido a que a partir de ellos se puede analizar la estabilidad del proceso y se determina la manera en la que se distribuyen los componentes en los sistemas o entre los sistemas en contacto directo, además son de gran utilidad para cuantificar la energía transferida o consumida por los sistemas.

Londoño³⁹, indica que el balance de masa determina la distribución de todos los materiales empleados en el proceso para obtener productos, subproductos y desechos determinando los rendimientos en el sistema y cuantificando la porción de producto obtenido por cantidad de materia prima suministrada en el proceso, lo que nos permite reducir mermas provenientes de la materia prima y la optimización de recursos en plantas industriales.

El balance de energía es de gran utilidad ya que proporciona información acerca de la potencia requerida y la cantidad de calor que adsorbe o libera un equipo. En una planta de operación el balance de energía mostrará la cantidad de consumo, y a partir de esto se busca alternativas para la conservación y ahorro, debido a que es una condición de proceso de gran trascendencia en los costos de la empresa y su adecuada utilización beneficia a la planta tanto a nivel económico como ambiental.

³⁴ Scientia et Technica. Gasificación de biomasa para la producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. 2004, p 157.

³⁵ ARBÓS, Lluís Cuatrecasas. Diseño avanzado de procesos y plantas de producción flexible: técnicas de diseño y herramientas gráficas con soporte informático. Profit Editorial, 2009. CUATRECASAS Lluís. Organización de la producción y dirección de operaciones. Madrid. 2012, p 312.

³⁶ MONSALVO Raúl y MUÑOZ Graciela et al. Balance de materia y energía. México. 2014, p 21.

³⁷ HERNÁNDEZ, Leonel. Balance de materia y energía. El Salvador.

³⁸ DCSBA. Universidad abierta y a distancia. Balance de materia y energía. México. 2017.

³⁹ LONDOÑO GARCÍA, Rodrigo. Balances de masa y energía. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. 2015.

El presente proyecto propone desarrollar una herramienta computacional con alta flexibilidad que permita evaluar parámetros de operación y diseño, con el fin de proporcionar un análisis de balance de energía y masa, la información y características necesarias para el uso eficiente de un sistema de gasificación de biomasa para la producción de gas de síntesis.

Para esto es necesario tener en cuenta, realizar los balances de materia y energía a partir de la biomasa residual en cada uno de los equipos presentes en el proceso de gasificación, sobretodo porque nos permite definir las operaciones tecnológicas, parámetros de operación y las características necesarias para el desarrollo del proceso y así elegir la biomasa más adecuada para la producción de gas de síntesis e incrementar la eficiencia de conversión del proceso. Para ello es necesario tener en cuenta las variables y las propiedades de la biomasa a trabajar para el desarrollo del mismo.

En el siguiente capítulo se lleva a cabo una revisión bibliográfica en donde se presentan los conceptos relacionados con el proceso de gasificación de biomasa para la producción de gas de síntesis.

1. MARCO CONCEPTUAL

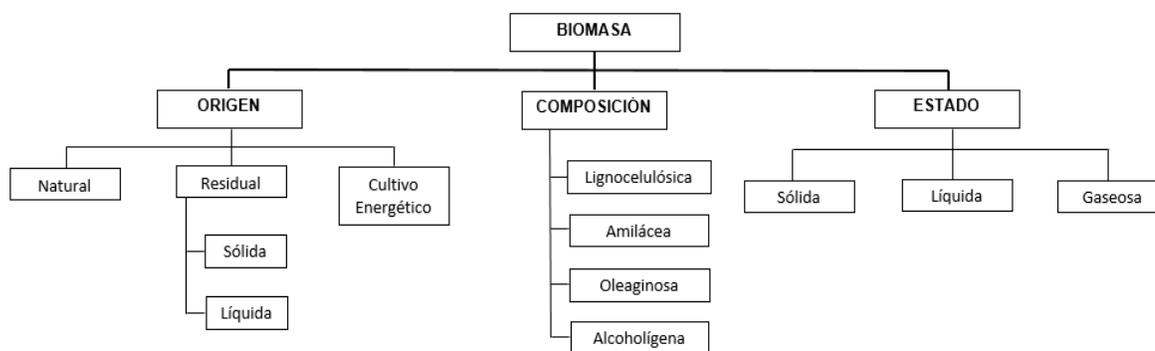
1.1 BIOMASA

1.1.1 Definición. Según el libro de gasificación de biomasa, define “La biomasa es toda materia orgánica derivada de las plantas como un resultado del proceso de conversión fotosintética, o derivada de animales, la cual se destina a almacenar energía química para producir calor, electricidad o combustibles para el transporte”⁴⁰.

Fernandez⁴¹ indica que la biomasa tiene un carácter de energía renovable ya que su contenido energético procede de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético; esta energía se libera rompiendo los enlaces de los compuestos orgánicos en un proceso de combustión, dando como productos finales dióxido de carbono y agua.

1.1.2 Tipos y fuentes de biomasa. La biomasa se clasifica según su origen, composición y estado.

Figura 1. Clasificación de la biomasa.



Fuente. TRANSBIOMA. Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. España: Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA.CT, 2012. 5 p. ISBN: 978-84-931891-5-0.

Según Peso y Lucas de Herguedas⁴², en el origen de la biomasa se pueden reconocer tres tipos de biomasa, natural, residual y provenientes de residuos

⁴⁰ PÉREZ, Juan. Gasificación de biomasa: estudios teórico-experimentales en lecho fijo equicorriente. Editorial Universidad de Antioquia, 2009. 17 p. ISBN 978-958-714-263-1.

⁴¹ FERNÁNDEZ, Jesús. Energías renovables para todos: biomasa. En: Energías Renovables. p. 1-20.

⁴² TRANSBIOMA. Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. España: Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA.CT, 2012. 5 p. ISBN: 978-84-931891-5-0..

energéticos. En el artículo energía renovable: la biomasa⁴³, define la biomasa natural se produce de forma espontánea en la naturaleza es decir, toda materia orgánica formada directamente por los seres fotosintéticos donde se incluye toda biomasa de tipo vegetal⁴⁴. Y según transbioma⁴⁵, debido a sus altos costos de explotación, transporte y producción este tipo de materia orgánica no se aprovecha al máximo, generando desperdicios y contaminación al medio ambiente. Una de las mayores fuentes de obtención de la biomasa natural es la leña procedente de árboles y de tierras no cultivadas. Fernández⁴⁶, indica que el aprovechamiento de la leña ha sido criticada debido a que su uso masivo conlleva a la destrucción de los ecosistemas que lo producen, sin embargo, se pueden aprovechar los residuos de las partes muertas o los restos de podas para evitar el daño ambiental.

Igualmente Fernández⁴⁷, comenta que la biomasa residual proviene de residuos generados por las actividades humanas, como la explotación agrícola, forestal o ganadera, este tipo de biomasa es secundaria debido a que la energía almacenada es transformada por la intervención de un tercero. De acuerdo a ello Arévalo⁴⁸; menciona que los residuos animales, que son todos aquellos subproductos generados en la crianza o manejo de animales residuos agrícolas, que se obtienen a partir de procesos de limpieza de cultivos, ya sea, “residuos herbáceos o leñosos; residuos forestales, que son generados principalmente por la tala de árboles y residuos industriales que se obtienen por medio de procesos de transformación de materias primas orgánicas animales”⁴⁹.

En Manuales sobre energía renovable⁵⁰, mencionan que en la agricultura se encuentran los mayores residuos para obtener la biomasa, la cual genera cantidad considerable de desechos y estos son dejados en el campo sin su aprovechamiento, como el arroz, el café y la caña de azúcar, por otro lado, las granjas generan residuos húmedos llamados estiércol de animales. Como ejemplo de desechos industriales, se encuentra la industria alimenticia la cual genera una gran cantidad de desechos y subproductos, estos son provenientes de carne y residuos sólidos y líquidos con alto contenido de azúcar y carbohidratos. Los desechos urbanos se

⁴³ EPEC. Energía renovable: la biomasa. EPEC [en línea], [revisado el 1 de abril de 2018]. Disponible en Internet: <https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/biomasa.pdf>.

⁴⁴ SAN MIGUEL, Guillermo; GUTIÉRREZ, Fernando. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. España: Mundi-Prensa, 2015. 32 p. ISBN 978-84-8476-674-2.

⁴⁵ TRANSBIOMA. Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. España: Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA.CT, 2012. 5 p. ISBN: 978-84-931891-5-0.

⁴⁶ FERNÁNDEZ, Jesús. Energías renovables para todos: biomasa. En: Energías Renovables. p. 1-20.

⁴⁷ Ibid., p. 13.

⁴⁸ ARÉVALO, William. La Biomasa: Una Alternativa Energética Proveniente de la Vida Misma. Libros Editorial UNIMAR, 2015. 84 p.

⁴⁹ ARÉVALO, William. La Biomasa: Una Alternativa Energética Proveniente de la Vida Misma. Libros Editorial UNIMAR, 2015. 85 p.

⁵⁰ NETWORK, Biomass Users. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. Fortalecimiento de la capacidad en energía renovable para América Central, 2002, vol. 56. 8 p. ISBN: 9968-904-02-3.

generan en gran cantidad de biomasa de diversas formas, como lo son los residuos de papel, cartón, alimenticios y aguas negras⁵¹.

Al mismo tiempo los cultivos energéticos son aquellos que se encargan de producir biomasa para ser transformada en biocombustibles⁵². Este tipo de biomasa tiene una gran ventaja frente a la biomasa residual debido a que permite controlar su concentración y su disponibilidad, debido al diseño de técnicas agrícolas especiales.

Existen cultivos energéticos oleaginosos, alcoholígenos y lignocelulosicos⁵³. Estos cultivos ayudan a controlar la erosión y la degradación de los suelos, pero su desventaja es la gran extensión de tierra necesaria para una producción rentable⁵⁴. Es así como su clasificación según su estado, depende del tipo de fase en que se encuentre, puede ser líquido, sólido y gaseoso. La biomasa en estado líquido se puede obtener por medio de residuos ganaderos, residuos industriales biodegradables y aguas residuales urbanas. Network⁵⁵, indica que la biomasa gaseosa se obtiene mediante residuos animales, agroalimenticios y vertederos. Por último, la biomasa sólida se puede obtener a través de la tala de árboles y subproductos o residuos de naturaleza agrícolas y agroindustriales, entre otros⁵⁶.

Por otra parte transbioma⁵⁷, indica la biomasa de acuerdo a su composición, puede ser de tipo lignocelulósica y amilácea, compuestas por polisacáridos procedente de alimentos y maderas, respectivamente; de tipo oleaginosa, compuesta por lípidos y se obtienen en las semillas de girasol, soja y maíz; y alcoholígena, compuesta por monosacáridos y disacáridos, proveniente de pulpa de fruta caña de azúcar y remolacha.

1.1.3 Procesos de obtención de la biomasa. Para realizar la transformación de los diferentes tipos de biomasa residual vegetal en alguna forma de energía renovable, Según Martínez⁵⁸, se requiere la aplicación de distintos tipos de tecnologías, es decir, la biomasa debe someterse a diferentes procesos para aprovechar al máximo su potencial calorífico, donde la energía de la biomasa está

⁵¹ NETWORK, Biomass Users. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. Fortalecimiento de la capacidad en energía renovable para América Central, 2002, vol. 56. 9 p. ISBN: 9968-904-02-3.

⁵² FERNÁNDEZ, Jesús. Energías renovables para todos: biomasa. En: Energías Renovables. p. 1-20.

⁵³ ARÉVALO, William. La Biomasa: Una Alternativa Energética Proveniente de la Vida Misma. Libros Editorial UNIMAR, 2015. 84 p.

⁵⁴ NETWORK, Biomass Users. Manuales sobre energía renovable: Biomasa, 2002. Op. Cit., p.7.

⁵⁵ NETWORK, Biomass Users. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. *Fortalecimiento de la capacidad en energía renovable para América Central*, 2002, vol. 56. 7 p. ISBN: 9968-904-02-3.

⁵⁶ Ibid., p. 6.

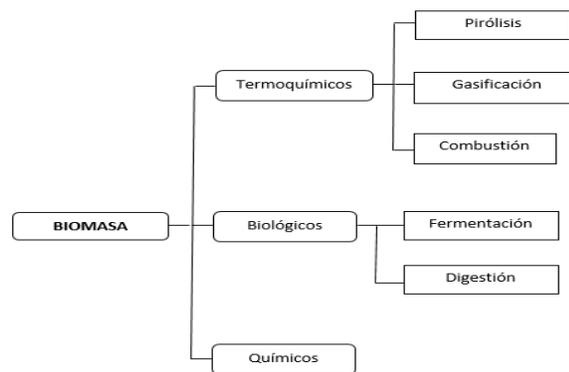
⁵⁷ TRANSBIOMA. Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. España: Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA.CT, 2012. 7 p. ISBN: 978-84-931891-5-0.

⁵⁸ MARTÍNEZ, Pedro Elías Patiño. Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual. Innovaciencia, 2014, vol. 2, no 1, p. 45-52.

acumulada principalmente en forma de carbono e hidrógeno, obteniendo combustibles sólidos, líquidos, gaseosos o directamente en electricidad⁵⁹.

Existen diferentes formas de transformar la biomasa en energía:

Figura 2. Tecnologías de transformación de la biomasa.



Fuente. MARTÍNEZ, Pedro Elías Patiño. Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual. Innovaciencia, 2014, vol. 2, no 1, p. 45-52.

Martínez⁶⁰, indica que una forma es por medio de la Combustión directa, consiste en sistemas de poca eficiencia energética y la biomasa no necesita de algún pretratamiento para su aprovechamiento energético; además Arévalo⁶¹, agregapues la biomasa se quema en un horno a altas temperaturas y el calor generado es usado como vapor para utilizarlo como calefacción o la activación de una turbina. Otro aspecto son los procesos termoquímicos, donde la biomasa es transformada cuando se expone a procesos de oxidación a ciertos parámetros determinados como lo son la temperatura y presión, para la obtención de combustibles líquidos, sólidos o gaseosos⁶².

Arévalo⁶³, dice que los procesos biológicos utilizan el principio de biodegradación de la biomasa por medio de microorganismos que pueden ser propios de la biomasa o adicionados en el proceso, con la finalidad de generar productos con mayor densidad energética; los microorganismos más utilizados en éste tipo de procesos son las bacterias las cuales son las encargadas de digerir la biomasa y generar biogás.

⁵⁹ MARTÍNEZ, Pedro Elías Patiño. Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual. Innovaciencia, 2014, vol. 2, no 1, p. 48-52.

⁶⁰ MARTÍNEZ, Pedro Elías Patiño. Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual. Innovaciencia, 2014, vol. 2, no 1, p. 48.

⁶¹ ARÉVALO, William. La Biomasa: Una Alternativa Energética Proveniente de la Vida Misma. Libros Editorial UNIMAR, 2015. 85 p.

⁶² Ibid., p. 86.

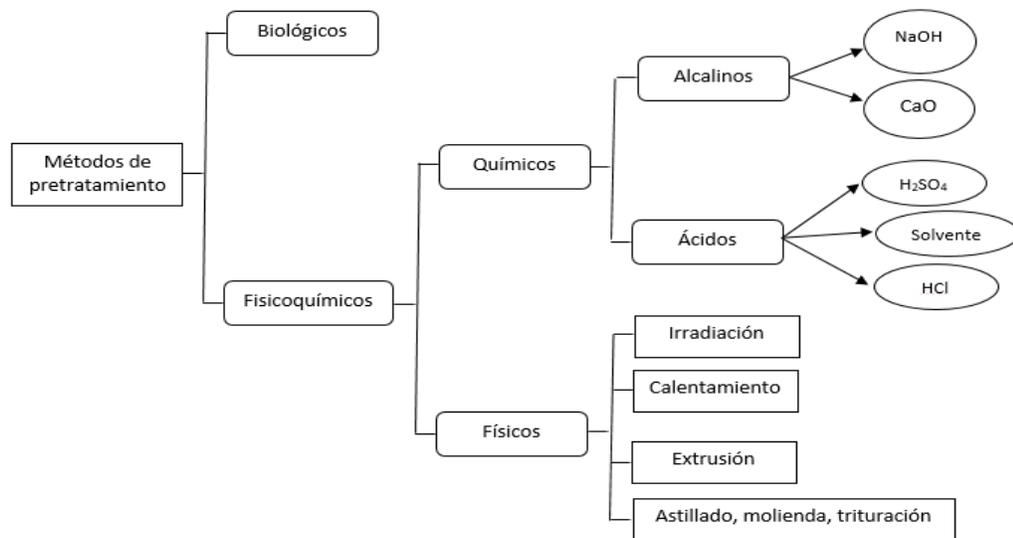
⁶³ ARÉVALO, William. La Biomasa: Una Alternativa Energética Proveniente de la Vida Misma. Op. Cit., p. 86.

1.2 PRE-TRATAMIENTOS

La biomasa tiene unas características determinadas por su naturaleza como los son la forma, la densidad, humedad y contenido energético que podrían afectar el proceso de transformación de la misma. La granulometría de la biomasa es una de ellas, y si es grande y muy heterogénea dificulta la carga. Según Peña⁶⁴, el contenido de humedad, si es alto dificultará la combustión y también hay que tener en cuenta la existencia de productos indeseables como la arena, piedras, etc. Por ello, es necesario que la biomasa pase por un pre-tratamiento para que su conversión y aprovechamiento energético sea posible.

1.2.1 Tipos de pre-tratamientos. Los pre-tratamientos físicos corresponden a la reducción del tamaño de las partículas de la biomasa, entre estos está el astillado, molienda, trituración, calentamiento, extrusión e irradiación. Las ventajas de éste método es que reduce la cristalinidad de la celulosa, pero por otro lado hay un alto consumo de energía; los pre-tratamientos químicos utilizan ácidos como el ácido sulfúrico, solventes y el ácido clorhídrico, o bases como el hidróxido de sodio y CaO, para la separación de compuestos; y en los biológicos introducen microorganismos para la descomposición de la materia orgánica⁶⁵.

Figura 3. Métodos de pre-tratamiento de la biomasa.



Fuente. MARTÍNEZ RINCÓN, José María; SILVA LORA, Electro Eduardo (ed.). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. 2015. 145 p. ISBN: 978-958-58880-0-5.

⁶⁴ PEÑA, Santiago Vignote. La biomasa, importancia, características y formas de preparación. Universidad Politécnica de Madrid. Marzo, 2015. p. 1-36.

⁶⁵ *Ibid.*, p. 144.

1.2.1.1 Molienda. Según Uba⁶⁶, la molienda es una operación de reducción de tamaño de material similar a la trituración. Los productos obtenidos por molienda son pequeños y de forma regular. Para el proceso de molienda se hace uso de “los molinos que son aparatos que reducen el tamaño de la materia por fricción e impacto con elementos móviles del interior del molino. Consiguen tamaños de partícula del orden de 1 mm.”⁶⁷

1.2.1.2 Torrefacción. De acuerdo con el libro de energía de la biomasa⁶⁸, es un pretratamiento cuyo objetivo es transformar un biocombustible en un producto de mayor calidad mediante la aplicación de calor a una velocidad no superior a 50°C/min hasta alcanzar temperaturas de 200- 300 °C, en una atmosfera carente de oxígeno.

1.2.1.3 Secado. Según el libro secado de sólidos en la industria química, define secado como “la eliminación de un líquido por conversión en vapor, que se separa del sólido⁶⁹”. Además, Rincón Martínez⁷⁰, indica que la vaporización del agua se hace por medio de la temperatura o por la acción de un agente de secado que puede ser gas, aire o vapor de agua. En el caso de la biomasa se realiza el proceso de secado para aumentar su potencial energético.

1.2.1.4 Peletización. Según el libro de energía de la biomasa⁷¹, la peletización es “el proceso de compresión y conformado de sólidos conglomerados de material particulado. El producto obtenido se denomina pélet, es cilíndrico y de tamaño pequeño”.

1.3. PIRÓLISIS DE BIOMASA

1.3.1 Definición. La pirólisis es un proceso termoquímico mediante el cual la biomasa se descompone por la acción de calor en ausencia de oxígeno transformando dicha materia orgánica en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles y residuos secos de carbón y agua⁷².

⁶⁶ UBA. Industrias I: Molienda. Universidad de Buenos Aires. Facultad de ingeniería. 2015. 3 p.

⁶⁷ LOPEZ COSTA, J; CERVERA, S. et al. Curso de ingeniería química: Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte. Barcelona.: Reverté, S.A, 1991. 84 P.

⁶⁸ NOGUÉS, Fernando Sebastián; GARCÍA GALINDO, Daniel y REZEAU, Adeline. Energía de la biomasa. Zaragoza.: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010. 232 p.

⁶⁹ NONHEBEL, G y MOSS, A. A. H. El secado de sólidos en la industria química. Barcelona. Reverté, S.A., 1979. 1 p

⁷⁰ RINCON MARTINEZ, José María y SILVA LORA, Electro Eduardo. Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. Colombia. Red Iberoamericana de aprovechamiento de residuos orgánicos en producción de energía, 2014. 100 p.

⁷¹ NOGUÉS, Fernando Sebastián; GARCÍA GALINDO, Daniel y REZEAU, Adeline. Energía de la biomasa. Zaragoza.: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010. 633 p.

⁷² SEDECOL. Manual técnico – Administrativo para el servicio de Limpia Municipal. Secretaria de desarrollo social. 101 p.

Como lo indica Míguez⁷³, la descomposición térmica en la pirólisis de biomasa se produce a partir de reacciones químicas y procesos de transferencia de masa y calor, Pinero⁷⁴ indica, que las condiciones de operación que influyen en el proceso, tales como la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia y temperatura del proceso, el tipo de biomasa empleado y las características de la misma, al igual que la tecnología utilizada.

1.3.2 Tipos de procesos de pirólisis. Según Pinedo⁷⁵, la pirólisis se clasifica en distintos tipos de procesos dependiendo los parámetros utilizados en cada uno de ellos. Los procesos de pirólisis más utilizados son carbonización, pirólisis convencional y pirólisis rápida.

La **carbonización** es un proceso de pirólisis lenta que tiene como objetivo principal la obtención carbón o carbonizado. Los parámetros parten de una tasa de calentamiento muy lenta en ausencia de oxígeno, a bajas temperaturas y tiempos de procesamiento prolongados. Según Pinedo⁷⁶, este proceso permite convertir el vapor condensable en carbón y gases no condensables en un tiempo especificado. La pirólisis **convencional**, es también una pirólisis lenta, en la que se involucran productos gaseosos, líquidos y carbonizados. Las condiciones de proceso utilizadas son una temperatura moderada y un tiempo de residencia de orden de minutos.

“La **pirólisis rápida** es un proceso en donde la biomasa se calienta rápidamente a altas temperaturas en ausencia de oxígeno”⁷⁷; además, se destaca por realizarse en condiciones que favorecen altos coeficientes de transferencia de calor y tasas de calentamiento de la biomasa⁷⁸, donde Agrowaste⁷⁹, comenta que el vapor caliente tiene un tiempo de residencia corto en la zona de transformación.

1.3.3 Parámetros del proceso de pirólisis. Los productos generados en el proceso de pirólisis dependen de las condiciones de operación, Según lo indica Basu⁸⁰,

⁷³ MÍGUEZ, José. Procesos termoquímicos para la obtención de energía a partir de la fitomasa residual (combustión, gasificación, pirólisis). 19 p.

⁷⁴ PINEDO, Andrea Urien. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. Tesis de maestría: Universidad Nacional de Educación a Distancia, Facultad de Ciencias, 2013. 20 p.

⁷⁵ PINEDO, Andrea Urien. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. Tesis de maestría: Universidad Nacional de Educación a Distancia, Facultad de Ciencias, 2013. 20 p.

⁷⁶ BASU, Prabir. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. 2 ed. Academic press, 2013. 72 p. ISBN: 978-0-12-396488-5.

⁷⁷ MONTROYA, J. I., et al. Pirólisis rápida de biomasa. *Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín*, 2013. 45 p. ISBN: 978-958-761-774-0.

⁷⁸ Ibid., p. 45.

⁷⁹ AGROWASTE. Pirólisis. AGROWASTE LIFE + Environment policy & Governance (LIFE10 ENV/ES/469) [en línea], febrero de 2013 [revisado 3 de abril de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/PIROLISIS.pdf>.

⁸⁰ BASU, Prabir. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. 2 ed. Academic press, 2013. 74 p. ISBN: 978-0-12-396488-5.

como la tasa de velocidad de calentamiento, temperatura, tiempo de residencia y las características físicas y químicas de la biomasa.

La **composición** de la biomasa tiene una influencia importante en el rendimiento del proceso de pirólisis. “La biomasa tiene tres constituyentes principales, hemicelulosa, celulosa y lignina, y cada uno de ellos tiene un tiempo determinado de descomposición”⁸¹. Según en el análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales⁸², el análisis de estos constituyentes se hace por medio de termogravimetría (TGA) o termogravimetría diferencial (DTA), los cuales son técnicas que estudian las reacciones de descomposición de la materia orgánica para la determinación de las características de la desvolatilización y parámetros cinéticos.

Indica Montoya⁸³, que la **tasa de velocidad de calentamiento** está directamente relacionada con el tiempo que necesita la biomasa para alcanzar la temperatura de reacción, por lo tanto tiene gran influencia sobre la composición y rendimiento de los productos. El efecto de una velocidad rápida de calentamiento a temperaturas moderadas, es aumentar el rendimiento de productos líquidos, mientras que una velocidad de calentamiento lenta favorece la producción de carbonizado

La **temperatura de reacción** del proceso tiene influencia tanto en la composición como en el rendimiento de los productos⁸⁴. Basu⁸⁵ comenta, que la cantidad de carbonizado producido depende de la temperatura de la pirólisis, ya que entre mayor sea está menor será su composición, mientras que a bajas temperaturas se produce mayor cantidad de carbonizado.

Según Montoya⁸⁶, el **tiempo de residencia** es el tiempo promedio en el que una molécula permanece en el reactor. Para la obtención de productos líquidos se utilizan tiempos cortos, en cambio para favorecer los productos sólidos y gaseosos, y generar segundas reacciones, se necesita aumentar el tiempo de residencia.

⁸¹ BASU, Prabir. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. 2 ed. Academic press, 2013. 74 p. ISBN: 978-0-12-396488-5.

⁸² PENEDO-MEDINA, Margarita, et al. Análisis Termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. Tecnología Química, 2016, vol. 31, no 2, p. 36-43.

⁸³ MONTOYA, J. I., et al. Pirólisis rápida de biomasa. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 2013. 51 p. ISBN: 978-958-761-774-0.

⁸⁴ MONTOYA, J. I., et al. Pirólisis rápida de biomasa. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 2013. 46 p. ISBN: 978-958-761-774-0.

⁸⁵ BASU, Prabir. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. Op. Cit., p. 75.

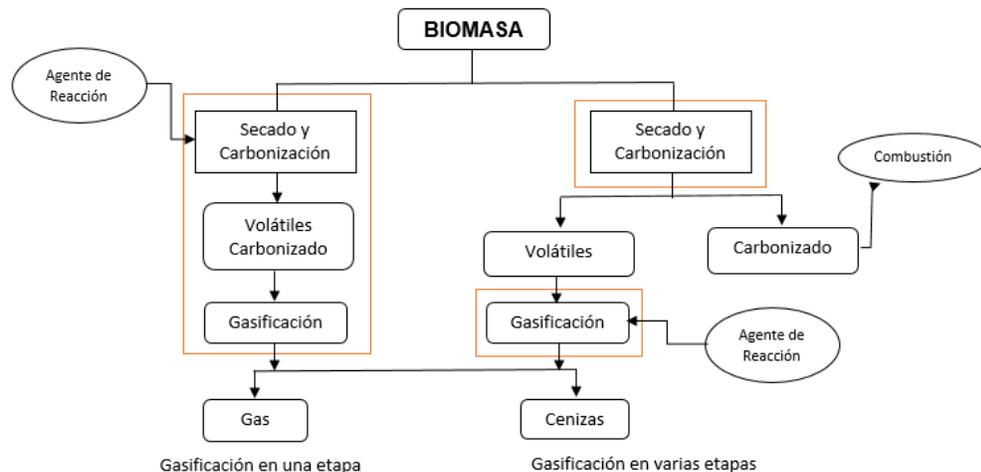
⁸⁶ MONTOYA, J. I., et al. Pirólisis rápida de biomasa. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 2013. 56 p. ISBN: 978-958-761-774-0.

1.4. GASIFICACIÓN

Rincón⁸⁷ define la gasificación es un proceso de transformación termoquímica en el que la biomasa, es decir, el material orgánico, es puesto en contacto con una corriente de gas oxidante o agente de reacción a altas temperaturas, donde Besel⁸⁸ indica que la celulosa de la biomasa se transforma en hidrocarburos más ligeros, incluso el monóxido de carbono e hidrogeno, obteniendo una mezcla de gases, conocido como el gas síntesis o por el diminutivo syngas, que “al ser condicionada puede ser utilizada en calderas, turbinas o motores de combustión”⁸⁹.

El gas síntesis o syngas obtenido en el proceso de gasificación está compuesto por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂), metano (CH₄), agua (H₂O) y nitrógeno (N₂). Como se indica en Diseño y Construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa⁹⁰, la composición y el poder calorífico del gas depende de algunos factores como las condiciones o parámetros a las que se realizó el proceso, el tipo de biomasa y su respectiva caracterización, el agente oxidante utilizado para llevar a cabo la gasificación y los dispositivos o maquinaria utilizada, es decir los gasificadores.

Figura 4. Proceso de gasificación en una o varias etapas.



Fuente. RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. Op. cit., p. 12.

⁸⁷ RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. kassel university press GmbH, 2011. 12 p. ISBN: 978-3-89958-950-4.

⁸⁸ BESEL, S. A. Biomasa: gasificación. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)(Ed.), Madrid, España, 2007, p. 1-36.

⁸⁹ PUJOLDEVALL SÁNCHEZ DE TOLEDO, Oriol. Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa. 2015. Tesis de Licenciatura. Universitat Politècnica de Catalunya. 18 p.

⁹⁰ Ibid., p. 18.

1.4.1 Proceso de gasificación. Según Rincón ⁹¹ el proceso de gasificación se desarrolla en tres etapas, el secado, la pirólisis o carbonización y gasificación, cada una de estas etapas se realiza en una sección concreta del gasificador y suceden en el orden indicado secuencialmente. El estudio de este proceso se realiza al analizar cada una de las etapas por separado para luego de ello establecer tu interrelación.

Para empezar el proceso de gasificación, la biomasa entra al reactor donde es calentada con el fin de realizar el secado de la misma. Esta etapa según Pujoldevall⁹², es de gran importancia, debido a que el contenido de humedad de la materia orgánica oscila entre 30% y puede tener hasta 60% de humedad, y cada kilogramo de agua presente en ésta representa una pérdida de energía de aproximadamente 2260 kJ; por ello se requiere alcanzar una temperatura de 100°C y lograr la evaporación del agua, obteniendo una biomasa seca y acondicionada para su uso en las etapas posteriores.

La segunda etapa, que corresponde a la pirólisis, como indica De Riesgo⁹³ requiere de un aporte de energía mayor, sin añadir oxígeno, con el fin de que se lleve a cabo el proceso de descomposición. Y Como afirma Rincón⁹⁴, esta etapa es de carácter fundamental ya que constituye el primer paso en procesos de combustión y gasificación. Y como explica Pujoldevall⁹⁵, allí las cadenas de las moléculas que forman la biomasa se rompen en otras más cortas, logrando la degradación de la materia orgánica generando productos sólidos o carbonizados, productos líquidos que en su mayoría son alquitranes y que según Fonseca⁹⁶ indica que son una mezcla de gases formado por hidrocarburos volátiles de bajo peso molecular.

Por último, los productos carbonizados resultantes de la pirólisis entran simultáneamente en contacto con un agente gasificante o agente de reacción, dando paso al proceso de gasificación. Como explica Rincón⁹⁷ el agente gasificante puede ser aire, oxígeno, vapor de agua, hidrógeno y dióxido de carbono. Y como

⁹¹ RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. kassel university press GmbH, 2011. 12 p. ISBN: 978-3-89958-950-4.

⁹² PUJOLDEVALL SÁNCHEZ DE TOLEDO, Oriol. *Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa*. 2015. Tesis de Licenciatura. Universitat Politècnica de Catalunya. 19 p.

⁹³ DE RIESGO, Análisis de Tecnologías. Gasificación y pirólisis de residuos: procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos. 2017. p. 1-16.

⁹⁴ RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. Op. cit., p. 13.

⁹⁵ PUJOLDEVALL SÁNCHEZ DE TOLEDO, Oriol. *Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa*. Op. cit., p. 19.

⁹⁶ FONSECA GONZÁLEZ, Natalia Elizabeth. *Estado del Arte del Uso del Gas de Gasificación Termoquímica de Biomasa (GG)*, en *Motores de Combustión Interna Alternativos*. 2003. Tesis Doctoral. Industriales. 12 p.

⁹⁷ RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. kassel university press GmbH, 2011. 15 p. ISBN: 978-3-89958-950-4.

agrega Foseca⁹⁸ en esta etapa, suceden una serie de reacciones sólido-gas o gas-gas, en donde los carbonizados, líquidos y vapores de alto y medio peso molecular se convierten en gas.

1.4.2 Parámetros influyentes. “Las variables o parámetros más importantes para tener en cuenta en el proceso de gasificación son el tipo de biomasa, los agentes gasificantes, la temperatura y la presión, estos factores influyen en las características del producto final, en este caso el gas síntesis”⁹⁹.

En la biomasa los factores que intervienen en el proceso de obtención de gas de síntesis son la densidad y el tamaño de partícula. Según Pujoldevall¹⁰⁰ es de vital importancia realizar un tratamiento previo a la biomasa para obtener un tamaño de partícula adecuado, ya que la biomasa al ser homogénea y al tener un tamaño de partícula menor, aportará mayor calidad al gas siendo menor el tiempo de residencia en el proceso disminuyendo la producción de alquitranes.

Además, se debe tener en cuenta realizar el análisis elemental y análisis próximo a la materia prima para conocer el porcentaje de los elementos tales como el hidrogeno, carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre presentes en la biomasa, al igual que el porcentaje de humedad, cenizas y material volátil.

Besel¹⁰¹ indica que el agente de gasificación utilizado en el proceso define la calidad del gas síntesis y los efectos sobre él dependen del tipo de gasificante a utilizar variando la composición y el poder calorífico en el producto final, al igual que el tiempo requerido para la conversión final de los productos obtenidos en el proceso de pirólisis. Los agentes de reacción que se utilizan son el oxígeno, aire, hidrogeno, dióxido de carbono y agua. Rincón¹⁰² comenta que el agente gasificante tiene influencia en el desarrollo de la porosidad del carbonizado durante el proceso, lo que afecta la tasa de reacción.

La temperatura es un parámetro esencial en el proceso de gasificación ya que interviene en la cinética y velocidad de reacción y en la situación termodinámica de las reacciones químicas definidas en el proceso. “El uso de altas temperaturas permite que las reacciones de gasificación y reformado sean más rápidas

⁹⁸ FONSECA GONZÁLEZ, Natalia Elizabeth. *Estado del Arte del Uso del Gas de Gasificación Termoquímica de Biomasa (GG), en Motores de Combustión Interna Alternativos*. Op. cit., p. 12.

⁹⁹ PUJOLDEVALL SÁNCHEZ DE TOLEDO, Oriol. *Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa*. 2015. Tesis de Licenciatura. Universitat Politècnica de Catalunya. 21 p.

¹⁰⁰ *Ibid.*, p. 22.

¹⁰¹ BESEL, S. A. *Biomasa: gasificación*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)(Ed.), Madrid, España, 2007, p. 1-36.

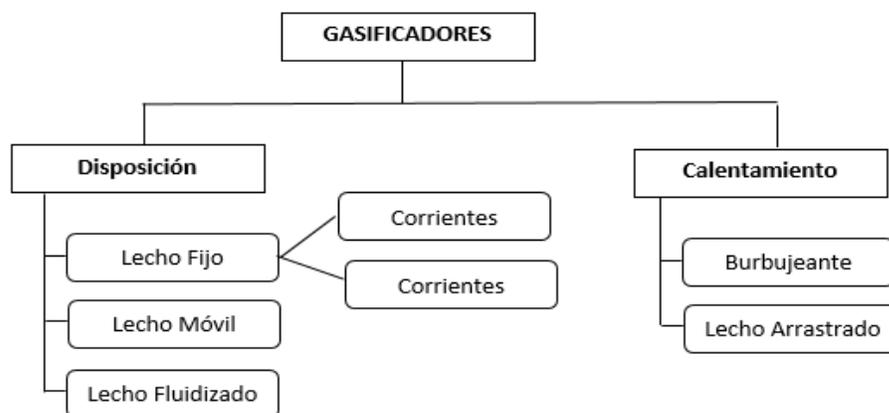
¹⁰² RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang. *Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial*. kassel university press GmbH, 2011. 18 p. ISBN: 978-3-89958-950-4.

consiguiendo un mayor rendimiento en los gases y una menor producción de contaminantes como partículas y alquitranes”¹⁰³.

Según Rincón¹⁰⁴, la presión inhibe o promueve las reacciones presentes en el proceso de gasificación, favoreciendo el contacto de los reactantes y ayuda al equilibrio termodinámico.

1.4.3 Tipos de gasificadores. Los dispositivos más utilizados para llevar a cabo el proceso de gasificación se dividen en reactores de lecho fijo, lecho móvil, lecho fluidizado y de lecho arrastrado.

Figura 5. Tipos de gasificadores.



Fuente. ARMENTA GARCÍA, Ana Cecilia. Disminución de alquitranes en la gasificación de biomasa, utilizando escoria de aceración. Proyecto de grado México D.F. Universidad Nacional Autónoma de México. 2014. 51 p.

Para Rincón¹⁰⁵, los reactores de lecho fijo se alimentan por lotes, cuentan con una tecnología simple, son de fácil operación y son apropiados para la producción de cantidades pequeñas de energía. Tiene como desventaja que en su interior requiere altos gradientes de temperatura, además hay adherencia del material y caídas de presión.

“El reactor de lecho móvil es una tecnología robusta y económica, se emplea para procesos de pequeña y mediana potencia y pueden ser alimentados exclusivamente con biomasa”¹⁰⁶. El reactor más utilizado es el horno rotatorio, debido a que ofrece

¹⁰³ SAN MIGUEL, Guillermo; GUTIÉRREZ, Fernando. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. España: Mundi-Prensa, 2015. 220 p. ISBN 978-84-8476-674-2.

¹⁰⁴ RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. Op. cit., p. 22.

¹⁰⁵ RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. kassel university press GmbH, 2011. 22 p. ISBN: 978-3-89958-950-4.

¹⁰⁶ SAN MIGUEL, Guillermo; GUTIÉRREZ, Fernando. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. España: Mundi-Prensa, 2015. 225 p. ISBN 978-84-8476-674-2.

ventajas como tiempos cortos para la elaboración del proceso y la posibilidad de usar materias primas de diversas propiedades físicas y químicas¹⁰⁷.

Según San Miguel¹⁰⁸ los reactores de lecho fluidizado son más costosos y requieren de un mayor desarrollo tecnológico. En este reactor las etapas del proceso de gasificación ocurren de manera simultánea, ya que la velocidad de calentamiento de la biomasa es muy rápida, y permite una buena condición de contacto entre el agente gasificante y el carbonizado¹⁰⁹. Según Pujodevall¹¹⁰, tiene como ventaja operar con gran variedad de materias primas y controlar las variaciones de los parámetros influyentes.

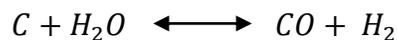
En la gasificación del carbón¹¹¹, los reactores de lecho arrastrado son dispositivos que consisten en un sistema de dos fases de dos sólidos divididos dispersos en un gas. Según indica Rincón¹¹², estos reactores operan por encima de la temperatura de fusión de la ceniza, el uso de altas temperaturas genera un gas de síntesis con un porcentaje muy bajo de alquitrans debido a que estos reaccionan casi completamente, pero requieren de una gran cantidad de energía para su funcionamiento.

1.4.4 Reacciones generadas en el proceso de gasificación. En el proceso de gasificación se efectúan dos tipos de reacciones, las reacciones heterogéneas, donde el medio de reacción y los gases producidos reaccionan con el producto sólido; y las reacciones homogéneas donde los productos en fase gaseosa reaccionan entre sí con el agente gasificante¹¹³.

Entre las reacciones que se presentan en el proceso de gasificación son:

Reacciones heterogéneas de gasificación

Ecuación 1. Reacción heterogénea de gasificación.



¹⁰⁷ RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. Op. cit., p. 23.

¹⁰⁸ SAN MIGUEL, Guillermo; GUTIÉRREZ, Fernando. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Op. cit., p. 230.

¹⁰⁹ RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. Op. cit., p. 24.

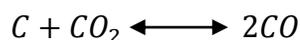
¹¹⁰ PUJOLDEVALL SÁNCHEZ DE TOLEDO, Oriol. Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa. 2015. Tesis de Licenciatura. Universitat Politècnica de Catalunya. 29 p.

¹¹¹ REDSAUCE. Gasificación del carbón (Capítulo XVII). REDSAUCE Software Quality [en línea], [revisado 3 de abril de 2018]. Disponible en Internet: <http://files.pfernandezdiez.es/CentralesTermicas/PDFs/17CT.pdf>.

¹¹² RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. kassel university press GmbH, 2011. 24 p. ISBN: 978-3-89958-950-4.

¹¹³ RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. kassel university press GmbH, 2011. 16 p. ISBN: 978-3-89958-950-4.

Ecuación 2. Reacción heterogénea de gasificación.



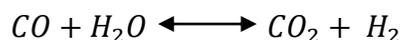
Ecuación 3. Reacción heterogénea de gasificación.



De la literatura de Rincón¹¹⁴ se extraen las siguientes ecuaciones, la **ecuación 1** corresponde a la reacción principal del carbonizado debido a que utiliza como agente gasificante el agua; y las **ecuaciones 2 y 3** corresponden a las reacciones secundarias ya que se utiliza el CO₂ y H₂ como agentes de reacción generando CO y CH₄, respectivamente¹¹⁵.

Reacciones homogéneas

Ecuación 4. Reacción de conversión agua-gas.



Ecuación 5. Reacción de reformado.



Las reacciones secundarias mencionadas anteriormente (*ecuación 2 y 3*) son generadas a partir de los productos obtenidos en las reacciones de las **ecuaciones 4 y 5**, correspondientes a reacciones homogéneas¹¹⁶.

1.5 ADECUACIÓN DEL GAS DE SÍNTESIS

1.5.1 Gas de síntesis. Para Cano¹¹⁷ el gas de síntesis (syngas) es generado en el proceso de gasificación y se obtiene a partir de Carbono, biomasa o reformado de metano. En análisis de Tecnología¹¹⁸ explican que el syngas se compone

¹¹⁴ RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. kassel university press GmbH, 2011. 16 p. ISBN: 978-3-89958-950-4.

¹¹⁵ Ibid., p. 17.

¹¹⁶ RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. kassel university press GmbH, 2011. 17 p. ISBN: 978-3-89958-950-4.

¹¹⁷ CANO, Leonardo Andres. Preparación y caracterización de catalizadores de hierro soportado sobre sólidos mesoporosos ordenados para ser utilizados en la obtención de olefinas C 5 y superiores a partir de la síntesis de Fisher-Tropsch. 2011. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas. 7 p.

¹¹⁸ DE RIESGO, s. Gasificación y pirólisis de residuos: procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos. 2017. p. 1-16.

principalmente de monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), dióxido de carbono (CO₂) y contaminantes. Posee un valor calorífico suficiente para ser quemado y transformado en energía. Se debe tener en cuenta que la calidad del gas síntesis depende de los parámetros utilizados en el proceso de gasificación como el tipo de agente de reacción utilizado.

1.5.2 Adecuación de alquitranes. Para Rincón¹¹⁹, la calidad y el rendimiento del gas de síntesis dependen de las características del proceso de gasificación, así como las técnicas de limpieza y las adecuaciones posteriores de este proceso para su aprovechamiento, eliminando los contaminantes del reformado, es decir, los alquitranes

Según San Miguel¹²⁰ los **alquitranes** son productos no deseados que se componen de un conjunto de especies orgánicas que se generan en el proceso de descomposición térmica o gasificación de cualquier material orgánico, estos compuestos generan contaminación ambiental y son cancerígenos. Como indica Zaguan¹²¹, los alquitranes son condensables a temperaturas altas y esto ocasiona problemas de taponamiento en las tuberías y equipos utilizados en el proceso, es por ello que es de gran importancia implementar una etapa de limpieza de dichos contaminantes.

Como indica San Miguel¹²², para realizar una depuración y acondicionamiento de gas síntesis existen dos técnicas principales, como la eliminación por métodos primarios, y la eliminación por vía térmica y catalítica. Como explica Peña¹²³, la eliminación por medio del método primario se hace por medio de la disminución de la concentración y variables como la temperatura, presión y tipo de agente gasificante. San Miguel¹²⁴ explica que el método de eliminación por vía térmica consiste en transformar el alquitrán en gases ligeros por medio de calentamiento a una temperatura y tiempo determinado; y también explica que por vía catalítica se deben utilizar criterios establecidos para los catalizadores dependiendo los componentes de los alquitranes¹²⁵.

¹¹⁹ RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. kassel university press GmbH, 2011. 15 p. ISBN: 978-3-89958-950-4.

¹²⁰ SAN MIGUEL, Guillermo; GUTIÉRREZ, Fernando. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. España: Mundi-Prensa, 2015. 241 p. ISBN 978-84-8476-674-2.

¹²¹ ZAGUAN. Universidad Zaragoza [en línea], [revisado 3 de Abril de 2018]. Disponible en Internet: <https://zaguan.unizar.es/record/6135/files/TAZ-PFC-2011-362.pdf>.

¹²² SAN MIGUEL, Guillermo; GUTIÉRREZ, Fernando. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Op. cit., p. 241.

¹²³ PEÑA, Jesika, et al. Uso energético de la biomasa a través del proceso de gasificación. *Revista de Investigación*, 2017, vol. 10, no 2, p. 165-181.

¹²⁴ SAN MIGUEL, Guillermo; GUTIÉRREZ, Fernando. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Op. cit., p. 253.

¹²⁵ *Ibid.*, p. 254.

1.5.3 Reacciones de la formación de alquitranes. Según García¹²⁶, Los alquitranes pueden clasificarse según su régimen de reacción en primarias, secundarios y terciarios.

Los **alquitranes primarios** son resultado de la descomposición térmica de la biomasa, es decir, derivados de la hemicelulosa, celulosa y lignina. El porcentaje de alquitranes primarios en el gas producido depende del contenido volátil del combustible, del diseño del reactor y de las condiciones del proceso¹²⁷.

Según San Miguel¹²⁸, las **reacciones secundarias** se originan a partir de las reacciones primarias, para dar estructuras aromáticas y poliaromáticas de mayor peso molecular, como los fenoles y olefinas. Estas reacciones se ven favorecidas cuando la temperatura y el tiempo de residencia en el reactor son elevados

Las **reacciones terciarias** se originan a partir de las reacciones secundarias y se forman cuando las reacciones primarias han desaparecido. Como indica García¹²⁹, se componen de derivados de compuestos aromáticos que contienen grupos metilos.

1.6. ESQUEMAS TECNOLÓGICOS DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA

Codelco¹³⁰ define un esquema tecnológico como una serie de etapas relacionadas entre sí, cuyo objetivo es la transformación de diversos materiales o materias primas en un producto final o un objeto tecnológico. Para Montoya¹³¹, la planeación de un esquema tecnológico es importante realizar una revisión de cada una de las tecnologías o equipos a utilizar en el proceso y los parámetros y condiciones a las que se debe llevar a cabo la producción.

Como ejemplo de un esquema tecnológico de gasificación de biomasa se toma como referencia el artículo “Gasificación de madera para la obtención de un syngas útil en la producción de biocombustibles y/o productos químicos” de los investigadores Laura Suárez Hernández, Juan F. Pérez Bayer y Rolando Barrera Zapata (2016), donde se desarrolla un modelo en equilibrio que permite simular el

¹²⁶ GARCÍA, María del Alba. Análisis de la capacidad de reducción de alquitranes de un gas de gasificación mediante inyección de vapor y aire. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Sevilla, España: Universidad de Sevilla. 14 p.

¹²⁷ SAN MIGUEL, Guillermo; GUTIÉRREZ, Fernando. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. España: Mundi-Prensa, 2015. 221 p. ISBN 978-84-8476-674-2.

¹²⁸ SAN MIGUEL, Guillermo; GUTIÉRREZ, Fernando. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. España: Mundi-Prensa, 2015. 221 p. ISBN 978-84-8476-674-2.

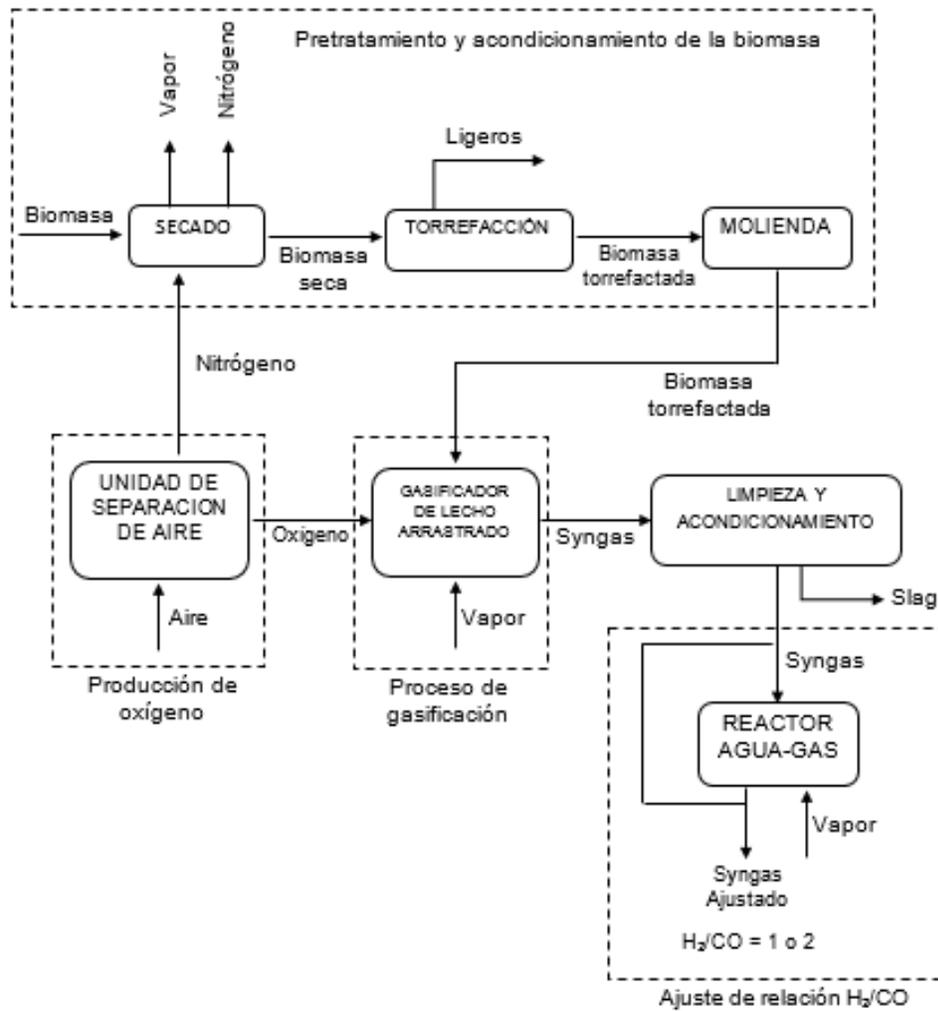
¹²⁹ GARCÍA, María del Alba. Análisis de la capacidad de reducción de alquitranes de un gas de gasificación mediante inyección de vapor y aire. Op. cit., p. 14.

¹³⁰ CODELCO. Diagrama de un proceso tecnológico. CODELCO Educa [en línea], [revisado 3 de Abril de 2018]. Disponible en Internet: https://www.codelcoeduca.cl/biblioteca/tecnologia/1_tecnologia_NB6-8B.pdf.

¹³¹ MONTOYA, M. I.; QUINTERO, J. A. Esquema tecnológico integral de la producción de bioetanol carburante. Trabajo de grado Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia: Manizales, 2005, vol. 115. 1p.

proceso de producción de un syngas útil para la obtención de biocombustibles mediante gasificación en lecho arrastrado; en él se define un diagrama de procesos para la obtención de gas de síntesis teniendo en cuenta los datos tomados de la literatura de Montoya¹³² y se describe de manera detallada el modelo planteado.

Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de gasificación en lecho arrastrado para la obtención de un syngas útil para la producción de combustibles líquidos y productos químicos.



Fuente. SUÁREZ L, PÉREZ JF, BARRERA R. Gasificación de madera para la obtención de un syngas útil en la producción de biocombustibles y/o productos químicos. rev.ion. 2017;30(1):57-71.

¹³² SUÁREZ L, PÉREZ JF, BARRERA R. Gasificación de madera para la obtención de un syngas útil en la producción de biocombustibles y/o productos químicos. rev.ion. 2017;30(1):57-71.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

En este capítulo, se presentan las pruebas de caracterización fisicoquímicas de la cascarilla de café, madera y caucho, para finalmente realizar un análisis entre los datos literarios y los datos experimentales correspondientes al porcentaje de humedad y cenizas de cada una de las materias primas trabajadas. Luego de ello se establece la caracterización de la biomasa a utilizar en el proyecto, por medio de los datos extraídos de la literatura correspondientes al análisis próximo, análisis elemental y poder calorífico.

2.1 ANÁLISIS PRÓXIMO

El análisis próximo se realiza a la biomasa para determinar el porcentaje de humedad, contenido de cenizas y material volátil presentes en ella.

2.1.1 Contenido de humedad. El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca¹³³.

2.1.2 Contenido de cenizas. El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material¹³⁴. Según Al-Kassir¹³⁵, es de gran importancia conocer tanto la cantidad como la composición de cenizas para poder predecir la calidad del producto y evitar problemas en el proceso de combustión, ya que producen la formación de escoria, además entre mayor sea la cantidad de cenizas, menor será la calidad del combustible producido.

2.1.3 Material volátil. Los materiales volátiles son desprendimientos gaseosos de la materia orgánica e inorgánica durante el calentamiento¹³⁶.

2.2 ANÁLISIS ELEMENTAL

Como se puede observar en el libro Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética¹³⁷, el análisis elemental se basa principalmente en evaluar la proporción de los elementos que componen la biomasa, en la mayoría de los casos, se determina el contenido del carbono, nitrógeno, azufre, hidrógeno y oxígeno; esta

¹³³ FOCER. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. San José, Costa Rica.: Bun-ca, 2002. 10 p.

¹³⁴ Ibid., p 10.

¹³⁵ AL-KASSIR, Raúl. Caracterización y preparación de residuos de biomasa con ensayos experimentales de secado térmico y combustión no contaminante. Tesis de máster. Portalegre.: Instituto politécnico de Portalegre. 2013. 31 p.

¹³⁶ VASQUEZ SIERRA, Erika Biviana y HERRERA BUILES, Jhon Fredy. Metodología para la caracterización de combustibles sólidos maderables del área metropolitana del valle de aburrá "amva", Colombia. En: Revista facultad Nacional de agronomía. 2006. Vol 59, no 2, p 3561.

¹³⁷ SAN MIGUEL, Guillermo y GUTIERREZ MARTÍN, Fernando. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Madrid.: Mundi-Prensa, 2015. 27 p.

determinación del análisis elemental se hace por medio de equipos denominados analizadores elementales. Además, según Nogues, estos elementos participan en las reacciones de oxidación y por lo tanto definen en gran medida el poder calorífico en los biocombustibles producidos¹³⁸.

Así mismo, Nogues¹³⁹ indica que el contenido de los elementos como el hidrógeno, oxígeno y carbono, son de gran importancia en los procesos de conversión de materia orgánica como la combustión, gasificación, licuefacción; mientras que el contenido de azufre, nitrógeno y cloro tienden a ser emisiones contaminantes.

2.3 PODER CALORÍFICO

“La cantidad de calor liberado en la combustión completa de un proceso es llamado poder calorífico”¹⁴⁰, en el cual, según Vázquez¹⁴¹, la energía es producida por el carbono e hidrogeno de la materia orgánica.

Como lo expone Al-Kassir¹⁴², el poder calorífico puede ser llamado, poder calorífico superior (PCS) que representa el valor máximo de liberación de energía en la combustión completa, donde se considera la energía utilizada para la vaporización del agua contenida; y el poder calorífico inferior (PCI) que representa el valor máximo de energía útil.

2.4 TIPOS DE BIOMASA UTILIZADOS EN EL PROYECTO DE GRADO

La materia orgánica utilizada en el proyecto de grado para su debida caracterización y proceso de gasificación es la madera, cascarilla de café y caucho.

2.4.1 Cascarilla de café. Como lo define Arenas¹⁴³, La cascarilla de café es un residuo proveniente de la agroindustria y se obtiene a partir de la operación unitaria conocida como trilla, este proceso se le realiza al grano antes de ser tostado o

¹³⁸ NOGUES, Fernando Sebastián; GARCÍA GALINDO, Daniel y REZEAU, Adeline. Energías renovables: Energía de la biomasa. España, Zaragoza.; Prensas universitarias de Zaragoza, 2010. 129 p.

¹³⁹ NOGUES, Fernando Sebastián; GARCÍA GALINDO, Daniel y REZEAU, Adeline. Energías renovables: Energía de la biomasa. España, Zaragoza.; Prensas universitarias de Zaragoza, 2010. 137 p

¹⁴⁰ AL-KASSIR, Raúl. Caracterización y preparación de residuos de biomasa con ensayos experimentales de secado térmico y combustión no contaminante. Tesis de máster. Portalegre.: Instituto politécnico de Portalegre. 2013. 1 p.

¹⁴¹ VASQUEZ SIERRA, Erika Biviana y HERRERA BUILES, Jhon Fredy. Metodología para la caracterización de combustibles sólidos maderables del área metropolitana del valle de aburrá “amva”, Colombia. En: Revista facultad Nacional de agronomía. 2006. Vol 59, no 2, p 3562.

¹⁴² AL-KASSIR, Raúl. Caracterización y preparación de residuos de biomasa con ensayos experimentales de secado térmico y combustión no contaminante. Op. cit., p. 37.

¹⁴³ ARENAS CASTELLANOS, Daniel. Propuesta de diseño de un proceso para la generación de energía eléctrica a partir de residuos de la producción de café. Trabajo de grado. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería. 2009. 48 p.

convertido en café molido para el consumo humano. “La cascarilla de café es la parte que envuelve al grano inmediatamente después de la capa mucilaginosa y representa alrededor de 12% del grano de café en base seca. Esta cascarilla constituye en excelente parte por celulosa, lignina, pentosanos, sílice y ceniza”¹⁴⁴; su composición la hace muy interesante para implementarla en procesos termoquímicos, por eso se propone su utilización para la generación de energía.

2.4.2 Madera. La madera es un residuo forestal y “su procesamiento genera cantidades considerables desechos, en forma de aserrín o pequeños pedazos de madera. Se estima que, de un árbol talado, se aprovecha solo 20% en el producto final¹⁴⁵.

La madera corresponde a la parte sólida de los árboles que se encuentra debajo de la corteza. Como indica Presa¹⁴⁶, es conformada por una serie de tejidos y material fibroso, donde se encuentra la celulosa en un 50%, lignina en un 20%, hemicelulosa en aproximadamente un 20%, y otros componentes moleculares como las resinas, almidones y azúcares. La madera se puede clasificar según su textura en blandas, duras, resinosas, frondosas, y exóticas, para la realización de este proyecto se realizó la caracterización de la madera blanda.

2.4.3 Caucho. “La fabricación de neumáticos es una de las principales aplicaciones del caucho”¹⁴⁷. Así Hervás¹⁴⁸, expone que el neumático se compone principalmente de caucho y aditivos en cantidades diferentes como óxido de zinc, antioxidantes, negro de humo, azufre, entre otros. Miranda, Segovia y Sosa¹⁴⁹, expresan que en los últimos tiempos la industria del caucho ha experimentado un proceso de mundialización, debido al incremento en el uso vehicular. Castro¹⁵⁰, plantea que el problema radica en la disposición final de las llantas ya que su confinamiento es en los rellenos sanitarios o la quema de los mismos generando emisiones de gases que contienen partículas nocivas para el entorno, causando grandes problemas ambientales. El aprovechamiento de esos residuos sólidos está en la mira debido a que son una buena alternativa para la obtención de energía.

¹⁴⁴ AKHTAR, J. et al. Una revisión de los parámetros de operación para líquido óptimo en producción de petróleo en pirólisis de biomasa. Citado por MANALS CUTIÑO, Enma; PENEDO MEDINA; Margarita y SALAS TORT, Dolores. Caracterización de la biomasa vegetal “cascarilla de café”. Op. cit., p. 200.

¹⁴⁵ FOCER. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. San José, Costa Rica.: Bun-ca, 2002. 35 p

¹⁴⁶ PRESA, Juan Manuel. Estructura, composición y clasificación de la madera. En: Cedria. Abril, 2015. 4 p.

¹⁴⁷ FULLANA, Andres. Pirólisis y combustión de neumáticos usados y lodos de depuradora. Trabajo de grado. Alicante.: Universidad de Alicante. 2001. 1 p.

¹⁴⁸ HERVAS RAMIREZ, Lorenzo. Los residuos urbanos y asimilables. Andalucía.: Consejería de medio ambiente, 2003. 281 p.

¹⁴⁹ MIRANDA, Rosa del Carmen; SEGOVIA MARTÍNEZ, Ciro César y SOSA BLANCO, Cesar Alberto. Pirólisis de llantas usadas: Estudio cinético. En: Información tecnológica. 2006. Vol. 17, no. 2, p 8.

¹⁵⁰ CASTRO, Guillermo. Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos. Universidad de Buenos aires. 2007. 2 p.

2.5 CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA BIOMASA

Para la caracterización experimental de la materia prima escogida para el proyecto, se lleva a cabo la prueba de secado para hallar el porcentaje de humedad y contenido de cenizas presentes en el material orgánico. Las muestras de biomasa utilizadas para el estudio corresponden a residuos agroindustriales y urbanos que generan gran contaminación ambiental. La cascarilla de café utilizada es proveniente del departamento del Huila, mientras que la madera corresponde a residuos de madera (aserrín) generados en una empresa de corte. El neumático fue obtenido por medio de una empresa dedicada a la recolección, almacenamiento y disposición de neumáticos en desuso, ubicada en Puente Piedra, Madrid, Cundinamarca. Para realizar dicha caracterización, se lleva a cabo un pretratamiento a las muestras seleccionadas, las cuales fueron trituradas y posteriormente tamizadas para eliminar partículas de tamaño superior a 1 mm.

2.5.1 Contenido de humedad. Para llevar a cabo la medición del contenido de humedad presente en la biomasa, se toma como guía la Norma DIN CEN/TS 147743:2004. “Esta norma consiste en someter muestras de 1 g de materia prima con un tamaño de grano ≤ 1 mm, a una temperatura de $105 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta obtener un valor estable de la masa de la materia prima.”¹⁵¹ Se requiere realizar modificaciones a la Norma DIN CEN/TS 147743:2004 para el desarrollo de la prueba, teniendo en cuenta que los equipos utilizados funcionan a condiciones o parámetros diferentes a los establecidos por la Norma.

El tamaño de partícula utilizado fue ≤ 1 mm para dos muestras de 1g para cada una de las materias primas. El tiempo inicial de calentamiento fue de 2 horas y se tomaron 3 mediciones cada 20 minutos durante 1 hora, manteniendo una temperatura de 105°C . En la tercera medición se obtuvo un valor estable de la materia prima; dichas mediciones se realizaron por medio de una balanza analítica con precisión de 0,1 mg. En este estudio no se tiene en cuenta las reacciones de descomposición que se puedan presentar durante el proceso.

En la **tabla 1** se muestran los resultados obtenidos en la prueba de contenido de humedad para la caracterización de la biomasa y su respectivo porcentaje, el cual se obtiene mediante la **ecuación 6**, donde W_o es el peso inicial en gramos de la materia prima contenida dentro del crisol y W_{final} es el peso resultante del proceso de secado.

Ecuación 6. Porcentaje de humedad.

$$\%Humedad = \frac{W_o - W_{final}}{W_o}$$

¹⁵¹ MENDOZA GENEY, Libardo Enrique, et al. Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá. 2016. 19 p.

Tabla 1. Porcentaje de humedad contenida en la materia prima.

Biomasa	W_{final} (g)	% Humedad
Muestra 1: Cascarilla de café	0,97	4,84
Muestra 2: Cascarilla de café	0,97	4,88
Muestra 1: Madera	0,94	7,04
Muestra 2: Madera	0,94	6,93
Muestra 1: Neumático	0,99	1,54
Muestra 2: Neumático	0,99	1,45

Fuente. Elaboración propia.

2.5.2 Contenido de cenizas. Para llevar a cabo la medición del contenido de ceniza presente en la biomasa, se toma como guía la Norma DIN CEN/TS 14775:2004, a la cual se le realiza una serie de modificaciones teniendo en cuenta que los equipos utilizados funcionan a condiciones o parámetros diferentes a los requeridos por la Norma. Esta Norma se realiza para llevar la biomasa a una temperatura mínimo de $550 \pm 10^{\circ}\text{C}$.

El tamaño de partícula utilizado fue ≤ 1 mm para dos muestras de 1g para cada una de las materias primas. El tiempo inicial de calentamiento fue de 5 a 8 minutos y se tomaron mediciones periódicas de la temperatura cada 15 segundos hasta llegar a 250°C y se mantuvo la temperatura durante 2 horas. Posteriormente, se realizó el mismo procedimiento, donde el tiempo inicial de calentamiento fue de 15 a 18 minutos hasta llegar a la temperatura de 550°C y se mantuvo estable durante 1 hora. Finalmente, se lleva a cabo la medición de cada una de las muestras, y los resultados obtenidos se observan en la **tabla 2** con su respectivo porcentaje de ceniza.

Tabla 2. Porcentaje de cenizas contenida en la materia prima.

Biomasa	Wo BS*(g)	% Cenizas
Muestra 1: Cascarilla de café	0,96	1,01
Muestra 2: Cascarilla de café	0,96	1,01
Muestra 1: Madera	0,93	1,06
Muestra 2: Madera	0,93	1,06
Muestra 1: Neumático	0,99	0,92
Muestra 2: Neumático	0,99	0,91

BS*: Biomasa seca

Fuente. Elaboración propia.

El porcentaje de cenizas se obtuvo por medio de la **ecuación 7**, en la cual W_o es el peso inicial en gramos de la materia prima, W_{final} es el peso resultante del proceso

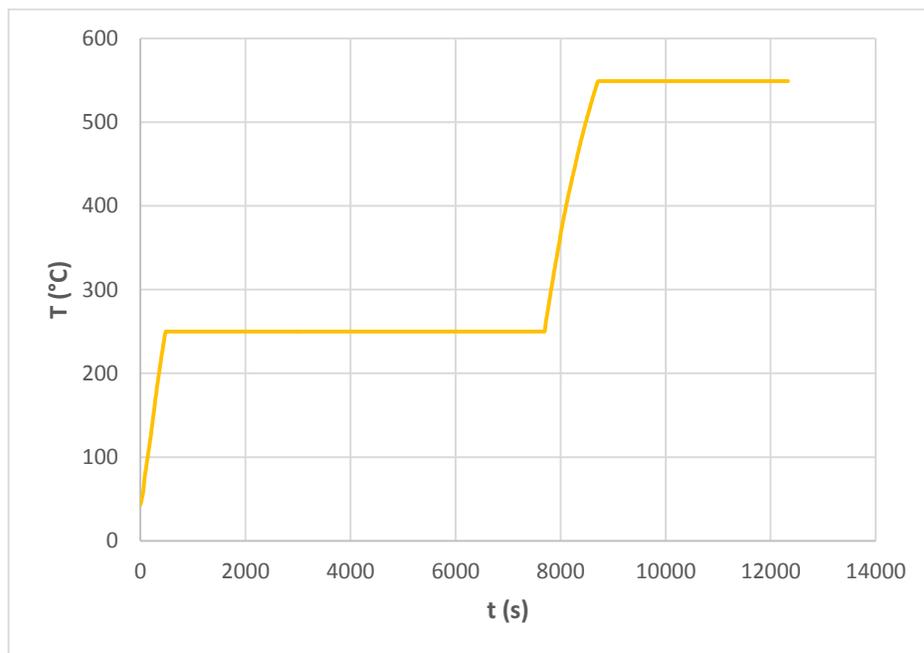
de secado y W_o en base seca, se obtiene por medio del porcentaje de humedad obtenido anteriormente y el W_o inicial de esta etapa.

Ecuación 7. Porcentaje de cenizas.

$$\%Cenizas = \frac{W_o - (W_{final} - Crisol)}{W_o BS}$$

En la **gráfica 1** se presenta la curva de velocidad de calentamiento determinada a partir del tiempo en el que se alcanzó la temperatura indicada por la Norma DIN CEN/TS 14775:2004. Para la primera y segunda fase, se llevó la temperatura a 250°C en un tiempo de 5 a 8 minutos y se mantuvo constante durante 2 horas. La tasa de calentamiento para la primera fase es de 4,16°C/min. Para la tercera y cuarta fase, se llevó la temperatura a 550 °C en un tiempo de 15 a 18 minutos y se mantuvo constante durante 1 hora. La tasa de calentamiento para la tercera fase es de 17,37°C/min. La tasa de calentamiento se obtuvo por medio de la pendiente determinada en cada fase.

Gráfica 1. Curva de velocidad de calentamiento.



Fuente. Elaboración propia.

2.5.3 Comparación del estudio realizado. A continuación, se lleva a cabo la comparación de los datos obtenidos experimentalmente con los datos extraídos de la literatura, de cada una de las materias primas.

2.5.3.1 Cascarina de café. Para realizar la comparación del contenido de humedad y cenizas de la cascarina de café se tiene como base los datos extraídos de la literatura, por medio del libro “Pirólisis de biomasa. Cuesco de palma de aceite”¹⁵². En la **tabla 3** se muestran los resultados, tanto de la caracterización experimental (muestra 1 y 2) como la caracterización de datos literarios (muestra 3).

Tabla 3. Comparación de los datos estudiados de Cascarina de café.

Cascarina de café	ANÁLISIS PRÓXIMO	
	%Humedad	%Cenizas
Muestra 1 (presente trabajo)	4,84	1,01
Muestra 2 (presente trabajo)	4,88	1,01
Muestra 3 ¹⁶²	10,1	1,2

Fuente. Elaboración propia.

Para la muestra de cascarina de café 1, 2 y 3, se lleva a cabo un proceso de secado para obtener el análisis próximo correspondiente al %humedad y %cenizas con muestras de 1g cada una. Se puede evidenciar que la cascarina de café presentada en la muestra 3, del libro “Pirólisis de biomasa. Cuesco de palma de aceite”¹⁵³, tiene un contenido de humedad mayor comparado con los resultados experimentales del presente proyecto. Esto se puede presentar debido a que la materia prima utilizada por cada una de las investigaciones es proveniente de lugares diferentes, al igual que cada biomasa presenta otro tipo de condiciones dependiendo del lugar donde se encuentra y a las que este lugar está. Por otro lado, se puede observar, que el porcentaje de cenizas para las tres muestras es muy cercano.

2.5.3.2 Madera. La caracterización experimental se realizó para aserrín de madera. “El aserrín es el conjunto de partículas o polvillo que se desprende de la madera cuando ésta es aserrada; también contiene minúsculas partículas de madera producidas durante el proceso y manejo de la misma”¹⁵⁴.

En la **tabla 4**, se muestran los datos a estudiar para realizar el análisis de comparación. La muestra 1 y 2, es el aserrín utilizado para la caracterización experimental del presente proyecto. Las muestras 3, 4 y 5, corresponden a aserrín de algarrobo, majagua y cedro, respectivamente. Estas muestras se estudian en el artículo “Caracterización de aserrín de diferentes maderas”¹⁵⁵, recolectados en el aserrío 337 “Carlos Montalván” del municipio Palma Soriano en Santiago de Cuba.

¹⁵² GÓMEZ, Alexánder. Pirólisis de biomasa: cuesco de palma de aceite. kassel university press GmbH, 2008. 17 p.

¹⁵³ GÓMEZ, Alexánder. Pirólisis de biomasa: cuesco de palma de aceite. kassel university press GmbH, 2008. 17 p.

¹⁵⁴ SERRET-GUASCH, Nurian; GIRALT-ORTEGA, Giselle; QUINTERO-RÍOS, Mairet. Caracterización de aserrín de diferentes maderas. *Tecnología Química*, 2016, vol. 36, no 3, p. 468-479.

¹⁵⁵ SERRET-GUASCH, Nurian; GIRALT-ORTEGA, Giselle; QUINTERO-RÍOS, Mairet. Caracterización de aserrín de diferentes maderas. *Tecnología Química*, 2016, vol. 36, no 3, p. 395-405.

Las muestras 6 y 7, corresponden a datos de caracterización adaptados para el estudio del artículo “Caracterización de la biomasa vegetal: cascarilla de café”¹⁵⁶, en el cual los datos extraídos para el pino y aserrín de pino, corresponden a los autores Xianwen¹⁵⁷ y Wei¹⁵⁸, respectivamente.

Los valores determinados de porcentajes de humedad y cenizas para la muestra 1 y 2 son similares a la muestra 4, correspondiente a madera de Majagua. Las diferencias entre los datos de la literatura especificados y el aserrín caracterizado experimentalmente, se pueden asociar a la composición de cada materia prima, al tamaño de partícula utilizado para el estudio de caracterización, a la norma utilizada o a las condiciones a las cuales la biomasa ha estado expuesta. También, se puede observar que los contenidos de humedad y cenizas varían debido a que se realiza una comparación entre diferentes tipos de madera.

Tabla 4. Comparación de los datos estudiados de Madera.

Madera	Tipo	ANÁLISIS PROXIMO	
		%Humedad	%Cenizas
Muestra 1 (presente trabajo)	Aserrín	7,04	1,06
Muestra 2 (presente trabajo)	Aserrín	6,93	1,06
3 ¹⁶⁵	Algarrobo	8,54	0,87
4 ¹⁶⁵	Majagua	7,83	0,95
5 ¹⁶⁵	Cedro	9,73	0,96
6 ¹⁶⁶	Pino	5,8	2,3
7 ¹⁶⁶	Aserrín de pino	5,01	0,34

Fuente. Elaboración propia.

2.5.3.2 Neumático. En la **tabla 5** se muestra la comparación del porcentaje de humedad y cenizas para muestras de neumáticos determinadas mediante pruebas experimentales junto con composiciones determinadas por otros autores para neumáticos fuera de uso (NFU). Las muestras 1 y 2, son correspondientes a los resultados obtenidos durante la caracterización del proceso de secado en el presente proyecto. La muestra 3, corresponde a los datos experimentales obtenidos de la tesis “Transformación termoquímica de neumáticos usados en una sola etapa en atmósfera de CO₂, para la obtención de carbón activado”, de la investigadora

¹⁵⁶ MANALS-CUTIÑO, Enma M.; SALAS-TORT, Dolores; PENEDO-MEDINA, Margarita. Caracterización de la biomasa vegetal cascarilla de café. Tecnología Química, 2018, vol. 38, no 1, p. 169-181.

¹⁵⁷ XIANWEN, D. et al. “The fast pyrolysis of biomass in CFB reactor”. Energy and Fuels, 2000, Vol.14, p. 552-557.

¹⁵⁸ WEI, L et al. “Characteristics of fast pyrolysis of biomass in a free fall reactor”. Fuel Processing Technology, 2006, Vol. 87, p. 863-871.

Luisa Cardona¹⁵⁹. El neumático utilizado en la muestra 3, “se adquirió en la empresa Mundo Limpio S.A (Medellín). La materia prima recibió un pretratamiento físico mediante tamizado, con el objetivo de obtener un tamaño de partícula de aproximadamente 0.6 mm”¹⁶⁰. La muestra 4, corresponde a los datos experimentales obtenidos en el artículo científico “Pirólisis convencional de neumáticos en desuso para la producción de combustibles líquidos”¹⁶¹, estas muestras se obtuvieron en el análisis próximo de los neumáticos en desecho, obtenidos por el Instituto Nacional de Tecnología y Normalización del Paraguay.

Tabla 5. Comparación de los datos estudiados de Neumático.

Neumático	ANÁLISIS PRÓXIMO	
	%Humedad	%Cenizas
Muestra 1 (presente trabajo)	1,54	0,92
Muestra 2 (presente trabajo)	1,45	0,91
3 ¹⁶⁹	0,8	3,6
4 ¹⁷¹	1,1	6,2

Fuente. Elaboración propia.

Los valores determinados en el contenido de humedad son similares a los presentados previamente, mientras que hay una gran diferencia en el porcentaje de cenizas de los neumáticos estudiados. Las diferencias se pueden asociar a que la composición de cada uno de ellos varía de acuerdo al fabricante de estos productos. También, varía respecto al lugar donde se obtuvo y al uso que tuvo cada neumático antes de pasar por la fase de pretratamiento. Debido a que los datos obtenidos para la muestra 1 y 2 son cercanos y estables, no se atribuye a errores experimentales.

2.6 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA BIOMASA UTILIZADA EN EL PROYECTO

Los datos del análisis próximo, el análisis elemental y el poder calorífico que se presentan a continuación en la **Cuadro 2-6** de las respectivas biomásas como la cascarilla de café, la madera y el caucho, son datos extraídos de las diferentes fuentes literarias para las cuales se realiza previamente una comparación con los datos experimentales. Para la *cascarilla de café*, se establecen los datos expuestos

¹⁵⁹ CARDONA ÁLVAREZ, L. F. Transformación termoquímica de neumáticos usados en una sola etapa en atmósfera de CO₂, para la obtención de carbón activado (Trabajo de grado inédito). Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2014. 47 p.

¹⁶⁰ Ibid., p. 35.

¹⁶¹ DUARTE, S.; VELÁZQUEZ, E.; DULLAK, A. Pirolisis convencional de neumáticos en desuso para la producción de combustibles líquidos. Revista Científica de la UCSA, vol.3, no. 2. Diciembre, 2016:25-32.

en el libro “Pirólisis de biomasa. Cuesco de palma de aceite”¹⁶². Para la *madera*, se presentan los datos de Aserrín de pino, estudiados por el autor Wei¹⁶³. Finalmente, para establecer los datos de caracterización de los *neumáticos*, se presentan los datos estudiados en la tesis “Transformación termoquímica de neumáticos usados en una sola etapa en atmósfera de CO₂, para la obtención de carbón activado”, de la investigadora Luisa Cardona¹⁶⁴.

Se toman estos datos para la correspondiente caracterización del proyecto, debido a que experimentalmente solo se lleva a cabo el proceso de secado para obtener el porcentaje de humedad y ceniza contenida en cada materia prima, para lo cual no se completa el análisis próximo, análisis elemental y poder calorífico, necesarios para una caracterización fisicoquímica completa, es por ello que se tiene en cuenta los datos obtenidos en la literatura.

Tabla 6. Caracterización fisicoquímica de la biomasa utilizada en el proyecto.

BIOMASA	ANÁLISIS PRÓXIMO			ANÁLISIS ELEMENTAL				PODER CALORÍFICO (MJ/Kg)
	% Humedad	% Cenizas	% Material Volátil	% H	% C	% N	% O	
CASCARILLA DE CAFÉ	10,1	1,2	82	5,3	50,3	<1	43,8	18,7
MADERA (Aserrín de pino)	5,01	0,34	77,7	6,72	50,3	<1	42,7	17,9
NEUMÁTICO	0,8	3,6	65,6	7,19	84	0,49	3,27	30-40

Fuente. Elaboración propia.

¹⁶² GÓMEZ, Alexánder. Pirólisis de biomasa: cuesco de palma de aceite. kassel university press GmbH, 2008. 17 p.

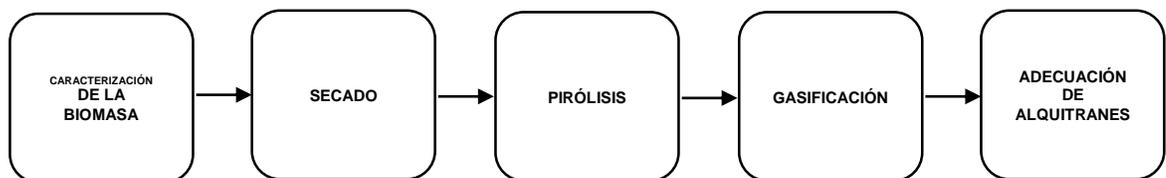
¹⁶³ WEI, L et al. “Characteristics of fast pyrolysis of biomass in a free fall reactor”. Fuel Processing Technology, 2006, Vol. 87, p. 863-871.

¹⁶⁴ CARDONA ÁLVAREZ, L. F. Transformación termoquímica de neumáticos usados en una sola etapa en atmósfera de CO₂, para la obtención de carbón activado (Trabajo de grado inédito). Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2014. 47 p.

3. ESQUEMA TECNOLÓGICO

Para la planeación del esquema tecnológico se tiene en cuenta la herramienta computacional donde se desarrollará cada una de las etapas del proceso de gasificación para la obtención de gas síntesis, como lo son el proceso de secado, de pirólisis, de gasificación y por último la adecuación del syngas que se explicarán a continuación; la biomasa a utilizar para el desarrollo del esquema es la madera, ésta pasará por cada una de las etapas sometiéndose a su descomposición y transformación para la generación del gas síntesis.

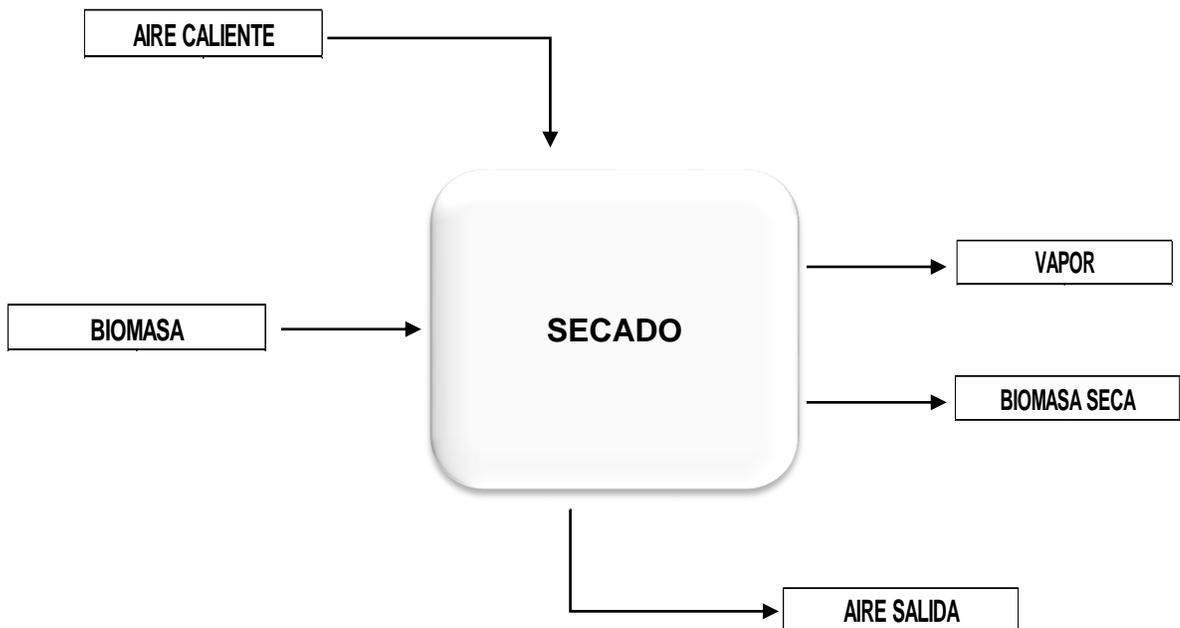
Figura 7. Esquema tecnológico general para el desarrollo de la herramienta tecnológica.



Fuente. Elaboración propia.

3.1 SECADO

Figura 8. Proceso de secado en el esquema tecnológico.



Fuente. Elaboración propia.

El proceso de secado es la primera etapa del esquema tecnológico. La biomasa entra a temperatura ambiente de 25°C con un porcentaje de humedad determinado. Como se ha explicado anteriormente, el secado tiene como finalidad retirar o evaporar la cantidad de agua presente en la biomasa para su utilización en los procesos posteriores y aprovechar en gran medida su capacidad calorífica.

Para lograr la evaporación del agua es necesario el suministro de una corriente de aire caliente. Es necesario hallar la temperatura a la que debe entrar la corriente de aire para lograr el proceso de secado, donde ésta debe ser mayor con respecto a la temperatura de entrada de la biomasa.

Para el proceso de secado se debe conocer los valores de las temperaturas de las corrientes, la fracción másica de la biomasa y del aire de salida; para la determinación de estos datos se deben realizar balances de energía y materia. Para el balance de materia se obtiene:

Ecuación 8. Balance general.

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5$$

Ecuación 9. Balance biomasa.

$$\dot{m}_1 * X_{1\text{seco}} = \dot{m}_5 * X_{5\text{seco}}$$

Ecuación 10. Balance aire caliente.

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

Ecuación 11. Balance agua.

$$\dot{m}_1 * X_{\% \text{humedad}} = \dot{m}_4$$

Donde \dot{m}_1 corresponde a la biomasa seca, \dot{m}_2 a la corriente de entrada de aire caliente, \dot{m}_3 a la corriente de salida de aire, \dot{m}_4 al vapor, \dot{m}_5 a la biomasa seca, y X corresponde a la fracción de cada uno de los componentes en las corrientes.

La cantidad de energía para la evaporación de agua contenida en la biomasa:

Ecuación 12. Cantidad de energía.

$$q_{\text{salida}} = \dot{m}_{H_2O} * h_{fg}$$

Donde q_{salida} se refiere al calor requerido para secar la biomasa, \dot{m}_{H_2O} es la cantidad de agua en la corriente y h_{fg} es la entalpía de vaporización tomada a una presión de 75 Kpa, según las condiciones de Bogotá.

Una vez obtenido el valor del calor requerido, se realiza el cálculo del calor que el aire caliente debe aportar a la biomasa, donde el C_p es constante ya que depende de la temperatura y se toma una temperatura de referencia de 0 K:

Ecuación 13. Cantidad de energía.

$$q_{salida} = \dot{m}_{aire} * C_p * (T_1 - T_2)$$

De la anterior ecuación se despeja T_1 que corresponde a la temperatura de entrada del aire, de la siguiente manera:

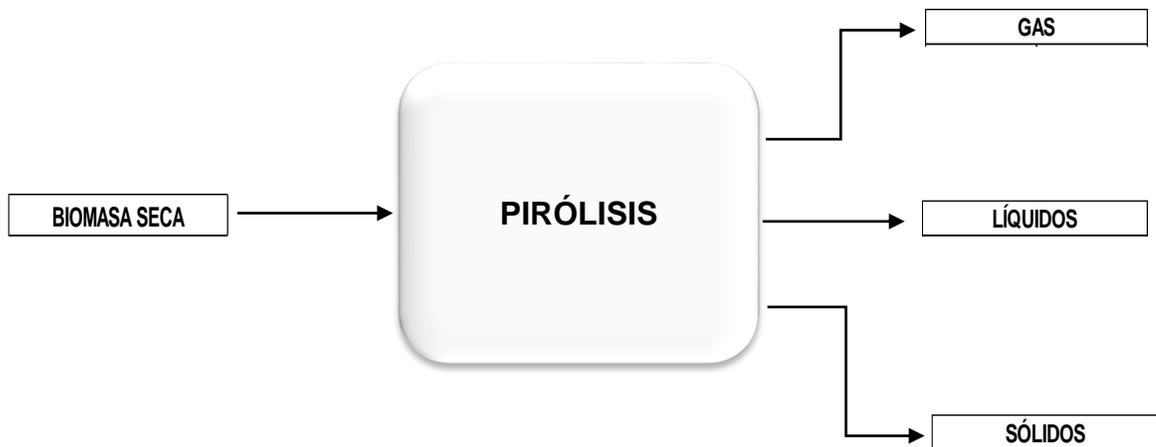
Ecuación 14. Temperatura inicial.

$$T_1 = \frac{q_{salida}}{\dot{m}_{aire} * C_p} + T_2$$

Con la anterior ecuación también se halla la temperatura de salida de la biomasa (T_2) cambiando los datos de la masa $\dot{m}_{biomasa}$ y el C_p de la madera.

3.2 PIRÓLISIS

Figura 9. Proceso de pirólisis en el esquema tecnológico.



Fuente. Elaboración propia.

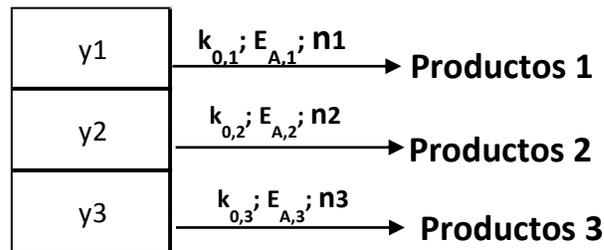
El proceso de pirólisis es la segunda etapa dentro del esquema tecnológico, donde la biomasa seca se va a descomponer por causa del calor en ausencia de oxígeno, para la generación de productos sólidos, líquidos y gaseosos.

El desarrollo de la pirólisis es de gran importancia ya que constituye el paso inicial para el desarrollo de la gasificación, además allí se define las características de los productos generados y las fracciones finales que se obtienen en cada uno de ellos.

3.2.1 Cinética de reacción. Es de gran importancia el estudio cinético de las reacciones que se presentan durante la descomposición de la biomasa en el proceso de pirólisis, ya que a partir de éstas se pueden determinar las composiciones de los productos finales. Para ello, se sigue un mecanismo de reacción donde se muestra la manera en que se dan las reacciones químicas; el modelo de reacción a seguir son las semiglobales.

Según en la literatura del libro pirólisis de biomasa: cuesco de palma de aceite¹⁶⁵, los modelos semiglobales describen las reacciones en el proceso de pirólisis por medio de tres reacciones independientes y paralelas, que corresponden a los componentes de la biomasa como, la hemicelulosa, celulosa y lignina, relacionando las propiedades de la biomasa con las fracciones formadas de los productos.

Figura 10. Modelo de tres reacciones independientes y paralelas.



Fuente. Elaboración propia.

Donde Y_x corresponde a la fracción de masa que participa en la reacción; $K_{0,x}$, $E_{a,x}$, y n_x son las constantes cinéticas para cada reacción.

Para la variación de la masa se tiene una secuencia de tres reacciones donde se tienen en cuenta las tres composiciones de la biomasa:

Ecuación 15. Variación de la masa.

$$\frac{dw}{dt} = - \left[y_1 k_{0,1} e^{-\frac{E_{A,1}}{RT}} w_{bm}^{n1} + y_2 k_{0,2} e^{-\frac{E_{A,2}}{RT}} w_{bm}^{n2} + y_3 k_{0,3} e^{-\frac{E_{A,3}}{RT}} w_{bm}^{n3} \right]$$

Donde w_{bm} es la cantidad de material orgánica de la muestra, E_A es la energía de activación, R constante de los gases ideales, k_0 factor preexponencial, T temperatura y n_1 orden de reacción. En el cuadro 3-1 se presentan los valores de los parámetros cinéticos para cada reacción. Se considera que el orden de reacción es igual a 1.

¹⁶⁵ GOMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang y RINCON, Sonia. Pirólisis de Biomasa: Cuesco de Palma de aceite. Bogotá D.C.: Kassel, 2008. 42 p.

Tabla 7. Valores de las constantes cinéticas de reacción.

	Y	E _{A,i} (J/mol)	K _{0,i} (S-1)
Reacción 1	0,4	46570	23,8074844
Reacción 2	0,31	69100	214,862868
Reacción 3	0,29	72470	2,80106583

Fuente. MENDOZA GENEY, Libardo Enrique. 2016.

Con respecto al balance de energía se necesita calcular el calor necesario para llevar a cabo el proceso de pirólisis, utilizando el calor específico (Cp) de la madera, que se halla por medio de la siguiente fórmula sacada del artículo: revisión de propiedades fisicoquímicas y caracterización analítica de biomasa lignocelulósica¹⁶⁶:

Ecuación 16. Calor específico de la madera.

$$C_{p\theta} = 0.266 + 0.00116\theta$$

Donde θ será 106 °C que corresponde a la temperatura de la madera seca para el cálculo de Cp.

Ecuación 17. Cantidad de calor requerido.

$$q_{requerido} = \dot{m}_{biomasa} * C_p * (T_2 - T_1)$$

Para hallar el calor de los productos en el proceso de pirólisis se debe hallar el Cp de cada uno de los componentes que pertenecen a cada corriente, es decir, para el CO, CO₂, H₂, CH₄, H₂O, alquitranes y carbón:

Ecuación 18. Calor específico para los productos.

$$C_{p,i} = a + b * T + c * T^2 + d * T^3$$

¹⁶⁶ CAI, Junmeng; HE, Yifeng; BANKS, Scott. Et al. revisión de propiedades fisicoquímicas y caracterización analítica de biomasa lignocelulósica. En: Elsevier. 2017. 15 p.

Los coeficientes para la determinación de la anterior ecuación se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 8. Coeficientes para la determinación de la capacidad calorífica.

Especie	a	b	c	d
CO	28,16	1,68E-03	5,37E-06	-2,22E-09
CO ₂	22,26	5,98E-02	-3,50E-05	7,47E-09
H ₂	29,11	-1,92E-03	4,00E-06	-8,70E-10
CH ₄	19,89	5,02E-02	1,30E-05	-1,10E-09
H ₂ O	32,24	1,92E-03	1,06E-05	-3,60E-09

Fuente. Rummer et al. 1997.

3.2.2 Productos de pirólisis. En el proceso de pirólisis se obtienen los productos líquidos en donde se encuentran los alquitranes y el agua, los productos gaseosos que están conformados por los componentes CO, CO₂, H₂ Y CH₄, y por último los productos sólidos corresponden a los carbonizados.

Para la obtención de estos productos se hace por medio de los resultados obtenidos por Rummer¹⁶⁷, donde se deben tener en cuenta los parámetros cinéticos que corresponden a cada uno de los componentes mencionados anteriormente, obteniendo la fracción final de cada uno de ellos:

Ecuación 19. Cinética de reacción para los productos.

$$\frac{\partial y_i}{\partial t} = \sum_{k=1}^k k_{0,i,k} * \exp\left(\frac{-E_{a,i,k}}{R_u * T}\right) * (y_{0,i,k} - y_{i,k})^{n_{i,k}}$$

Tabla 9. Parámetros cinéticos para CO.

	Y	E _{A,i} (J/mol)	K _{0,i} (S-1)	n
Reacción 1	0,0165	131000	800000000	1
Reacción 2	0,019	40000	60	1
Reacción 3	0,012	71000	5	1

Fuente. Rummer et al. 1997

¹⁶⁷ RUMMER, Bernhard; PETEK, Josef y STAUDINGER, Gernot. Trocknung und Pyrolyse eines Einzelpartikels - Modellrechnung und experimentelle Verifikation. En: VDI-Berichte. p. 265-276

Tabla 10. Parámetros cinéticos para CO₂.

	Y	E _{A,i} (J/mol)	K _{0,i} (S-1)	n
Reacción 1	0,02	128000	5E+14	2
Reacción 2	0,036	161000	1E+16	2
Reacción 3	0,008	70000	20000	2

Fuente. Rummer et al. 1997.

Tabla 11. Parámetros cinéticos para CH₄.

	Y	E _{A,i} (J/mol)	K _{0,i} (S-1)	n
Reacción 1	0,003	140000	1E+14	2
Reacción 2	0,0042	100000	1000000	2

Fuente. Rummer et al. 1997.

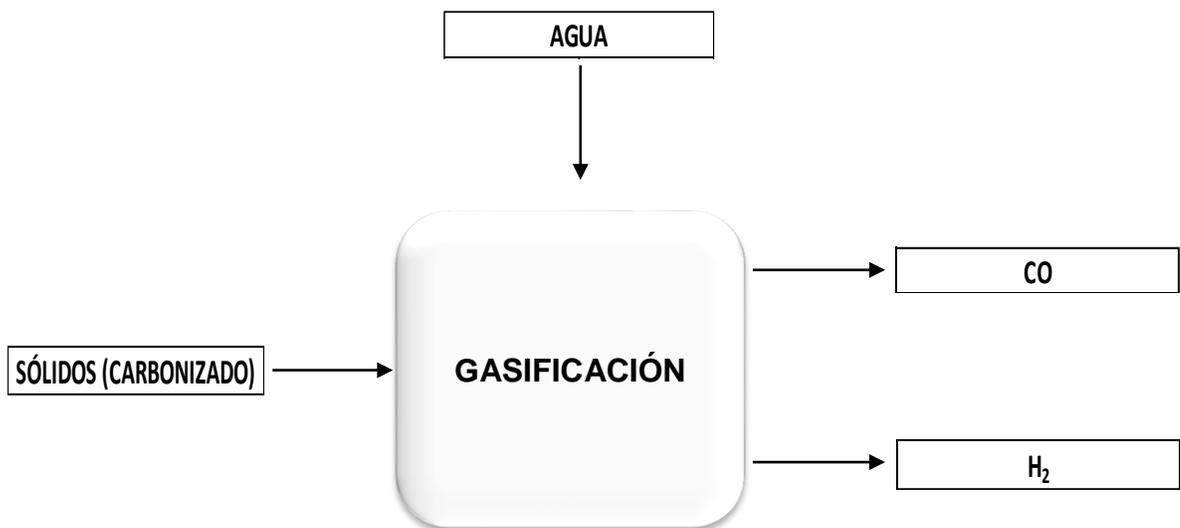
Tabla 12. Parámetros cinéticos para H₂.

	Y	E _{A,i} (J/mol)	K _{0,i} (S-1)	n
Reacción 1	0,0043	117000	400000	2

Fuente. Rummer et al. 1997.

3.3 GASIFICACIÓN

Figura 11. Proceso de gasificación en el esquema tecnológico.

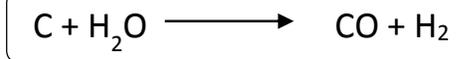


Fuente. Elaboración propia.

La gasificación corresponde a la tercera etapa del esquema. La temperatura final del proceso se evalúa en el rango entre 700°C y 900°C, y se considera constante en el reactor. En éste proceso, sólo se considera la reacción heterogénea del carbonizado producido en el proceso de pirólisis y el agente gasificante. La fracción de productos líquidos y gases se van a mantener constantes puesto que no se van a tener en cuenta las reacciones secundarias.

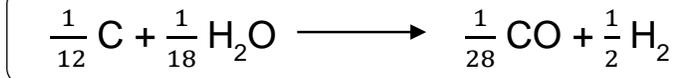
Para el proceso de gasificación de los carbonizados se va a utilizar como agente oxidante el agua con concentraciones entre un 30 y 70%, que al contacto van a dar paso a las reacciones de oxidación; la razón por la que se utiliza este agente de reacción es porque el agua ayuda a aumentar el poder calorífico en la mezcla de gases mejorando su calidad¹⁶⁸. La reacción de gasificación para el carbonizado es:

Ecuación 20. Reacción de gasificación para el carbonizado.



Al realizar el balance de la ecuación de carbonizado queda:

Ecuación 21. Reacción balanceada.



La variación de la masa en el proceso de gasificación se obtiene a partir de la ecuación:

Ecuación 22. Reacción de gasificación para el carbonizado.

$$\frac{dw}{dt} = \left[k_{0,1} e^{-\frac{E_{A,1}}{RT}} w_{\text{agua}}^{n1} \right]$$

Tabla 13. Parámetros cinéticos para la variación de masa de la gasificación.

	$E_{A,i}$ (J/mol)	$K_{0,i}$ (S-1)	n
Reacción 1	167000	27000	0,67

Fuente. RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. kassel university press GmbH, 2011. 2 p.

¹⁶⁸ RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. kassel university press GmbH, 2011. 2 p. ISBN: 978-3-89958-950-4.

Para hallar el carbonizado en cualquier punto del proceso se realiza la integración entre los límites de tiempo 0 y t de la **ecuación 22**:

Ecuación 23. $w_{\text{carbonizado}}$.

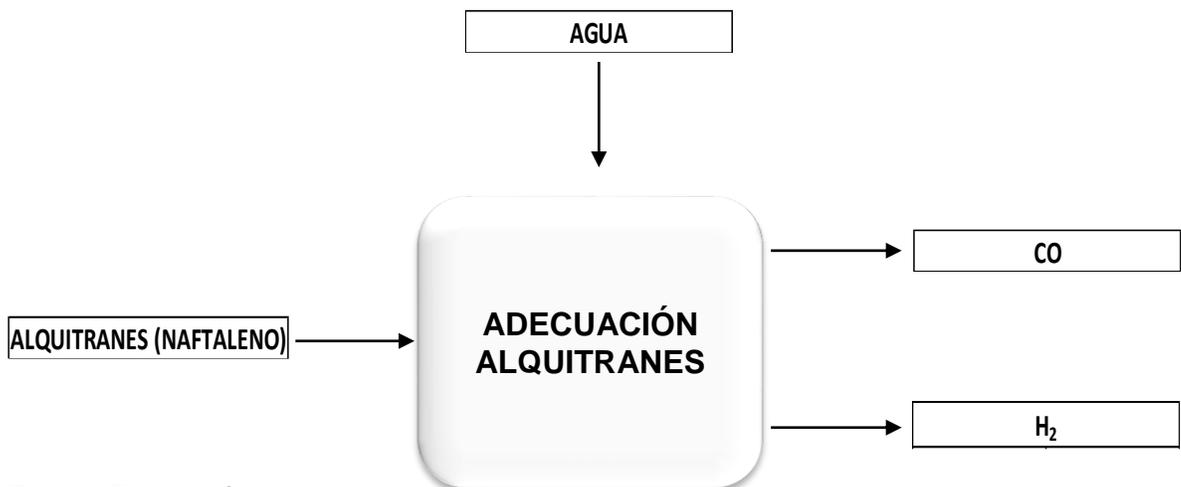
$$w_{\text{carbonizado}} = \left[k_0, 1 e^{-\frac{E_{A+}}{RT}} w_{\text{agua}}^{n1} \right] * t + w_i$$

Donde t es el tiempo al cual se lleva la gasificación en segundos y w_i es la fracción de productos sólidos o carbonizados al final del proceso de pirólisis.

A partir de esos datos obtenidos de carbonizado y las moles de cada uno de los elementos del proceso, se obtiene la composición de carbono y la composición del agua requerida para dar paso a la formación de productos; luego se debe hallar los valores de la descomposición del carbono para obtener los datos de la formación del monóxido de carbono y el hidrógeno.

3.4 ADECUACIÓN DE ALQUITRANES

Figura 12. Proceso de adecuación de alquitranes en el esquema tecnológico.



Fuente. Elaboración propia.

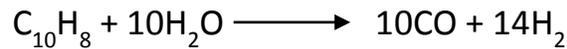
Por último se tiene la adecuación de alquitranes que es la última etapa del esquema tecnológico, esta etapa tiene como objetivo la purificación del gas síntesis reduciendo al máximo la composición de alquitranes. Esta evaluación se realiza considerando que la reducción de alquitranes se da en un reactor de lecho fijo en presencia de un catalizador (carbonizado de madera¹⁶⁹).

¹⁶⁹ El-Rub, Z.A. ; Bramer, G.: Comparación experimental de caracteres de biomasa con otros catalizadores para reducción de alquitrán. En: Fuel 78 (2008), p. 2243–2252.

Se considera que los productos líquidos o alquitranes se pueden modelar como si fuera una sola sustancia pura. En este caso, los alquitranes se modelan como naftaleno (C₁₀H₈) ya que corresponde a una sustancia con presencia importante en los productos líquidos¹⁷⁰.

Para modelar la reducción de alquitranes se considera la reacción de reformado de naftaleno de acuerdo al siguiente esquema:

Ecuación 24. Reacción de reformado de naftaleno.



Los valores de alquitranes o productos líquidos utilizados en esta etapa son los que se obtienen del proceso de pirólisis. La reducción de alquitranes se obtiene a través de la implementación de un modelo de reacción simple de primer orden considerando el proceso isotérmico:

Ecuación 25. Modelo de reacción simple de primer orden.

$$\int \frac{dw_{alquitranes}}{w_{alquitranes}} = \int K_0 \exp\left(\frac{-EA}{RT}\right) dt$$

Integrando y despejando:

Ecuación 26. Walquitranes.

$$w_{alquitranes} = \exp(K_0 \exp\left(\frac{-EA}{RT}\right) * t)$$

Los parámetros cinéticos que se utilizan para la anterior ecuación se obtienen de Comparación experimental de caracteres de biomasa con otros catalizadores para reducción de alquitrán de Abu el Rub¹⁷¹ con el modelo de alquitrán de Naftaleno debido a que se utiliza en el carbonizado de madera.

Tabla 14. Parámetros cinéticos para el Naftaleno.

	E _{A,i} (J/mol)	K _{0,i} (S-1)	n
Reacción 1	61000	10000	1

Fuente. (El-Rub, Za.; Bramer, G. 2008.

¹⁷⁰ POLING, Bruce E., et al. The properties of gases and liquids. 5 ed. New York: Mcgraw-hill, 2001. 663 p.

¹⁷¹ El-Rub, Z.A. ; Bramer, G.: Comparación experimental de caracteres de biomasa con otros catalizadores para reducción de alquitrán. Citado por MENDOZA, Libardo. Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio. Tesis doctorado Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. 2016. 98 p.

Al obtener la composición de alquitranes, se debe hallar la fracción de alquitranes para posteriormente conocer su conversión a gas. Donde se deben hallar los moles de cada uno de los elementos presentes en la reacción de acuerdo a su peso molecular y conocer finalmente la fracción de formación de CO y la producción del mismo.

Para hallar el calor con el cual entra el Naftaleno en la adecuación se debe hallar el Cp con la siguiente fórmula:

Ecuación 27. Calor específico.

$$C_{p,i} = a + b * T + c * T^2 + d * T^3 + e * T^4$$

Los coeficientes para la determinación de la anterior ecuación se presentan en el siguiente cuadro:

Tabla 15. Coeficientes para la determinación de la capacidad calorífica del Naftaleno.

Especie	a	b	c	d	e
<i>Naftaleno</i>	2,889	1,43E-02	1,60E-04	-2,39E-07	1,02E-10

Fuente. Poling, B.; Prausnitz, J.; OConell, J. The properties of Gases and Liquids.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se hace el estudio y la evaluación del esquema tecnológico desarrollado en la herramienta computacional del proceso de gasificación, donde se realizan balances de masa y energía en cada uno de los equipos, teniendo en cuenta la influencia de las principales variables y parámetros para cada una de las etapas del proceso.

4.1 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA CONDICIONES PRINCIPALES

A continuación se mostrarán cada uno de los equipos del proceso de gasificación siendo éste el caso de estudio número uno y la base del proyecto de grado, donde se establecen unas condiciones y parámetros principales.

Tabla 16. Parámetros iniciales para el caso BASE.

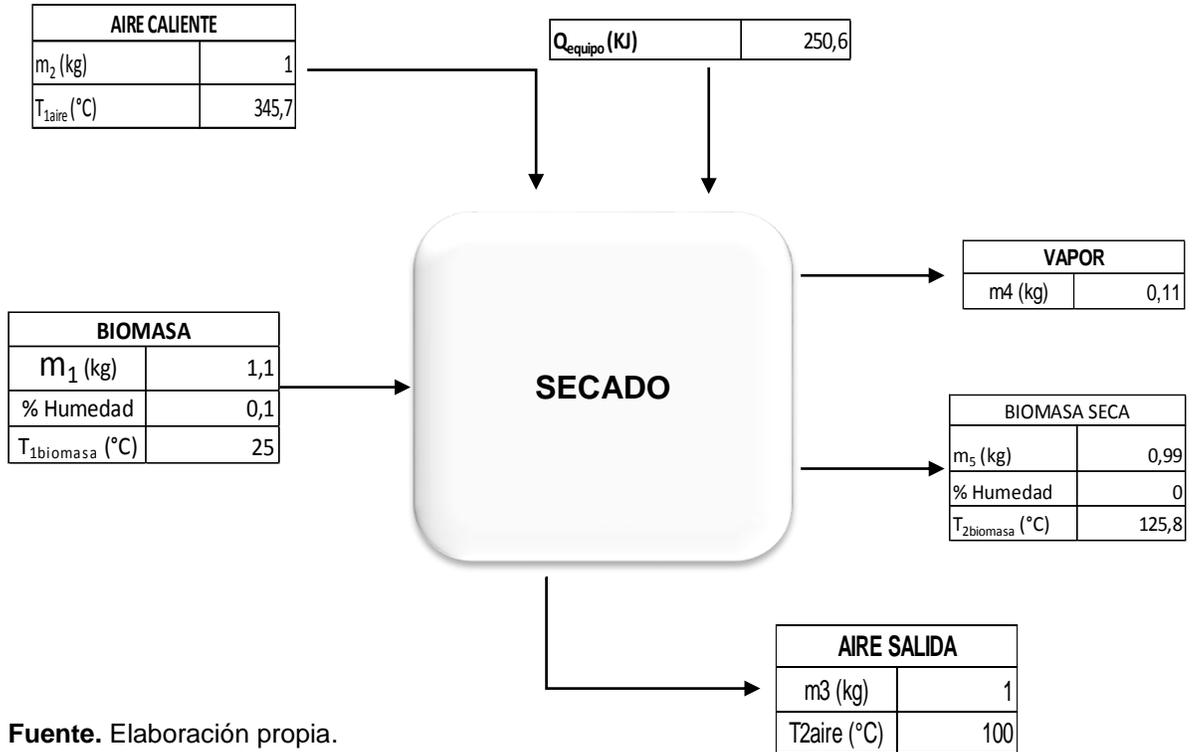
SECADO		PIRÓLISIS	GASIFICACIÓN		ADECUACIÓN DE ALQUITRANES
<i>Biomasa (Kg)</i>	<i>% Humedad</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>% Agente gasificante</i>	<i>Temperatura (°C)</i>
1.1	10	1000	900	30	800

Fuente. Elaboración propia.

Las condiciones presentadas en la **tabla 16** se establecieron de manera independiente para cada equipo y se toman estos valores debido a que muestran los productos generados en cada proceso a su máxima temperatura. La pirólisis se lleva hasta 1000°C para observar el comportamiento de todas las reacciones globales que se presentan durante la descomposición de la biomasa, este tipo de estudio se hace generalmente en análisis de termogravimetría a muestras muy pequeñas de biomasa, y debido a ello se establece este parámetro para analizar en la herramienta computacional los productos generados en el proceso de pirólisis.

4.1.1 Secado.

Figura 13. Esquema del proceso de Secado.



Fuente. Elaboración propia.

En el proceso de secado desarrollado en la herramienta computacional entra 1,1 kg de biomasa con un porcentaje de humedad del 10 % a una temperatura ambiente de 25 °C, según lo planteado en la **tabla 16**. Para realizar el proceso de secado se ingresa una corriente de aire caliente de 1 kg. Con el balance de materia de la biomasa (3-2), el aire caliente (3-3) y el agua (3-4) se obtienen los valores de la masa de las corrientes de salida, obteniendo 0.99, 1 y 0.11, respectivamente. La temperatura final de secado se va a mantener constante.

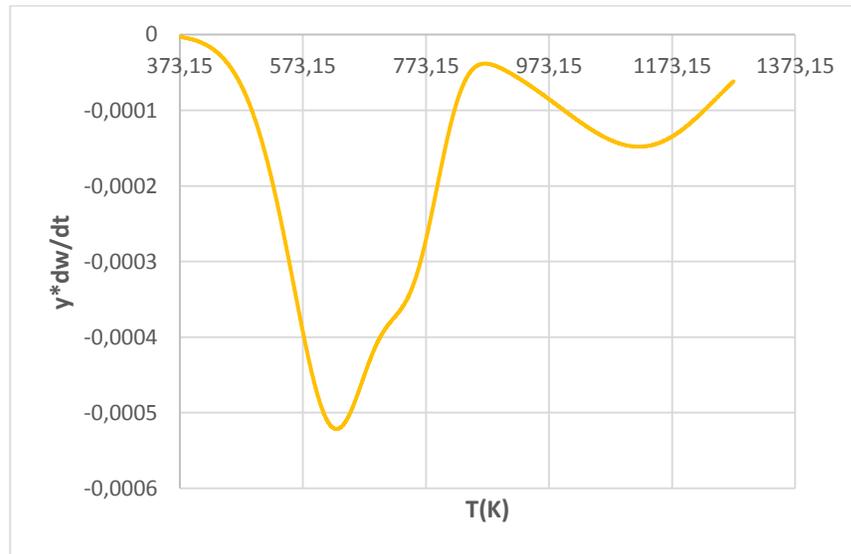
Para realizar la evaporación del contenido de agua presente en la materia prima, se debe conocer la temperatura a la que debe entrar la corriente de aire caliente para secar la biomasa en su totalidad. Para hallar la temperatura de entrada del aire caliente es necesario primero hallar el calor requerido en este equipo con la ecuación 3-5, donde h_{fg} la entalpia de evaporación del agua a una presión de 75 Kpa es de 2278,6 KJ/kg y \dot{m}_{H_2O} corresponde a 0.11 kg, obteniendo q_{equipo} de 250.646 KJ. Una vez conocido el valor del calor requerido, se utiliza la ecuación 3-7 para hallar la temperatura de entrada del aire caliente siendo su valor 345.73 °C, asumiendo que la temperatura final del aire es de 100 °C.

Para hallar la temperatura con la que sale la biomasa del equipo de secado se usa de nuevo la ecuación 14, donde $\dot{m}_{biomasa}$ corresponde a \dot{m}_5 es decir la biomasa seca, y el c_p de madera que se halla con la ecuación 16, obteniendo 125.85°C como temperatura final de la biomasa.

4.1.2 Pirólisis. La biomasa al haberse sometido al pretratamiento de secado, está lista para entrar al proceso de pirólisis que es la segunda etapa del esquema tecnológico trabajada en la herramienta computacional. La biomasa entra con 0,99 kg para su descomposición y generación de tres productos: sólido, líquido y gaseoso.

Para la descomposición de la biomasa se supone una temperatura de 1000 °C, y se debe tener en cuenta su cinética de reacción con el fin de conocer la composición final de los productos generados en esta etapa; para el proceso de pirólisis se sigue el modelo de reacción de tres reacciones independientes y paralelas conocidas como las semiglobales. Cada una de estas reacciones corresponde a los componentes de la biomasa, lignina, celulosa y hemicelulosa.

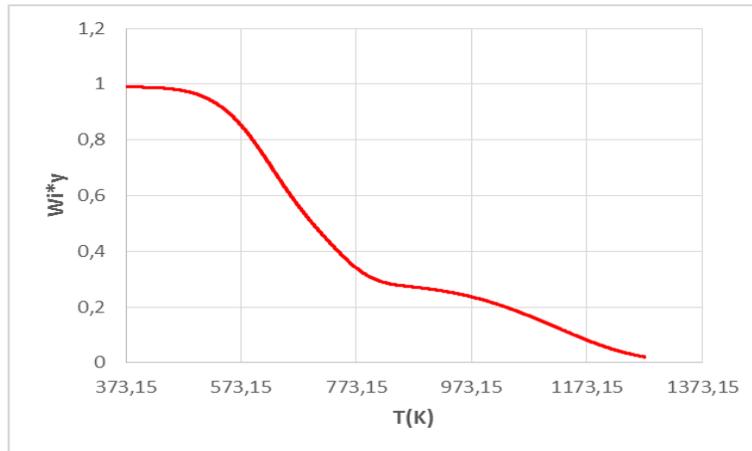
Gráfica 2. Variación de la masa vs Temperatura.



Fuente. Elaboración propia.

A partir de los datos obtenidos de la ecuación de variación de masa (3-8) en la herramienta computacional y utilizando los parámetros cinéticos para cada una de las reacciones se obtiene la **gráfica 2**, que corresponde a la variación de la masa vs temperatura. Se analiza los picos de las curvas de variación de masa donde se identifica la presencia de las tres reacciones globales durante la pirólisis.

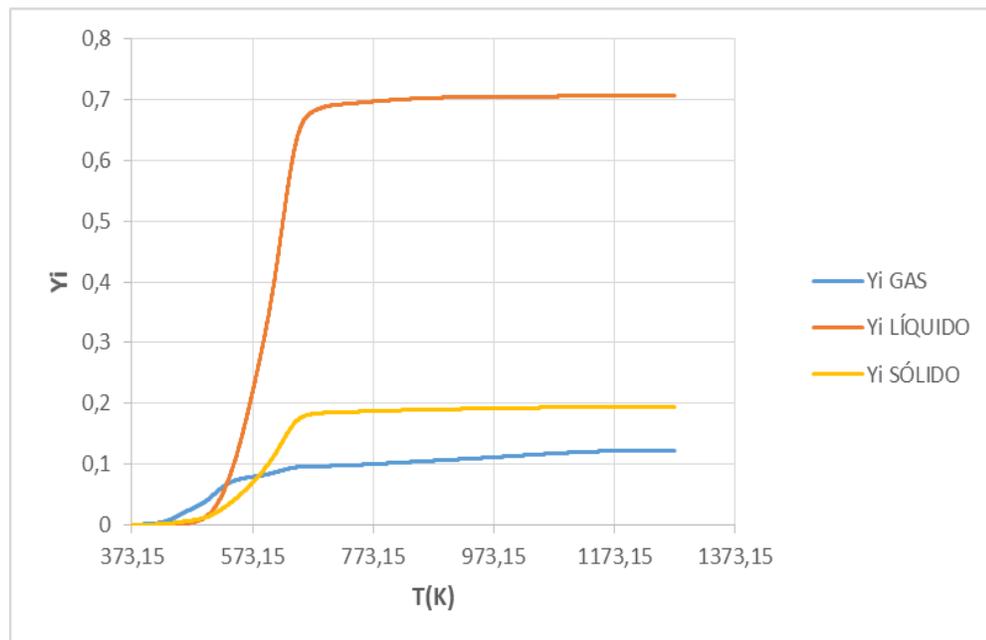
Gráfica 3. Material orgánico vs Temperatura (K).



Fuente. Elaboración propia.

En la **gráfica 3** se muestra la descomposición y degradación térmica de la biomasa de cada uno de sus componentes; no es una línea recta ya que se muestra en sus cambios de pendiente las tres reacciones. En esta gráfica se evidencia la pérdida de masa ya que a partir de esto se da paso a la generación de los productos de carbonizado, líquido y gaseosos, que se muestran a continuación:

Gráfica 4. Composición de los productos de la pirólisis.

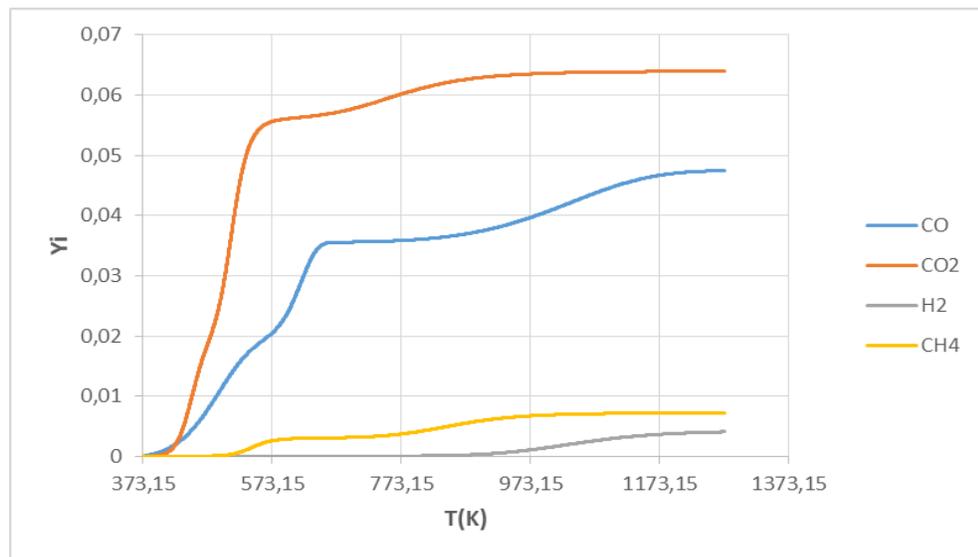


Fuente. Elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos de la **ecuación 19** de Rummer, se observa en la **gráfica 4** la distribución de los tres productos de pirólisis en diferentes proporciones, esto se debe a los parámetros operacionales utilizados y que influyen en su composición, entre estos se encuentran la velocidad de calentamiento, temperatura del proceso, los parámetros cinéticos, la composición de la materia prima y el tiempo de retención. El producto que se obtiene en mayor cantidad es la líquida con una composición de 0.6353, el producto sólido se obtiene con una composición de 0,1697 y el gas se obtiene con una composición de 0.1103.

A partir de los resultados obtenidos de la **ecuación 19**, se determina la composición final de los elementos que componen los productos gaseosos que son CO, CO₂, H₂ Y CH₄.

Gráfica 5. Formación de productos gaseosos.



Fuente. Elaboración propia.

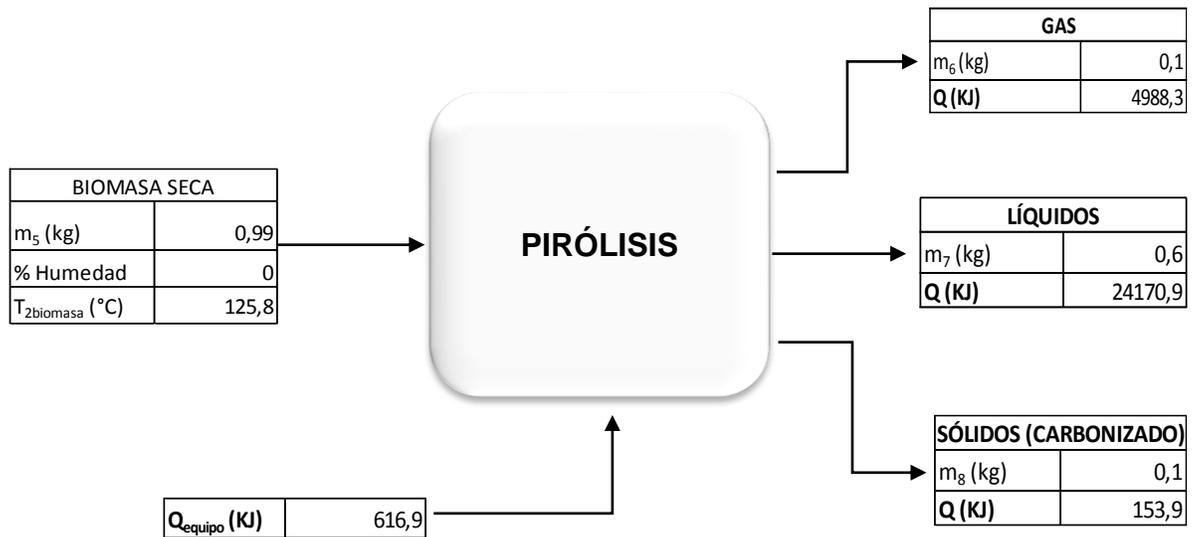
Como se observa en la **gráfica 5** el elemento que se obtiene en mayor proporción es el CO₂, con una composición de 0.06395, seguido del CO, CH₄ y H₂ con unas composiciones de 0.04745, 0,00718 y 0,00404 respectivamente. La suma de sus composiciones debe ser próxima a los productos gaseosos.

Para hallar el calor requerido por el equipo de pirólisis se realiza el balance de energía utilizando la **ecuación 17**, donde $\dot{m}_{biomasa}$ corresponde a 0.99 kg de madera y el Cp se halla por medio de la **ecuación 16**; el calor requerido es de 616, 98 KJ.

Para hallar el calor con el que salen los productos de la pirólisis, se debe hallar primero el Cp de cada uno de los componentes que conforman las corrientes de salida, con la **ecuación 18** teniendo en cuenta los respectivos coeficientes que se

muestran en el **tabla 8**; seguido de esto con la **ecuación 17** se halla el calor para cada uno, donde m corresponde a la masa de los componentes, que se halla multiplicando la fracción de cada uno por la masa de la corriente de productos a la que corresponden. La sumatoria de cada uno de los componentes corresponderá al calor de cada corriente de salida por producto. El calor para la corriente de gas, líquido y sólido son 4988.36, 24170.984 y 153.99 KJ, respectivamente. A continuación se muestra en la **figura 17** las corrientes de entrada y de salida del equipo de pirólisis con sus respectivos balances de masa y energía.

Figura 14. Esquema del proceso de Pirólisis.

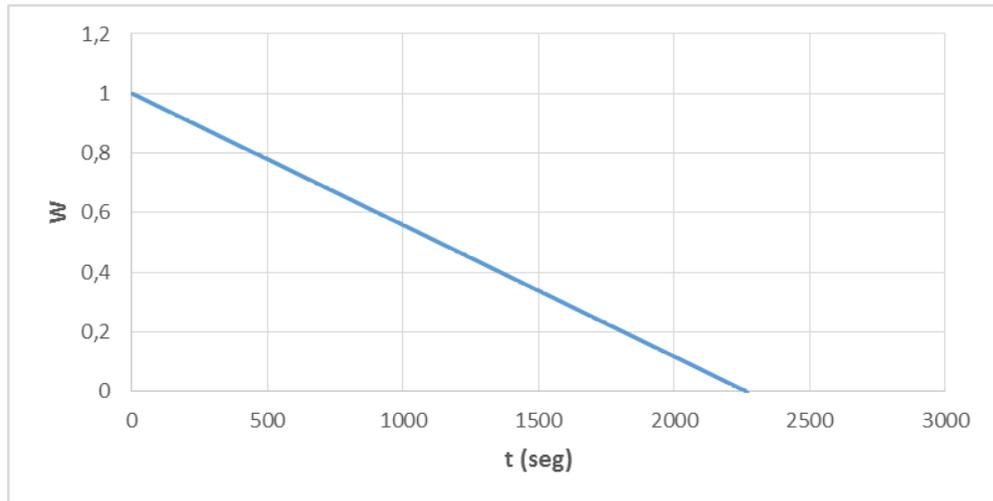


Fuente. Elaboración propia.

4.1.3 Gasificación. La siguiente etapa del esquema tecnológico trabajado en la herramienta computacional corresponde a la gasificación, donde la corriente de carbonizado entra a este bloque para ser sometida a su descomposición y posteriormente a la generación de gas síntesis. Las corrientes de gas y líquido entran al gasificador de manera continua. La corriente líquida no se tendrá en cuenta en el proceso de gasificación, ya que no se tomarán las reacciones secundarias que presenta.

Según el **tabla 16** el proceso de gasificación se llevará a una temperatura de 900 °C y el carbonizado estará en contacto con el agente de reacción que es el agua con una concentración del 30% a una temperatura constante de 1173.15 K. Para hallar la descomposición del carbonizado en esta etapa se hace por medio de la **ecuación 23**. A partir de la **ecuación 23** se obtiene la **gráfica 6**, donde se observa que el tiempo en el que se logra la descomposición total del carbonizado a una temperatura de 900°C es de aproximadamente 2270 segundos.

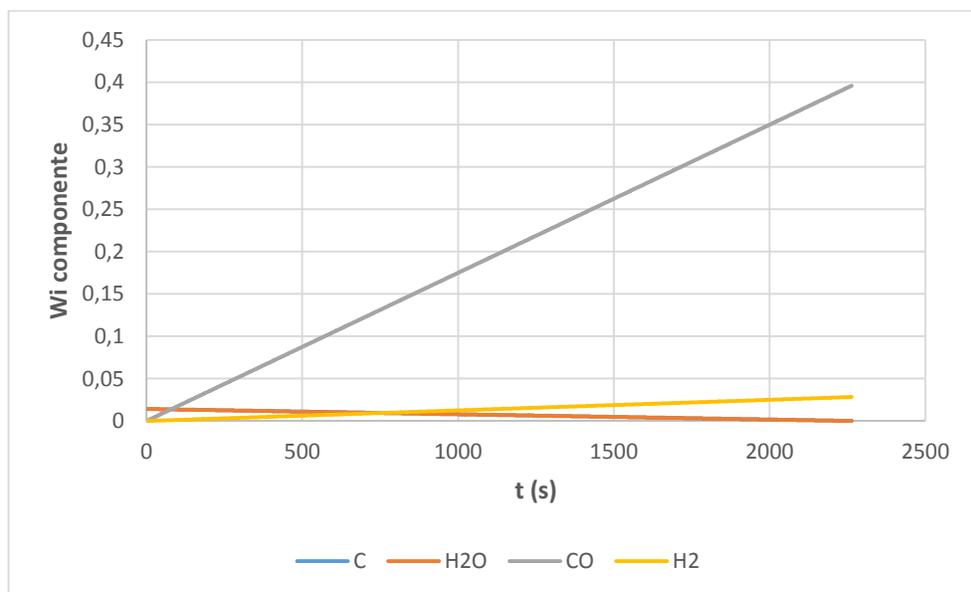
Gráfica 6. Descomposición del Carbonizado.



Fuente. Elaboración propia.

En el proceso de gasificación, para la conversión del combustible sólido en gas se tiene presente la reacción de carbonizado (**ecuación 21**) con el fin de realizar balances químicos y poder obtener las composiciones de lo que reacciona y de lo que se produce.

Gráfica 7. Reacción de Gasificación.

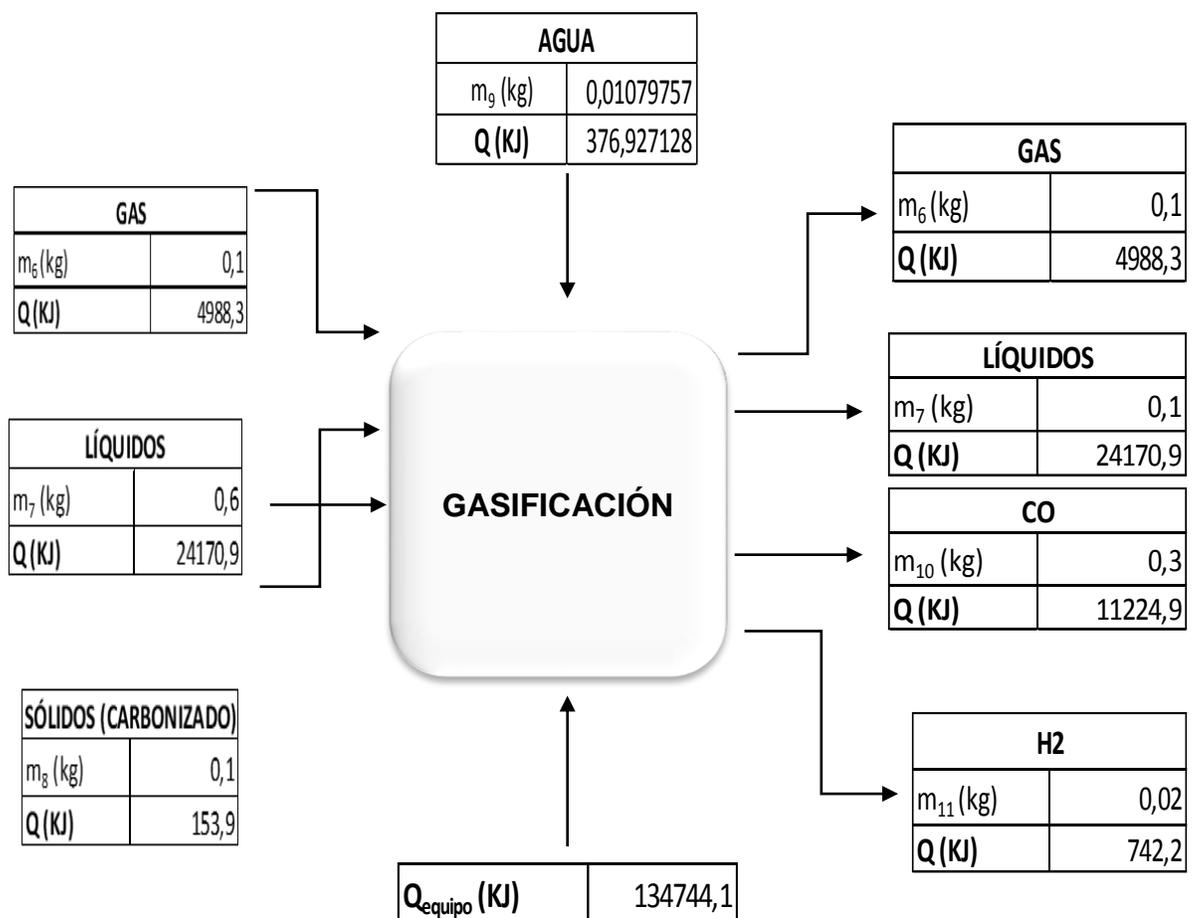


Fuente. Elaboración propia.

En la **gráfica 7** se puede observar que las líneas que corresponden al carbono (C) y agua (H₂O), tienen una pendiente negativa debido a que en la **ecuación 21** estos son los reactantes, es decir los que reaccionan para producir CO y H₂; estos productos, en cambio tienen una pendiente positiva porque son los que se van a formar a medida que los reactantes reaccionan y se consumen. El H₂ se forma con una composición final del 0.02828, y el CO tiene una composición final del 0,3959.

El calor requerido hallado en la herramienta computacional para el proceso de gasificación es de 134744.107 KJ, el cual se halla por medio de la **ecuación 17**, donde la diferencia de temperatura es entre 900 °C que es a la cual se va a llevar el proceso, y 25 °C que es la temperatura ambiente de la biomasa que entra. Para conocer el calor con que salen los productos de la gasificación se aplica la **ecuación 18**.

Figura 15. Esquema del Proceso de Gasificación.



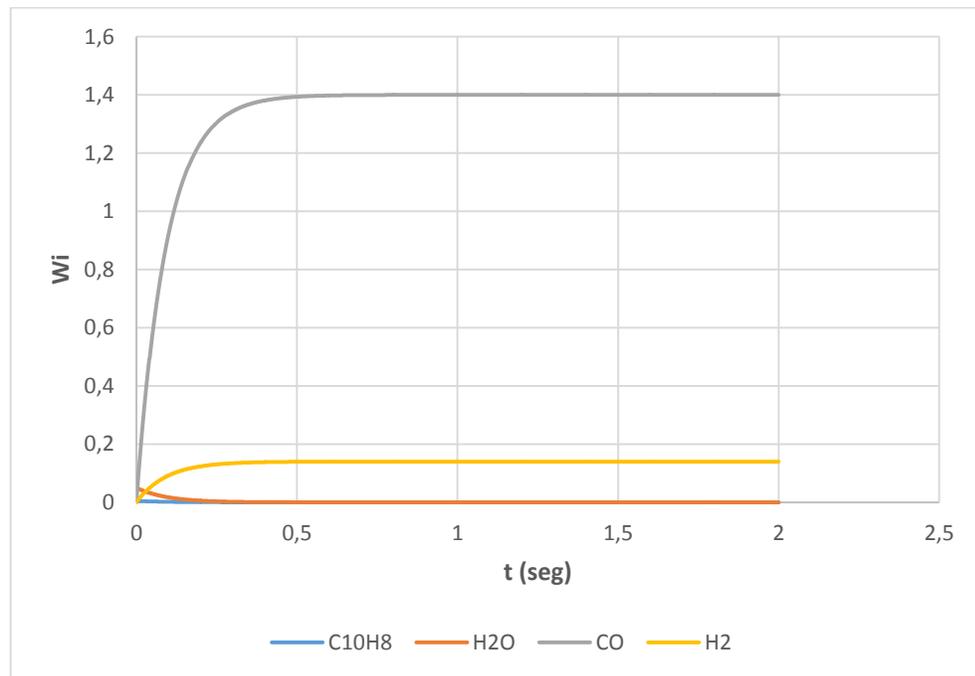
Fuente. Elaboración propia.

4.1.4 Alquitranes. En el proceso de gasificación se obtienen como productos el CO y H₂, esta mezcla de gases se llama gas de síntesis o syngas; éste producto presenta contaminantes como los alquitranes, lo que impiden su uso directo en aplicaciones finales, es por esto que la última etapa es la adecuación de estos contaminantes.

La descomposición de alquitranes se obtiene mediante la **ecuación 26** con los parámetros cinéticos presentes en la **tabla 14**, los cuales se tienen en cuenta para el desarrollo de la herramienta computacional.

Para esta etapa se supone una temperatura de 800°C y se toma como alquitrán el Naftaleno y es importante tener en cuenta su **ecuación 24** para realizar balances químicos y saber la composición de lo que se convierte en gas.

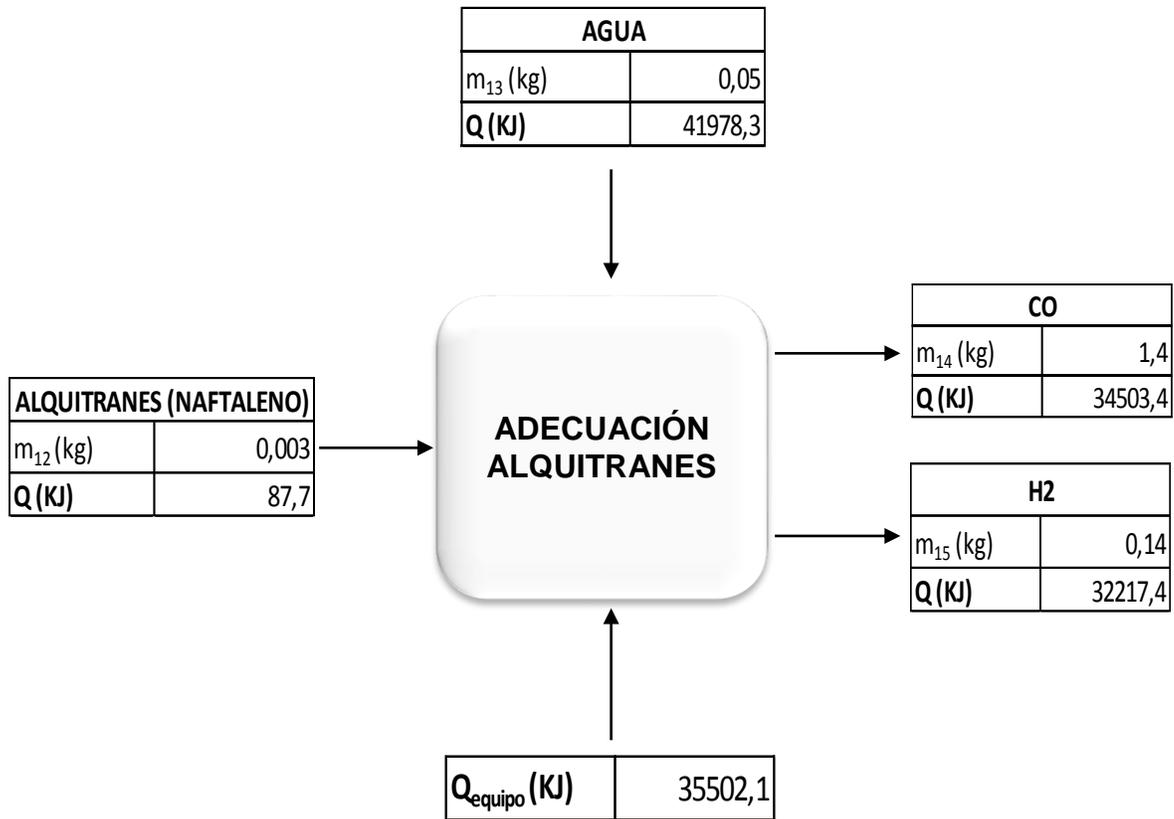
Gráfica 8. Reacción del Naftaleno.



Fuente. Elaboración propia.

A partir de la **ecuación 24** se obtiene la **gráfica 8** donde se puede observar que los productos, es decir el CO y H₂, tienen pendiente positiva porque son los que se van a formar después de realizar la adecuación del Naftaleno. El H₂ se mantiene constante después de 0,839 segundos aproximadamente y el CO se mantiene constante después 0,831 segundos.

Figura 16. Esquema de la Adecuación de Alquitranes.

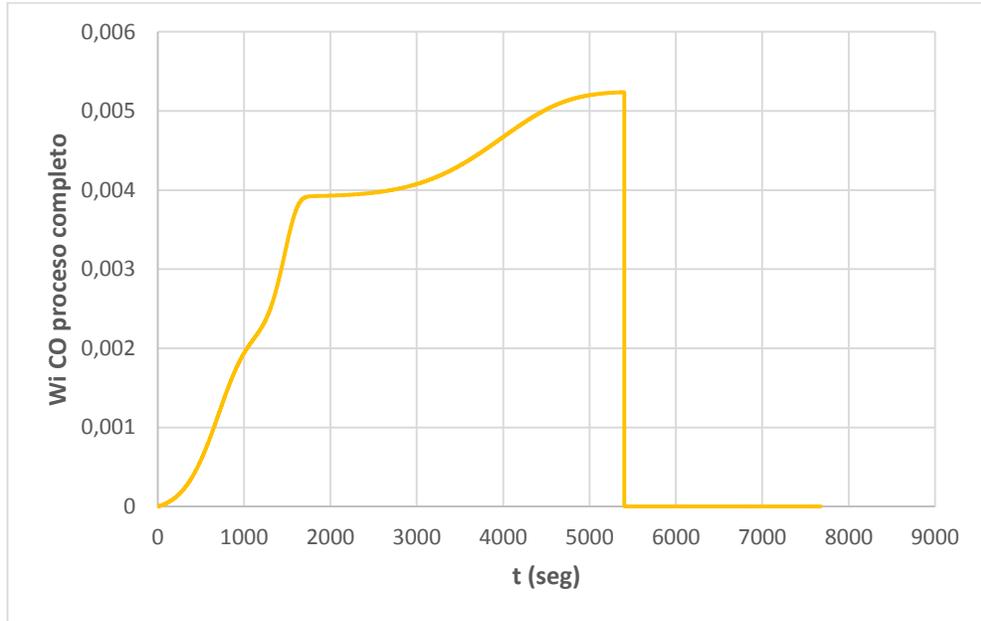


Fuente. Elaboración propia.

En la **figura 16**, podemos observar las corrientes de entrada y salida en la etapa de adecuación de alquitranes, que corresponden a los balances de masa y energía. La corriente de entrada de alquitranes corresponde a la corriente de salida del proceso de pirólisis de los productos líquidos.

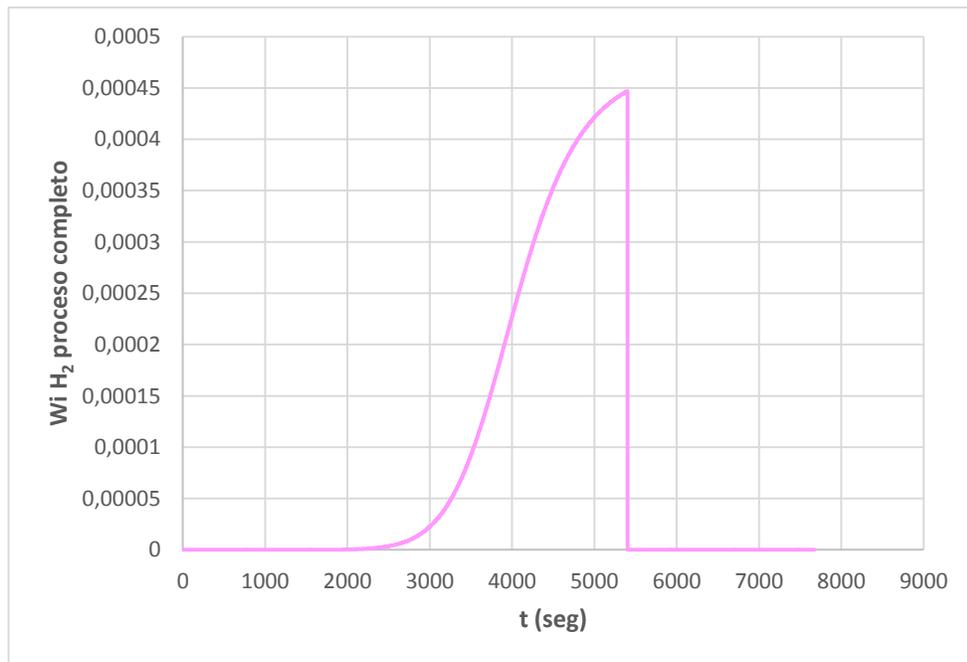
Para hallar el calor con el que entra el Naftaleno en la última etapa se utiliza la **ecuación 27** con sus respectivos coeficientes presentes en el **cuadro 16**, su calor de entrada es de 87.74 KJ. Por último, para hallar el calor en los productos de las corrientes de salida se halla con la **ecuación 17**, hallando su respectivo C_p con la **ecuación 17**. El calor de salida del CO y H₂ son de 34503.45 KJ y 32217.42 KJ, respectivamente.

Gráfica 9. Formación del CO.



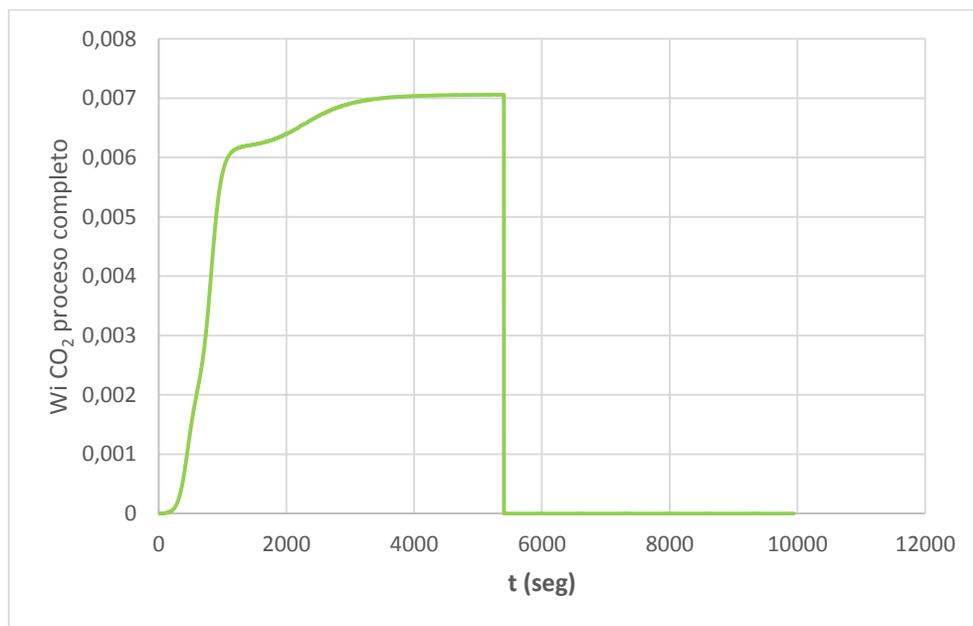
Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 10. Formación del H₂.



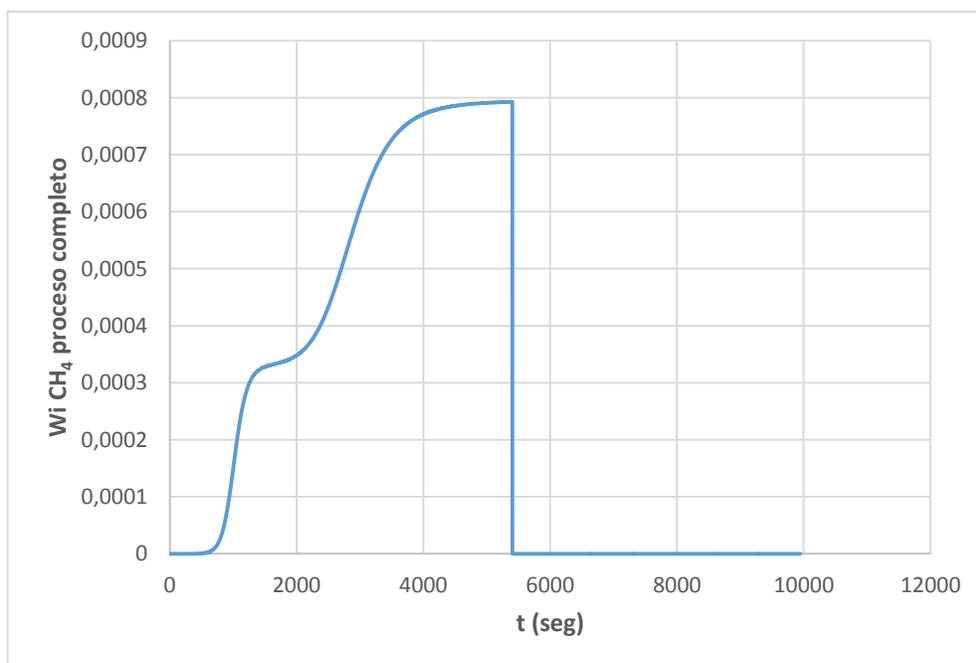
Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 11. Formación del CO₂.



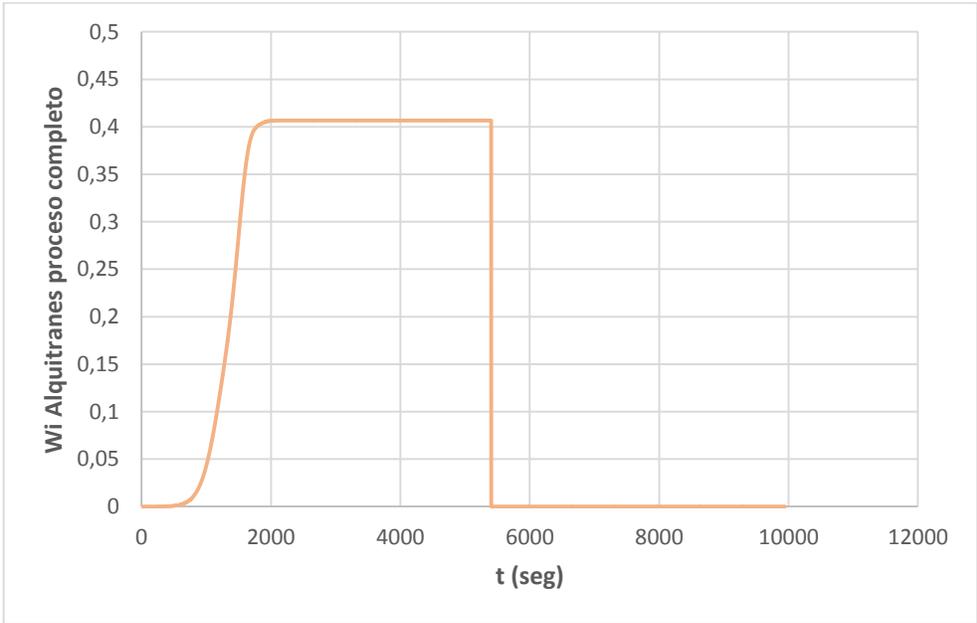
Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 12. Formación del CH₄.



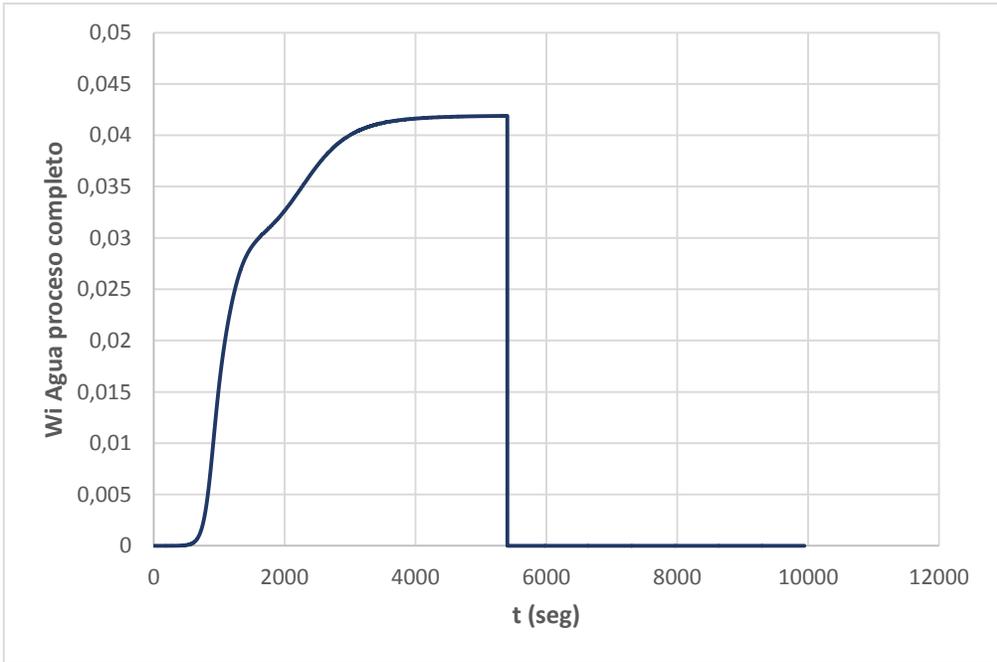
Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 13. Formación de Alquitranes.



Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 14. Formación del Agua.



Fuente. Elaboración propia.

A partir de la **ecuación 26** se generan las gráficas **9, 10, 11, 12, 13, 14** y se observa la formación del CO, H₂, CO₂, CH₄, alquitranes y agua, respectivamente, a lo largo de todo el proceso durante aproximadamente 5400 segundos: pirólisis, gasificación y adecuación. Cada uno de estos elementos empieza desde su composición cero hasta llegar a la última etapa con su composición final.

4.2 CASOS DE ESTUDIO

En la segunda parte del capítulo, se realiza una variación de condiciones para analizar 8 casos de estudio, en los cuales se varían condiciones de operación para los equipos de secado, pirólisis, gasificación y adecuación de alquitranes, con el objetivo de realizar una comparación de resultados obtenidos para la cantidad de gas de síntesis resultante y la cantidad de energía necesaria en cada caso. Se establece como caso de referencia y comparación, el estudiado anteriormente denominado como **caso 1 BASE**.

Tabla 17. Variación de parámetros para cada uno de los casos estudiados.

CASO	SECADO		PIRÓLISIS	GASIFICACIÓN		ADECUACIÓN DE ALQUITRANES
	Biomasa (Kg)	% Humedad	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	% Agente gasificante	Temperatura (°C)
¹ BASE	1.1	10	1000	900	30	800
2	1.428	30	1000	900	30	800
3	1.99	50	1000	900	30	800
4	1.1	10	550	900	30	800
5	1.1	10	300	900	30	800
6	1.1	10	1000	700	30	800
7	1.1	10	1000	900	60	800
8	1.1	10	1000	900	30	700
9	1.1	10	1000	900	30	900

Fuente. Elaboración propia.

En la **tabla 17** se presenta la variación de parámetros para cada uno de los casos estudiados, realizando dos variaciones para cada uno de los equipos analizados. Además, se muestran las condiciones en las cuales se encuentra el **caso 1 BASE**, el cual se establece como referente de estudio y comparación. Para el **caso 1** el proceso de pirólisis permanece a una temperatura de 1000°C y a una velocidad de calentamiento de 10K/min; el proceso de gasificación se mantiene a una temperatura constante de 900°C y un porcentaje del 30% para el agente gasificante; finalmente la adecuación de alquitranes se mantiene una temperatura constante de 800°C.

A continuación se presenta los análisis de resultados de cada uno de los casos estudiados, realizando una comparación entre el caso 1 y los dos casos de variación de parámetros correspondientes a cada equipo.

4.2.1 Variación de humedad.

Tabla 18. Resultados obtenidos para los casos 2 y 3.

PROCESO	VARIACIÓN		SECADO	PIRÓLISIS	GASIFICACIÓN	ADECUACIÓN ALQUITRANES	PROCESO Q_{total}	GAS DE SÍNTESIS
CASO	Biomasa (Kg)	%Humedad	Q_{equipo} (KJ)					m (Kg)
1 (BASE)	1,1	10	250,6	617,0	134744,1	35502,1	171113,8	2,1
2	1,43	30	977,5	617,0	134744,1	35502,1	171840,7	2,1
3	1,99	50	2278,6	617,0	134744,1	35502,1	173141,8	2,1

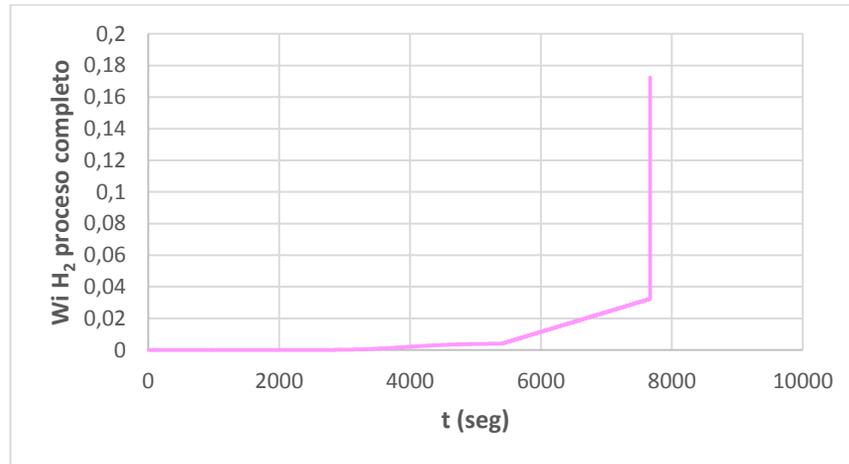
Fuente. Elaboración propia.

Para la variación de humedad se establece una condición en la cual, la cantidad de biomasa seca que sale del proceso de secado debe ser siempre la misma, para ello se debe tener en cuenta una relación de la humedad respecto a la salida de biomasa seca deseada, definiendo la cantidad exacta que debe entrar para el **caso 2 y 3** para que al salir de este proceso se tenga aproximadamente 0,99 Kg de biomasa seca. También, se establece una temperatura final constante para la biomasa seca de 125,85°C.

En el **caso 2**, se realiza la variación de la humedad de la biomasa a 30% y la cantidad de materia que entra en la misma es de 1,428 Kg, y en el **caso 3** se varía la humedad de la biomasa a 50% y su cantidad inicial es de 1,99 Kg. Debido a las condiciones establecidas anteriormente, los resultados en el equipo de secado no interfieren en los resultados obtenidos para los siguientes equipos especificados en el esquema tecnológico. Según se puede observar en la **tabla 18** se requiere de una mayor energía para la primera etapa en el **caso 2 y 3**, comparado con el **caso 1 BASE**, esto debido a que la biomasa entra con mayor contenido de humedad y la energía necesaria debe ser mayor para obtener una biomasa completamente seca.

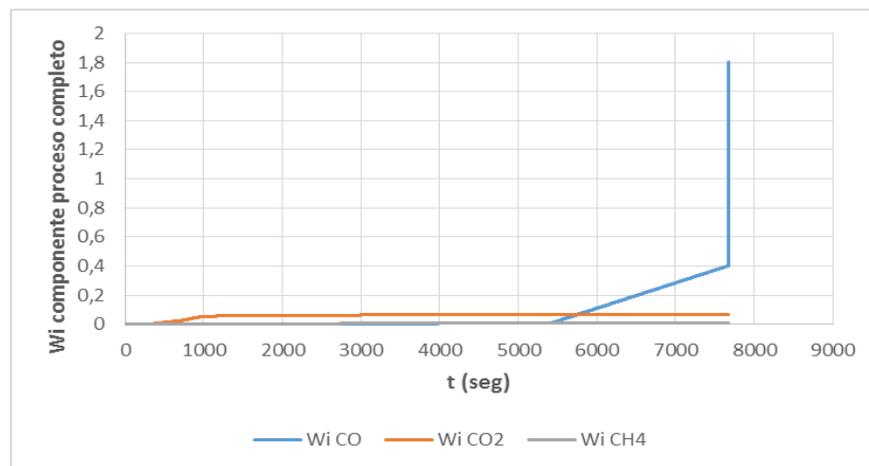
Debido a que la cantidad de biomasa seca que sale del proceso de secado en el **caso 2 y 3** es igual a la cantidad del **caso 1 BASE**, los resultados finales obtenidos de gas de síntesis corresponden a 2,1 kg. El aumento del resultado obtenido para el gas de síntesis respecto a la cantidad de material orgánico inicial, se debe a la cantidad de agua que se agrega tanto en el proceso gasificación como en el equipo de adecuación de alquitranes.

Gráfica 15. Cantidad de H₂ producida respecto al tiempo.



Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 16. Cantidad de CO, CO₂ y CH₄, producida respecto al tiempo.



Fuente. Elaboración propia.

En la **gráfica 15 y 16**, se puede observar el comportamiento del proceso de pirólisis, gasificación y adecuación de alquitranes con respecto a la masa del CO, CO₂, CH₄ y H₂ producidos, los cuales corresponden a la composición de gas de síntesis. Se puede observar, que la cantidad de masa producida no depende de la energía requerida para cada equipo del proceso, esto se debe a que los productos obtenidos en el proceso de pirólisis dependen de la temperatura a la cual este proceso opera y de la cantidad de biomasa seca que entra al proceso, condiciones establecidas como constantes para el correspondiente análisis de casos de estudio.

4.2.2 Variación de la temperatura de pirólisis.

Tabla 19. Resultados obtenidos para los casos 4 y 5.

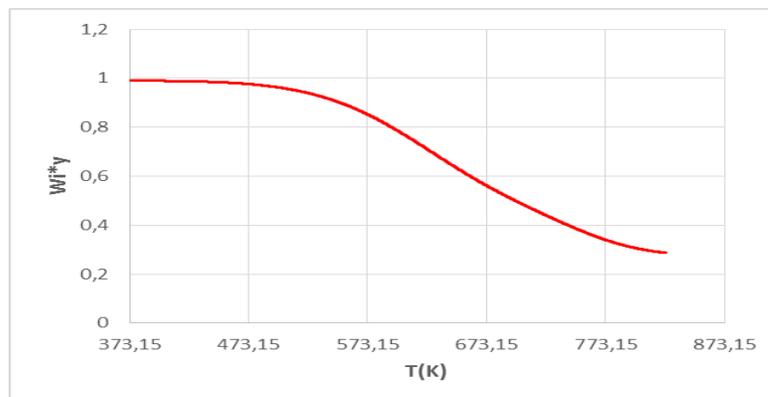
PROCESO	VARIACIÓN	SECADO	PIRÓLISIS	GASIFICACIÓN	ADECUACIÓN ALQUITRANES	PROCESO Q_{total}	GAS DE SÍNTESIS m (Kg)
CASO	Temperatura	Q_{equipo} (KJ)					
1 (BASE)	1000	250,6	617,0	134744,1	35502,1	171113,8	2,1
4	550	250,6	299,4	64064,2	25870,8	90485,0	2,1
5	300	250,6	122,9	84969,8	14619,5	99962,9	1,8

Fuente. Elaboración propia.

Los **casos 4 y 5** corresponden a variaciones en el proceso de pirólisis, la variable modificada en este caso es la temperatura con un requerimiento de 550°C y 300°C respectivamente, manteniendo las condiciones de operación del caso referente (**caso 1**).

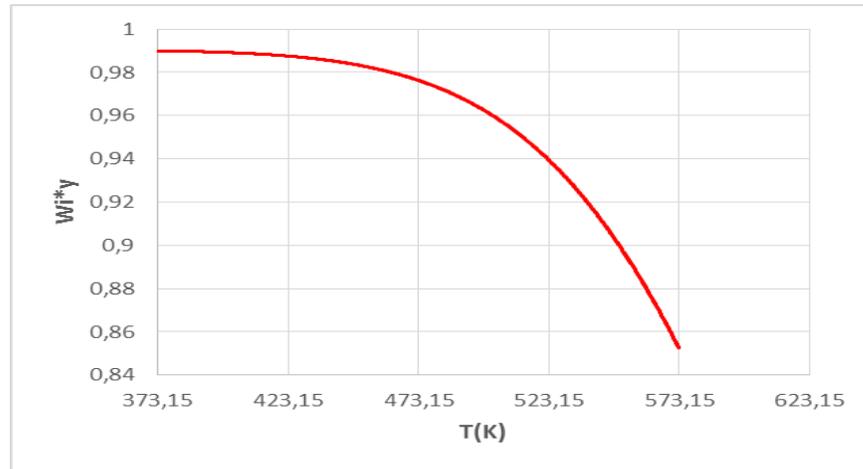
Para el **caso** de estudio **4** el requerimiento energético es menor comparado con el **caso 1**, debido a que la temperatura en la etapa de pirólisis disminuye en relación al caso base, y de igual manera ocurre para el **caso 5**, siendo necesaria una energía de 299,4 kJ y 122,9 kJ respectivamente, para llevar a cabo el proceso en la segunda etapa. El proceso de pirólisis depende directamente de la temperatura y para obtener el resultado de $Q_{pirólisis}$ se tiene en cuenta el $\Delta T_{proceso}$, el cual es menor a medida que disminuye la temperatura final, siendo directamente proporcional a la disminución del calor requerido.

Gráfica 17. Descomposición del material orgánico respecto a la temperatura para el caso 4.



Fuente. Elaboración propia.

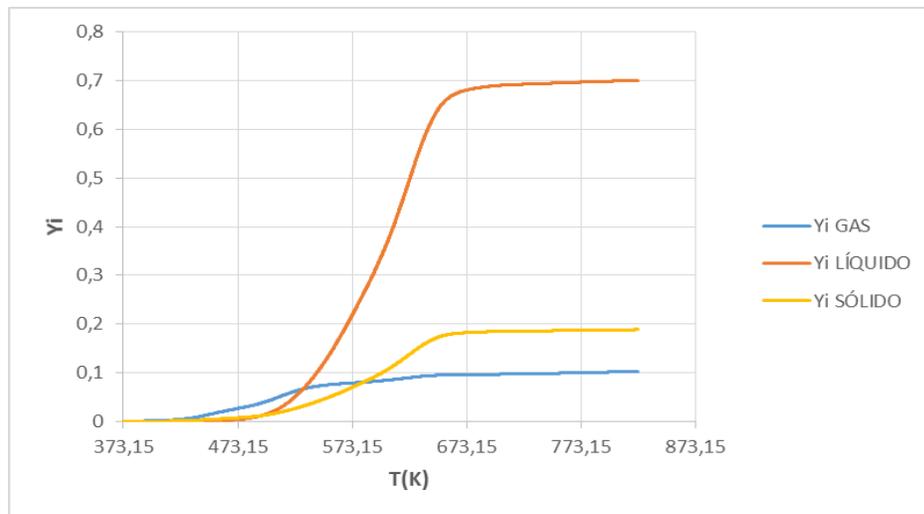
Gráfica 18. Descomposición del material orgánico respecto a la temperatura para el **caso 5**.



Fuente. Elaboración propia.

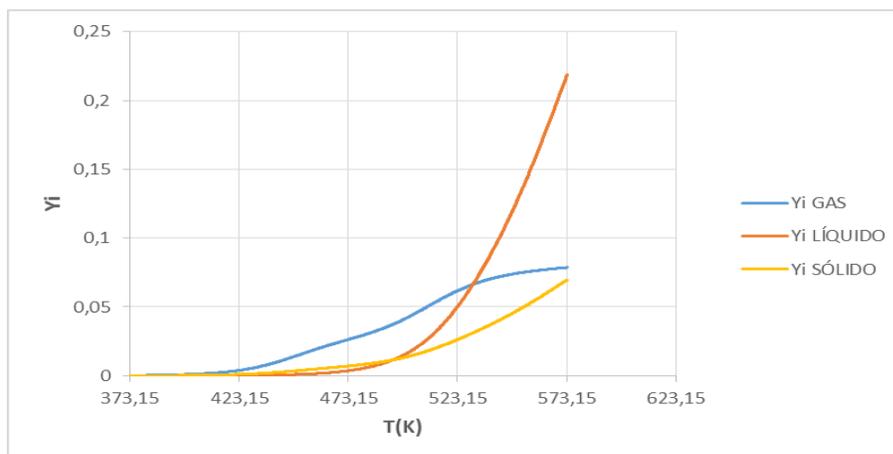
En las **gráficas 17 y 18**, se puede observar la descomposición del material orgánico en el proceso de pirólisis. En el **caso 5 (gráfica 18)** se puede observar una descomposición directa debido a que se opera con la temperatura mínima a trabajar en un proceso de pirólisis, mientras que en la **gráfica 17**, se puede observar que ocurren más reacciones para alcanzar una descomposición total debido al aumento de temperatura, esto de acuerdo a la cinética de reacción para el modelo de tres reacciones paralelas independientes visto anteriormente.

Gráfica 19. Productos generados en el proceso de pirólisis para el **caso 4**.



Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 20. Productos generados en el proceso de pirólisis para el **caso 5**.



Fuente. Elaboración propia.

En las **gráficas 19 y 20**, se puede observar el comportamiento de los productos generados en el proceso de pirólisis. Para el **caso 4 (gráfica 19)**, se observa una mayor producción para el gas, líquido y sólidos generados, mientras que en la **gráfica 20** para el **caso 5**, se observa una disminución significativa en la producción de los mismos. Esto ocurre debido a que al disminuir la temperatura del proceso el tiempo de operación del mismo disminuye, provocando que el material orgánico no se descomponga totalmente y esto influye en la cantidad final obtenida de gas de síntesis, siendo 2,1 kg y 1,8 kg los obtenidos respectivamente, disminuyendo en el último caso 0,3 kg del gas de síntesis generado a las condiciones del **caso 1 BASE**.

4.2.3 Variación de la temperatura y agente gasificante en el proceso de gasificación.

Tabla 20. Resultados obtenidos para los casos 6 y 7.

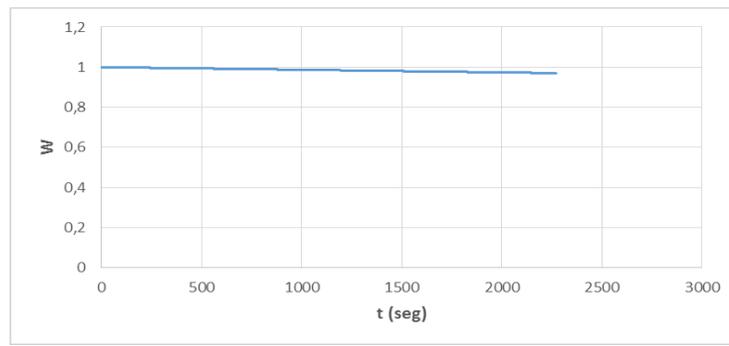
PROCESO	VARIACIÓN		SECADO	PIRÓLISIS	GASIFICACIÓN	ADECUACIÓN ALQUITRANES	PROCESO Q_{total}	GAS DE SÍNTESIS m (Kg)
CASO	Temperatura (°C)	%Agente gasificante	Q_{equipo} (KJ)					
1 (BASE)	900	30	250,6	617	134744,1	35502,1	171113,8	2,1
6	700	30	250,6	617	103945,5	35502,1	140315,2	1,7
7	900	60	250,6	617	134744,1	35502,1	171113,8	2,3

Fuente. Elaboración propia.

En el **caso 6 y 7** se varía la temperatura en el equipo de gasificación. Para el **caso 6** se analiza el proceso a una temperatura de 700°C y 30% de contenido de agua como agente gasificante; y para el **caso 7** se presenta una variación de la

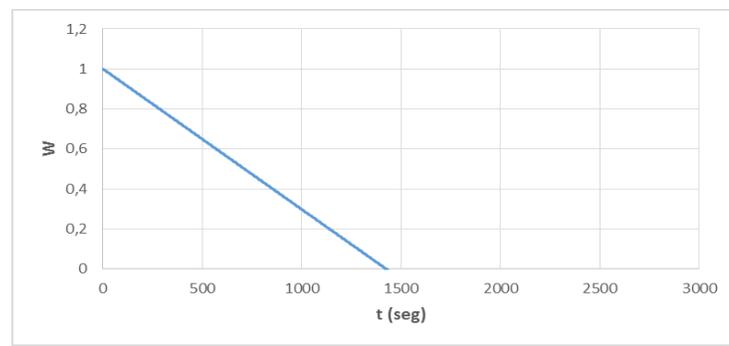
temperatura a 900°C y se especifica el contenido de agua en 60%. En ambos casos, se observan cambios en los resultados tanto de energía como en la cantidad de masa, solo para el proceso de gasificación, debido a que la adecuación de alquitranes no depende de los resultados de esta etapa, y los datos para los equipos anteriores se mantienen iguales a los obtenidos en el **caso 1**. Como se puede observar en el **tabla 6** la energía total requerida en el proceso para el **caso 6** es de 103945,5 kJ y para el **caso 7** es de 134744,1 kJ, obteniendo para el último caso la misma cantidad de energía que en el **caso 1 BASE**. La diferencia en la energía requerida se relaciona directamente con la cantidad de agente gasificante utilizado y con el aumento o disminución de temperatura, siendo esta variable la que predomina sobre el efecto del agente utilizado. Así mismo, a mayor cantidad de agente gasificante más rápida será la conversión de la reacción de carbonizados a gas y así mismo aumentará el requerimiento de energía.

Gráfica 21. Descomposición del carbonizado en el proceso de gasificación para el **caso 6**.



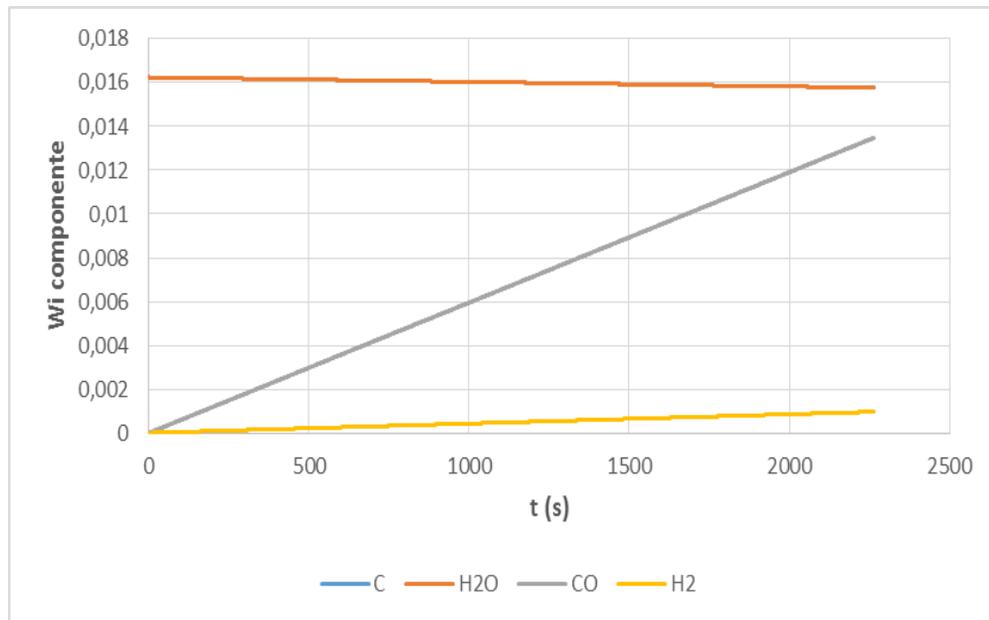
Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 22. Descomposición del carbonizado en el proceso de gasificación para el **caso 7**.



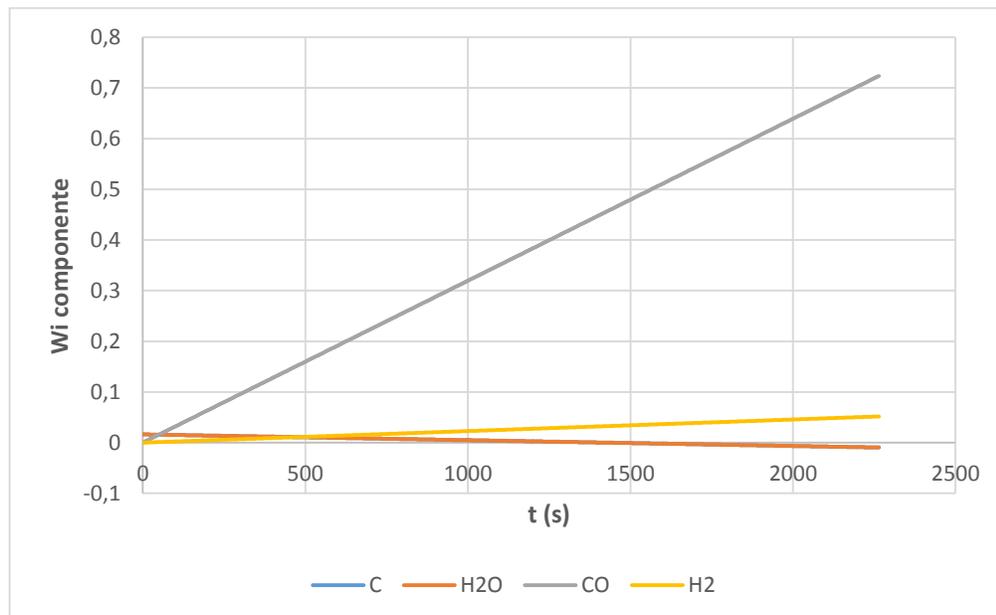
Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 23. Descomposición de reactantes y producción de productos en el proceso de gasificación **caso 6**.



Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 24. Descomposición de reactantes y producción de productos en el proceso de gasificación **caso 7**.



Fuente. Elaboración propia.

Para la gasificación, la cantidad de producción de CO y H₂, es la que define cuanta energía se requiere en el proceso. En las **gráficas 21 y 22** se analiza cual es el comportamiento de descomposición del carbonizado para el **caso 6 y 7** respetivamente. Para el **caso 6**, se puede observar que el carbonizado no se descompone en su totalidad, debido a que al operar el equipo a una temperatura de 700°C y 30% de contenido de agua, se necesita de mayor tiempo para descomponerse en su totalidad y tener la capacidad de producir una mayor cantidad de CO y H₂, lo que sí se puede observar en la **gráfica 22** al descomponerse totalmente el carbonizado en las condiciones establecidas. Para las **gráficas 23 y 24**, se observa que para el **caso 6 (gráfica 23)** al no obtener una descomposición completa del carbonizado no es posible en ese tiempo obtener la misma cantidad de productos que en el **caso 7 (gráfica 24)**. Es decir, la gasificación, depende de la temperatura, el agente gasificante y del tiempo en el cual se lleva a cabo la conversión.

4.2.4 Variación de la temperatura en la de adecuación de alquitranes.

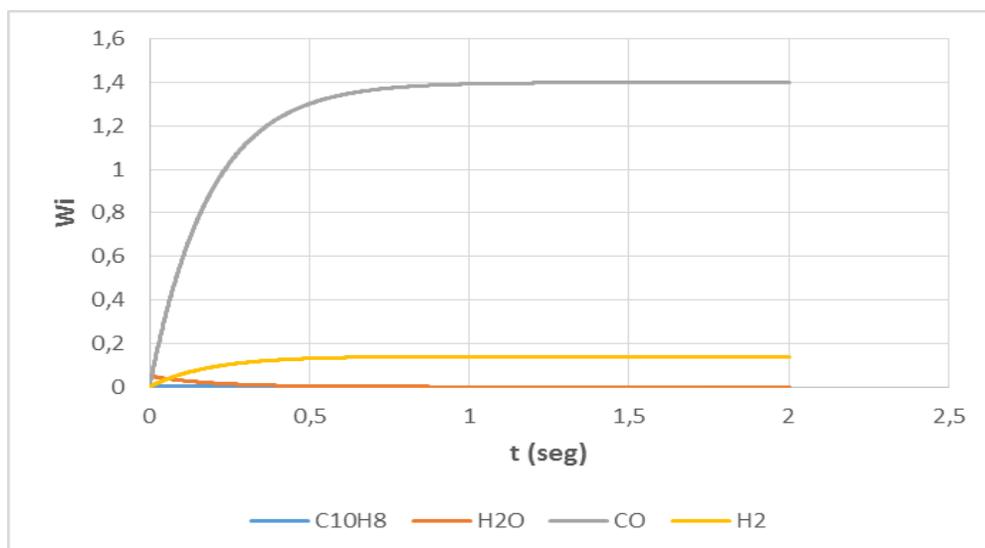
Tabla 21. Resultados obtenidos para los casos 8 y 9.

PROCESO	VARIACIÓN	SECADO	PIRÓLISIS	GASIFICACIÓN	ADECUACIÓN ALQUITRANES	PROCESO Q _{total}	GAS DE SÍNTESIS m (Kg)
CASO	Temperatura (°C)	Q _{equipo} (KJ)					
1 (BASE)	800	250,6	617,0	134744,1	35502,1	171113,8	2,1
8	700	250,6	617,0	134744,1	30921,2	166532,9	2,1
9	900	250,6	617,0	134744,1	40083,0	175694,8	2,1

Fuente. Elaboración propia.

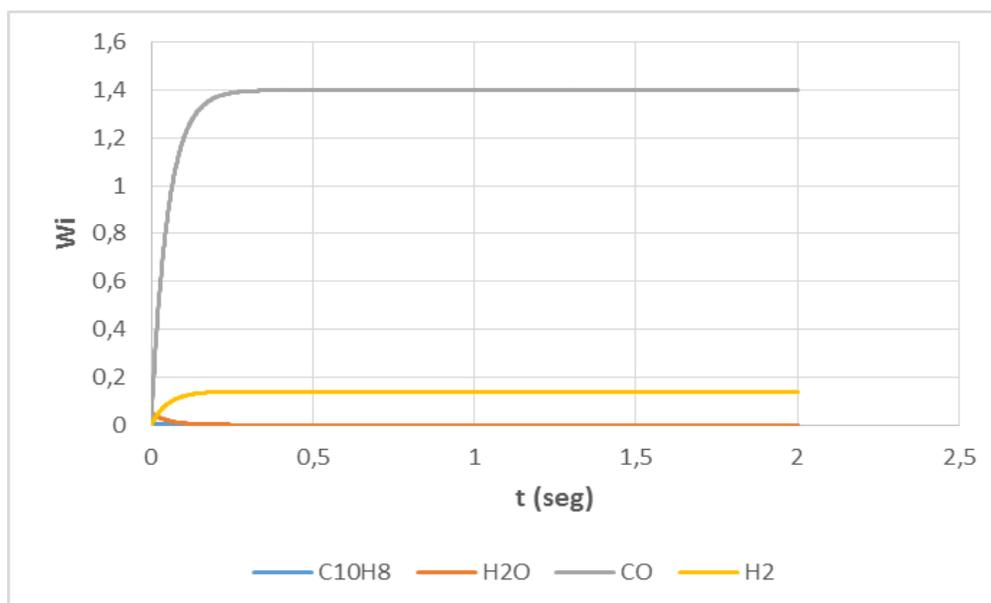
Para el **caso 8 y 9** se realiza una variación a la temperatura en el proceso de adecuación de alquitranes correspondientes a 700 °C y 900 °C, respectivamente. Debido a que la adecuación de reformado es la última etapa del esquema propuesto, las condiciones, parámetros y resultados del **caso 1** se mantienen constantes en los demás equipos, obteniendo solo una pequeña variación en la composición de CO y H₂ en esta etapa.

Gráfica 25. Producción de CO y H₂ en la adecuación de alquitranes para el **caso 8**.



Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 26. Producción de CO y H₂ en la adecuación de alquitranes para el **caso 9**.



Fuente. Elaboración propia.

Como se puede observar en las **gráficas 25 y 26**, para una adecuación de alquitranes con temperatura constante de 700°C se necesita de un tiempo mayor para producir el gas, mientras que a mayor temperatura el tiempo de reacción para la conversión es mucho menor.

Para el **caso 8 y 9**, el aumento de los productos CO y H₂ es cercano a los resultados obtenido para el **caso 1**, por esta razón la cantidad de gas de síntesis obtenido en estos procesos son iguales a los presentados en el **caso base**, como se puede observar en la **tabla 7**. A diferencia de esto, se puede analizar en la **tabla 7** que la cantidad de energía para el **caso 9** aumenta con respecto al **caso 1**, siendo 30921,2 kJ la energía requerida para el **caso 8** y 40083,0 kJ para el **caso 9**. Esto se debe a que a una mayor temperatura en el proceso, la reacción es más rápida, mientras que a una menor temperatura se necesita de un tiempo mayor para llegar a una conversión total de los productos. Así mismo, la energía requerida para el **caso 8** es menor debido a que el equipo produce menos CO y H₂.

Tabla 22. Estudio de la energía requerida para cada proceso.

PROCESO	SECADO	PIRÓLISIS	GASIFICACIÓN	ADECUACIÓN ALQUITRANES	PROCESO Q _{total}
CASO	Q _{equipo} (KJ)				
1 (BASE)	250,6	617,0	134744,1	35502,1	171113,8
2	977,5	617,0	134744,1	35502,1	171840,7
3	2278,6	617,0	134744,1	35502,1	173141,8
4	250,6	299,4	64064,2	25870,8	90485,0
5	250,6	122,9	84969,8	14619,5	99962,9
6	250,6	617,0	103945,5	35502,1	140315,2
7	250,6	617,0	134744,1	35502,1	171113,8
8	250,6	617,0	134744,1	30921,2	166532,9
9	250,6	617,0	134744,1	40083,0	175694,8

Fuente. Elaboración propia.

Finalmente, se presenta el **cuadro 22** donde se realiza una recopilación de los datos de energía necesaria obtenidos en cada equipo y la energía total requerida en el proceso. Así mismo, se muestra el **cuadro 23**, con la cantidad de masa producida de gas de síntesis y su respectiva composición a lo largo del proceso en cada caso.

Tabla 23. Producción de masa en cada uno de los procesos.

PROCESO	SECADO	PIRÓLISIS							GASIFICACIÓN	ADECUACIÓN ALQUITRANES	GAS DE SÍNTESIS				
CASO	m (kg)														m (Kg)
	BM Base seca	Gas				Líquido		Sólido	Σ	CO	H ₂	CO	H ₂		
		CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	H ₂ O	Alquitranes	Carbonizado							
1 (BASE)	0,99	0,05	0,06	0,004	0,01	0,07	0,64	0,16	0,99	0,40	0,03	1,40	0,14	2,1	
2	1,001	0,05	0,06	0,004	0,01	0,07	0,64	0,17	1,00100	0,40	0,03	1,40	0,14	2,1	
3	1	0,05	0,06	0,004	0,01	0,07	0,64	0,17	1,00000	0,40	0,03	1,40	0,14	2,1	
4	0,99	0,04	0,06	0,0001	0,004	0,06	0,64	0,19	0,99000	0,45	0,03	1,40	0,14	2,1	
5	0,99	0,02	0,06	0,0000	0,003	0,04	0,18	0,70	0,99000	1,62	0,12	0,0007	0,0001	1,8	
6	0,99	0,05	0,06	0,004	0,01	0,07	0,63	0,17	0,99000	0,01	0,001	1,40	0,14	1,7	
7	0,99	0,05	0,06	0,004	0,01	0,07	0,63	0,17	0,99000	0,63	0,04	1,40	0,14	2,3	
8	0,99	0,05	0,06	0,004	0,01	0,07	0,63	0,17	0,99000	0,40	0,03	1,40	0,14	2,1	
9	0,99	0,05	0,06	0,004	0,01	0,07	0,63	0,17	0,99000	0,40	0,03	1,40	0,14	2,1	

Fuente. Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de datos, se puede concluir que la herramienta computacional puede ser utilizada para el diseño a nivel energético y producción de masa del gas de síntesis de los equipos utilizados en el proceso de gasificación.

De igual manera, se realiza una recopilación de los datos obtenidos durante las variaciones de parámetros y se puede observar en la **tabla 23** que el caso con mayor producción de gas de síntesis corresponde al **caso 7**, el cual se lleva a cabo a las condiciones del **caso 1 BASE**, con la diferencia que se utiliza un porcentaje mayor de agente gasificante. Como se presenta en la **tabla 23**, el **caso 5** es el proceso en el que se produce menor cantidad de gas de síntesis, debido a que al disminuir la temperatura final en el proceso de pirólisis se ve una notable disminución en la producción de cada uno de los componentes. También se puede observar en la **tabla 22** que el **caso 4** es el proceso que menos requiere de energía a nivel global, debido a la disminución de temperatura en el proceso de pirólisis, influyendo en la disminución del calor requerido para las siguientes etapas y los correspondientes productos generados. Finalmente, de acuerdo a lo presentado en la **tabla 22**, el aumento de la temperatura en el equipo de adecuación de alquitranes para el **caso 8** requiere de mayor energía para realizar la conversión a gas en un tiempo determinado.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló un esquema tecnológico, donde se hacen balances de masa y energía en cada uno de los equipos involucrados en el proceso de gasificación con el fin de obtener gas síntesis, además, se evalúan las condiciones de operación para la transformación de diferentes tipos de biomasa como la cascarilla de café, madera y caucho. El secado como pre-tratamiento fue de gran importancia, ya que al retirar la humedad de la biomasa su poder calorífico aumenta haciendo que la biomasa se aproveche al máximo y tenga una mayor eficiencia en su transformación. Se considera que entre más sea la cantidad de biomasa para secar, mayor será el calor requerido para el proceso, es decir, la temperatura de la corriente de aire caliente será mayor. Además, entre mayor sea el porcentaje de humedad el equipo de secado va a requerir mayor cantidad de calor, como se evidencia en el caso 3 con un porcentaje de humedad del 50% con un calor requerido de 2278.6 KJ.

Por otro lado, la cantidad y la composición de los productos en cada uno de las etapas de pirólisis y gasificación dependen directamente de la composición de la biomasa, la temperatura a la que se llevaron los procesos y el tiempo de residencia.

En pirólisis la cinética de reacción y la temperatura influyen en la composición de los productos finales; como se evidencia en el caso 5 a una temperatura de 300°C se produce una cantidad menor de gas síntesis de 1.8 kg con respecto al caso 4 que se maneja a una temperatura de 550°C produciendo 2.1 kg de gas síntesis, ya que al manejar el proceso de pirólisis a una baja temperatura disminuye la producción de cada uno de los componentes en esta etapa. Por otro lado, la cinética manejada en el proceso complejo de pirólisis, se hizo por medio del modelo de reacciones en paralelo e independientes; cada una de ellas corresponde a los componentes de la biomasa estudiada.

En el caso del proceso de gasificación, depende en gran medida de la temperatura la cual se mantiene constante durante el proceso y del tipo de agente gasificante que se utilice y la concentración del mismo, pues al utilizar un porcentaje alto de agente de reacción, el tiempo en el que se descompone el carbonizado será mucho menor al tiempo que va requerir un proceso de gasificación con un agente de reacción de composición menor; lo anterior, se evidencia en el caso 6 y 7 donde se utiliza 30 y 60% de agente gasificante, que a mayor cantidad de agente gasificante más rápida será la conversión de carbonizados a gas, y también se ve reflejado en el aumento de requerimiento de energía, Además, el caso 7 que se lleva a una temperatura de 900°C y 60% de agente gasificante se obtiene 2.3 kg de gas de síntesis, siendo mayor que el del caso 6 que se lleva a una temperatura menor e igualmente de agente gasificante.

Para el estudio del esquema tecnológico y para la obtención de las composiciones de los diferentes productos se hizo necesario conocer la cinética de reacción y los parámetros correspondientes en cada uno de las etapas de pirólisis, gasificación y adecuación.

El esquema tecnológico presentado se puede validar para cualquier tipo de biomasa siempre y cuando se tenga conocimiento de los parámetros cinéticos y datos experimentales necesarios y las condiciones establecidas para llevar a cabo el proceso de gasificación y así realizar la determinación de la composición de los productos finales.

6. RECOMENDACIONES

La producción de gas de síntesis a partir del proceso de gasificación de biomasa representa un foco de estudio de alta relevancia a nivel global, esto debido al potencial energético de la biomasa residual y a la disposición alterna que se le puede dar a los residuos orgánicos. En el presente proyecto se lleva a cabo un análisis teórico para generar balances de masa y energía bajo diferentes condiciones operacionales del esquema tecnológico propuesto. Se desarrolla una herramienta computacional usando el programa Microsoft Excel, para generar los resultados a partir de diferentes condiciones planteadas. A partir de los resultados y del desarrollo del proyecto se generan las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda realizar un complemento experimental, para validar el análisis y los resultados obtenidos a través de la herramienta computacional.
- Se recomienda definir los diferentes tipos de equipos a utilizar para cada uno de los subprocesos contemplados en el esquema tecnológico y así realizar un análisis más detallado de eficiencias en los procesos de transferencia de calor y de masa.
- En el desarrollo del balance de energía y masa para cada uno de los equipos propuestos en el esquema tecnológico, se analizan los datos obtenidos en la herramienta tecnológica teniendo en cuenta solo la madera, debido a ello se recomienda realizar el análisis para diferentes tipos de biomasa, en el cual se tenga en cuenta la capacidad calorífica y la caracterización de la misma.
- Se recomienda incluir en la cinética de reacción en el proceso de gasificación, las reacciones de la fase gaseosa y de degradación de alquitranes ya que influyen de forma significativa en la distribución de productos en dicho proceso.

BIBLIOGRAFÍA

AGROWASTE. Pirólisis. AGROWASTE LIFE + Environment policy & Governance (LIFE10 ENV/ES/469) [en línea], febrero de 2013 [revisado 20 de marzo de 2018].

AINETO, Alberto Patino. Implantación de metodología SPA de captura de alquitranes y desarrollo de dispositivo de dopado de alquitranes. Proyecto fin de carrera España: Universidad de Sevilla.

AKHTAR, J. et al. Una revisión de los parámetros de operación para líquido óptimo en producción de petróleo en pirólisis de biomasa, Citado por MANALS CUTIÑO, Enma; PENEDO MEDINA; Margarita y SALAS TORT, Dolores. Caracterización de la biomasa vegetal “cascarilla de café”.

AL-KASSIR, Raúl. Caracterización y preparación de residuos de biomasa con ensayos experimentales de secado térmico y combustión no contaminante. Tesis de máster. Portalegre.: Instituto politécnico de Portalegre. 2013.

AMESTOY ALONSO José. El planeta en peligro: calentamiento global, cambio climático, soluciones. España. Club universitario. 2010.

ANDA CÁRDENAS Pascual. Química 1. México. Umbral. 2006.

ARBÓS, Lluís Cuatrecasas. Diseño avanzado de procesos y plantas de producción flexible: técnicas de diseño y herramientas gráficas con soporte informático. Profit Editorial, 2009. CUATRECASAS Lluís. Organización de la producción y dirección de operaciones. Madrid. 2012.

ARENAS CASTELLANOS, Daniel. Propuesta de diseño de un proceso para la generación de energía eléctrica a partir de residuos de la producción de café. Trabajo de grado. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería. 2009.

ARÉVALO, William. La Biomasa: Una Alternativa Energética Proveniente de la Vida Misma. Libros Editorial UNIMAR, 2015.

ARMENTA GARCÍA, Ana Cecilia. Disminución de alquitranes en la gasificación de biomasa, utilizando escoria de aceración. Proyecto de grado México D.F. Universidad Nacional Autónoma de México. 2014.

ASORENOVABLES. (2018). Qué son las Energías Renovables. [online] Available at: <https://www.asorenovables.com/que-son-las-energias-renovables/> [Accessed 7 Feb. 2018].)

BASU, Prabir. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. 2 ed. Academic press, 2013. ISBN: 978-0-12-396488-5.

BENAVIDES BALLESTEROS Henry Oswaldo y LEÓN ARISTAZABAL Gloria Esperanza. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Nota técnica del IDEAM. 2007.

BESEL, S. A. Biomasa: gasificación. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)(Ed.), Madrid, España, 2007.

Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. Edición Especial No. 2. CABRERA, G., MADRIÑAN S., MUÑOZ D. Evaluación de índices de conversión energética en la producción de gas combustible a partir de biomasa. 2013.

CAI, Junmeng; HE, Yifeng; BANKS, Scott. Et al. revisión de propiedades fisicoquímicas y caracterización analítica de biomasa lignocelulósica. En: Elsevier. 2017.

CALVO MARTÍN Francisco Javier y LÓPEZ CASILLAS Alberto. Energías y medio ambiente. Salamanca. Ediciones universidad de salamanca. 2004.

CANO, Leonardo Andres. Preparación y caracterización de catalizadores de hierro soportado sobre sólidos mesoporosos ordenados para ser utilizados en la obtención de olefinas C 5 y superiores a partir de la síntesis de Fisher-Tropsch. 2011. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas.

CANTALOSELLA, Sergi. Influencia de las condiciones de pretratamiento en la gasificación eficiente de biomasa vegetal para la producción de energía sostenible. Tesis de maestría Valencia: Universidad politécnica de Valencia. 2017.

CARDONA ÁLVAREZ, L. F. Transformación termoquímica de neumáticos usados en una sola etapa en atmósfera de CO₂, para la obtención de carbón activado (Trabajo de grado inédito). Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.
CASTELLS Xavier Elías. Aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales. España. 2012.

CASTELLS Xavier Elías. Biomasa y bioenergía. 2012.

CASTRO, Guillermo. Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos. Universidad de Buenos aires. 2007.

CIESLA William. Cambio climático, bosques y ordenación forestal. Roma. 1996.
CODELCO. Diagrama de un proceso tecnológico. CODELCO Educa [en línea], [revisado 3 de Abril de 2018]. Disponible en Internet: https://www.codelcoeduca.cl/biblioteca/tecnologia/1_tecnologia_NB6-8B.pdf.

DE RIESGO, Análisis de Tecnologías. Gasificación y pirólisis de residuos: procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos. 2017.

DCSBA. Universidad abierta y a distancia. Balance de materia y energía. México. 2017.

DUARTE, S.; VELÁZQUEZ, E.; DULLAK, A. Pirólisis convencional de neumáticos en desuso para la producción de combustibles líquidos. Revista Científica de la UCSA, vol.3, no. 2. Diciembre, 2016.

El-Rub, Z.A. ; Bramer, G.: Comparación experimental de caracteres de biomasa con otros catalizadores para reducción de alquitrán. Citador por MENDOZA, Libardo. Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio. Tesis doctorado Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. 2016.

EPEC. Energía renovable: la biomasa. EPEC [en línea], [revisado el 1 de abril de 2018]. Disponible en Internet: <https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/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. Agosto, 2004. Scientia et Technica Año X, No 25.

FERNÁNDEZ, Jesús. Energías renovables para todos: biomasa. En: Energías Renovables.

FOCER, (2002), Manual sobre energía renovable: Biomasa, San José, Costa Rica: BUN-CA.

FONSECA GONZÁLEZ, Natalia Elizabeth. Estado del Arte del Uso del Gas de Gasificación Termoquímica de Biomasa (GG), en Motores de Combustión Interna Alternativos. 2003. Tesis Doctoral. Industriales.

FULLANA, Andres. Pirólisis y combustión de neumáticos usados y lodos de depuradora. Trabajo de grado. Alicante.: Universidad de Alicante. 2001.

GARCÍA, Luis. Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Tesis de maestría Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. 2011.

GARCÍA, María del Alba. Análisis de la capacidad de reducción de alquitranes de un gas de gasificación mediante inyección de vapor y aire. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.

GONZALES Francisco. El efecto invernadero, el cambio climático, la crisis medioambiental y el futuro de la tierra. Madrid. 2003.

GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang; RINCÓN, Sonia. Pirólisis de Biomasa. Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Procesos –BIOT, de la Universidad de Colombia. Facultad de ingeniería. 2008.

GUTIERREZ Fernando y SAN MIGUEL Guillermo. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. España. Mundi-prensa. 2015.

HERNÁNDEZ, Leonel. Balance de materia y energía. El Salvador.

HERVAS RAMIREZ, Lorenzo. Los residuos urbanos y asimilables. Andalucía.: Consejería de medio ambiente, 2003.

IICA. Biomasa y otras fuentes no convencionales de energía. San Jose, Costa Rica. 1980.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización, 1 ed. Bogotá: ICONTEC, 2008. 33p.

_____. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. 1 ed. Bogotá: El instituto, 2008. 38 p.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. 1 ed. Bogotá: El instituto, 1998. 23 p.

LONDOÑO GARCÍA, Rodrigo. Balances de masa y energía. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. 2015.

MANALS-CUTIÑO, Enma M.; SALAS-TORT, Dolores; PENEDO-MEDINA, Margarita. Caracterización de la biomasa vegetal cascarilla de café. Tecnología Química, 2018, vol. 38, no 1.

MARTÍNEZ, Maximiliano. Simulación del proceso de gasificación termoquímica para la obtención de gas combustible, aplicado a cascarilla de café. Tesis de maestría México: Universidad Veracruzana. 2015.

MARTÍNEZ, Pedro Elías Patiño. Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual. Innovaciencia, 2014, vol. 2, no 1, p. 45-52.

MARTÍNEZ RINCÓN, José María; SILVA LORA, Electo Eduardo (ed.). Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. 2015. 145 p. ISBN: 978-958-58880-0-5.

MENDOZA GENEY, Libardo Enrique, et al. Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá. 2016.1 ed.

MÍGUEZ, José. Procesos termoquímicos para la obtención de energía a partir de la fitomasa residual (combustión, gasificación, pirólisis).

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINERÍA. Energías Renovables: energía Biomasa. Argentina: Secretaria de Energía, 2008.

MIRANDA, Rosa del Carmen; SEGOVIA MARTÍNEZ, Ciro César y SOSA BLANCO, Cesar Alberto. Pirólisis de llantas usadas: Estudio cinético. En: Información tecnológica. 2006. Vol. 17, no. 2.

MOLINA Mario, SARUKHAN José, y CARABIAS Julia. El cambio climático. México. Fondo de cultura económica. 2017.

MONTOYA, J. I., et al. Pirólisis rápida de biomasa. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 2013. ISBN: 978-958-761-774-0.

MONSALVO Raúl y MUÑOZ Graciela et al. Balance de materia y energía. México. 2014.

NETWORK, Biomass Users. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. Fortalecimiento de la capacidad en energía renovable para América Central, 2002, vol. 56. ISBN: 9968-904-02-3.

NOGUES, Fernando Sebastián; GARCÍA GALINDO, Daniel y REZEAU, Adeline. Energías renovables: Energía de la biomasa. España, Zaragoza.; Pressas universitarias de Zaragoza, 2010.

ORDÓÑEZ, Yesid Javier Rueda; TANNOUS, Katia K. Análisis cinético de la descomposición térmica de biomasa aplicando un esquema de reacciones paralelas independientes. Revista UIS Ingenierías, 2017, vol. 16, no 2.

PÉREZ, Juan. Gasificación de biomasa: estudios teórico-experimentales en lecho fijo equicorriente. Editorial Universidad de Antioquia, 2009. ISBN 978-958-714-263-1.

PEÑA, J., MARTÍNEZ, P., CORTÉS, M., CHIRIVI, N., MENDOZA, L. Uso energético de la biomasa a través del proceso de gasificación. Revista de investigación facultad de Ingeniería Fundación Universidad de América, 2017. vol. 10, no 2.

PÉREZ, Juan; BORGE, David; AGUDELO, John. Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico-experimentales. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 2010, no 52.

PINEDO, Andrea Urien. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. Tesis de maestría: Universidad Nacional de Educación a Distancia, Facultad de Ciencias, 2013.

PRESA, Juan Manuel. Estructura, composición y clasificación de la madera. En: Cedria. Abril, 2015.

PUJOLDEVALL SÁNCHEZ DE TOLEDO, Oriol. Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa. 2015. Tesis de Licenciatura. Universitat Politècnica de Catalunya.

REDSAUCE. Gasificación del carbón (Capítulo XVII). REDSAUCE Software Quality [en línea], [revisado 3 de abril de 2018]. Disponible en Internet:<http://files.pfernandezdiez.es/CentralesTermicas/PDFs/17CT.pdf>.

Revistas.udes.edu.co. (2017). INNOVACIENCIA. [online] Available at: <http://revistas.udes.edu.co/site/index.php/innovaciencia> [Accessed 7 Feb. 2018].

REYES Torres Pedro Julio. Combustibles fósiles y contaminación. Revista de la facultad de ingeniería. 1999.

RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. kassel university press GmbH, 2011. ISBN: 978-3-89958-950-4.

ROLDÁN VILORIA Jose. Energías renovables: lo que hay que saber. España. Paraninfo. 2013.

Romero, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles.

ROMEO Luis Miguel, LISBONA Pilar y GONZALEZ Ana et al. Captura y almacenamiento de CO₂. España. Prensas Universitarias de Zaragoza. 2010.

RUMMER, Bernhard; PETEK, Josef y STAUDINGER, Gernot. Trocknung und Pyrolyse eines Einzelpartikels - Modellrechnung und experimentelle Verifikation. En: VDI-Berichte. p. 265-276.

SAN MIGUEL, Guillermo; GUTIÉRREZ, Fernando. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. España: Mundi-Prensa, 2015. ISBN 978-84-8476-674-2.

Scientia et Technica. Gasificación de biomasa para la producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. 2004.

SEDECOL. Manual técnico – Administrativo para el servicio de Limpia Municipal. Secretaria de desarrollo social.

SERRET-GUASCH, Nurian; GIRALT-ORTEGA, Giselle; QUINTERO-RÍOS, Mairer. Caracterización de aserrín de diferentes maderas. *Tecnología Química*, 2016, vol. 36, no 3.

SUÁREZ L, PÉREZ JF, BARRERA R. Gasificación de madera para la obtención de un syngas útil en la producción de biocombustibles y/o productos químicos. *rev.ion.* 2017;30(1).

Trabajo de grado. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería. 2009.

TRANSBIOMA. Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. España: Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA.CT, 2012. 5 p. ISBN: 978-84-931891-5-0.

VASQUEZ SIERRA, Erika Biviana y HERRERA BUILES, Jhon Fredy. Metodología para la caracterización de combustibles sólidos maderables del área metropolitana del valle de aburrá “amva”, Colombia. En: *Revista facultad Nacional de agronomía*. 2006. Vol 59, no 2.

WEI, L et al. “Characteristics of fast pyrolysis of biomass in a free fall reactor”. *Fuel Processing Technology*, 2006, Vol. 87.

XIANWEN, D. et al. “The fast pyrolysis of biomass in CFB reactor”. *Energy and Fuels*, 2000, Vol.14.

ZAGUAN. Universidad Zaragoza [en línea], [revisado 3 de Abril de 2018]. Disponible en Internet: <https://zaguan.unizar.es/record/6135/files/TAZ-PFC-2011-362.pdf>.