

	<b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	Dependencia	Aprobado	Pag.	
	SUBDIRECTOR ACADEMICO		1(1)	

## RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	<b>GERSON DAVID CLAVIJO ORTIZ</b>		
FACULTAD	<b>INGENIERIAS</b>		
PLAN DE ESTUDIOS	<b>INGENIERIA MECANICA</b>		
DIRECTOR	<b>JHON AREVALO TOSCANO</b>		
TÍTULO DE LA TESIS	<b>FORMULACIÓN DEL MODELO TEÓRICO DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA DE UN REACTOR DE LECHO FIJO</b>		
<b>RESUMEN</b> (70 palabras aproximadamente)			
<p>EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO SE PLANTEA FORMULAR EL MODELO TEÓRICO DE LA GASIFICACIÓN DE BIOMASA EN UN REACTOR DE LECHO FIJO CON FLUJO DESCENDENTE, DONDE SE PUEDE PREDECIR LA COMPOSICIÓN DEL GAS OBTENIDO. SE DESARROLLA EL MODELO A PARTIR DEL PLANTEAMIENTO DE LAS ECUACIONES DE EQUILIBRIO TERMODINÁMICO Y BALANCE DE MASA EN LAS ZONAS DE OXIDACIÓN Y REDUCCIÓN. LA SOLUCIÓN DEL MODELO SE DESARROLLA EN EL SOFTWARE SCILAB POR EL MÉTODO NUMÉRICO DE NEWTON RAPHSON.</p>			
<b>CARACTERÍSTICAS</b>			
PÁGINAS: 76	PLANOS:	ILUSTRACIONES: 15	CD-ROM: 1



**FORMULACIÓN DEL MODELO TEÓRICO DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN  
DE BIOMASA DE UN REACTOR DE LECHO FIJO**

**GERSON DAVID CLAVIJO ORTIZ**

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTADER OCAÑA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERIA MECANICA  
OCAÑA  
2015**

**FORMULACIÓN DEL MODELO TEÓRICO DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN  
DE BIOMASA DE UN REACTOR DE LECHO FIJO**

**GERSON DAVID CLAVIJO ORTIZ**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director  
JHON AREVALO TOSCANO  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTADER OCAÑA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERIA MECANICA  
OCAÑA  
2015**

## *DEDICATORIA*

*A mi mamá Yamile Ortiz, mi papá David Emilio Clavijo y a mis hermanas Camila Clavijo y Kenia Clavijo, por su amor, generosidad y paciencia que me impulsaron a seguir luchando por este sueño.*

*(Mi Única Familia)*

## AGRADECIMIENTO

*Primeramente a DUS por hacer su obra en mí permitiendo culminar esta etapa de mi vida, alcanzando este triunfo especial lleno de esfuerzo dedicación y mucho amor.*

*Al ingeniero FDFR Flórez por su apoyo y colaboración en el transcurrir de la carrera.*

*Al ingeniero Jhon Arévalo, por su tiempo, apoyo y orientación brindada para el desarrollo de este trabajo.*

*A Yulieth Paola Mora Pacheco por su amor, sostenibilidad y apoyo incondicional.*

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. TITULO.....	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA.....	15
1.3 OBJETIVOS.....	15
1.3.1 Objetivo general.....	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.5 DELIMITACIONES.....	16
1.5.1 Delimitación geográfica.....	16
1.5.2 Delimitación conceptual.....	16
1.5.3 Delimitación operativa.....	16
1.5.4 Delimitación temporal.....	16
2. MARCO REFERENCIAL.....	17
2.1 MARCO HISTORICO.....	17
2.1.1 Antecedentes históricos a nivel mundial.....	17
2.1.2 Antecedentes históricos a nivel nacional.....	17
2.1.3 Antecedentes históricos a nivel local.....	18
2.2 MARCO CONCEPTUAL.....	18
2.2.1 Biomasa.....	18
2.2.2 Procesos de conversión.....	23
2.2.3 Gasificación.....	23
2.2.4 Cinética de las reacciones.....	24
2.2.5 Tipos de gasificación.....	25
2.2.6 Agentes gasificante.....	30
2.2.7 Termoquímica del proceso de gasificación.....	30
2.2.8 propiedades de la biomasa.....	31
2.2.9 Modelación del proceso de gasificación.....	34
2.3 MARCO TEORICO.....	35
2.4 MARCO LEGAL.....	37
2.4.1 Constitución política de Colombia.....	37
2.4.2 Universidad Francisco de Paula Santander.....	37
2.4.3 Normas internacionales.....	38
3. DISEÑO METODOLOGICO.....	39
3.1 TIPO DE INVESTIGACION.....	39
3.2 FASES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	39
3.2.1 FASE I. Revisión bibliográfica.....	39
3.2.2 FASE II. Análisis matemático.....	39

3.2.3 FASE III. Validación de resultados.....	39
4. PRESENTACION DE RESULTADOS.....	40
4.1 DESCRIPCION DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARAMETROS DEL PROCESO DE GASIFICACION.....	40
4.1.1 Descripción el proceso en un gasificador Downdraft.....	44
4.1.2 Producto obtenido.....	46
4.2 SELECCIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO MATEMATICO QUE PERMITE REALIZAR EL ANALISIS DE LA GASIFICACION.....	46
4.2.1 Ventajas del Modelado del Gasificador de Biomasa Downdraft.....	47
4.2.2 Formulación del modelo Para el Gasificador Downdraft.....	47
4.2.3 Solución del Modelo.....	51
4.3 SIMULACION DEL MODELO MEDIANTE EL SOFTWARE SCILAB.....	52
4.3.1 Resultados del Modelo 0-D.....	53
4.3.1.1 Efecto del contenido de humedad.....	57
5. CONCLUSIONES.....	65
6. RECOMENDACIONES.....	66
BIBLIOGRAFIA.....	67
ANEXOS.....	70

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Principales reacciones de gasificación.....	25
<b>Figura 2.</b> Flujo en contracorriente.....	27
<b>Figura 3.</b> Flujo en corriente paralela.....	27
<b>Figura 4.</b> Flujo en corriente cruzada.....	28
<b>Figura 5.</b> Gasificador de lecho fluidizados burbujeante (a) y circulante (b).....	29
<b>Figura 6.</b> Zonas del gasificador en estudio.....	45
<b>Figura 7.</b> Composición del gas obtenido para la madera.....	54
<b>Figura 8.</b> Composición del gas obtenido para la cascarilla de arroz.....	55
<b>Figura 9.</b> Composición del gas obtenido para el bagazo de caña de azúcar.....	56
<b>Figura 10.</b> Efecto de la humedad en los valores en la composición del gas obtenido para madera a 800K.....	58
<b>Figura 11.</b> Efecto de la humedad en la composición del gas obtenido para la madera a 1200K.....	59
<b>Figura 12.</b> Efecto de la humedad en la composición del gas obtenido para la cascarilla de arroz a 800K.....	60
<b>Figura 13.</b> Efecto de la humedad en la composición del gas obtenido para la cascarilla de arroz a 1200K.....	61
<b>Figura 14.</b> Efecto de la humedad en la composición del gas obtenido para el bagazo de caña a 800K.....	62
<b>Figura 15.</b> Efecto de la humedad en la composición del gas obtenido para el bagazo de caña a 1200K.....	63

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Estado típico de la biomasa.....	19
<b>Tabla 2.</b> Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de diversos tipos de biomasa (% en masa).....	20
<b>Tabla 3.</b> Potencial energético de la biomasa residual del sector agrícola en Colombia.....	23
<b>Tabla 4.</b> Caracterización de varios tipos de biomasa (% en masa).....	33
<b>Tabla 5.</b> Poder calorífico de diferentes residuos.....	34
<b>Tabla 6.</b> Análisis elemental y fórmula química para la biomasa.....	54
<b>Tabla 7.</b> Composición típica del gas.....	57
<b>Tabla 8.</b> Efecto de la humedad en la composición del gas obtenido para la madera a 800K.	58
<b>Tabla 9.</b> Efecto de la humedad en la composición del gas obtenido para la madera 1200K.....	59
<b>Tabla 10.</b> Efecto de la humedad en los valores en la composición del gas obtenido para la cascarilla de arroz a 800K.....	61
<b>Tabla 11.</b> Efecto de la humedad en los valores en la composición del gas obtenido para la cascarilla de arroz a 1200K.....	62
<b>Tabla 12.</b> Efecto de la humedad en los valores en la composición del gas obtenido para el bagazo de caña a 800K.....	63
<b>Tabla 13.</b> Efecto de la humedad en los valores en la composición del gas obtenido para el bagazo de caña a 1200K.....	64

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo A.</b> Implementación del Código en el programa SCILAB.....	71
<b>Anexo B.</b> Ventana Principal del Simulador.....	75
<b>Anexo C.</b> Funcionamiento del Programa.....	76

## INTRODUCCIÓN

La gasificación de biomasa, al igual que la pirolisis, es un proceso complejo donde se presenta transferencia de calor y masa paralelamente. El rendimiento de la gasificación de biomasa variará con las propiedades físicas y químicas de la materia prima de biomasa. Conseguir el gas pobre no es muy difícil, pero la obtención de la calidad y cantidad adecuada si es tarea difícil. Los sistemas de gasificación tienen ciertos requisitos de tamaño de combustible, la humedad, el contenido de ceniza y así el contenido de energía, en estas circunstancias construir un gasificador como método de ensayo no es en absoluto lo adecuado en lo que respecta a tiempo y costo para averiguar los parámetros óptimos de funcionamiento.

Los modelos matemáticos ayudan a comprender los fenómenos físicos que se presentan en los procesos, aplicando principios de termodinámica y transferencia de calor que pueden proporcionar pautas adecuadas para diseñar el sistema de manera eficiente y económica.

El presente proyecto muestra el planteamiento del modelo teórico del proceso de gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo con flujo descendente. El modelo desarrollado es simple. Se tiene en cuenta el contenido de humedad en la madera y la temperatura en la zona de gasificación. Se describe el proceso de gasificación de biomasa utilizando reacciones de equilibrio, metanación y desplazamiento de agua-gas.

Al final se pudo determinar la composición del gas pobre resolviendo el sistema de ecuaciones formado por las ecuaciones de equilibrio, desplazamiento de agua-gas y metanación por medio de la programación del método numérico de Newton Raphson en el software Scilab, el cual es libre y gratuito.

Por último se plantearon unas conclusiones y recomendaciones ajustadas a lo realizado en este estudio.

## 1. TITULO

### **FORMULACIÓN DEL MODELO TEÓRICO DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA DE UN REACTOR DE LECHO FIJO**

#### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los avances tecnológicos requieren la implementación de nuevas técnicas que ayuden al mejoramiento de la sociedad. Normalmente la obtención de energías es a través de combustibles fósiles (carbón, gas natural, petróleo etc.). Los combustibles fósiles son fuentes no renovables de energía, que se encuentran en la naturaleza en grandes cantidades, pero limitada. Las emisiones de los gases contaminantes como el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y los compuestos azufrados que resultan del proceso de combustión para su aprovechamiento energético resultan siendo factores de gran impacto ambiental, lo que ha ocasionado que surjan nuevos estudios donde se emplean técnicas para aprovechar materiales orgánicos que ayuden en la generación de energía, ésta se puede obtener mediante procesos bioquímicos, termoquímicos y fisicoquímicos.

Hoy en día se busca la participación de las energías alternativas y renovables en la producción energética mundial, para suplir una demanda que va en aumento. Dentro de las energías renovables se encuentran la energía solar, eólica, la de biomasa y la hidráulica. Siendo la biomasa uno de los recursos energéticos con mayor potencial tanto en países desarrollados como emergentes. La gasificación de biomasa es uno de los sistemas con gran potencial ya que permite la generación tanto de energía térmica como eléctrica, mediante tecnologías de bajo costo.

Para la implementación de esta técnica, se requiere el conocimiento del proceso termoquímico y las influencias de los parámetros que intervienen dentro de la gasificación, para esto se hace necesario implementar un modelo teórico que permita realizar un análisis de lo ocurrido en cada fase de la gasificación de biomasa.

Los sistemas de gasificación de biomasa, bien sea de origen forestal, agrícola o urbanos se enmarcan dentro del desarrollo sostenible de los países, ya que se integran con planes de manejo de residuos sólidos, generando energía eléctrica, disminuyendo la dependencia energética de combustibles derivados del petróleo y reduciendo las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

## 1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA

¿Cuál es el resultado de formular el modelo teórico del proceso de gasificación de biomasa?

## 1.3 OBJETIVOS

**1.3.1 Objetivo general.** Formular el modelo teórico del proceso de gasificación de biomasa de un reactor de lecho fijo

**1.3.2 Objetivos específicos.**

- ✓ Describir el comportamiento de los parámetros del proceso de gasificación
- ✓ Aplicar un modelo matemático que permita realizar el análisis de la gasificación.
- ✓ Simular el modelo mediante el software computacional “SCILAB”

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

En Colombia, los procesos agroindustriales y las biomásas naturales, arrojan cantidades elevadas de residuos sólidos, destacándose por su aprovechamiento energético el bagazo de caña, la cascarilla del arroz, la cascarilla de café, el cuesco y la fibra de palma de aceite. Gran parte de estos residuos se emplea con fines energéticos dentro de las mismas implantaciones, o para industria como la papelera y la de alimentos. Otra parte representan diversos problemas por el inadecuado manejo con que son tratados y la mala disposición final. En los últimos años se han incursionado en la búsqueda de alternativas, para su aprovechamiento, tratamiento y reutilización de dichos residuos.

El aprovechamiento energético de la biomasa se puede realizar mediante el proceso termoquímico de la gasificación, siendo un proceso que permite la conversión de un combustible sólido, tal como el carbonizado obtenido de la pirolisis en un combustible gaseoso, mediante un proceso de oxidación parcial.

El desarrollo de esta técnica debe ir acompañado con el planteamiento de modelos matemáticos que describen los fenómenos que se llevan a cabo. Estos modelos se utilizan en el escalamiento de equipos experimentales a equipos de mayor tamaño permitiendo el desarrollo de las tecnologías. La implementación de modelos matemáticos permite estudiar las influencias de los parámetros que intervienen en un proceso de manera rápida y práctica, permitiendo predecir la composición del gas obtenido del proceso de gasificación para utilizarlos en motores de combustión interna como una alternativa para la generación de potencia, permitiendo contribuir con el manejo de los residuos sólidos y disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles.

Este proceso teórico tiene la ventaja de no adelantar pruebas experimentales que permitan evaluar las influencias de los parámetros en el proceso sobre los resultados obtenidos, es más práctico y se requiere menos dinero y tiempo.

## **1.5 DELIMITACIONES**

**1.5.1 Delimitación geográfica.** El proyecto de investigación se desarrollará en la ciudad de Ocaña, para la universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, ubicada en la sede El algodonal.

**1.5.2 Delimitación conceptual.** Los términos que se manejarán como referentes primarios del proyecto son: gasificación, biomasa, calorimetría, humedad, poder calorífico, temperatura, presión, catalizadores.

**1.5.3 Delimitación operativa.** El cumplimiento de los objetivos del siguiente estudio puede ser afectado por distintos factores. De surgir en el desarrollo del mismo, algún inconveniente que amerite modificaciones significativas, estas serán consultadas con el director del mismo modo y comunicadas al Comité Curricular.

**1.5.4 Delimitación temporal.** El presente proyecto tendrá una duración aproximada de 8 semanas a partir de la aprobación del anteproyecto, como se muestra en el cronograma de actividades.

## **2. MARCO REFERENCIAL**

### **2.1 MARCO HISTORICO**

#### **2.1.1 Antecedentes históricos a nivel mundial.**

Durante la investigación realizada para recopilar información acerca de los estudios académicos hechos sobre temas relacionados con este proyecto se encontraron publicaciones extranjeras de artículos de investigación científica.

Planta de cogeneración mediante gasificación de biomasa residual, realizada por Verónica del Val Gento, Gregorio Antolín Giraldo, Escuela técnica Superior de ingenieros Industriales, Paseo del Cauces s/n, Valladolid.

Análisis y diseño de un sistema de gasificación de biomasa, realizado por Rodríguez Alejandro David A., Zaleta Aguilar Alejandro, Olivares Arriaga Abraham, Torres Chimal Francisco F. Artículo científico. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato, México (2010).

Estudio termodinámico y dimensionamiento de un gasificador downdraft para un sistema de cogeneración compacto en comunidades aisladas, realizado por Néstor Proenza Pérez y Ramón Cala Alello. Artículo científico. Departamento de mecánica, facultad de electromecánica, Universidad de Camaguey, cuba, 2006.

Modelado de un gasificador estratificado de lecho móvil de biomasa, utilizando CFD, realizado por A. Rogel Ramírez, FES Zaragoza –UNAM, México, 2007.

Conversión de Residuos Sólidos Urbanos en Energía, realizado por Diego Moratorio, Ignacio Rocco, Marcelo Castelli, artículo científico, Universidad de Montevideo, 2012.

Desarrollo de modelos matemáticos para la gasificación de biomasa, realizado por Daniel Borniquel Moreno, tesis de grado. Departamento de ingeniería y medio ambiente, Universidad Zaragoza, 2014.

#### **2.1.2 Antecedentes históricos a nivel nacional.**

Siguiendo con la documentación realizada para compilar la información, se obtuvieron documentos de artículos publicados en revistas nacionales, tesis de pregrado y tesis de maestría los cuales ayudaron a orientar la investigación, dentro de los cuales se citan los siguientes:

Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia, realizado por Jaider Sierra Aguilar. Tesis de pregrado. Universidad De Sucre, Colombia (2009).

Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo, realizado por Luis Eduardo García Fernández, Facultad de Ingenierías, Universidad Nacional de Colombia, Colombia (2011).

Simulación computacional del proceso de gasificación de biomasa en el reactor d lecho fijo de la facultad de ingeniería de la universidad nacional de Colombia, realizado por Santiago Ramírez Rubio, Facultad de ingeniería, departamento de mecánica y mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Colombia (2010).

Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teóricos- experimentales, realizado por Juan Pérez, David Borge, John Agudelo, Facultad de ingeniería, universidad de Antioquia, Colombia (2010).

Alternativas tecnológicas para el uso de la cascarilla de arroz como combustible, realizado por David Quiceno Villada y Marvin Yair Mosquera Gutiérrez, tesis de grado, ingeniería mecánica, departamento de energética y mecánica, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia (2010).

Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor, realizado por Carlos Augusto Estrada, Alberto Zapata Meneses, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia (2004).

### **2.1.3 Antecedentes históricos a nivel local.**

En la ciudad de Ocaña actualmente no existen reseñas, antecedentes o artículos sobre la realización de estudios aplicados a la gasificación de biomasa.

## **2.2 MARCO CONCEPTUAL**

A continuación se relación algunos conceptos básicos que se desarrollan dentro de la investigación en el proceso de gasificación, estos son:

**2.2.1 Biomasa.** Se considera que la biomasa es una fuente renovable de energía porque su valor proviene del Sol. A través del proceso de fotosíntesis, la clorofila de las plantas captura su energía, y convierte el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) del aire y el agua del suelo en carbohidratos, para formar la materia orgánica. Cuando estos carbohidratos se queman, regresan a su forma de dióxido de carbono y agua, liberando la energía que contienen. De esta forma, la biomasa funciona como una especie de batería que almacena la energía solar. Como criterio de selección de la materia prima se toma la disposición y cantidades de producción de biomasa residual, para ofrecer alternativas de disposición de los residuos de la producción agroindustrial. Los recursos biomásico se presentan en diferentes estados físicos que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular. En la tabla 1 se describen los principales estados típicos de la biomasa.

**Tabla 1. Estado típico de la biomasa.**

<b>Recursos de Biomasa</b>	<b>Tipos de residuos</b>
Residuos forestales	Restos de aserrado: corteza, aserrín, astillas. Restos de plantaciones: ramas, cortezas, raíces.
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales Residuos de cosechas: tallos, hojas y cáscaras
Residuos industriales	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales Grasas y aceites vegetales
Residuos urbanos	Aguas negras Desechos domésticos orgánicos

Fuente: Biomass users network, BUN-CA. Manuales sobre energía renovable: Biomasa.2002

Cada tipo de biomasa posee concentraciones específicas de celulosa, hemicelulosa, lignina, extractos y cenizas que determinan su utilización en procesos de generación de potencia. En la Tabla 2 se pueden apreciar los contenidos de celulosa, hemicelulosa, lignina, extractos y cenizas de diversos tipos residuos agrícolas.

**Tabla 2. Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de diversos tipos de biomasa (% en masa).**

Biomasa	Celulosa %	Hemicelulosa %	Lignina %	Extractos %	Cenizas %
Cáscara de coco	36,3	25,1	28,7	8,3	1,6
Bagazo de caña	41,3	22,6	18,3	13,7	4,1
Cascarilla de arroz	31,3	24,3	14,3	6,6	23,5
Paja de trigo	11,2	30,5	28,9	16,4	13,0
Tallos de maíz	6,6	42,5	23,6	17,5	9,8

Fuente: RAVEENDRAN, K.; Ganesh, a.; khilart, k.: Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. En: Fuel 74 (1995), p. 1812–998

La elección de la biomasa se justifica por estar considerada como un vector energético universal, ya que existe una amplia variedad de productos o aplicaciones y es de fácil almacenamiento. Previamente al uso de la biomasa, se debe considerar el proceso productivo en su conjunto, desde su origen, haciendo hincapié en los pasos intermedios referentes a la fabricación y transporte de los componentes y equipos asociados a la biomasa. Hay que tener en cuenta la utilización de fuentes de energía no renovable en

alguna etapa, contribuyendo de forma negativa al proceso renovable que conlleva la utilización de la biomasa.

### **2.2.1.1 Descripción de las materias primas**

Como criterio de selección de la materia prima se toma la disposición y cantidades de producción de biomasa residual, para ofrecer alternativas de disposición de los residuos de la producción agroindustrial. Entre los residuos agroindustriales más comunes en el país están el cuesco de palma de aceite y la cascarilla de café, cascarilla de arroz, bagazo de caña y fibra de coco.

***Cuesco de palma de aceite.*** La palma de aceite es originaria de África Occidental, donde las poblaciones locales la utilizan para los más diversos usos, desde los alimenticios a los medicinales, incluyendo también el uso de sus fibras, así como de su savia para la fabricación de vino de palma. La palma de aceite pertenece a la familia de las monocotiledóneas. Es un cultivo de plantación perenne y de rendimiento tardío.

En Colombia el cultivo de palma de aceite se ha difundido ampliamente en los últimos años; las plantaciones se encuentran principalmente en los departamentos de Meta, Nariño, Magdalena y Cesar. Anualmente se producen casi 2,9 millones de toneladas de racimos de fruta fresca de palma africana, de los cuales el aceite representa en promedio el 21% del peso del racimo. La parte restante es considerada como residuo y está conformada por el raquis, la fibra y el cuesco.<sup>1</sup>

***Cascarilla de café.*** El fruto del cafeto es de forma ovalada o elipsoidal ligeramente aplanada. Contiene normalmente dos semillas plano convexas separadas por el tabique (surco) interno del ovario. Los arbustos y árboles de café son del tipo perenne, leñoso y de un tallo resistente<sup>2</sup>. El café es un cultivo ampliamente difundido en Colombia, principalmente se cultiva en la zona comprendida por los departamentos de Quindío, Risaralda, Caldas y Antioquia. La cascarilla de café, se obtiene como residuo del proceso de trillado realizado a los granos; Entre los principales usos que se le dan están la ser empleada como materia prima para quemar y proveer calor a los cultivos evitando el que se vean afectados por heladas. Grandes volúmenes de la cascarilla producida no son aprovechados de ninguna forma. Por tal razón, su uso como materia prima para procesos de generación de energía es una opción viable para darle un valor agregado a este tipo de residuos.

***Cascarilla del arroz.*** El grano de arroz presenta diferentes estructuras de protección como lo son la cascarilla o cascara la cual mantiene al grano en una condición de impermeabilidad y termo estabilidad, además de poco contacto con el aire que pueda provocar la degradación de los componentes internos. Seguido de esta cascarilla se encuentran varias capas entre las cuales se puede ver el pericarpio, una cubierta de semilla,

---

<sup>1</sup> SANZ, J. Informe de gestión 2009, Cenipalma. 2010

<sup>2</sup> MONROIG, M. Descripción morfológica del cafeto. 2005

el nucelio y la aleurona. Dichas capas y la parte del embrión o germen, constituyen lo que conocemos como salvado de arroz.

Se estima que en Colombia se producen anualmente más de 400 mil toneladas de cascarilla de arroz. Una parte de la cascarilla producida se comercializa para uso en establos, caballerizas, avicultura y para labores de jardinería. Sin embargo, este mercado no es capaz de consumirla toda e incluso se cree que no consume más del 5% del total de cascarilla producida. El uso que demanda los mayores volúmenes es el de la semi-quema controlada al aire libre, que garantiza la comercialización de la cascarilla semi-quemada, la cual es usada como sustrato en los cultivos de flores.

**Bagazo de caña de azúcar.** Los ingenios ubicados en el Cauca y Valle del Cauca producen conjuntamente el 99% de la caña de azúcar del país. La industria azucarera genera dos productos de interés energético: el bagazo de caña y los residuos de cosecha. La producción de residuos de caña varía entre 46 y 50% de la producción total de caña. En estos ingenios se produce en promedio, 11,5 millones de toneladas de residuos de cosecha y 7 millones de toneladas de bagazo por año.

Según Asocaña, el 94% del bagazo producido es utilizado como energético en los mismos ingenios, mientras que el 6% restante se utiliza para la industria papelera (debido a su alto contenido de celulosa), la industria de aglomerados y como alimento para ganado. Los residuos de cosecha de la caña de azúcar son poco empleados en la actualidad y representan una gran cantidad de biomasa no aprovechada, ya que para su recolección y transporte se debe incurrir en elevados costos que los ingenios no están dispuestos a asumir.<sup>3</sup>

**Fibra de coco.** Para el análisis de la fibra de coco producida en el país no se encontraron industrias procesadoras que almacenen este residuo y permitan su utilización con fines energéticos. Sin embargo, el coco se encuentra en grandes cantidades en la Zona Atlántica del país y es una opción que no se debe descartar, ya que además presenta condiciones similares en cuanto a fluidez y otras características, a las mostradas por la fibra de palma africana para el proceso de gasificación.

En la tabla 3 se presenta el consolidado del potencial energético de la biomasa residual agrícola por especie en Colombia. El factor de residuo se define como la fracción de biomasa generada por unidad de producto principal; esta información fue suministrada por los centros de investigación y federaciones relacionadas con el gremio (Cenipalma, Cenicaña, Cimpa, Cenicafé, Augura, Fedearroz y Fenalce)<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA UPME: Potencialidades de los cultivos energéticos y cultivos agrícolas en Colombia. UPME, 2002

<sup>4</sup> Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia, UPME, Colombia.

Tabla 3. Potencial energético de la biomasa residual del sector agrícola en Colombia.

Cultivo	Producción <sup>1</sup> [t/año]	Tipo de residuo	Origen del residuo	Factor de residuo <sup>2</sup> [t <sub>residuo</sub> /t <sub>producto principal</sub> ]	Masa de residuo	Potencial energético
					[ t / año]	[TJ / año]
Palma de Aceite	872.117	Cuesco	RAI	0,22	189.074	2.627,44
		Fibra		0,63	546.381	6.778,89
		Raquis de Palma		1,06	924.618	6.607,31
Caña de Azúcar	2.615.251	Hojas - Cogollo	RAC	3,26	8.525.718	41.707,22
		Bagazo	RAI	2,68	7.008.873	76.871,65
Caña Panelera	1.514.878	Bagazo	RAC	2,53	5.680.790	62.305,56
		Hojas - Cogollo	RAI	3,75	3.832.640	18.749,01
Café	942.327	Pulpa	RAI	2,13	2.008.192	7.206,79
		Cisco		0,21	193.460	3.338,57
		Tallos	RAC	3,02	2.849.596	38.561,52
Maíz	1.368.996	Rastrojo	RAC	0,93	1.278.642	12.573,18
		Tusa		0,27	369.629	3.845,88
		Capacho		0,21	288.858	4.383,73
Arroz	2.463.689	Tamo	RAC	2,35	5.789.669	20.699,41
		Cascarilla	RAI	0,2	492.738	7.136,53
Banano	1.878.194	Raquis de banano	RAC	1	1.878.194	806,31
		Vástago de banano		5	9.390.968	5.294,27
		Banano de rechazo	RAI	0,15	281.729	495,34
Plátano	3.319.357	Raquis de plátano	RAC	1	3.319.357	1.425,00
		Vástago de plátano		5	16.596.783	9.356,64
		Plátano de rechazo	RAI	0,15	497.903	875,43
<b>TOTAL</b>	<b>14.974.807</b>				<b>71.943.813</b>	<b>331.645,71</b>

RAC: Residuo Agrícola de Cosecha. RAI: Residuo Agrícola Industrial

1. Ministerio de Agricultura (2006) Anuario Estadístico.

2: Datos obtenidos de los centros de investigación y federaciones relacionadas: Cenipalma, Cenicaña, Cimpa, Cenicafe, Augura, Fedearroz y Fenalce

Fuente: Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia, UPME, Colombia.

### 2.2.2 Procesos de conversión

Hay tres procesos principales por los que se puede transformar la biomasa o materia prima:

**Procesamiento fisicoquímico.** Consiste en prensar mecánicamente la biomasa, por ejemplo plantas oleaginosas como el maní, girasol, palma, soja y semilla de algodón, para producir aceites vegetales combustibles. Por medio de procesos posteriores de transesterificación estos aceites se pueden adecuar para emplearlos en los motores de combustión interna.

**Procesamiento bioquímico.** Este tipo de procesamiento está dividido en dos clases de procesos: fermentación anaeróbica (en ausencia de aire), en la cual la biomasa se deposita en una cámara hermética o biodigestor, y después de un cierto tiempo de residencia se obtiene como producto un gas combustible denominado biogás. Como otro producto del proceso se obtiene un residuo que presenta una alta calidad como fertilizante, denominado bioabono. Fermentación alcohólica, se obtiene como producto del proceso alcohol como combustible o carburante en motores de combustión interna o para plantas de generación de energía.

**Procesamiento termoquímico.** Este tipo de procesamiento está dividido en pirolisis, gasificación, licuefacción y combustión. Se refieren a la conversión de la biomasa por medio de reacciones químicas, propiciadas por la adición de calor y/o la exposición a agentes de reacción, mediante las cuales se libera energía directamente o se convierte la biomasa en combustible sólido, líquido o gaseoso.<sup>5</sup>

**2.2.3 Gasificación.** Es la conversión termoquímica de un material orgánico en una mezcla de gas combustible por medio de reacciones químicas propiciadas por la adición de calor y la exposición a agentes de reacción (aire, oxígeno puro, vapor de agua, dióxido de carbono o hidrógeno)<sup>6</sup>. Los productos obtenidos de un proceso previo de pirolisis, se transforman en un gas combustible de moderado poder calorífico, mediante una serie de reacciones homogéneas (gas-gas) y heterogéneas (carbonizado sólido-gas). Estas reacciones ocurren a una temperatura superior a la del proceso de pirolisis (800 - 1100 °C), en presencia de un agente de gasificación como aire, oxígeno, dióxido de carbono o vapor de agua<sup>7</sup>. El agente de gasificación empleado para el proceso juega un papel importante en la composición del gas generado. Al utilizar aire se genera un gas pobre con un poder calorífico de 4 - 7 MJ/m<sup>3</sup> STP, debido a que el alto contenido de nitrógeno introducido en el aire se diluye en el gas producido. Al emplear oxígeno se obtiene un gas con un moderado poder calorífico de 10 - 15 MJ/m<sup>3</sup> STP y con vapor de agua se obtiene un gas con poder calorífico de 13 - 20 MJ/m<sup>3</sup> STP. Si se emplea hidrógeno, se puede llegar a obtener un gas con alto poder calorífico (40MJ/m<sup>3</sup> STP), que puede ser empleado como sustituto del gas natural.

---

<sup>5</sup> MORAGES, J. Energía de la biomasa. 2002

<sup>6</sup> LILIEDAHL, T.; Sjöström, K.: Modelling of char-gas reaction kinetics. En: Fuel 76 (1997), p. 29–37

<sup>7</sup> ESTRADA, C.; Meneses, A.: Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. En: Scientia et Technica. (2004)

La gasificación se realiza en un recipiente cerrado, conocido por gasógeno, en el cual se introduce el combustible y una cantidad de aire menor a la que se requeriría para su combustión completa. El gas pobre obtenido puede quemarse luego en un quemador para obtener energía térmica, en una caldera para producir vapor, o bien ser enfriado y acondicionado para su uso en un motor de combustión interna que produzca, a su vez, energía mecánica.

Se opera normalmente con cantidades del orden del 25 al 30% del oxígeno que sería necesario para la oxidación completa (valor estequiométrico), o sea, se trabaja con defecto de oxígeno, que generalmente procede del aire, (79% Nitrógeno, 21% Oxígeno), con lo cual el caudal de gases resultantes es también mucho menor que en la incineración que opera con 60/80% de exceso de oxígeno<sup>8</sup>.

**2.2.4 Cinética de las reacciones.** La cinética química es el estudio de las velocidades de las reacciones químicas y de los mecanismos mediante los que tienen lugar. La cinética química introduce la variable tiempo en el estudio de las reacciones químicas y estudia el camino que siguen los reactivos para convertirse en productos, mientras que La velocidad de reacción es la rapidez con que se modifica la concentración de un producto o un reactivo al transcurrir el tiempo.

En la figura 1 se muestran las principales reacciones que ocurren durante el proceso de gasificación (Cuando se emplea aire u oxígeno como agente de gasificación).

Las reacciones de gasificación heterogéneas (sólido-gas) son más lentas y limitan la velocidad del proceso de gasificación. Las reacciones heterogéneas entre el carbonizado y el dióxido de carbono, y entre el carbonizado y el vapor de agua son endotérmicas, siendo la reacción de gasificación con vapor de agua de 3 a 5 veces más rápida que la gasificación con dióxido de carbono<sup>9</sup>. Adicionalmente se presenta la reacción heterogénea entre el carbonizado y el hidrógeno<sup>10</sup>. Entre las reacciones de gasificación homogéneas que se dan, la reacción entre el monóxido de carbono y el vapor de agua, que conduce a la formación de hidrógeno y dióxido de carbono es de relevancia.

---

<sup>8</sup> MAÍLLO, A. Congreso internacional en la gestión y tratamiento de los residuos municipales la tecnología de la gasificación aplicada a los residuos sólidos urbanos.2009

<sup>9</sup> GÓMEZ, A. Investigación del Proceso de Gasificación de Biomasa en un Gasificador en Paralelo. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2002.

<sup>10</sup> PILON, G. Utilization of arecanut (Areca catechu) husk for gasification. Montreal, Canadá, Department of Bioresource Engineering - McGill University, Tesis de Maestría, 2007.

**Figura 1. Principales reacciones de gasificación**

<b>Oxidación Heterogénea</b>		$\Delta H$	<i>Ecuación</i>
Combustión	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$-394 \frac{MJ}{Kmol}$	<i>Ecu.1</i>
Combustión incompleta	$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	$-111 \frac{MJ}{Kmol}$	<i>Ecu.2</i>
<b>reacciones heterogéneas en equilibrio</b>			
Reacción de boudouard	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	$172 \frac{MJ}{Kmol}$	<i>Ecu.3</i>
Reacción agua gas	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	$131 \frac{MJ}{Kmol}$	<i>Ecu.4</i>
Reacción de metanación	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	$-72 \frac{MJ}{Kmol}$	<i>Ecu.5</i>
<b>Oxidación homogénea</b>			
Oxidación de monóxido de carbono	$CO + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow CO_2$	$-283 \frac{MJ}{Kmol}$	<i>Ecu.6</i>
Metanización	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	$-206 \frac{MJ}{Kmol}$	<i>Ecu.7</i>
Oxidación del hidrógeno	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	$-242 \frac{MJ}{Kmol}$	<i>Ecu.8</i>
Oxidación del metano	$CH_4 + \frac{3}{2} O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$	$-519 \frac{MJ}{Kmol}$	<i>Ecu.9</i>
<b>Reacciones homogéneas en equilibrio</b>			
Reacciones agua-gas	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	$-41 \frac{MJ}{Kmol}$	<i>Ecu.10</i>
	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	$-206 \frac{MJ}{Kmol}$	<i>Ecu.11</i>

Fuente: SIERRA, F. *et al.* Procesos de Gasificación de Materiales Orgánicos. Bogotá: Asociación de Ingenieros Mecánicos de la Universidad Nacional de Colombia. 2009.

### 2.2.5 Tipos de gasificación

Existen diferentes configuraciones de reactores que definen distintos modos de contacto entre la biomasa y el agente de reacción, lo cual se ve reflejado en la distribución de productos obtenidos de cada equipo. De acuerdo a la disposición del equipo existen diversos tipos de gasificadores principalmente de lecho fijo, lecho móvil y lecho fluidizados. De la misma forma de acuerdo al tipo de calentamiento del equipo se pueden clasificar en equipos de calentamiento directo e indirecto.

#### Gasificación de lecho fijo

Son de construcción simple, apropiados para pequeña escala y generalmente operan con alta conversión de carbono, largos tiempos de residencia, baja velocidad del gas y bajo transporte de cenizas. Asimismo los gasificadores de lecho fijo pueden operar

satisfactoriamente con biomasa que tenga un tamaño uniforme en sus partículas y un contenido de humedad y cenizas de menos de 20% y 5% respectivamente.

Respecto al sentido de flujo del gas y del sólido a gasificar, estos equipos se clasifican en tres grandes grupos: gasificadores en contracorriente (normalmente llamados updraft), gasificadores en corriente paralela (normalmente llamados downdraft) y gasificadores en corriente cruzada.

Estos reactores son especialmente apropiados para la producción de energía a pequeña y mediana escala. Debido a las características del mismo es difícil mantener una temperatura de operación uniforme al interior del reactor. Es por esto que la composición del gas generado puede ser impredecible y poco eficiente para producciones a gran escala (superior a 1 MW). La operación de los gasificadores de lecho fijo está altamente influenciada por las propiedades morfológicas, físicas y químicas de la biomasa. En estos gasificadores es común encontrar problemas como: falta de uniformidad en el flujo de la fase sólida, formación de puentes y adherencia de material (alquitranes y sólido que no fluye) a las paredes del equipo y caídas considerables de presión en el reactor<sup>11</sup>.

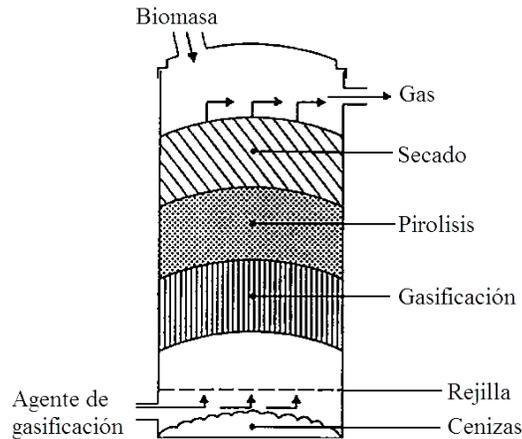
**Gasificadores en contracorriente.** El agente gasificante es introducido por la parte baja del equipo y circula en sentido opuesto a la fase sólida. La biomasa es alimentada por la parte superior del reactor y fluye lentamente hacia la parte baja del mismo, mientras que las cenizas son removidas por la zona inferior. El gas producido es entregado por la parte superior a una temperatura relativamente baja (menores a 300 °C), lo que se traduce en una alta eficiencia térmica del equipo. Se pueden identificar tres zonas (ver figura 2), las cuales ocurren de forma secuencial. Las desventajas de este sistema son el alto contenido de alquitranes en el gas producido.

**Gasificadores en corriente paralela.** El agente gasificante es introducido por la parte media o superior del equipo y el gas combustible es retirado por la parte baja, como se ve en la figura 4. Por lo tanto, la fase sólida y el gas se mueven en la misma dirección. Al igual que en los gasificadores de flujo en contracorriente, la biomasa es alimentada por la parte superior del reactor fluyendo hacia la parte baja del mismo. Su principal ventaja radica en la posibilidad de obtener un gas con bajo contenido de alquitranes y aceites, adecuado para su uso en motores de combustión interna, ya que los alquitranes generados durante la pirolisis se degradan al fluir por la cama del material ya pirolizado. Los gases producidos salen del reactor con temperaturas de 900 - 1000°C aproximadamente, haciendo que la eficiencia térmica general de estos equipos sea baja.

---

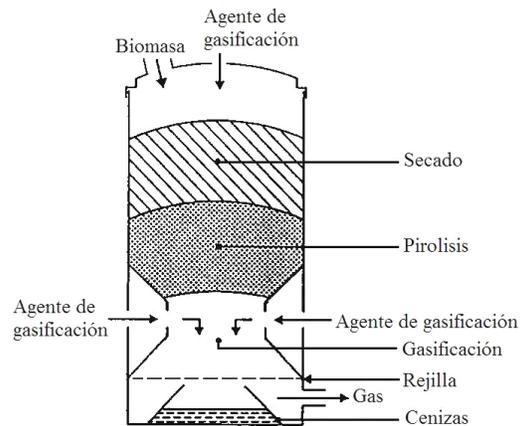
<sup>11</sup> Food and Agriculture organization for the United Nations: Wood gas as engine fuel. En: FAO Forestry Paper.1986

**Figura 2. Flujo en contracorriente.**



Fuente: Food and Agriculture organization for the United Nations: Wood gas as engine fuel. En: FAO Forestry Paper (1986)

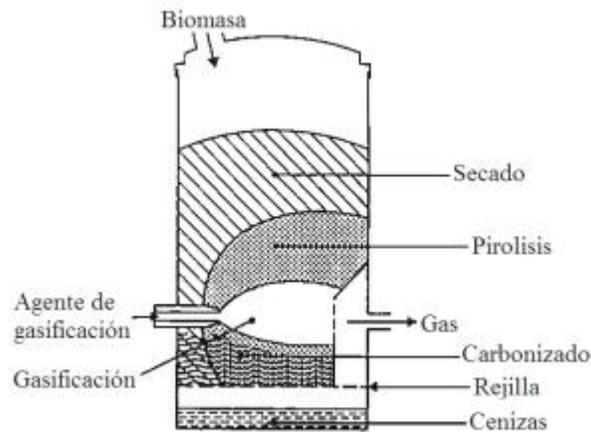
**Figura 3. Flujo en corriente paralela.**



Fuente: Food and Agriculture organization for the United Nations: Wood gas as engine fuel. En: FAO Forestry Paper (1986)

**Gasificadores en corriente cruzada.** En un reactor de flujo cruzado (Figura 5), la biomasa es alimentada por la parte superior del reactor y fluye hacia la parte baja del mismo a medida que el proceso de gasificación ocurre. El agente gasificante es introducido lateralmente al reactor mientras que el gas es extraído por el lado opuesto del equipo, al mismo nivel. El gas producido abandona el reactor a una temperatura de 700 - 900 °C, lo que hace que la eficiencia térmica del equipo sea baja.

**Figura 4. Flujo en corriente cruzada.**



Fuente: Food and Agriculture organization for the United Nations: Wood gas as engine fuel. En: FAO Forestry Paper (1986)

Los reactores de lecho fijo también se pueden clasificar dependiendo de la forma en la cual se adiciona calor al equipo.

En los reactores de calentamiento directo, las reacciones exotérmicas de combustión entre el oxígeno, el carbonizado y los compuestos volátiles, proveen el calor necesario para que se produzca la descomposición de la biomasa. Como existe un contacto directo entre el medio de calentamiento y los productos presentes en el reactor, los gradientes de temperatura dentro de la cama en la dirección radial son bajos. Esto ayuda a que la velocidad de reacción sea constante para toda la sección transversal del equipo, y por lo tanto a que la velocidad de la cama y el encogimiento de las partículas en la dirección radial sean iguales<sup>12</sup>.

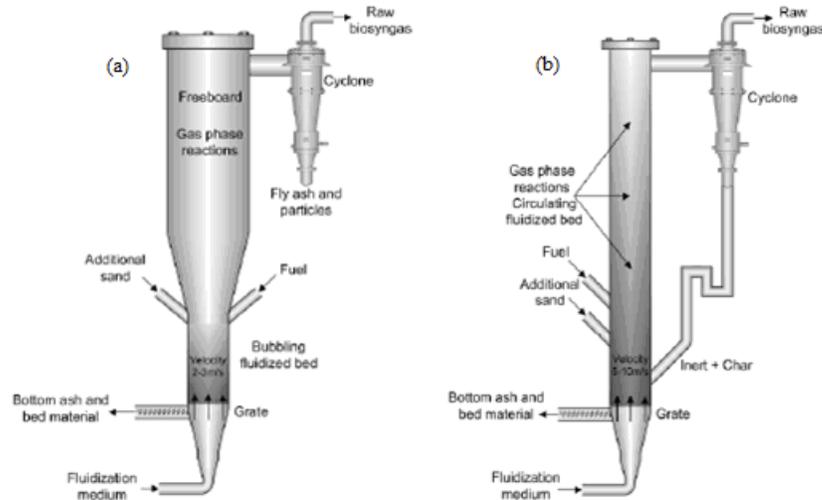
En los reactores de calentamiento indirecto, el calor es suministrado a través de las paredes del reactor, es decir, el medio de calentamiento no entra en contacto con el producto que se procesa. Esto genera gradientes de temperatura en la dirección radial, lo que hace que la velocidad de reacción no sea uniforme. Las partículas ubicadas cerca de las paredes del equipo, reaccionan más rápido que las ubicadas en el centro del reactor. Como consecuencia de esto, la velocidad de la cama no es constante y se produce un perfil de velocidad para la sección transversal del equipo. Este tipo de calentamiento permite obtener gases combustibles con un poder calorífico moderado cuando se emplea vapor de agua u oxígeno como agentes de gasificación, lo que representa una ventaja importante comparado con los gasificadores de calentamiento directo.

<sup>12</sup> MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. En: Bioresource Technology (2001)

**Gasificación de lecho móvil.** Los reactores de lecho móvil, como el horno rotatorio, ofrecen algunas ventajas como tiempos cortos para el procesamiento en comparación con los reactores de lecho fijo y el procesamiento de materias primas con un rango amplio de propiedades fisicoquímicas. El funcionamiento de este tipo de reactor presenta similitudes con los gasificadores de lecho móvil, sobre todo por lo que respecta a la parte mecánica que facilita el desplazamiento de los sólidos lo que hace más fácil la operación en continuo del sistema.

**Gasificación de lecho fluidizados.** Los reactores de lecho fluidizados<sup>13</sup> presentan elevadas velocidades de reacción y buenas condiciones de contacto entre el agente de reacción y el material carbonizado, lo cual hace que los perfiles de temperatura y concentración sean uniformes a lo largo del reactor, permitiendo un control muy preciso de las condiciones de operación; las velocidades de calentamiento de la materia prima en este tipo de reactores son altas, lo que incentiva la formación de la fase volátil. La distribución de temperatura en el lecho se mantiene en niveles casi constantes. Algunas modificaciones técnicas como la recirculación del material sólido ayudan a mejorar los grados de gasificación del carbonizado. En general, no se puede distinguir zonas más o menos diferenciadas en las que se lleven a cabo los distintos procesos de secado, pirolisis y gasificación; cada partícula es sometida de forma instantánea a estos procesos en cualquier punto del gasificador tras su entrada en él, lo cual origina que las cenizas sean arrastradas por el gas obtenido.

**Figura 5. Gasificador de lecho fluidizados burbujeante (a) y circulante (b).**



Fuente: MORENO, F. simulación de gasificación de biomasa en lecho fluidizados burbujeante, Universidad Carlos III de Madrid, Tesis de grado. 2010

<sup>13</sup> MORENO, F. simulación de gasificación de biomasa en lecho fluidizado burbujeante, Universidad Carlos III de Madrid, Tesis de grado. 2010

### **2.2.6 Agentes gasificante**

El término genérico gasificación engloba una gran variedad de procesos en los que pueden obtenerse muy diversos productos. Basándose en el agente gasificante empleado puede establecerse una clasificación de los procesos de gasificación:

Con aire. La reacción de combustión parcial con el aire da lugar a una reacción exotérmica que da lugar a un gas de bajo poder calorífico, que será aprovechado con fines de carácter energético. El proceso de gasificación con aire es el que, a nuestro juicio, presenta un mayor interés económico y social. En este proceso, el oxígeno del aire quema parcialmente el residuo carbonoso procedente de la pirólisis (proceso simultáneo al de gasificación), y se genera el calor necesario para el proceso. El producto a obtener es un gas combustible de bajo contenido energético (inferior a 6 Mj/Nm<sup>3</sup>). Los reactores más utilizados son los de "lecho móvil en contracorriente" (updraft) o "en corrientes paralelas" (downdraft) y los de "lecho fluidizados".

Con oxígeno. Se produce un gas de poder calorífico medio, pero de mayor calidad al no estar diluido con N<sub>2</sub>. Además de aplicaciones de carácter energético puede utilizarse como gas de síntesis para la obtención de metanol.

Con vapor de agua y/o oxígeno (o aire). Se produce un gas enriquecido en H<sub>2</sub> y CO que se puede utilizar como gas de síntesis para diversos compuestos (amoníaco, metanol, gasolinas, etc.).

Con hidrógeno. Se produce un gas de alto contenido energético que, por tener altos porcentajes de metano, puede utilizarse como sustituto del gas natural.

### **2.2.7 Termoquímica del proceso de gasificación**

En el proceso de gasificación tienen lugar una gran variedad de reacciones cuyo orden e importancia relativa dependen de las condiciones de operación y del agente gasificante utilizado, pero que pueden agruparse en tres bloques o etapas en los que conceptualmente puede dividirse un proceso de gasificación:

**PIRÓLISIS O DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA**, en la que mediante calor, el sólido original se descompone en una mezcla sólido, líquido, gas. Al sólido originado en esta etapa se le suele denominar char y, a los líquidos, debido a la presencia mayoritaria de alquitranes y vapores condensables, tar. Puede incluirse aquí el proceso de secado que tiene lugar al entrar la biomasa al gasificador, aunque este proceso no implica ninguna reacción química.

**OXIDACIÓN O COMBUSTIÓN**. Tiene lugar cuando el agente gasificante es un oxidante como oxígeno o aire e implica el conjunto de reacciones de oxidación, tanto homogéneas como heterogéneas, fundamentalmente exotérmicas, mediante las que se genera el calor necesario para que el proceso se mantenga.

**REDUCCIÓN O GASIFICACIÓN.** La constituyen las reacciones sólido-gas o en fase gas, mediante las que el sólido remanente se convierte en gas. Se trata de reacciones fundamentalmente endotérmicas, algunas de las cuales tienen lugar en muy poca extensión, o solo tienen lugar en determinadas condiciones, como ocurre con algunas reacciones de hidrogenación y/o reformado.

Las etapas de oxidación y reducción pueden considerarse conjuntamente en una sola etapa de gasificación en la que tienen lugar todo tipo de reacciones posibles entre el char y la mezcla gaseosa presente.

Existen una serie de factores que influyen en el proceso de gasificación, pudiendo distinguirse entre los que se refieren al modo de operación y al sólido gasificado, y los que son inherentes al diseño del gasificador y de los equipos auxiliares. Iremos pues examinando estos grupos de factores uno a uno.

### **2.2.8 propiedades de la biomasa**

Las tecnologías actuales permiten procesar prácticamente todo combustible de origen biomásico, para esto se debe cumplir con una serie de condiciones para conseguir un eficiente funcionamiento en el sistema aprovechando toda la biomasa disponible, las características de la biomasa alimentada tiene un efecto significativo en el rendimiento del gasificador, especialmente las siguientes:

El contenido de humedad en la biomasa presenta una gran variedad, desde un 5% a un 100% o más, por lo que en muchos casos es necesario un secado previo a su utilización. El agua requiere más de 2300 KJ/Kg para evaporizarse y 1500Kj/Kg para alcanzar 700°C durante la pirolisis o gasificación. En la tabla 4 se muestra el contenido de humedad para algunos residuos. El contenido de humedad afecta enormemente tanto a la operación del reactor como a la cantidad y calidad del producto obtenido.

La biomasa utilizada debe tener una densidad mínima de 200 a 250 Kg/m<sup>3</sup>, densidades menores provocarían problemas en el manejo de la biomasa y dificultaría la gasificación en lechos fluidizados, ya que la biomasa sería arrastrada por el gas de síntesis, la densidad depende de la tipología y presentación de la biomasa, la densidad real y aparente varía considerablemente.

El análisis elemental de los residuos biomásicos viene expresado por su contenido de C, H, N, S, O y cenizas, en la tabla 6 se describe el porcentaje de cada uno de estos componentes para los residuos de biomasa, obtenidos del análisis elemental a las biomásas.

Es de notar el bajo contenido de N del material biomásico comparado con el carbón. El contenido de ceniza de la biomasa es típicamente menor que para los carbones. Trabajando en altas temperaturas las cenizas pueden fundir, causando graves problemas en el reactor.

Es recomendable que la biomasa contenga menos de 10% de cenizas y su punto de fusión sea elevado.

En la tabla 6 se observa el resultado de pruebas de caracterización de varios tipos de biomasa, donde se observa que el cuesco de la palma presenta el mayor poder calorífico y junto con la cascarilla de café tienen bajo contenido de cenizas, lo cual los hace interesantes para su uso en procesos termoquímicos.

**Tabla 4. Caracterización de varios tipos de biomasa (% en masa).**

Biomasa	Análisis último %				Análisis próximo %				Poder calorífico MJ/Kg	
	<i>C<sub>waf</sub></i>	<i>h<sub>waf</sub></i>	<i>n<sub>waf</sub></i>	<i>O<sub>waf</sub></i>	<i>W</i>	<i>F</i>	<i>C<sub>f</sub></i>	<i>a</i>	<i>H<sub>o</sub></i>	<i>H<sub>s</sub></i>
Cuesco de palma	52,8	5,7	≤1	40,5	11,2	69	18,4	1,4	22,2	21,1
Cascarilla de café	50,3	5,3	≤1	43,8	10,1	72,7	16	1,2	18,7	17,5
Bagazo de caña	53,1	4,7	≤1	41,7	15	67	9,9	8,1	17,9	16,9
Madera de haya	48,9	0,5	≤1	45,4	5,53	84,7	9,4	0,39	18,3	17,1

Fuente: GÓMEZ, Klose.; Rincón, S.: Pirolisis de biomasa: cuesco de palma de aceite. Kassel, Alemania: Kassel university press, 2009

**Poder calorífico.** Lo podemos definir como la cantidad de calor que se desprende en la combustión completa de una unidad de masa, es decir, la cantidad de calor que entrega un kilogramo o metro cúbico de combustible al oxidarse en forma completa cuando el carbono pasa a anhídrido. Experimentalmente se determina mediante la combustión con oxígeno en bomba calorimétrica.

El poder calorífico aumenta con el contenido de carbón e hidrogeno y disminuye con el oxígeno, el poder calorífico de un sólido depende de su composición química y su humedad.

Se hace importante distinguir entre PCS (poder calorífico superior) y PCI (poder calorífico inferior). La diferencia radica en el estado de agregación del agua contenida, es decir, el PCS se define con agua líquida, y el PCI se define con un contenido de agua en forma de vapor. En la tabla 7 se muestra el poder calorífico superior e inferior de diferentes residuos. Conociendo el poder calorífico del combustible se tiene una idea aproximada del poder calorífico del gas de síntesis.

**Tabla 5. Poder calorífico de diferentes residuos.**

<b>COMBUSTIBLE</b>	<b>PODER CALORIFICO MEDIO</b>
	<b>KJ/Kg</b>
Bagazo húmedo	10500
Bagazo seco	19200
Cáscara de cacahuete	17800
Cascarilla de arroz	13800
Celulosa	16500
Corteza escurrida	5900
Cosetas de caña	4600
Madera seca	19000
Madera verde	14400
Paja de trigo	12500
Paja seca de cebada	13400
Serrín húmedo	8400
Viruta seca	13400
<b>COMBUSTIBLE</b>	<b>P. C. SUPERIOR KJ/Kg</b>
Cáscara de almendras	36800
Cáscara de nueces	32000
Cáscara de arroz	15300
Cáscara de pipa de girasol	17500
Cáscara de trigo	15800
Corteza de pino	20400
Corcho	20930

Fuente: poder calorífico de la biomasa, [Online], disponible en:  
[http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/tablas\\_tema\\_3.pdf](http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/tablas_tema_3.pdf)

**2.2.9 Modelación del proceso de gasificación.** Existen dos planteamientos matemáticos para describir el proceso de gasificación de biomasa, que transforman las variables físicas de entrada para obtener unas variables físicas deseadas a la salida; los modelos que describen este tipo de fenómenos se denominan modelos Cero-dimensional (0-D) y modelos Dimensionales, dependiendo del número de coordenadas espaciales considerado.

**Modelos Cero –Dimensional.** Los modelos Cero-Dimensionales son aquellos que relacionan variables de entrada y salida prediciendo la composición final del gas pobre obtenido y la temperatura de equilibrio en función de parámetros de entrada, tales como el tipo de biomasa, la humedad, la temperatura, entre otros.

El modelo plantea balances de materia y energía introduciendo un factor empírico que permite corregir la cinética relacionando los porcentajes de conversión del carbón reales y teóricos. El poder calorífico del gas pobre obtenido disminuye a medida que se incrementa la cantidad de aire como consecuencia del incremento en el porcentaje de conversión del carbón con el consiguiente aumento de CO<sub>2</sub> y disminución de la concentración de CO, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>.

**Modelos unidimensionales (1D).** Modelos transitorios. El proceso de combustión de residuos sólidos mediante un modelo unidimensional heterogéneo en estado transitorio ha sido estudiado por *Shin y Choi*.<sup>14</sup> Los autores consideran la devolatilización del combustible, la oxidación del carbón, volátiles y monóxido de carbono; estudian cómo influye la tasa de suministro de aire, el poder calorífico del combustible y el tamaño de partícula en el proceso y tienen en cuenta la intensidad de radiación como método de transferencia de calor por radiación en el lecho. *Yang et al.*<sup>15</sup> estudiaron la influencia de las tasas de cinética química del proceso de pirólisis, la variación de la tasa de suministro de aire y el contenido de humedad del combustible en el proceso de combustión de residuos sólidos, utilizando para ello un modelo unidimensional heterogéneo en estado transitorio que considera las etapas de secado, devolatilización, oxidación de volátiles, alquitranes y carbón.

Modelos estacionarios. Los modelos unidimensionales en estado estacionario del proceso de gasificación en lechos fijos en equicorriente, cuando ésta condición es la que predomina en los sistemas de gasificación una vez alcanzan el estado estable. Una combinación del equilibrio (zona de combustión-pirólisis) y un modelo unidimensional ha sido establecido por *Jayah et al.*<sup>16</sup> Con el fin de estudiar la composición y la temperatura a lo largo de la zona final del gasificador en función de parámetros de diseño del reactor y variables del proceso.

---

<sup>14</sup> SHIN, D.; CHOI, S. The combustion of simulated waste particles in a fixed bed. *Combustion and Flame*. Vol. 121. 2000. pp. 167-180.

<sup>15</sup> YANG, Y.; *et.al.* Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviours of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds. *Fuel*. Vol. 83. 2004. pp. 1553- 1562.

<sup>16</sup> JAYAH, T. *et.al.* Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 25. 2003. pp. 459-469.

**Modelos bidimensionales.** Para el desarrollo de modelos bidimensionales<sup>17</sup> se ha utilizado de forma muy habitual la experimentación en procesos de combustión de residuos sólidos urbanos. Este modelo considera el efecto difusivo de las ecuaciones de conservación de masa para las diferentes especies gaseosas, área del reactor y fracción libre constante. La transferencia de calor tiene en cuenta los fenómenos de convección, conducción y radiación (flujos de intensidad de radiación), además consideran los modelos de transferencia de energía en fase sólida y están contemplados por la ecuación de conservación de energía en el sólido. En este modelo se utilizan las ecuaciones de conservación del movimiento en las dos direcciones (modelo 2D) para determinar las velocidades en ambas fases.

### 2.3 MARCO TEORICO

Los gasificadores de lecho fijo (alimentación por lotes) o semimóvil (alimentación en continuo) tienen una cama fija de partículas sólidas de biomasa a través de las cuales se mueve el agente de gasificación. En los reactores de lecho fijo la fase sólida se mueve lentamente hacia la parte baja del reactor, a medida que ocurre la descomposición de la biomasa. Este tipo de gasificadores presentan las condiciones técnicas más simples, siendo relativamente fáciles de diseñar y de operar. Consisten principalmente de un espacio cilíndrico en donde suceden de forma secuencial los procesos de secado, pirolisis y gasificación, una unidad de alimentación de biomasa, un sistema de remoción de cenizas, un sistema dosificador del agente de gasificación y la salida del gas.

Algunos autores lo clasifican como lecho fijo<sup>18</sup> debido a que el tamaño del lecho permanece constante en el reactor, gracias a la continua alimentación que sobre éste se realiza. Además, las zonas de secado, pirolisis, combustión y gasificación permanecen constantes. Otros lo consideran como lecho móvil ya que si se observa una partícula, ésta va atravesando las diferentes zonas desde su ingreso hasta que es gasificada.

A continuación se da una descripción del proceso de gasificación para el caso de un reactor de corrientes paralelas empleado en este trabajo y los diferentes niveles de realización del mismo.

En una fase inicial se realiza el secado por medio de calentamiento indirecto, en esta fase se extrae la humedad contenida en la biomasa, obteniéndose biomasa seca y agua. La biomasa seca y el agua posteriormente entran en la zona de pirolisis, donde por efecto de la descomposición térmica la biomasa seca se descompone, produciendo carbonizado y volátiles. Los productos de la pirolisis junto con el agua obtenida en el secado ingresan a la zona de gasificación donde son mezclados con el agente de reacción y por medio de la

---

<sup>17</sup> PEREZ, J. *et al.* Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico-experimentales. Colombia 2010.

<sup>18</sup> REDDY, R.; Joshi, J. CFD modeling of pressure drop and drag coefficient in fixed beds: Wall effects. En: *Particuology* 8 (2010), p. 37–43

temperatura a la que son expuestos se producen las reacciones de gasificación y la reducción de los alquitranes contenidos en el gas.

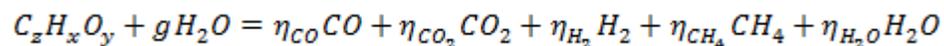
El uso de calentamiento indirecto en procesos de gasificación, permite obtener un gas con menor contenido de alquitranes y mayor poder calorífico al no tener una zona de combustión al interior del equipo de procesamiento.

Como producto final se obtiene un gas combustible que se compone principalmente de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, algunas trazas de hidrocarburos pesados como C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> y C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, agua y varios contaminantes como pequeñas partículas de carbonizado, cenizas y alquitranes. La velocidad de gasificación la determinan las reacciones químicas del carbonizado y los fenómenos de transferencia de calor y de masa en el interior de las partículas y en el lecho de material carbonizado; el cual, luego de ser sometido a sistemas de limpieza y enfriamiento reúne las condiciones adecuadas para su uso en motores de combustión interna.

Cabe destacar que en la fase inicial de operación del equipo el suministro de energía se hace por medio de una fuente externa; posteriormente cuando el proceso se estabiliza y comienza la producción de gas, se utiliza una fracción del gas producido para el suministro de energía necesario para mantener el proceso.

Existen varios modelos que pueden ser empleados en la simulación, estos permiten hacer un análisis coherente con el fin de optimizar el desarrollo del proceso. Estos modelos dan una información esencial en los mecanismos que describen la conversión durante el proceso de gasificación. Conocer estos mecanismos es fundamental para el diseño, evaluación y optimización de los gasificadores.

La fórmula que describe la reacción global de gasificación se expresa de la siguiente manera,



Si se considera  $z$  igual a 1; se tiene que  $x$  y  $y$  son el número de átomos presentes de H y O por cada átomo de C, respectivamente.  $g$  representa la cantidad de moles de agua agregada al proceso y  $n_i$  representa el número de moles de las especies consideradas en el análisis. El contenido de humedad de la biomasa se considera implícito en el agua agregada al proceso. Todos los reactantes en el lado izquierdo de la ecuación se consideran a 25 °C. Los productos en el lado derecho de la ecuación se consideran a la temperatura de gasificación<sup>19</sup>.

---

<sup>19</sup> GARCIA, L. Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo, tesis de maestría, Bogotá, 2011, Universidad nacional de Colombia.

Se establece una herramienta de simulación para la reproducción de las condiciones de reacción del proceso de gasificación, pudiendo optimizar el proceso sin necesidad de experimentar, lo que conlleva un ahorro económico y de tiempo. Para la resolución del modelo, será fundamental conocer un análisis inmediato de la biomasa para obtener: carbón fijo, materia volátil, humedad y cenizas; y un análisis elemental sin tener en cuenta la ceniza.

## **2.4 MARCO LEGAL**

Las bases legales que sustentan este proyecto están contempladas en la Constitución Política de Colombia, en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña y las normas internacionales que se mencionan a continuación.

### **2.4.1 Constitución política de Colombia**

**Artículo 71.** La búsqueda del conocimiento y la expresión artística son libres. Los planes de desarrollo económico y social incluirán el fomento a las ciencias y, en general, a la cultura. El Estado creará incentivos para personas e instituciones que desarrollen y fomenten la ciencia y la tecnología y la demás manifestaciones culturales y ofrecerá estímulos especiales a personas e instituciones que ejerzan estas actividades.<sup>20</sup>

### **2.4.2 Universidad Francisco de Paula Santander**

**Acuerdo 065 de 1996.** El cual establece el estatuto estudiantil que es el regente actual en la institución.

**Artículo 140.** El estudiante podrá optar por una de las siguientes modalidades del trabajo de grado:

#### **a. Proyecto de Investigación**

- Monografía
- Trabajo de Investigación: Generación o aplicación de conocimientos
- Sistematización del conocimiento.

#### **b. Proyecto de Extensión.**

- Trabajo social
- Labor de consultoría en aquellos proyectos en los cuales participe la Universidad.
- Pasantía
- Trabajo dirigido

---

<sup>20</sup> Constitución política de Colombia

PARÁGRAFO 1. El estudiante podrá optar como componente alterna al proyecto de grado, créditos especiales como cursos de profundización académica o exámenes preparatorios.

PARÁGRAFO 2°. Para algunos Planes de Estudio y de acuerdo a sus características el Consejo Académico podrá obviar la presentación del trabajo de grado.

**Artículo 141.** El proyecto de grado incluye las siguientes etapas:

**a.** Presentación del anteproyecto o plan de trabajo según corresponda a la modalidad del proyecto seleccionado.

**b.** Desarrollo de la investigación o ejecución física del proyecto.

**c.** Sustentación de la investigación y/o verificación o aval de la realización del proyecto.

PARÁGRAFO. Para todas las modalidades de proyecto de grado, el estudiante deberá presentar un informe final avalado por su director.

**Artículo 142.** Las condiciones y procedimientos para la presentación, desarrollo y evaluación de cada una de las modalidades de trabajo de grado, o sus componentes alternas, harán parte de la reglamentación específica de cada facultad, para cada plan de estudios.

PARÁGRAFO. La Universidad incorporará los trabajos de grado, como componente básico de su hacer y creará bancos de proyectos en los Departamentos Académicos y en la Vicerrectoría Asistente de Investigación y Extensión.

### **2.4.3 Normas internacionales**

#### **PROTOCOLO DE KYOTO**

El Protocolo de Kyoto establece, reducir el total de sus emisiones de GEI (Gases Efecto Invernadero) a un nivel inferior en no menos de 5% al de 1990 en el período de compromiso, comprendido entre el año 2008 y el 2012. Para cumplir con el mismo se establecieron además de las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero en cada país, y del comercio de emisiones, otros mecanismos como la Aplicación Conjunta (AC) y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Tras la ratificación por parte de Rusia en septiembre de 2004 el Protocolo de Kyoto se convierte en Ley internacional. Este mecanismo ofrece a los gobiernos y a las empresas privadas de los países industrializados la posibilidad de transferir tecnologías limpias a países en desarrollo, mediante inversiones en proyectos de reducción de emisiones o sumideros, recibiendo de esta forma certificados de emisión que servirán como suplemento a sus reducciones internas.

### 3. DISEÑO METODOLOGICO

#### 3.1 TIPO DE INVESTIGACION

Se realizó una revisión bibliográfica de todo aquello que incluye la biomasa, analizando cada una de sus aplicaciones. Se realizó una breve descripción de los materiales que son usados en el proceso de gasificación, para esto es necesario conocer sus propiedades fisicoquímicas.

Este proyecto se ha basado en una investigación cualitativa<sup>21</sup>, haciendo una descripción<sup>22</sup> detallada de la situación, apoyada en la recolección de datos y buscando la aplicación de los conceptos adquiridos en un área específica, tal como la termodinámica y transferencia de calor y masa que ayuden a resolver y/o dar solución a los objetivos específicos propuestos.

#### **3.2 FASES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

Para el desarrollo de la propuesta se establecen fases que cumplen con los objetivos específicos: se formula cada una de las fases y sus respectivas actividades a fin de formular el modelo teórico del proceso de gasificación de biomasa, las cuales son:

**3.2.1 FASE I. Revisión bibliográfica.** En esta fase se cumplió con el primer objetivo específico de describir el comportamiento de los parámetros del proceso de gasificación de diversos materiales y de sus efectos en la composición de la fase gaseosa generada realizando actividades en la búsqueda de información sobre características, propiedades de la biomasa empleada y estado del arte.

**3.2.2 FASE II. Análisis matemático.** En esta fase se cumple con el segundo objetivo específico que es aplicar un modelo matemático que permita realizar el análisis de la gasificación con el fin de optimizar el desarrollo del proceso, pudiendo predecir los componentes del gas producto.

**3.2.3 FASE III. Validación de resultados.** En esta última fase se cumplió con el tercer objetivo específico de simular el modelo mediante el software computacional “SCILAB”, después de determinar el tipo de biomasa sus características y propiedades, y los parámetros de la gasificación se propone un modelo matemático por el que se registrará la gasificación de biomasa.

---

<sup>21</sup> HERNANDEZ, R. Metodología de la investigación, 5ta ed

<sup>22</sup> CALDERON, H.: Lecturas básicas de metodología de la investigación. México: McGraw-Hill, 2003

## 4. PRESENTACION DE RESULTADOS

El proceso de gasificación y de pirolisis está íntimamente relacionados entre sí, es decir, al ser procesos consecuentes las variables consideradas en el proceso de pirolisis tienen gran incidencia en el producto obtenido y en el desarrollo del proceso de gasificación. En este capítulo se presentan aspectos importantes del desarrollo del proceso de gasificación y la descripción específica del proceso a emplear en este estudio. La primera parte describe el comportamiento de los parámetros que intervienen en el proceso de gasificación, la segunda parte es seleccionar y aplicar el modelo matemático que permita hacer análisis de la gasificación y la última parte es mostrar los resultados que arrojados por la simulación del modelo.

### 4.1 DESCRIPCION DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARAMETROS DEL PROCESO DE GASIFICACION

A continuación se enuncian los parámetros involucrados en la etapa de pirolisis, de tal forma se entienda la influencia de cada uno de éstos en el proceso.

#### **Etapa de pirolisis.**

**Tamaño de la partícula.** Hay que tener presente que en el proceso va a tener lugar un calentamiento de las partículas, la difusión de reactivos hacia la partícula y de productos desde esta hacia el medio gaseoso que la rodea, y reacciones sólido-gas en la superficie sólida. Por esto el tamaño de partícula influye en el tiempo necesario para que el proceso tenga lugar y en el volumen de reactor adecuado para ello.

Cuando se tienen tamaños de partícula pequeños se reduce la formación de carbonizado<sup>23</sup>, esto se debe a la homogeneidad con la que se calienta la muestra y la facilidad que tiene la materia volátil para abandonar la partícula, ya que el recorrido que ésta debe hacer desde el interior de la partícula hasta la superficie de la misma es menor si se compara con un material de tamaño de partícula mayor, minimizando la ocurrencia de las reacciones secundarias, efecto que se nota en la disminución de formación de carbonizado con el decrecimiento del tamaño de partícula. Por otro lado, pequeños tamaños de grano llevan a una substancial caída en la presión dentro del gasificador.

La influencia del tamaño de partícula en la producción de carbonizado es explicada por la tasa de calentamiento y el tiempo de residencia de los volátiles, los cuales reaccionan con la capa de carbonizado a medida que salen de la partícula para formar más carbonizado.

El tamaño de la partícula del material depende de las dimensiones del hogar pero es típicamente 10-20% del diámetro del hogar. Partículas más grandes pueden formar puentes

---

<sup>23</sup> DI Blasi, C.: Kinetic and heat transfer control in the slow and flash pyrolysis of solids. En: Industrial Eng. Chem. 35 (1996), p. 37-46

que impiden la alimentación en movimientos hacia abajo, mientras que partículas más pequeñas tienden a obstruir la fracción de huecos de aire disponible, lo que conduce a una caída de presión alta y el posterior cierre del gasificador.

**Presión.** La reducción de la presión desfavorece la formación de carbonizado y las reacciones de gasificación, aumentando las proporciones de hidrocarburos y alquitranes. El aumento de la presión dificulta la evacuación de la materia volátil favoreciendo la formación de carbonizado y de gas producto. *Baratieri et al.* Evalúan el efecto generado por el aumento de la presión en el proceso de la gasificación de madera de pino. Con un aumento de la presión se establece que la producción de CO y H<sub>2</sub> disminuye mientras que la producción de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> aumenta<sup>24</sup>.

**Atmosfera en la que se realiza la pirolisis.** La atmosfera en vacío favorece la producción de alquitranes, baja producción de carbonizado y volátiles. La atmosfera inerte se emplea gases como nitrógeno, helio o argón. Este tipo de atmosfera ayuda a la rápida evacuación de la materia volátil, reduciendo las reacciones secundarias. Aunque los tiempos de permanencia en el reactor son corto, con este método se obtiene una mayor producción de carbonizado<sup>25</sup>. Cuando se emplea un agente reactivo, como vapor de agua o mezcla de dióxido de carbono y vapor de agua, se fomenta la producción de materia volátil y líquidos. El carbonizado obtenido es menor en comparación a cuando se emplea una atmósfera inerte. Específicamente cuando se emplea vapor de agua la proporción de líquidos obtenidos es de 2 a 4 veces mayor que la obtenida en atmósferas inertes, esto se origina por la alta reactividad del vapor de agua que propicia las reacciones secundarias.

**Altura del lecho.** Este parámetro es similar a aquel que se presenta al variar el tamaño de partícula. Al aumentar la altura del lecho el material que se encuentra al interior de éste, no permite que los gases producidos en las reacciones primarias salgan fácilmente del lecho y sufren transformaciones posteriores (reacciones secundarias), lo que lleva a una mayor formación de carbonizado y reducción en la producción de alquitranes, tal como se presenta con tamaños de grano mayores; con alturas de cama menores se presenta menor formación de carbonizado y gas, y mayor formación de alquitranes.

**Temperatura final.** Con el incremento de la temperatura final se da mayor tiempo para la degradación del material sólido, si se tiene en cuenta que la tasa de calentamiento se mantiene constante, esto ocasiona una reducción en la formación de carbonizado; esta menor formación de carbonizado implica una mayor formación de materia volátil, que a su vez se descompone formando gases y alquitranes. La formación total de gases por su parte tiende al aumento con el incremento de la temperatura. En la formación de alquitranes se presenta un máximo en función de la temperatura, que corresponde con la temperatura a la cual se considera que la biomasa se ha degradado totalmente, aproximadamente 550°C.

---

<sup>24</sup> ANTAL, M.; Gronli, M.: The art, science, and technology of charcoal production. En: Industrial Eng. Chem. 42. 2003

<sup>25</sup> ORTIZ, W.: Modelación de la pirolisis de biomasa con base en experimentación en termobalanza. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2004

## **Etapas de gasificación.**

A continuación se muestran los parámetros que influyen en la etapa de gasificación de biomasa:

**Temperatura del proceso.** Diversos autores han reportado que la temperatura del proceso es un factor vital en la producción del gas de síntesis, puesto que ésta ayuda a la conversión de los componentes no combustibles (como  $CO_2$  y  $H_2O$ ) en combustibles (como  $CO$  y  $CH_4$ ), mejorando su capacidad calorífica. Para que ocurran las reacciones de gasificación, es necesario contar con temperaturas superiores a los 800 K, razón por la cual, normalmente, los gasificadores son precalentados hasta que alcancen una temperatura, en la zona de combustión, superior a los 800°C (1173,5 K)<sup>26</sup>. Temperaturas mayores a los 850°C implican que las condiciones de reactividad aumentan considerablemente y el gas de reacción no alcanza a penetrar en la estructura porosa del carbonizado<sup>27</sup>.

En general para distintos combustibles puede decirse que el aumento de temperatura favorece el aumento del contenido en el gas producto de  $H_2$  y  $CO$  en detrimento del  $CH_4$  y del  $H_2O$ . Las reacciones de gasificación del carbonizado se hacen apreciables a temperaturas mayores a 500°C, sin embargo a estos niveles de temperatura la velocidad de reacción es muy lenta y el proceso se hace muy demorado.

**Agente oxidante.** Es uno de los parámetros más importantes en la gasificación, especialmente cuando ésta se autoabastece energéticamente mediante la oxidación parcial, con aire u oxígeno del residuo tratado. Valores excesivamente bajos de este parámetro pueden no generar la cantidad suficiente de energía para mantener el proceso en las condiciones adecuadas, produciéndose una disminución del rendimiento.

Por otro lado, cuando el agente gasificante es aire, existe además un efecto de dilución por parte del  $N_2$ . Por ello hay un valor óptimo de la relación gasificante/residuo para cada proceso, que depende básicamente de la composición del residuo gasificado. El proceso con aire genera un gas de bajo poder calorífico de alrededor de 4 a 6 MJ/Nm<sup>3</sup>, debido a los altos contenidos de  $N_2$ . Cuando se utiliza oxígeno o vapor de agua se obtiene un gas con un poder calorífico superior de alrededor de 10 a 15 MJ/Nm<sup>3</sup> y 13 a 20 MJ/Nm<sup>3</sup> respectivamente; pero dado a que el oxígeno es altamente reactivo se presentan problemas para controlar la reacción. Cuando se utiliza hidrógeno como agente de reacción, se obtiene un gas con un poder calorífico superior de alrededor de 40 MJ/Nm<sup>3</sup>. En el caso del oxígeno e hidrógeno consideraciones técnicas y económicas son el principal limitante de uso<sup>28</sup>.

---

<sup>26</sup> RAMIREZ, R. Santiago: simulación computacional del proceso de gasificación de biomasa en el reactor de lecho fijo de la facultad de ingeniería de la universidad nacional de Colombia. Tesis de maestría. Colombia. 2010

<sup>27</sup> BRIDGWATER, A.: The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. En: Fuel 74. 1995

<sup>28</sup> MCKENDRY, P.: Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. En: Bioresource technology 83 (2002), p. 55–63

Con el aumento de vapor al cociente de biomasa aumenta el hidrogeno, mientras que el CO y CH<sub>4</sub> disminuyen. Hay algunas perdidas de energía en consecuencia de muy alta proporción de vapor a la biomasa como es la perdida de vapor a lo largo del producto. El vapor es utilizado como agente gasificante, por lo que las reacciones, sobre todo de metano y de desplazamiento del gas son altamente dependientes de la velocidad de alimentación de vapor. Por lo tanto, a mayor vapor/ relación biomasa se incrementa los rendimientos de hidrogeno en alto grado, mientras que CH<sub>4</sub> y CO es muy bajo<sup>29</sup>.

**Humedad.** El contenido en humedad en la biomasa presenta una gran variedad, desde un 5% a un 100% o más, por lo que en muchos casos es necesario un secado previo a su utilización. El agua requiere más de 2300 KJ/Kg para evaporizarse y 1500Kj/Kg para alcanzar 700°C durante la pirolisis o gasificación. El contenido de humedad afecta enormemente tanto a la operación del reactor como a la cantidad y calidad del producto obtenido.

Combustibles con contenido de humedad por encima de aproximadamente 30% de ignición hace difícil y reduce el poder calorífico del gas producto debido a la necesidad de evaporar la humedad adicional antes de que ocurra la combustión/gasificación. Un alto contenido de humedad reduce la temperatura alcanzada en la zona de oxidación, lo que resulta en el craqueo incompleta de los hidrocarburos liberados dela zona de pirolis. Aumento de los niveles de humedad y la presencia de CO produce H<sub>2</sub> por la reacción de desplazamiento del gas de agua y a su vez el aumento del contenido de H<sub>2</sub> del gas produce más CH<sub>4</sub> por hidrogenación directa. La ganancia en H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> del gas producto sin embargo, no compensar la pérdida de energía debido a reducir el contenido de CO del gas y por lo tanto da un gas producto con un poder calorífico inferior<sup>30</sup>.

**Catalizadores.** Dependiendo de la tecnología que se emplea, y de las condiciones de gasificación (relación residuos/gasificante, tiempo de residencia, etc.) se pueden usar catalizadores para inducir ciertas reacciones y que se produzca prioritariamente algún componente. Catalizadores de reformado de níquel o cobalto, gasificando a menos de 550 °C facilitan el craqueo de las fracciones pesadas, es decir, la reducción de la formación de alquitranes. Catalizadores basados en zeolita y dolomía reducen la temperatura de craqueo de 1.100 °C a 800-900 °C, es decir, que permiten trabajar a menor temperatura en la zona de reducción. Si se quiere facilitar la formación de monóxido de carbono e hidrógeno, se deben utilizar catalizadores de níquel y cobalto, trabajando entre 700 y 800 °C en la zona de reducción<sup>31</sup>.

---

<sup>29</sup> MURNI, M. Ahmad; *et al.* Kinetic Modelling of Biomass Steam Gasification System for Hydrogen Production with CO<sub>2</sub> Adsorption. proceedings of international conference for technical postgraduates (techpos 2009), Kula Lumpur, Malaysia, 14-15 Diciembre, 2009

<sup>30</sup> MCKENDRY, P. *Op. cit.*, p. 55-63

<sup>31</sup> IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). Biomasa: Gasificación. Madrid. 2007

Los catalizadores utilizados en la conversión de biomasa, de acuerdo a su empleo, pueden dividirse en dos distintos grupos; en el primer grupo el catalizador es directamente añadido a la biomasa previo a la gasificación, este catalizador tiene como propósito de reducir el contenido de compuestos líquidos orgánicos y tiene un pequeño efecto en la conversión del metano e hidrocarburos en el producto gaseoso. En el segundo grupo el catalizador se coloca en un reactor secundario, en una corriente del gasificador. Independientemente del tipo de gasificador, el catalizador puede operar bajo condiciones diferentes a la unidad de gasificación<sup>32</sup>.

#### **4.1.1 Descripción el proceso en un gasificador Downdraft**

El gasificador utilizado para este trabajo es de lecho fijo tipo downdraft, el cual entrega el gas combustible por la parte baja y la admisión de aire es realizada por la parte media del mismo. Las dificultades que se tiene que enfrentar en esta configuración es el contenido de cenizas y humedad en el gas producido; por otra parte, requiere de un tiempo prolongado de encendido que puede estar en un rango de 20 a 30 minutos. En general este tipo de configuración es más aceptable para aplicaciones en motores de combustión interna y turbinas de gas<sup>33</sup>.

El proceso de gasificación se cumple en una cámara cerrada y sellada que opera un poco por debajo de la presión atmosférica. Este proceso se desarrolla como sigue:

Primeramente se realiza el secado de la biomasa, en este proceso el agua contenida en la biomasa es removida a una temperatura superior a los 100°C, sin oportunidad de reaccionar.

El proceso de pirolisis es la segunda parte en la gasificación y es en donde la biomasa experimenta una descomposición térmica en ausencia de oxígeno a temperaturas inferiores a 550°C. La pirolisis habitualmente es dividida en pirolisis lenta y pirolisis rápida. Las reacciones de descomposición de la biomasa no son lo bastante rápidas como para alcanzar condiciones de equilibrio, es decir, en el gas pueden existir moléculas orgánicas producidas por fractura de otras mayores, que reaccionan con otros componentes del gas a temperaturas superiores o simplemente se fragmentan nuevamente; alquitrán.

La oxidación es el proceso siguiente a la pirolisis de la gasificación en los reactores downdraft, en esta etapa el aire es introducido en el proceso. A parte del oxígeno y del vapor de agua, algunos gases inertes también son adicionados. Este procedimiento se realiza entre 700-2000°C. Las reacciones de oxidación entre la fase sólida proveniente de la

---

<sup>32</sup> VARGAS, G.: Estudio exploratorio de la gasificación de biomasa para la producción de hidrogeno. escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas. Tesis. México, DF. 2008

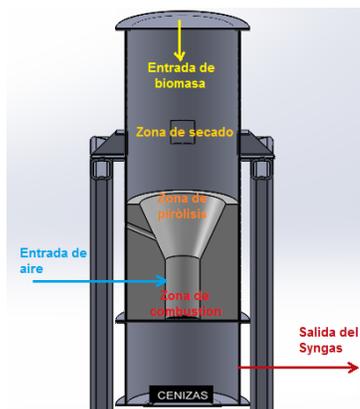
<sup>33</sup> ESTRADA, C.; ZAPATA, A.: Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. Universidad tecnológica de Pereira. Scientia et Technica Año X, No 25, Agosto 2004.

pirolisis (carbonizado) y el oxígeno contenido en el agente de reacción, las cuales son de naturaleza exotérmica; asimismo se producen las reacciones de reducción entre los alquitranes y gases presentes. Los productos que se obtienen en esta región son el H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> a partir de la combustión del combustible y los elementos creados en la pirolisis como los hidrocarburos pesados, el H<sub>2</sub> o alquitranes.

La reducción es la etapa final del proceso de gasificación, en la zona de reducción se producen numerosas reacciones químicas a alta temperatura que establecen el gas en su composición final. Esta etapa se produce simultáneamente y después de la oxidación. La reducción es la más compleja de todas las etapas, envuelve reacciones químicas entre HC, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, así como entre los gases desprendidos<sup>34</sup>. Si comparamos el residuo carbonoso de la biomasa con el del carbón fósil y coque, el primero es en general más poroso y reactivo, su porosidad está en el rango del 40 a 50% mientras que la del carbón fósil está entre el 2 y el 18%, los poros del residuo carbonoso de la biomasa son mucho más grandes que los del carbón fósil (Reed, 2002).

La cantidad y composición de los alquitranes dependen de la biomasa empleada, de las condiciones de operación del reactor y las reacciones secundarias que suceden en el gasificador. La figura 6 muestra las zonas de secado, pirolisis, gasificación que es donde ocurre la combustión de la biomasa y la zona de reducción o cenizas del gasificador en estudio.

**Figura 6. Zonas del gasificador en estudio.**



Fuente: Autor del proyecto<sup>35</sup>.

<sup>34</sup> FELISART, B.: simulación fluido-térmica de un reactor de gasificación de lecho fijo descendente, Lima, Pontificia universidad católica del Perú. 2014

<sup>35</sup> Dibujo realizado en el software CAD SOLIDWORKS.

#### 4.1.2 Producto obtenido

La composición del gas resultante del proceso de gasificación depende, fundamentalmente, del agente gasificante empleado, del tipo de residuo (en el caso de residuos agrícolas y forestales de la especie predominante de la cual se generan) y sus características de entrada en el gasificador (composición, tamaño, humedad, densidad, etc.), de la temperatura y la presión de funcionamiento del gasificador, de la velocidad de calentamiento, del tiempo de permanencia de los gases en el gasificador, etc. Finalmente, se obtiene una mezcla estable de gases formados por H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, otros hidrocarburos, etc., que suele ser rico en monóxido de carbono (18% a 20%) y/o hidrógeno (20% a 24%), con contenido menor de dióxido de carbono, metano y otros hidrocarburos.

El gas de síntesis (H<sub>2</sub>+CO) producido por la gasificación puede potencialmente utilizarse como combustible gaseoso para la generación de electricidad o la alimentación para la síntesis de combustibles limpios como el metanol, dimetil éter, aceites Fischer-Tropsch o algunos otros productos químicos<sup>36</sup>.

#### 4.2 SELECCIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO QUE PERMITE REALIZAR EL ANÁLISIS DE LA GASIFICACION.

Para el desarrollo del modelo se tienen en cuenta en especial la zona de piro-oxidación (zonas de pirolisis y oxidación). El proceso se ha resuelto basado en las ecuaciones de equilibrio químico, teniendo en cuenta las reacciones de desplazamiento de agua-gas y la reacción de metanación, como las reacciones se producen a altas temperaturas en estas zonas se puede obtener la composición de las diferentes especies.

En el punto 2.2.9 se mencionaron los modelos matemáticos que se aplican en los estudios de predicción de gas, por lo anterior, el presente trabajo se basa en un modelo 0-D que se explica a continuación.

Los modelos 0-D se conocen como modelos de equilibrio termodinámico y se caracterizan por ser independientes de las condiciones espaciales del equipo. Estos modelos relacionan las variables de entrada con las de salida, predicen la máxima conversión posible y la eficiencia teórica del proceso en función del tipo de biomasa, la relación agente-biomasa y la temperatura de procesamiento. Sin embargo bajo este planteamiento no es posible establecer la distribución de ningún parámetro a lo largo del equipo.

Existen dos tipos de modelos de equilibrio termodinámico: métodos estequiométricos y métodos no estequiométricos. Los métodos estequiométricos requieren definir específicamente el mecanismo de reacción que incorpora todas las reacciones químicas y

---

<sup>36</sup> VARGAS, G: *Op. cit.*, p.63.

las especies involucradas. Estos métodos están basadas en la determinación de las constantes de equilibrio.

En los métodos no estequiométricos, no es necesario establecer el mecanismo de reacción, las reacciones químicas o las especies involucradas. El único parámetro necesario es la composición elemental de la biomasa, la cual puede ser determinada fácilmente mediante el análisis último de la misma. Los métodos no estequiométricos están basados en minimizar la energía libre de Gibbs del sistema, sin especificar las posibles reacciones que tienen lugar durante el desarrollo del mismo. Sin embargo cabe destacar que ambos métodos están basados en el mismo concepto<sup>37</sup>.

#### **4.2.1 Ventajas del Modelado del Gasificador de Biomasa Downdraft**

Para efectos del modelado desarrollado en este trabajo se escoge el modelo 0-D debido a las ventajas que presenta, las cuales se describen a continuación<sup>38</sup>:

- Los modelos adimensionales se plantean mediante balances de conservación de masa, energía y reacciones químicas auxiliares para cerrar el sistema. Estos modelos son útiles para determinar hasta donde es posible llegar termodinámicamente en el proceso de gasificación. Se logra de esta forma predecir el comportamiento de los equipos mediante la modificación de parámetros en busca de maximizar la eficiencia.
- Son versátiles, ya que permiten evaluar diferentes parámetros de entrada como tipo de biomasa, contenido de humedad y relación agente-combustible, e intercambios de calor del proceso tales como pérdidas de energía, pre-calentamiento y caso adiabático).
- Estos modelos se destacan por su sencillez, facilidad de implementación y bajo tiempo computacional para su cálculo.

#### **4.2.2 Formulación del modelo Para el Gasificador Downdraft**

Los modelos de equilibrio están basados en algunas suposiciones generales, las cuales se consideran en el análisis llevado a cabo en este estudio. A continuación se describen dichas suposiciones:

- Se considera la biomasa mediante fórmula general como  $CH_xO_yN_z$ .
- El tiempo de residencia de los reactantes es suficiente para alcanzar el estado de equilibrio termodinámico.
- Se asume que todo el carbono contenido en la biomasa es gasificado y por lo tanto, la presencia de carbonizado en los productos no es considerada.

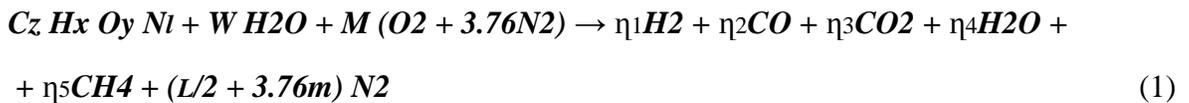
---

<sup>37</sup> GARCIA, *op. cit.*, p.54

<sup>38</sup> DEL VAL, V.; Antolín, G.: planta de cogeneración mediante gasificación de biomasa residual. Escuela técnica superior de ingenieros industriales, Paseo de cause s/n, 47011, Valladolid

- No se considera la formación de productos intermedios durante el desarrollo del proceso.
- Se asume una mezcla perfecta y una temperatura uniforme en toda la zona de gasificación.
- El gas obtenido del proceso está conformado por  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ .
- El gasificador se considera adiabático.
- La formación de alquitranes no es considerada.

La reacción global del proceso de gasificación de biomasa en un gasificador de lecho fijo downdraft con aire como agente oxidante es:



Dónde:

$z= 1$ .

$\eta$ = número de moles de las especies consideradas en el análisis.

$x$ = números de átomos presentes de Hidrógeno por cada átomo de carbono.

$y$ = números de átomos presentes de Oxígeno por cada átomo de carbono.

$L$ = números de átomos presentes de Nitrogeno por cada átomo de carbono.

El contenido de humedad es aproximadamente igual al contenido de agua agregada. Todos los reactantes en el lado izquierdo de la ecuación se consideran a 25°C. Los productos en el lado derecho de la ecuación se consideran a la temperatura de gasificación.

Con las fracciones másicas del análisis elemental de la biomasa se determinan los coeficientes  $x$  y  $y$ , así<sup>39</sup>:

$$x = \frac{\%H M_c}{\%C M_H} \quad (2)$$

$$y = \frac{\%O M_c}{\%C M_O} \quad (3)$$

---

<sup>39</sup> GARCIA, *op. cit.*, p.56

Relación aire-combustible puede ser calculada para un combustible con una fórmula química (Cz Hx Oy NL) por la siguiente ecuación así<sup>40</sup>:

$$\text{Aire}/_{comb} = (Z + 0.25X - 0.5Y) \quad (4)$$

Para la gasificación se necesita solo el 30% del aire estequiométrico.  
La cantidad molar de agua por un Kmol de la biomasa se puede escribir así:

$$w = \frac{M_{bm} * M_c}{M_{H_2O} * (1 - M_c)} \quad (5)$$

Donde:

W= contenido de humedad  
M<sub>bm</sub>= masa de la biomasa  
M<sub>c</sub>= contenido de humedad  
M<sub>H<sub>2</sub>O</sub>= masa de agua

#### BALANCE DE MASA

Se disponen de una serie de ecuaciones para hallar el valor de las cinco incógnitas que describen el número de moles en cada especie, en el balance de masa se generan tres ecuaciones para cada elemento. Los balances atómicos se obtiene respectivamente para los componentes C, H y O:

Balance de carbón:

$$1 = \eta_2 CO + \eta_3 CO_2 + \eta_5 CH_4 \quad (6)$$

Balance de hidrogeno:

$$2W + X = 2\eta_1 H_2 + 4\eta_5 CH_4 + 2\eta_4 H_2O \quad (7)$$

Balance de Oxigeno:

$$y + w + 2m = \eta_2 CO + 2\eta_3 CO_2 + \eta_4 H_2O \quad (8)$$

Considerando el sistema complejo de reacciones que se llevan a cabo dentro del gasificador, para que el modelo de equilibrio sea capaz de estimar correctamente los rendimientos de producción de los compuestos que conforman el gas de síntesis, es necesario seleccionar las reacciones más representativas del proceso.

---

<sup>40</sup> MAHDI, V.; *et al.* Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, IRAN. 1st WSEAS Int. Conf. on COMPUTATIONAL CHEMISTRY, Cairo, Egypt, December 29-31, 2007

En este sentido resulta adecuado concentrar toda la atención en las secciones de oxidación y de reducción del gasificador, debido a que en la sección de oxidación se consume completamente el oxígeno alimentado al mismo tiempo que el carbono del residuo se oxida y pasa a la fase gas, esta etapa resulta realmente crítica para el proceso y es en ella donde se define la conversión del carbono hacia la fase gas.

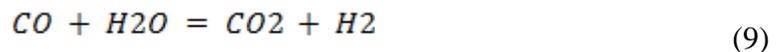
## EQUILIBRIO TERMODINÁMICO

El equilibrio químico es usualmente explicado mediante la minimización de la energía libre de Gibbs o usando constantes de equilibrio. Para realizar la minimización de la energía libre de Gibbs se emplean generalmente métodos restringidos de optimización basados en el método del multiplicador de LaGrange.

La determinación del equilibrio está basada en la consideración que la energía libre de Gibbs es cero en el equilibrio. En este estudio el equilibrio termodinámico es determinado mediante constantes de equilibrio<sup>41</sup>.

Para el modelo empleado en este estudio, se considera a todas las especies como gases ideales y que las reacciones se dan a presión atmosférica. De esta forma se obtienen las dos ecuaciones restantes necesarias para resolver el modelo, mediante el planteamiento de las constantes de equilibrio para las reacciones consideradas, así:

Reacción de desplazamiento Agua-Gas:



Reacción de metanación:



La ecuación de desplazamiento de agua-gas puede ser creada a partir de la combinación de la reacción de Boudouard. Para el modelo en este estudio, el equilibrio termodinámico se supuso para todas las reacciones químicas en la zona de gasificación. Todos los gases se asumieron como ideal y todas las reacciones tienen lugar a presión 1Atm. La relación entre las constantes de equilibrio, K, para las ecuaciones 8 y 9 se pueden escribir así:

---

<sup>41</sup> JARUNGTHAMMACHOTE, S.; Dutta, A.: Thermodynamic Equilibrium Model and Second Law Analysis of a Downdraft Waste Gasifier. Energy Field of Study, School of Environment, Resources and Development, Asian Institute of Technology, Pathumthani, Thailand. The 2<sup>nd</sup> Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)” 21-23 November 2006, Bangkok, Thailand.

$$0 = K1 (\eta_{2CO} * \eta_{4H2O}) - (\eta_{3CO2} * \eta_{1H2}) \quad (11)$$

$$0 = K2 (\eta_{1H2})^2 - (\eta_{5CH4}) * (\eta_{Total}) \quad (12)$$

Donde K1 y K2 son las constantes de equilibrio para la reacción de desplazamiento de agua-gas y la reacción de metanación, respectivamente.

Para completar la formulación del sistema, se requieren los valores de las constantes de equilibrio, las cuales están en función de la temperatura de gasificación, así<sup>42</sup>:

$$K1 = \exp(4000 * T^{-1} - 3.5) \quad (13)$$

$$K2 = \exp(10000 * T^{-1} - 12.2) \quad (14)$$

#### 4.2.3 Solución del Modelo

Para encontrar los valores del número de moles de las especies consideradas en este estudio; se toma una temperatura de gasificación inicial y se calculan los valores de K1 y K2 en las ecuaciones (13) y (14); luego estos valores se reemplazan en las ecuaciones (11) y (12), respectivamente. Finalmente, Las ecuaciones (6), (7), (8), (11) y (12), forman un sistema no lineal el cual se resuelve por el método de Newton-Raphson. La implementación numérica se realizó en Scilab.

Mediante este método iterativo se establecen los valores de las variables consideradas y se repite el proceso hasta que converjan los valores obtenidos de las mismas. Posteriormente se incrementa la temperatura de gasificación y se repite el cálculo. De esta forma se obtienen los valores de la composición del gas para cada temperatura de gasificación considerada.

Para determinar la adecuada composición del gas producto debe seguirse un método iterativo de cálculo. En el presente trabajo se utilizó el método de Newton Raphson Multivariable. El balance de masa entrega tres ecuaciones lineales que son útiles en la zona de oxidación y en la zona de reducción. El equilibrio termodinámico dispone de dos ecuaciones, una lineal y otra no lineal del balance de energía.

Para la zona de gasificación se tiene un total de 5 incógnitas, siendo estas el número de moles para cada especie que compone el gas.

El desarrollo del método de Newton-Raphson para sistemas de ecuaciones, se puede generalizar, al caso de sistemas de ecuaciones no lineales, basados en el teorema de Taylor para el caso multidimensional:

---

<sup>42</sup> GARCIA, *op. cit.*, p.57

Sea  $X=X_0 + H$  una raíz de  $F$ , entonces  $F(X)= F(X_0 + H)= 0$ , y con el teorema de Taylor se obtiene:

$$0= F(X) \approx F(X_0) + J|_{x_0} * H \quad (15)$$

Obsérvese que la ecuación anterior es un sistema lineal de ecuaciones para determinar el vector desconocido  $H$ , es decir, se linealiza el problema original. Si la Jacobiana  $J|_{x_0}$ , no es singular, se puede resolver este sistema, multiplicando la anterior ecuación por su inversa  $(J|_{x_0})^{-1}$  y se obtiene:

$$0 \approx (J|_{x_0})^{-1} F(X_0) + H \rightarrow H \approx -(J|_{x_0})^{-1} F(X_0)$$

Y la nueva aproximación de la raíz  $X$  es

$$X_1=X_0 + H. \quad (16)$$

Inicia con una aproximación de la raíz  $X_0$

En cada iteración:

$$X_{k+1} = X_k + H \quad (17)$$

$$\text{Donde } H = -(J|_{x_0})^{-1} F(X_k) \quad (18)$$

#### **4.3 SIMULACION DEL MODELO MEDIANTE EL SOFTWARE SCILAB.**

Uno de los aspectos más importantes de la investigación y el desarrollo del trabajo es la simulación matemática. Si bien no puede proporcionar una predicción muy exacta del comportamiento del sistema, si facilita una orientación cualitativa sobre el efecto de diseño, variables de entrada y condiciones de funcionamiento.

Algunos aspectos importantes que se tienen en cuenta para modelar son los siguientes:

El modelado puede proporcionar un medio más económico de evaluar los beneficios asociados a la aplicación de nuevas tecnologías como lo es la pirolisis, gasificación y demás procesos termoquímicos.

Usando datos experimentales, la simulación permite optimizar la operación o el diseño.

Proporciona información sobre las condiciones extremas de funcionamiento donde los experimentos son difíciles de realizar.

### 4.3.1 Resultados del Modelo 0-D.

A partir de los datos de los análisis elementales de la biomasa, en la tabla 8 se muestra la composición final y la fórmula química de tres tipos diferentes de biomasa con porcentajes de humedad (W) de 8.6% para la cascarilla de arroz, de 15% para el bagazo de caña y para la madera con un 27.5%.

**Tabla 6. Análisis elemental y fórmula química para la biomasa.**

BIOMASA	C%	H%	O%	N%	FORMULA QUIMICA
MADERA <sup>43</sup>	52.5	6.16	41.24	0.10	CH <sub>1.4</sub> O <sub>0.59</sub> N <sub>0.0017</sub>
CASCARILLA DE ARROZ <sup>44</sup>	42.5	6	36.2	0.21	CH <sub>1.7</sub> H <sub>0.64</sub> N <sub>0.0042</sub>
BAGAZO DE CAÑA <sup>45</sup>	41.34	4.99	36.40	0.14	CH <sub>1.45</sub> O <sub>0.66</sub> N <sub>0.0029</sub>

Fuente: Autor del proyecto

En el presente trabajo el equilibrio termodinámico fue evaluado en rango comprendido entre los 800 K y 1200 K. siendo este el intervalo de temperatura donde comienza hacerse notorio la conversión del carbón y producirse las demás reacciones para completar el proceso de gasificación.

En la figura 7 se puede apreciar la composición del gas obtenido para la madera. El resultado obtenido destaca el rango de temperatura comprendido entre los 1050K y los 1150K, en el cual se consigue la mayor producción de H<sub>2</sub>, se considera que la reacción de desplazamiento agua- gas es exotérmica y ese caso la constante de equilibrio se reduce a medida que se incrementa la temperatura. Si las constantes de equilibrio (K<sub>1</sub> y K<sub>2</sub>) toman valores negativos se invierte la reacción, reduciendo el contenido de H<sub>2</sub> y aumenta la cantidad de H<sub>2</sub>O.

---

<sup>43</sup> BARAJAS, F.: Diseño y construcción de un gasificador para el aprovechamiento energético de la biomasa residual forestal de la universidad industrial de Santander. Tesis, Bucaramanga, 2013. Universidad industrial de Santander.

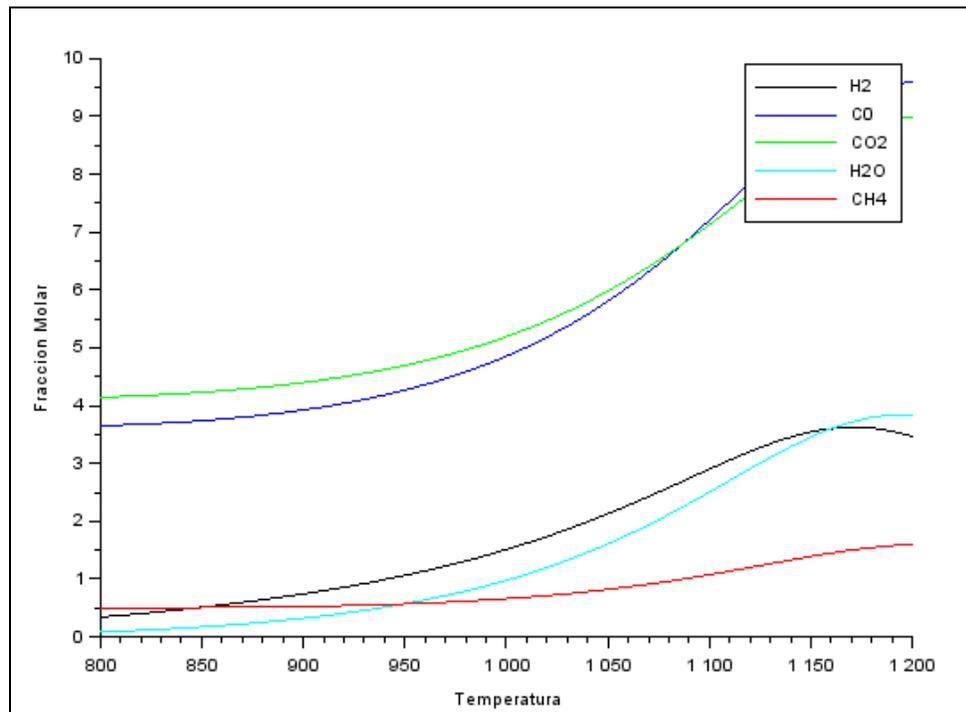
<sup>44</sup> VALVERDE, A; *et al.*: Análisis Comparativo de las Características Físicoquímicas de la cascarilla de Arroz, *Scientia et Technica*, año XIII, N°37, Diciembre 2007, Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701, Vol. 5, pág. 255-260.

<sup>45</sup> Características físicoquímicas del bagazo de caña, [On Line] disponible en internet en: <https://www.ecn.nl/phyllis2/Browse/Standard/ECN-Phyllis#bagasse>

Por otro lado se observa que el contenido de  $\text{CH}_4$  se mantiene casi constante a medida que se aumenta la temperatura, alcanzando su máximo valor en el punto de los  $1200\text{K}$  aproximadamente.

También se puede observar que el contenido de  $\text{CO}$  aumenta desde que comienza el proceso en la zona de gasificación hasta cuando alcanza los  $1200\text{K}$ . Siendo el punto de temperatura donde se tiene los más altos niveles de  $\text{CO}$  junto con  $\text{H}_2$ .

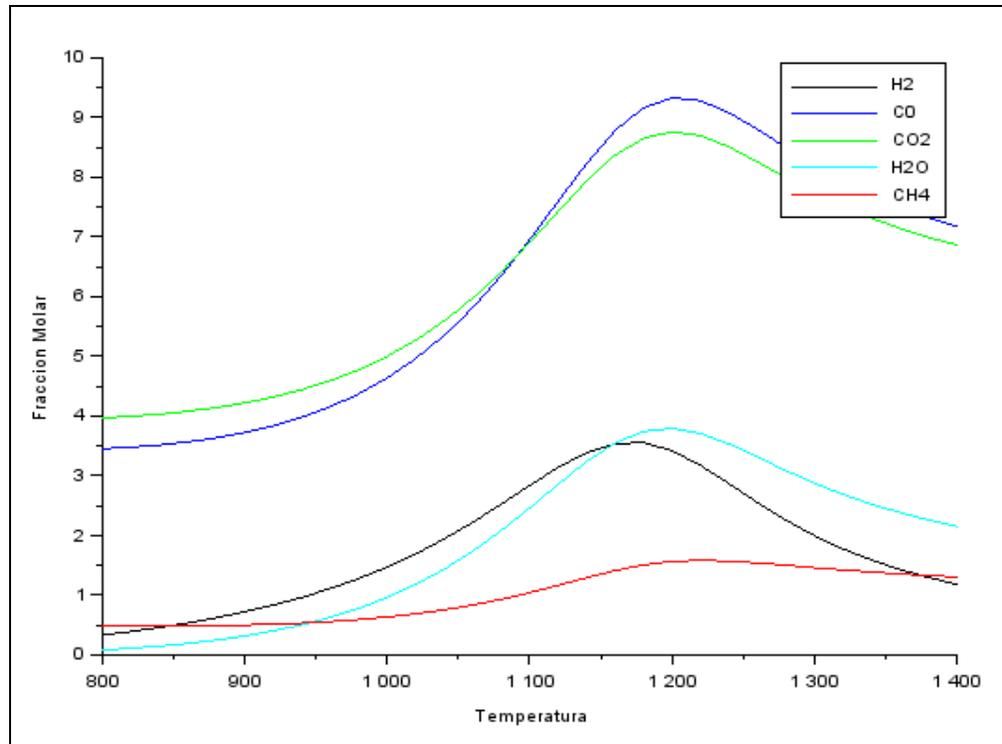
**Figura 7. Composición del gas obtenido para la madera.**



Fuente: Autor del proyecto

En la figura 8 y la figura 9 se aprecia la composición del gas obtenido para la cascarilla de arroz y el bagazo de caña respectivamente. Se observa que la fracción molar producida de  $\text{CO}$  en la cascarilla de arroz en  $800\text{K}$  es de aproximadamente de 4, levemente mayor comparado con el bagazo de caña donde la fracción molar es de 3.8 y menor para la madera que a esa misma temperatura está por encima de 4.2 aproximadamente. La fracción molar para el metano ( $\text{CH}_4$ ) es de 0.5 haciéndose casi que constante a lo largo del aumento de la temperatura. El  $\text{CH}_4$  cuando alcanza el punto de temperatura de  $1200\text{K}$  obtiene una fracción molar de 1.5 en cada gas producto para los tres tipos de biomásas utilizados.

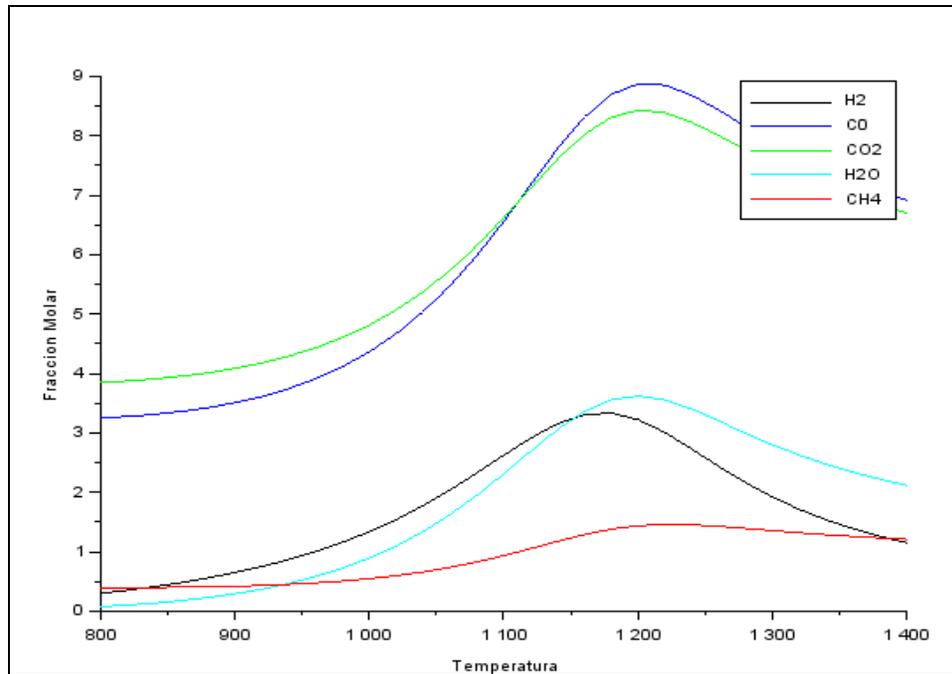
Figura 8. Composición del gas obtenido para la cascarilla de arroz.



Fuente: Autor del proyecto

De igual manera la figura 7 muestra la composición del gas producto para la madera, similar al gas producto obtenido para la cascarilla de arroz (figura 8) y el bagazo de caña (figura 9), debido a los porcentajes semejantes en la composición química (C, H, O, N), en la tabla 8 se observa que la cascarilla de arroz está compuesta por un 42.5% de C, 6% de H, mientras que para el bagazo de caña tiene 41.34% de C y 4.99% de H, arrojando formulas químicas muy parecidas para los tres tipos de biomasa utilizados.

Figura 9. Composición del gas obtenido para el bagazo de caña de azúcar.



Fuente: Autor del proyecto

La tabla 8 relaciona valores típicos para la composición del gas, utilizando tres agentes gasificadores. En el presente trabajo se utilizó aire como agente oxidante. Haciendo una comparación de los resultados obtenidos con los de la tabla, se observa que el CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub> se encuentran dentro del rango establecido entre 10 a 20, y 1 a 8 respectivamente.

Tabla 7. Composición típica del gas.

COMPOSICION TIPICA DEL GAS			
Componente	Vol. % seco	Aire	Aire Enriquecido (80% O <sub>2</sub> ) vapor
CO		10-20	40-50 25-47
H <sub>2</sub>		9-20	9-17 35-50
CH <sub>4</sub>		1-8	<1 14-25
CO <sub>2</sub>		10-20	19-25 9-15
N <sub>2</sub>		40-55	15-30 2-3
Valor calórico neto (Mj/Nm <sup>3</sup> , seco)		4-6,5	7-9 12-17

Fuente: Composición típica del gas, disponible en: [Online]. [22 de enero de 2015]:<http://ostargi.biz/energia-y-frio-por-biomasa/gasificacion-de-biomasa/>

#### 4.3.1.1 Efecto del contenido de humedad

Todos combustibles de biomasa contienen altos niveles de humedad, esta puede ser inherente a la biomasa o también debido a las condiciones climáticas.

Cuando el contenido de humedad en la biomasa es alto, una gran cantidad de calor generado en el gasificador se gasta en la vaporización de la humedad y sobrecalentando el vapor.

El contenido de humedad (W) ha sido variado en un rango de 0.2 a 0.4, este valor es obtenido del análisis elemental de la biomasa.

La tabla 8 muestra detalladamente los valores de cada componente al variar la humedad en el punto de temperatura de 800K.

**Tabla 8. Efecto de la humedad en la composición del gas obtenido para la madera a 800K.**

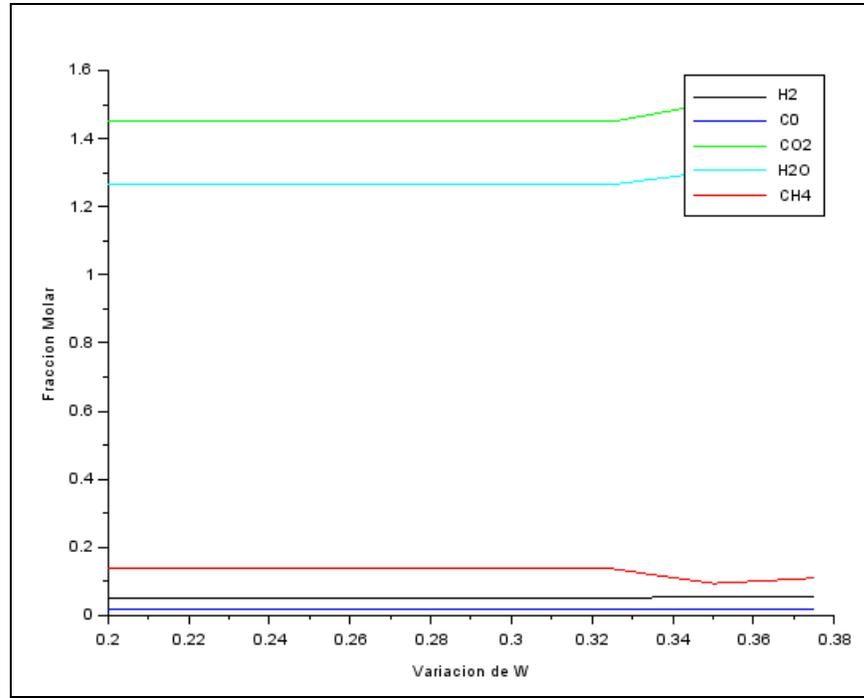
Temperatura Variación de W	800 K				
	H2	CO	CO2	H2O	CH4
0,2	0,052146	0,0196169	1,4498406	1,2651565	0,1372828
0,225	0,052146	0,0196169	1,4498406	1,2651565	0,1372828
0,25	0,052146	0,0196169	1,4498406	1,2651565	0,1372828
0,275	0,052146	0,0196169	1,4498406	1,2651565	0,1372828
0,3	0,052146	0,0196169	1,4498406	1,2651565	0,1372828
0,25	0,052146	0,0196169	1,4498406	1,2651565	0,1372828
0,35	0,0552248	0,0198037	1,5049773	1,3038502	0,0944119
0,375	0,0575008	0,0196035	1,4961496	1,3357194	0,1101627

Fuente: Autor del proyecto

Se observa, en este punto de temperatura, el aumento leve del 5.28% en contenido de agua, mientras que el CH<sub>4</sub> disminuye en 19.75 %, los demás componentes se mantienen de forma constante.

La figura 10 muestra el efecto de humedad en los valores de la composición del gas producto para una temperatura de 800 K, en esta temperatura es donde se comienza a hacerse notorio los niveles de especies que conforman el gas.

**Figura 10. Efecto de la humedad en los valores en la composición del gas obtenido para madera a 800K**



Fuente: Autor del proyecto.

En la tabla 9 se detalla los valores para cada componente del gas cuando se varía la humedad en el rango ya especificado (0.2 hasta 0.4) para el punto de temperatura de 1200K

**Tabla 9. Efecto de la humedad en la composición del gas obtenido para la madera 1200K.**

Temperatura	1200 K				
Variación de W	H2	CO	CO2	H2O	CH4
0,2	0,5374396	1,2416883	2,2265863	1,1385158	0,015102
0,225	0,5511885	1,2372808	2,221562	1,161567	0,0157188
0,25	0,5648908	1,239116	2,2165724	1,1997669	0,0163393
0,275	0,5785471	1,2285793	2,2116161	1,2303471	0,0169632
0,3	0,5921579	1,2242824	2,2066921	1,2608983	0,0175903
0,25	0,6057237	1,2200197	2,2017993	1,2914211	0,0182204
0,35	0,619245	1,2157898	2,1969367	1,3219164	0,0188531
0,375	0,6327222	1,2115916	2,1921034	1,3523848	0,0194882

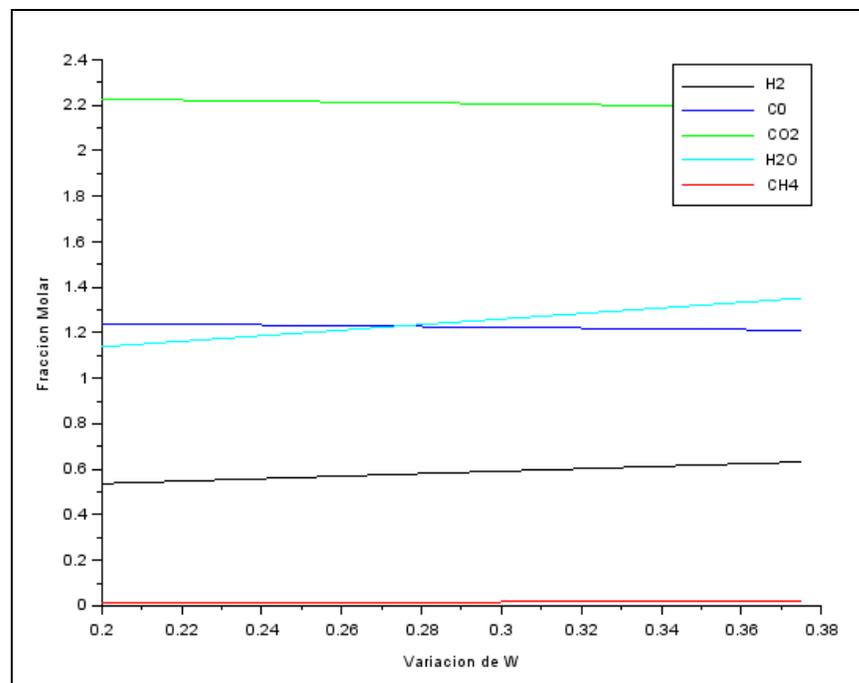
Fuente: Autor del proyecto.

El aumento del H<sub>2</sub> y del CO en este punto, con respecto al punto de los 800K ha sido de un 90% aproximadamente, variando la humedad hasta en 37.5%. Con esto se busca encontrar un punto de referencia con el que se pueda manejar un porcentaje de humedad en la biomasa que no altere significativamente los componentes del gas en cada punto de temperatura a lo largo del proceso de gasificación.

La figura 11 muestra efecto de la variación de humedad en el contenido de especies en la composición del gas producto para la temperatura de 1200 K, en la cual es donde se produce por completo la conversión del carbón.

Con el aumento del contenido de humedad, el H<sub>2</sub> aumenta, mientras el CO disminuye levemente y el CH<sub>4</sub> se mantiene casi que constante y esto depende fuertemente de la operación estequiometrica del gasificador.

**Figura 11. Efecto de la humedad en la composición del gas obtenido para la madera a 1200K.**



Fuente: Autor del proyecto.

El valor calorífico de un sólido depende de su composición química y su humedad. El poder calorífico del gas producto depende de la concentración de los componentes del combustible, disminuyendo su valor a medida que se incrementa la cantidad de aire, como consecuencia se tiene el incremento de los porcentajes de conversión de carbón con el

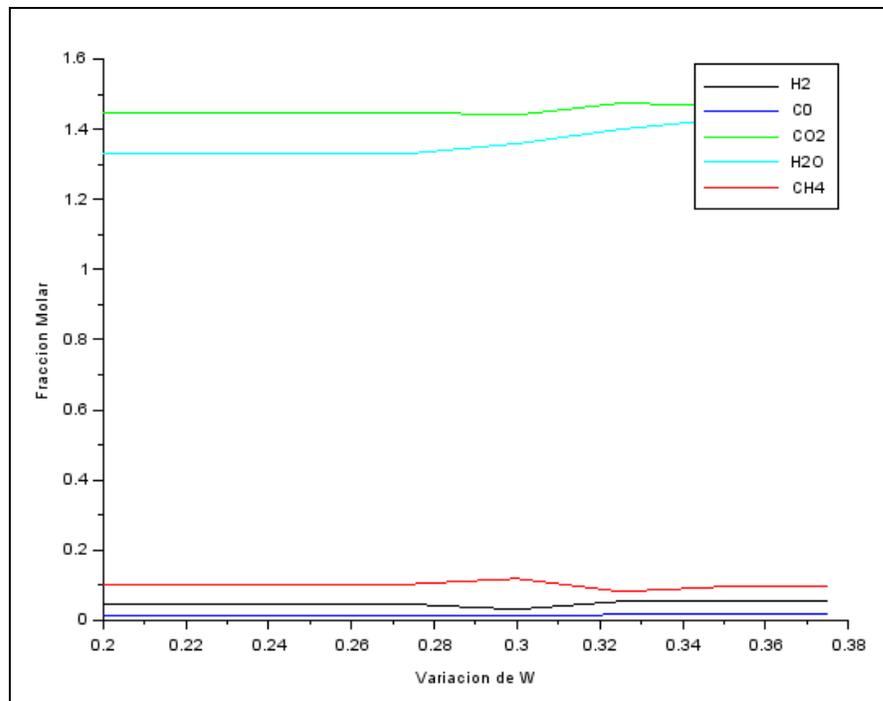
siguiente aumento de CO<sub>2</sub> y disminución de la concentración de CO, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>, el valor de calentamiento del gas se reduce con el aumento de la humedad.

**Tabla 10. Efecto de la humedad en los valores en la composición del gas obtenido para la cascarilla de arroz a 800K.**

Temperatura	800 K				
Variación de W	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
0,2	0,0458296	0,0160766	1,4478069	1,3321354	0,1041387
0,225	0,0458296	0,0160766	1,4478069	1,3321354	0,1041387
0,25	0,0458296	0,0160766	1,4478069	1,3321354	0,1041387
0,275	0,0458296	0,0160766	1,4478069	1,3321354	0,1041387
0,3	0,031599	0,0122976	1,4408477	1,3591358	0,1194985
0,35	0,0542743	0,0169682	1,4748556	1,4000805	0,0820343
0,375	0,0566129	0,0169747	1,466653	1,4294985	0,0964049

Fuente: Autor del proyecto.

**Figura 12. Efecto de la humedad en la composición del gas obtenido para la cascarilla de arroz a 800K.**



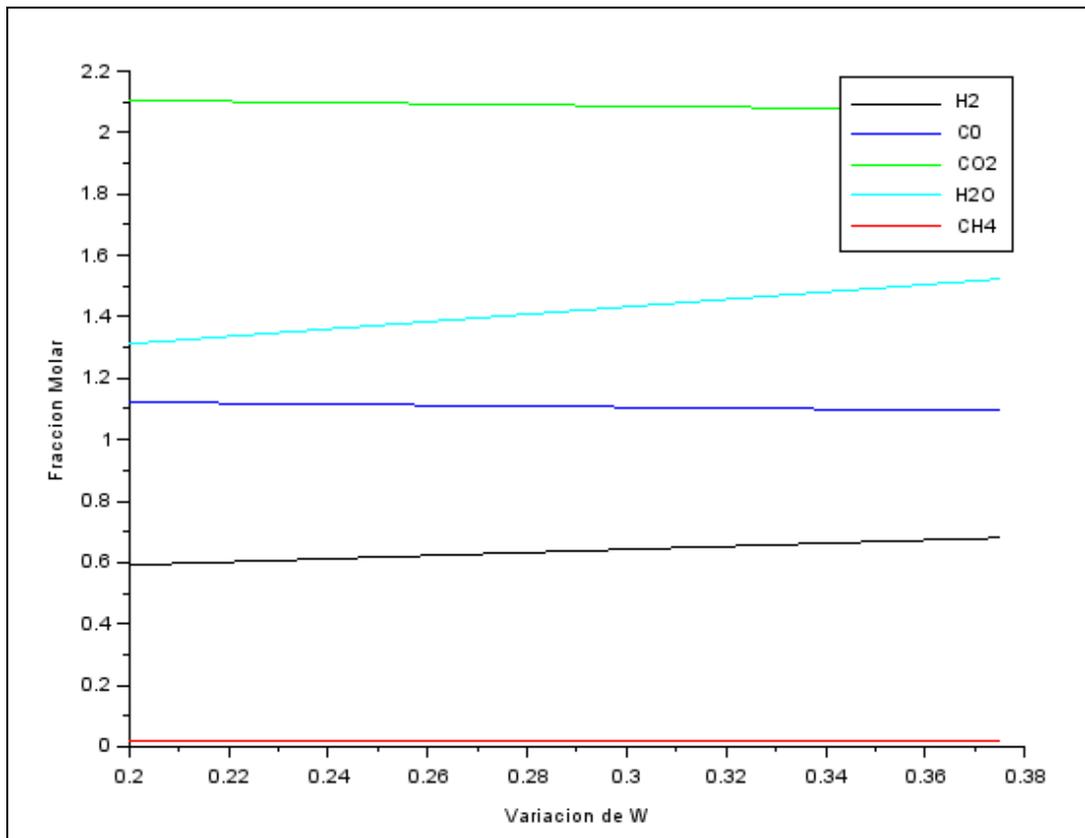
Fuente: Autor del proyecto.

**Tabla 11. Efecto de la humedad en los valores en la composición del gas obtenido para la cascarilla de arroz a 1200K.**

Temperatura	1200 K				
Variación de W	H2	CO	CO2	H2O	CH4
0,2	0,5919782	1,122238	2,1051812	1,3118755	0,0170568
0,225	0,6047522	1,1181107	2,100489	1,3421327	0,0176217
0,25	0,6174785	1,1140124	2,0958245	1,3723634	0,0181879
0,275	0,6301575	1,1099421	2,0911869	1,4025683	0,0187552
0,3	0,6427893	1,1058987	2,0865754	1,4025683	0,0193233
0,325	0,6553744	1,1018814	2,0819893	1,4629029	0,0198922
0,35	0,6679128	1,0978893	2,0774279	1,4930335	0,0204614
0,375	0,6804047	1,0939216	2,0728906	1,5231404	0,0210310

Fuente: Autor del proyecto.

**Figura 13. Efecto de la humedad en la composición del gas obtenido para la cascarilla de arroz a 1200K.**



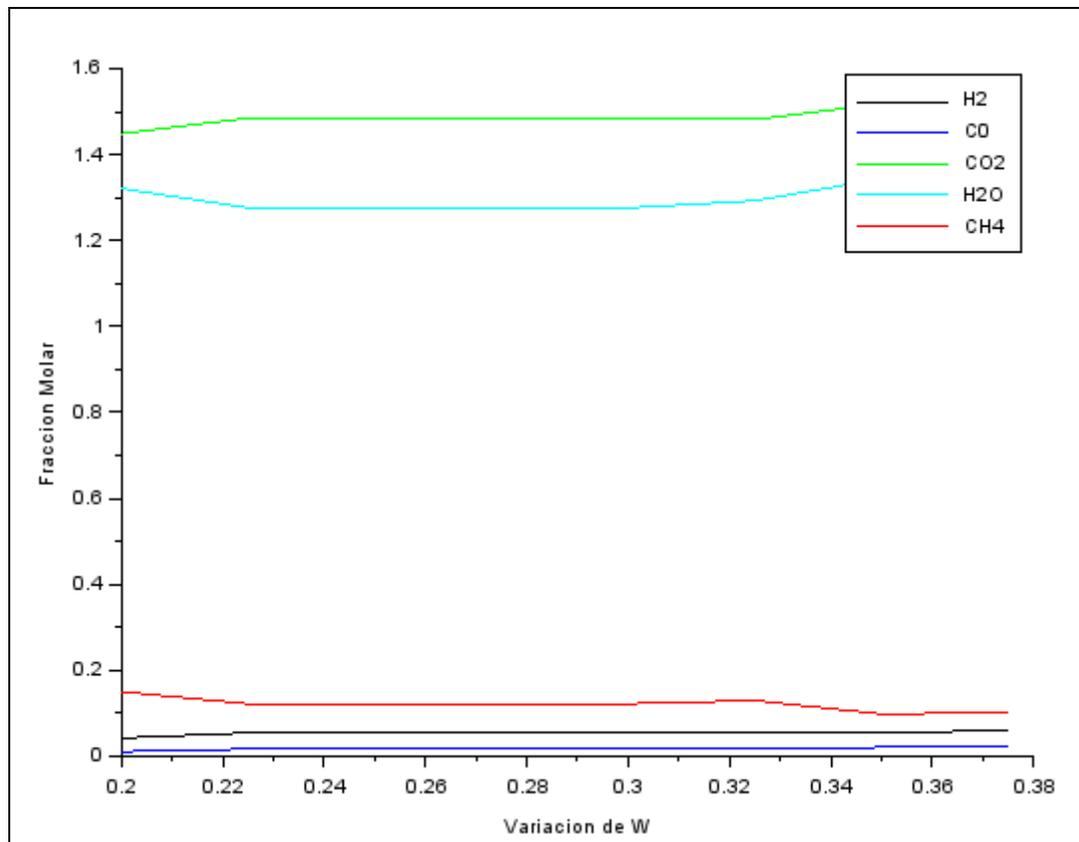
Fuente: Autor del proyecto.

**Tabla 12. Efecto de la humedad en los valores en la composición del gas obtenido para el bagazo de caña a 800K.**

Temperatura	800 K				
Variación de W	H2	CO	CO2	H2O	CH4
0,2	0,0426358	0,0111059	1,4489622	1,3212953	0,150217
0,225	0,0548192	0,0171095	1,4852734	1,2763565	0,1222403
0,25	0,0548192	0,0171095	1,4852734	1,2763565	0,1222403
0,275	0,0548192	0,0171095	1,4852734	1,2763565	0,1222403
0,3	0,0548192	0,0171095	1,4852734	1,2763565	0,1222403
0,325	0,0538178	0,0165868	1,4817101	1,2928063	0,1300033
0,35	0,0566255	0,0210781	1,5187946	1,343973	0,0985992
0,375	0,0590691	0,021472	1,5167402	1,3519991	0,1021359

Fuente: Autor del proyecto.

**Figura 14. Efecto de la humedad en la composición del gas obtenido para el bagazo de caña a 800K.**



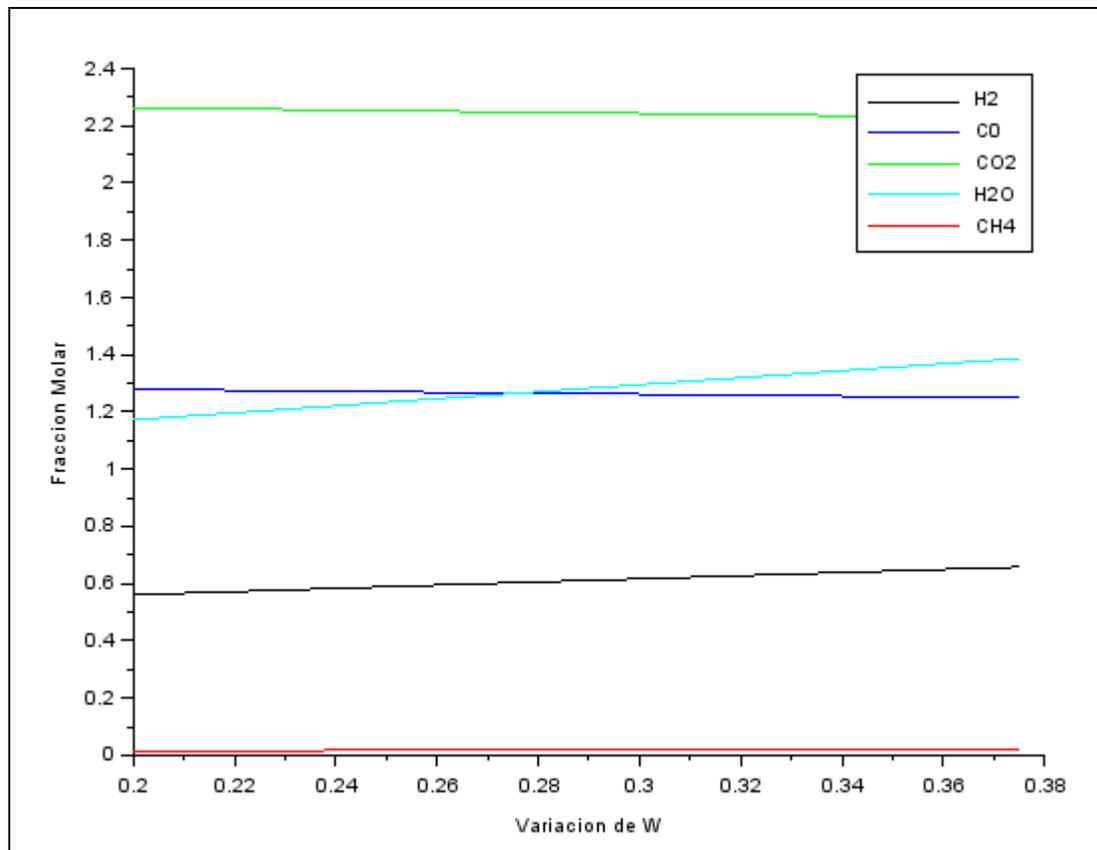
Fuente: Autor del proyecto.

Tabla 13. Efecto de la humedad en los valores en la composición del gas obtenido para el bagazo de caña a 1200K.

Temperatura	1200 K				
Variación de W	H2	CO	CO2	H2O	CH4
0,2	0,5614008	1,27977856	2,2634141	1,1729574	0,0163715
0,225	0,575397	1,2753878	2,2583662	1,2036554	0,0170216
0,25	0,5893489	1,2710279	2,2533523	1,2343233	0,0176756
0,275	0,603257	1,2667044	2,2483712	1,264962	0,0183332
0,3	0,6171217	1,2624159	2,2434217	1,2955725	0,0189942
0,325	0,6309437	1,2581612	2,238503	1,3261553	0,0196583
0,35	0,6447233	1,253939	2,2336138	1,3567113	0,0203252
0,375	0,6584609	1,2497481	2,2287534	1,3872412	0,0209946

Fuente: Autor del proyecto.

Figura 15. Efecto de la humedad en la composición del gas obtenido para el bagazo de caña a 1200K.



Fuente: Autor del proyecto.

En las figuras donde se tienen en cuenta el efecto de la humedad en la composición del gas para cada una la biomasa utilizada en el punto de temperatura de 1200K (figura 11, figura 13 y figura 15), el hidrogeno aumenta paralelamente aumenta la humedad de la biomasa, de igual manera aumenta los contenidos de agua en el gas producto en el orden del 15%, disminuyendo los contenidos de CO, por otro lado el CH<sub>4</sub> permanece casi que constante al variar la humedad pero con fracciones molares bajas alrededor de 0.017.

Para la temperatura del proceso en el punto de los 800K la producción de cada elemento que compone el gas para cada tipo de biomasa permanece constantes en el rango del 20% a 32%, si se aumenta la humedad desde 32% hasta 40% se hacen notorios cambios, es decir los niveles de fracción molar cambian un 5% para el agua y el metano, donde el metano disminuye y el agua aumenta.

En estas figuras para la variación de la humedad entre el 20% y el 40% arrojan dos cosas muy importantes:

La primera es que ya mayor fracción molar producida para el metano se dá a bajas temperaturas, es decir, cuando apenas empieza la etapa de gasificación en el punto de temperatura de proceso de los 800K.

La segunda es que el CO y el H<sub>2</sub> se dan en mayores cantidades de fracción molar a altas temperaturas de proceso, cuando alcanza los 1200K en la zona de gasificación.

Aunque la humedad produzca cambios en las fracciones molares en la composición de gas en estos puntos de temperatura del proceso, dependiendo del uso que se le dé al gas producto se debe tener en cuenta que para tener mayor fracción molar de CH<sub>4</sub> se debe hacer a 800K y, si por lo contrario se quiere producir mayor fracción molar de CO y H<sub>2</sub> en lugar de CH<sub>4</sub> se deben alcanzar temperaturas de procesos de 1200K. El CO se usa como combustibles para motores de combustión interna alternativos para generar energía eléctrica, mientras que el CH<sub>4</sub> podría ser sustituto del gas natural.

## 5. CONCLUSIONES

Para la formulación del modelo teórico se tuvo en cuenta el balance de masa, aportando tres ecuaciones lineales para formar un sistema, el cual se complementa con el aporte de dos ecuaciones del equilibrio termodinámico con las reacciones de desplazamiento de agua-gas y de metanación, siendo esta última una ecuación no lineal. La solución del sistema no lineal se desarrolla por el método iterativo de Newton Raphson multivariables. Para obtener los resultados de las 5 incógnitas generadas se programó el método iterativo en el software SCILAB que permite graficar y simular el proceso. El software es de acceso libre y gratuito.

La humedad es uno de los parámetros más importantes dentro del proceso de gasificación. Para el punto de temperatura de los 800K, la humedad, que ha sido variada en el rango de 20% hasta 40% (0.2 – 0.4), no produce significativos cambios en los componentes del gas permaneciendo casi que constantes por ser un punto con temperatura relativamente baja. Cosa contraria sucede cuando la temperatura está en 1200K, donde cada componente realiza considerados cambios. El aumento de la humedad (W), significa cambiar propiedades del gas producto, es decir, si se incrementa en un 40%, se aumentarían los contenidos de H<sub>2</sub>O, disminuyendo el poder calorífico del gas producto.

La temperatura del proceso es otro parámetro importante dentro de la gasificación de biomasa. Comprende altas temperaturas para realizar la conversión de la materia prima. El punto de temperatura que arroja las mejores características está alrededor de 1200K, haciéndose más notorio los aumentos en el contenido de elementos importantes con CO y H<sub>2</sub>.

La formulación del modelo teórico exige la simulación del proceso para evaluar las condiciones de operación, permitiendo optimizar el funcionamiento del sistema de gasificación. El presente trabajo se limita a la biomasa de madera con fórmula química (C<sub>z</sub>H<sub>x</sub>O<sub>y</sub>N<sub>l</sub>) basado en la alimentación del gasificador, el modelo no tiene en cuenta la formación de alquitrán e hidrocarburos superiores y tampoco el cambio de fase en el proceso de gasificación.

La predicción de la composición del gas y la temperatura del gasificador muestra ciertas incertidumbres, porque los modelos de equilibrio se basan en suposiciones empíricas creando discrepancias en contra de los resultados experimentales.

## 6. RECOMENDACIONES

Tener en cuenta los efectos producidos durante el proceso de gasificación y en el gas producto, la utilización de catalizadores de cualquier tipo, con el fin de que se produzca mejores rendimientos del proceso.

Determinar las características que se presentan al variar algunos parámetros, como el agente gasificante o reaccionante y el tipo de biomasa.

Realizar las pruebas de laboratorio al gas generado en gasificador, para realizar la comparación de los resultados con otros autores, permitiendo la validación del modelo.

Implementar a este modelo de equilibrio un modelo que considere la cinética de las reacciones, logrando una predicción en los tiempos del proceso.

Utilizar otro software matemático que tenga una interfaz gráfica que permita realizar las tablas y graficas de manera más atractiva y que se pueda operar con facilidad.

## BIBLIOGRAFIA

- ANTAL, M.; Gronli, M.: The art, science, and technology of charcoal production. En: Industrial Eng. Chem. 42. 2003
- ASOCIACIÓN CATALANA D'ENGINYERIA SENSE FRONTERAS, ESF. Estudio de alternativas para la electrificación rural en la zona de Perú. 2002
- BASALO, A. calculo de poder calorífico sustancias químicas puras.2006
- BIOMASS USERS NETWORK, BUN-CA. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. 2002
- BARAJAS, F.: Diseño y construcción de un gasificador para el aprovechamiento energético de la biomasa residual forestal de la universidad industrial de Santander. Tesis, Bucaramanga, 2013. Universidad industrial de Santander.
- BRIDGWATER, A.: The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. En: Fuel 74 (1995), p. 631–653
- CHOPRA, S.; Jain, A.: of Fixed Bed Gasification Systems for Biomass. En: Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal 9 (2007), p. 23
- CALDERON, H.: Lecturas básicas de metodología de la investigación. México: McGraw-Hill, 2003
- CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA.
- DEL VAL, V.; ANTOLIN, G.: planta de cogeneración mediante gasificación de biomasa residual. Escuela técnica superior de ingenieros industriales, Paseo de cause s/n, 47011, Valladolid
- DI Blasi,: Kinetic and heat transfer control in the slow and flash pyrolysis of solids. En: Industrial Eng. Chem. 35 (1996), p. 37–46
- SHIN, D; Choi, S.: The combustion of simulated waste particles in a fixed bed. Combustion and Flame. Vol. 121. 2000. pp. 167-180.
- ESTRADA, C.; ZAPATA, A.: Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. Universidad tecnológica de Pereira. Scientia et Technica Año X, No 25, Agosto 2004.
- FELISART, B.: simulación fluido-térmica de un reactor de gasificación de lecho fijo descendente, Lima, 2014, Pontificia universidad católica del Perú.
- Food and Agriculture organization for the United Nations: Wood gas as engine fuel. En: FAO Forestry Paper (1986)

GARCIA, L.: Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo, tesis de maestría, Bogotá, 2011, Universidad nacional de Colombia.

GÓMEZ, A.: Investigación del Proceso de Gasificación de Biomasa en un Gasificador en Paralelo. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado. 2002

HERNANDEZ, R.: Metodología de la investigación, 5ta ed

HUANG, H.; Ramaswamy, S.: Modeling Biomass Gasification Using Thermodynamic Equilibrium Approach. En: Applied Biochemical Biotechnology 154 (2009), p. 193–204

LILIEDAHL, T.; Sjöström, K.: Modelling of char-gas reaction kinetics. En: Fuel 76 (1997), p. 29–37

IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). Biomasa: Gasificación. Madrid. 2007

JARUNGTHAMMACHOTE, S.; Dutta, A.: Thermodynamic Equilibrium Model and Second Law Analysis of a Downdraft Waste Gasifier. Energy Field of Study, School of Environment, Resources and Development, Asian Institute of Technology, Pathumthani, Thailand. *The 2<sup>nd</sup> Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)” 21-23 November 2006, Bangkok, Thailand.*

MAHDI, V.; *et al.* Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, IRAN. 1st WSEAS Int. Conf. on COMPUTATIONAL CHEMISTRY, Cairo, Egypt, December 29-31, 2007

MAÍLLO, A.: Congreso internacional en la gestión y tratamiento de los residuos municipales la tecnología de la gasificación aplicada a los residuos sólidos urbanos. 2009

MCKENDRY, P.: Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. En: Bioresource Technology. (2001)

MCKENDRY, P.: Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. En: Bioresource technology 83 (2002), p. 55–63

MONROIG, M. Descripción morfológica del cafeto. 2005

MORAGES, J. Energía de la biomasa. 2002

MORENO, F.: simulación de gasificación de biomasa en lecho fluidizado burbujeante, Universidad Carlos III de Madrid, Tesis de grado. 2010

MURNI, A.; *et al.*: Kinetic Modelling of Biomass Steam Gasification System for Hydrogen Production with CO<sub>2</sub> Adsorption. Proceedings of international conference for technical postgraduates (techpos 2009), Kula Lumpur, Malaysia, 14-15 Diciembre, 2009

ORTIZ, W.: Modelación de la pirolisis de biomasa con base en experimentación en termobalanza. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2004

PÉREZ, J. *et al.*: Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico-experimentales. Colombia 2010

RAMIREZ, S.: simulación computacional del proceso de gasificación de biomasa en el reactor de lecho fijo de la facultad de ingeniería de la universidad nacional de Colombia. Tesis de maestría. Colombia. 2010

RAVEENDRAN, K.; *et al.*: Influence of mineral matter on biomass Pyrolysis characteristics. En: Fuel 74 (1995), p. 1812–998

SANDOVAL, A.: Análisis de mercado para el uso de la cascarilla de arroz en la producción de plantas ornamentales florecedoras en puerto rico. Universidad de puerto rico recinto universitario de Mayagüez .2007

SANZ, J. Informe de gestión 2009, Cenipalma. 2010

SCHLÜNDER, E.; Tsotsas, E.: Wärmeübertragung in Festbetten, durchmischten Schüttgütern and Wirbelschichten. Georg Thieme-Verlag, Stuttgart, 1988

SIERRA, F.; *et al.*: Procesos de Gasificación de Materiales Orgánicos. Bogotá: Asociación de Ingenieros Mecánicos de la Universidad Nacional de Colombia, 2009

JAYAH, T.; *et al.*: Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. Biomass and Bioenergy. Vol. 25. 2003. pp. 459-469.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA UPME: Potencialidades de los cultivos energéticos y cultivos agrícolas en Colombia. UPME, 2002

VALVERDE, A.; *et al.*: Análisis Comparativo de las Características Físicoquímicas de la cascarilla de Arroz, Scientia et Technica, año XIII, N°37, Diciembre 2007, Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701, Vol. 5, pág. 255-260.

VARGAS, G: Estudio exploratorio de la gasificación de biomasa para la producción de hidrogeno. Escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas. Tesis. México, DF. 2008

YANG, Y.; *et al.* Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviours of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds. Fuel. Vol. 83. 2004. pp. 1553- 1562.

## **ANEXOS**

## Anexo A. Implementación del Código en el programa SCILAB.

```
global x;
global w;
global y;
global z;
global l;
global m;
global k1;
global k2;
x=1.4; //MOLES DE HIDROGENO
w=0.275; //MOLES DE AGUA (HUMEDAD)
y=0.59; //MOLES DE OXIGENO
z=1; //MOLES DE CARBON
l=0.0016; //MOLES DE NITROGENO
m=1.78; //MOLES DE AIRE
function CambiarConstantes()
    global x;
    global w;
    global y;
    global z;
    global l;
    salir=1;
    while salir>0
        clc();
        printf('_____|\n|
|\n| Pulsa Una De Las Constantes Que Desea Cambiar:          |\n| X, Y, Z, W, L, M
|\n| S-> Salir
|\n|_____|\n|);

    select input("", "s")
    case 'X' then
        x=input("Nuevo valor de x: ")
    ,
    case 'Y' then
        y=input("Nuevo valor de y: ")
    ,
    case 'Z' then
        z=input("Nuevo valor de Z: ")
    ,
    case 'W' then
        w=input("Nuevo valor de w: ")
    ,
    case 'L' then
        l=input("Nuevo valor de l: ")
    ,
    case 'M' then
        m=input("Nuevo valor de m: ")
    ,
    case 'x' then
        x=input("Nuevo valor de x: ")
    ,
    case 'y' then
        y=input("Nuevo valor de y: ")
    ,
    case 'z' then
        z=input("Nuevo valor de Z: ")
```

```

,
case 'w' then
    w=input("Nuevo valor de w: ")
,
case 'l' then
    l=input("Nuevo valor de l: ")
,
case 'm' then
    m=input("Nuevo valor de m: ")
,
case 'S' then
    salir=0;
,
case 's' then
    salir=0;
//break;
else
    disp("Opcion Incorrecta ")
    input("");
end
end
endfunction
function Principal()
    salir=1;
    while salir>0
        clc();
        printf('_____|\n|
|\n| [1]... Cambiar Constantes [2]... Correr Programa [3]... Variando W |\n| [4]...Salir
|\n|_____|\n|');

        select input("")
        case 1 then
            CanbpiarConstantes();
,
        case 2 then
            SolEcuaciones();
,
        case 3 then
            SolucionVariandoW();
            AireCombustible();
,
        case 4 then
            salir=0;
            //break;
        else

            disp("Opcion Incorrecta ")
            input("");
        end
    end
endfunction
function [f]=f2(n)
    global x; global w; global y; global m; global k1;
    global k2;
    f(1) = n(2)+n(3)+n(5)-1;
    f(2) = n(1)+4*n(5)+2*n(4)-2*w-x;
    f(3) = n(2)+2*n(3)+n(4)-y-2*m-w;
    f(4) = k1*(n(2)*n(4))-(n(3)*n(1));

```

```

f(5) = k2*(2*n(1))^2-n(5)*(n(1)+n(2)+n(3)+n(4)+n(5));
endfunction
function [j]=jacob(n)
    global k1;    global k2;
    j(1,1)=0; j(1,2)= 1; j(1,3)=1; j(1,4)=0; j(1,5)=1;
    j(2,1)=1; j(2,2)=0; j(2,3)=0; j(2,4)=2; j(2,5)=4;
    j(3,1)=0; j(3,2)=1; j(3,3)=2; j(3,4)=1; j(3,5)=0;
    j(4,1)=-n(3); j(4,2)=k1*n(4);j(4,3)=-n(1); j(4,4)=k1*n(2); j(4,5)=0;
    j(5,1)=4*k2*n(1); j(5,2)=-n(5); j(5,3)=-n(5); j(5,4)=-n(5); j(5,5)=-n(1)-n(2)-n(3)-n(4)-2*n(5);

```

```

endfunction
function SolEcuaciones() //x0,f,j
    global k1;
    global k2;
    clc();
    t=input('Ingrese la temperatura Inicial: ');
    inc=input('Ingrese el Incremento de la Temperatura: ');
    tf=input('Ingrese la temperatura Final: ');
    i=t; k=1;
    tabla1=[];
    x0=[6;-2;1;-1;3];
    while i<=tf
        temp(k)=t;
        k1=exp(4000*t^1-3.5);
        k2=exp(10000*t^1-12.2);
        tol=0.00000001; //define la tolerancia
        [ss,fx,inf]=fsolve(x0,f2);
        x0=ss;
        //[[s,fx,inf]=fsolve(x0,f2,jacob,tol);
        t=t+inc;
        H2(k)=ss(1);
        CO(k)=ss(2);
        CO2(k)=ss(3);
        H2O(k)=ss(4);
        CH4(k)=ss(5);
        con(k)=inf
        k=k+1;
        i=t;
    end
    tabla1=[temp abs(H2) abs(CO) abs(CO2) abs(H2O) abs(CH4) con];
    clf();
    plot2d(temp,[abs(H2) abs(CO) abs(CO2) abs(H2O) abs(CH4)]);
    legend(['H2';'CO';'CO2';'H2O';'CH4']);
    xlabel('Temperatura');
    ylabel('Fraccion Molar');
    printf("Temperatura    H2    CO    CO2    H2O    CH4    CONVERGE");
    disp(tabla1);
    input("");
endfunction

```

```

function SolucionVariandoW()
    global k1;
    global k2;
    global w;
    clc();
    t=input('Ingrese la temperatura: ');
    i=t; k=1;
    tabla1=[];
    w=0.2; inc=0.025;

```

```

x0=[6;0;0;0;2];
while w<=0.4
    VariaW(k)=w;
    k1=exp(4000*t^-1-3.5);
    k2=exp(10000*t^-1-12.2);

    [ss,fx,inf]=fsolve(x0,f2);
    x0=ss;
    H2(k)=ss(1);
    CO(k)=ss(2);
    CO2(k)=ss(3);
    H2O(k)=ss(4);
    CH4(k)=ss(5);
    con(k)=inf
    k=k+1;
    w=w+inc;
end
tabla1=[VariaW abs(H2) abs(CO) abs(CO2) abs(H2O) abs(CH4) con];
//clf();
plot2d(VariaW,[abs(H2) abs(CO) abs(CO2) abs(H2O) abs(CH4)]);
legend('H2';'CO';'CO2';'H2O';'CH4');
xlabel('Variacion de W');
ylabel('Fraccion Molar');
printf("Variacion \n W          H2      CO      CO2      H2O      CH4      CONVERGE");
disp(tabla1);
input("");
endfunction
function AireCombustible()
    global x;
    global y;
    global z;

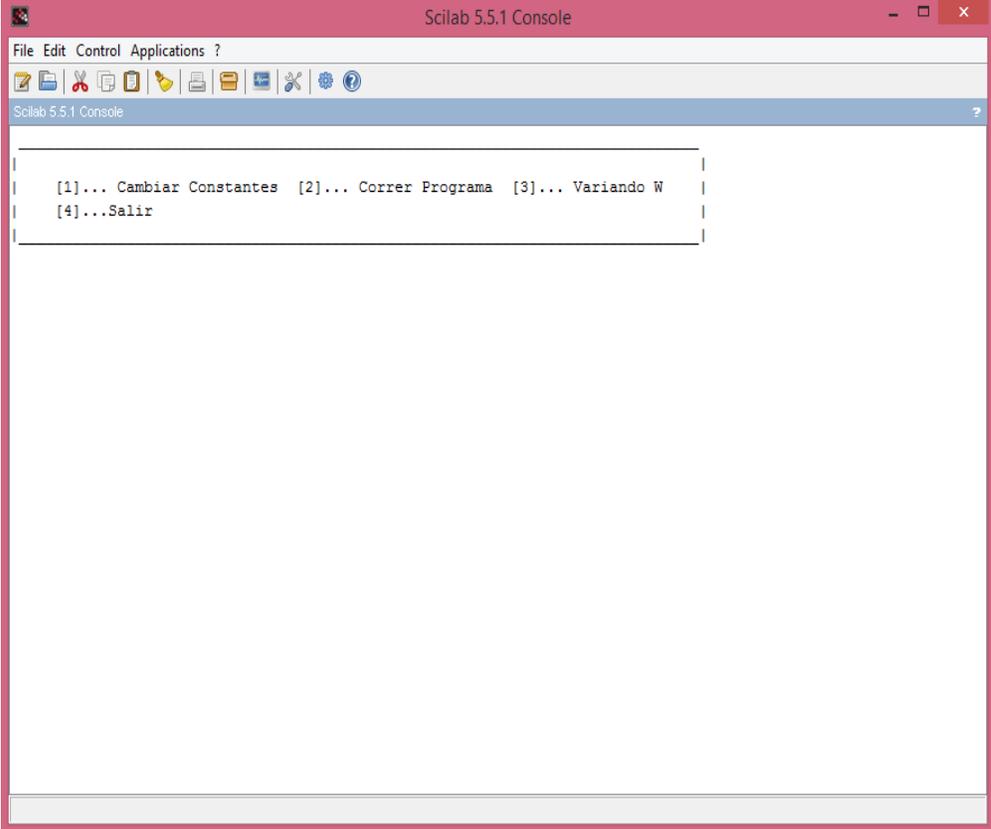
    AC=z+0.25*x-0.5*y;//relacion aire combustible
    disp(AC);
    input("");

endfunction

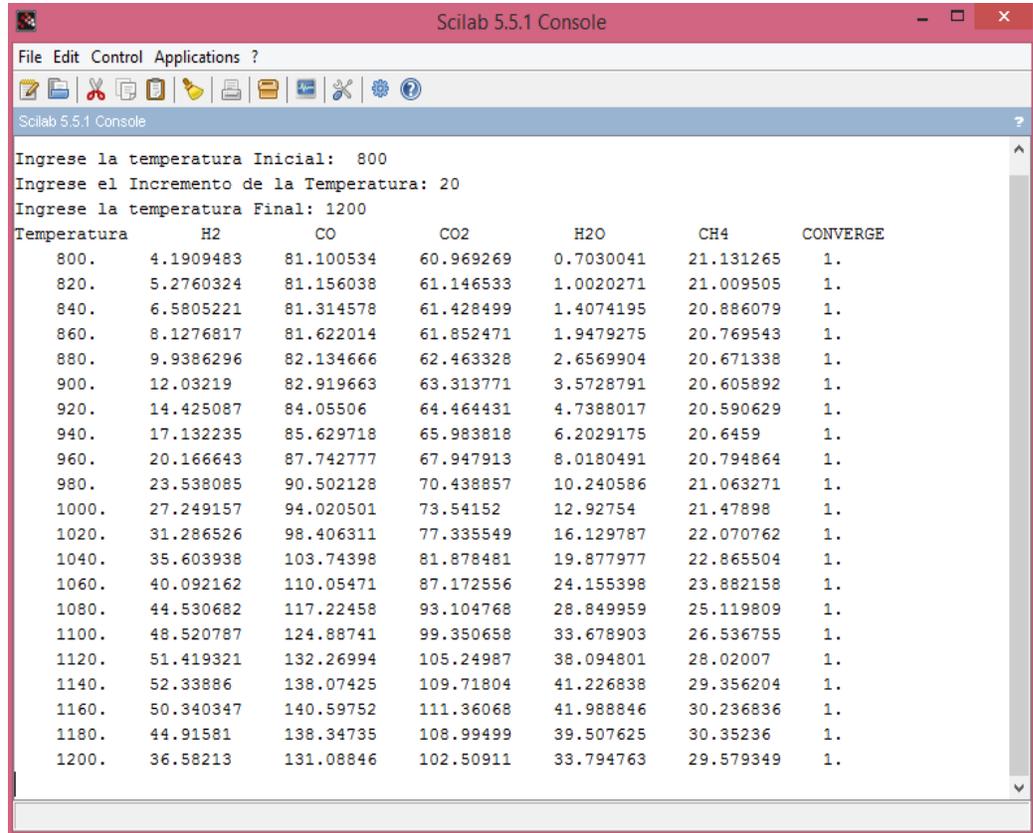
Principal();

```

**Anexo B. Ventana Principal del Simulador.**



## Anexo C. Funcionamiento del Programa.



```
Scilab 5.5.1 Console
File Edit Control Applications ?
Ingrese la temperatura Inicial: 800
Ingrese el Incremento de la Temperatura: 20
Ingrese la temperatura Final: 1200
Temperatura      H2      CO      CO2      H2O      CH4      CONVERGE
800.      4.1909483      81.100534      60.969269      0.7030041      21.131265      1.
820.      5.2760324      81.156038      61.146533      1.0020271      21.009505      1.
840.      6.5805221      81.314578      61.428499      1.4074195      20.886079      1.
860.      8.1276817      81.622014      61.852471      1.9479275      20.769543      1.
880.      9.9386296      82.134666      62.463328      2.6569904      20.671338      1.
900.      12.03219      82.919663      63.313771      3.5728791      20.605892      1.
920.      14.425087      84.05506      64.464431      4.7388017      20.590629      1.
940.      17.132235      85.629718      65.983818      6.2029175      20.6459      1.
960.      20.166643      87.742777      67.947913      8.0180491      20.794864      1.
980.      23.538085      90.502128      70.438857      10.240586      21.063271      1.
1000.      27.249157      94.020501      73.54152      12.92754      21.47898      1.
1020.      31.286526      98.406311      77.335549      16.129787      22.070762      1.
1040.      35.603938      103.74398      81.878481      19.877977      22.865504      1.
1060.      40.092162      110.05471      87.172556      24.155398      23.882158      1.
1080.      44.530682      117.22458      93.104768      28.849959      25.119809      1.
1100.      48.520787      124.88741      99.350658      33.678903      26.536755      1.
1120.      51.419321      132.26994      105.24987      38.094801      28.02007      1.
1140.      52.33886      138.07425      109.71804      41.226838      29.356204      1.
1160.      50.340347      140.59752      111.36068      41.988846      30.236836      1.
1180.      44.91581      138.34735      108.99499      39.507625      30.35236      1.
1200.      36.58213      131.08846      102.50911      33.794763      29.579349      1.
```