

Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación

Carlos Andrés Forero Núñez

PhD. (c) Ingeniería Ciencia y tecnología de los materiales,
Universidad Nacional de Colombia
Investigador Grupo Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión
Energética, Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
caforeron@unal.edu.co

Carlos Alberto Guerrero Fajardo

PhD. en Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia
Profesor Asociado dedicación exclusiva,
Director Grupo Aprovechamiento Energético de Recursos
Naturales, Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
caguerrero@unal.edu.co

Fabio Emiro Sierra Vargas

PhD. en Ingeniería, Universidad de Kassel Alemania
Profesor Asociado, Director Grupo Mecanismos de
Desarrollo Limpio y Gestión Energética, Universidad
Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
fesierrav@unal.edu.co

Resumen— La necesidad de generar energía térmica y eléctrica, el calentamiento global causado por el aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, el incremento en los precios de los combustibles fósiles y la búsqueda de independencia energética, han creado una nueva industria enfocada en la generación de energía mediante el aprovechamiento de fuentes renovables. Dentro de las distintas opciones, la biomasa se constituye como la tercera principal fuente para la obtención de energía eléctrica y como la principal fuente para la generación de energía térmica. Sin embargo, los problemas relacionados con la baja densidad de los distintos tipos de biomasa y la dificultad para transportarla y almacenarla han causado la necesidad de generar productos sólidos con mayor densidad, dureza y más resistentes conocidos como pellets y briquetas. El presente trabajo busca desarrollar un análisis de la situación actual de la producción de pellets y los posibles usos que tienen, enfocándose principalmente en la revisión de los estudios de modelamiento desarrollados para el proceso de gasificación.

Palabras clave— Biomasa, Energías renovables, Gasificación, Pellets, Pirolysis

Abstract— The need for producing thermal energy and electricity, the global warming caused by the increase of Green House Gas emissions, the raising of fossil fuels prices and the desire of energy independence, have created a new industry interested on generating energy by using renewable sources. Among different options, biomass is one of the most used elements to produce electricity, coming on third place worldwide behind hydropower and solar power, but is the most used to produce thermal energy. Problems related with low biomass density, transport and storage are the main reasons why it is so important to develop products with higher density, resistance and durability; thus, these products are called pellets and briquettes. This work aims to analyze the actual situation of pellets' production, their uses but

especially to summarize different models developed for gasification processes.

Keywords— Biomass, Gasification, Pellets, Pyrolysis, Renewable energies

I. INTRODUCCIÓN

A través de la historia, el desarrollo de la humanidad ha estado directamente relacionado con la generación de energía para su uso en forma de electricidad o para aplicaciones térmicas. Sin embargo, este aumento en la producción de energía ha llevado consigo un incremento desmesurado en la emisión de los gases de efecto invernadero, generados por el uso de combustibles fósiles como Carbón, Petróleo y Gas Natural; de hecho la producción de CO₂ aumentó de 4 millones de toneladas a más de 28 millones durante los últimos 60 años[1].

Debido a los altos niveles de CO₂, el calentamiento global y el aumento del costo de los combustibles fósiles, la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía que sean limpias y renovables se volvió imperiosa. Este aspecto se refleja en el aumento que tuvo la inversión en proyectos de energías renovables, la cual pasó de 20 a 160 billones de dólares entre el 2004 y el 2010[2]. Esto permitió la creación y el desarrollo de nuevas industrias y de nuevas tecnologías dedicadas a la generación de energía mediante fuentes renovables[3], de tal forma que en la actualidad se pro-

duce más del 3% de la energía global a base de dichas fuentes [4].

Para el 2008 la generación de energía eléctrica producida mediante fuentes renovables fue de 1140GW, de los cuales el 75% se produjo a partir de hidroeléctricas, 10% de la energía eólica, 7% de pequeñas hidroeléctricas y 4,5% a partir de Biomasa. La energía térmica obtenida a partir de fuentes renovables fue cercana a 450GWth, de los cuales se produjo más del 56% a partir de la Biomasa[2].

Como Biomasa se consideran todos aquellos compuestos que se generan de procesos de fotosíntesis y que debido a su contenido de carbono pueden producir energía mediante procesos térmicos o químicos[5]. Dentro de las principales ventajas que ofrece el uso de este tipo de fuentes de energía se encuentran: la fácil obtención, los bajos niveles de emisión de gases de efecto invernadero producidos por los procesos de transformación y el bajo costo de recolección. Es posible producir distintos tipos de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos a partir de la biomasa entre los cuales se encuentran las briquetas, los pellets, el carbón vegetal, alcoholes, biohidrocarburos, aceites de pirólisis, biogás e Hidrógeno, entre otros[6].

La biomasa posee un potencial estimado de 100 EJ/año, lo cual representa más del 30% del consumo global de energía primaria, de estos, 41,6 EJ/año provienen de la madera[7]. En Colombia según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) el potencial de la biomasa es de 16267MWh/año de los cuales 11828 provienen de residuos agrícolas[8].

II. PRODUCCIÓN DE PELLETS

Para realizar la evaluación del potencial que posee la biomasa es necesario tener en cuenta varios aspectos. Entre estos, algunas propiedades fisicoquímicas tales como el contenido de humedad, el contenido de Carbono, el poder calorífico y la densidad, los cuales son de gran importancia puesto que determinan el uso y la aplicación real que se le puede dar a determinado tipo de biomasa[5].

Analizando el poder calorífico superior (HHV) se puede ver cómo la biomasa a pesar de que posee valores levemente inferiores a los del car-

bón, genera grandes cantidades de energía por kilogramo de sustancia durante el proceso de combustión (Tabla I). Sin embargo, para poder realizar un uso adecuado de los distintos tipos de biomasa y para poder aprovechar este potencial energético es necesario tener en cuenta la densidad. A mayor densidad y mayor poder calorífico la sustancia representa mucha más energía por volumen ocupado, lo cual se vuelve una de las principales características a la hora de diseñar equipos para el aprovechamiento energético de biomasa.

TABLA I
PODER CALORÍFICO SUPERIOR PARA DISTINTAS FUENTES DE BIOMASA

Biomasa	HHV
	MJ/kg
Carbón coquizado	25 a 32
Madera	10 a 20
Cáscara de Coco	18 a 19
Paja	14 a 16
Cáscara de Café	16
Tallos de Algodón	16
Cáscaras de cacao	13 a 16
Cuesco de Palma de Aceite	15
Cáscara de Arroz	13 a 14
Tallos de Maíz	13 a 15
Aserrín	11
Pellet de aserrín	20,5
Pellet de madera	20,3

Fuente: Highman[9]

Es posible ver como muchos de los distintos residuos agrícolas presentan valores en el poder calorífico cercanos, entre 13 y 19 MJ/Kg, los pellets ofrecen valores un poco más elevados (20 MJ/Kg); por lo cual son todas estas sustancias fuentes potenciales para la producción de energía, al compararlas con la Madera o el Carbón.

Analizados los valores para la densidad de algunos compuestos es posible ver que existe un amplio rango, desde los más densos como el carbón (220Kg/m³) y la cáscara de coco (330Kg/m³); hasta los menos densos como la cáscara de cacao (112Kg/m³), cáscara de arroz (100Kg/m³) y el aserrín (100 Kg/m³)[5]. Es por esto que se ha generado la necesidad de densificar la biomasa de tal forma que pueda ser utilizada de mejor manera, creando dos tipos de productos principalmente, las briquetas y los pellets; los cuales poseen densidades que varían entre 590 y 1000Kg/m³[10].

A. Situación de la industria actual

Los *pellets* y las briquetas son principalmente sólidos cilíndricos que se diferencian exclusivamente por sus dimensiones; las briquetas poseen diámetros entre 50 y 90mm y longitudes entre 74 y 300mm, mientras que el diámetro del pellet es inferior a 10mm y la longitud no mayor a 30mm[11]. Para garantizar la calidad de los *pellets* que actualmente son comercializados existen diversas normas, dependientes del país en el cual se desea emplear el producto. Existen las normas Önorm M7135, la PVA, SS187120, DIN51731 (Tabla II) en las cuales se evalúan el diámetro, la longitud, densidad, contenido de agua, contenido de ceniza, poder calorífico superior e inferior, contenido de Azufre, Potasio, Cloro, Cadmio, Zinc y Plomo, entre otros[12].

TABLA II
CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE PELLETS Y BRIQUETAS SEGÚN
NORMATIVIDAD INTERNACIONAL

Parámetro	Unidad	Pellet	Briqueta
Diámetro (D)	Mm	4 - 10	40 - 120
Longitud	Mm	< 5*D	<400
Densidad a Granel	Kg/m ³	>600	
Densidad de Partícula	Kg/m ³	>1,12	>1
Contenido de Agua	Wt% (b.h)	<10	<10
Contenido de Cenizas	Wt% (b.s)	<0,5	<0,5
Abrasión	Wt% (b.h)	<2,3	
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg (b.s)	>18	>18
C	Wt% (b.s)	~50	~50,5
H	Wt% (b.s)	~6	~5,6
N	Wt% (b.s)	<0,3	<0,3
S	mg/kg (b.s)	<400	<400
Cl	mg/kg (b.s)	<200	<200
K	mg/kg (b.s)	~490	~600
Cd	mg/kg (b.s)	<0,5	<0,5
Pb	mg/kg (b.s)	<10	<10
Zn	mg/kg (b.s)	<100	<100
Cr	mg/kg (b.s)	<8	<8
Cu	mg/kg (b.s)	<5	<5

Fuente: Obernberger[12]

Aunque son desarrollados a partir de distintos tipos de biomasa la industria durante sus inicios se enfocó principalmente en la producción de *pellets* a partir de residuos de madera, a tal punto que países como Suecia, Canadá y Estados Unidos producen más de un millón de toneladas por año[13].

Los *pellets* producidos a partir de residuos de madera han sido generados con la finalidad de producir energía eléctrica en sistemas de cogeneración[14], para el calentamiento residencial y

distrital mediante sistemas de combustión[15]; es así como en la actualidad representan una industria creciente que satisface más de 7.5 billones de toneladas por año[16].

Esta industria presenta un crecimiento exponencial durante los últimos años, debido principalmente a las ventajas ambientales que ofrecen los *pellets*, así como a la facilidad de almacenamiento, transporte y a la duración que poseen. Por lo cual son cada vez más los países que realizan estudios para determinar el potencial que representa su uso[17]. Suecia debido a la necesidad de emplear sistemas de calefacción que sean limpios y al creciente uso de energías renovables lidera el mercado y los estudios de factibilidad desarrollados[18]. Finlandia presenta un consumo superior a 117 mil toneladas de *pellets* al año y espera un aumento, lo que conlleva a la investigación de más y mejores sistemas de distribución[19]. En Dinamarca, país precursor de sistemas de aprovechamiento de energía Eólica se analizan los beneficios del uso de *pellets* en plantas de cogeneración de energía para la producción de energía térmica[20], de tal forma que cuentan en la actualidad con la mayor planta de calentamiento distrital en el mundo empleando *pellets* de Biomasa ubicada en Avedore.

B. Sistemas de manufactura de pellets de biomasa

El proceso de producción de *pellets* se basa en una serie de etapas en las cuales es tratada la biomasa de tal forma que se compacta y se obtiene el material densificado. La primera etapa es la molienda con la cual se obtiene material de igual tamaño de partícula; posteriormente se seca el material y se procede a retirar los elementos metálicos presentes en la mezcla mediante el uso de imanes. Una vez el material cumple estas etapas se humedece y se prensa en una máquina *pelletizadora*, para posteriormente disminuir la temperatura y aumentar la dureza del sólido[11,16].

Respecto a las distintas etapas de procesamiento han sido varios los estudios realizados; la etapa de secado es una de las más críticas debido a la gran cantidad de energía que consume y a los cambios en la composición que llega a producir. Procesos de secado con altos tiempos de residencia afectan la cantidad de material presente en el *pellet* final, al igual que promueven la evaporación

de terpenos, se disminuye así el poder calorífico final del producto[21]; así mismo, el uso de sistemas de recirculación de gases en la etapa del secado mejora la eficiencia del proceso haciéndolo más rentable puesto que disminuye la cantidad total de energía requerida[22].

Alrededor de la etapa de *pelletizado*, núcleo del proceso de manufactura, son algunos los trabajos desarrollados. Desde 1948 científicos han patentado equipos de producción de *pellets*[23], procesos de elaboración de *pellets* mediante agentes aglomerantes[24] como ceras y sustancias lignosulfonadas[25]. Parte de estos estudios han llevado a analizar la influencia que tiene la lignina en las propiedades de dureza y resistencia del material sólido[26,27,28], en el comportamiento de distintos tipos de biomasa con los cambios de presión y la facilidad de comprimirlos[29,30].

C. Pellets de biomásas mixtas

En general los *pellets* son desarrollados a partir de residuos de la industria maderera; sin embargo, debido al crecimiento acelerado en la demanda de *pellets* y a la imposibilidad de producir más residuos de madera, es necesaria la evaluación de distintas fuentes de biomasa para la producción de *pellets* de tal forma que cumplan ciertos estándares de calidad.

Cuando los *pellet* son producidos a partir de biomasa diferente a la madera, son denominados *pellets* de biomásas mixtas, y es a partir de la mezcla de distintos residuos agrícolas que se está demostrando la posibilidad de producir sólidos que poseen la suficiente dureza y resistencia al transporte y un poder calorífico cercano al de los *pellets* de madera[31].

Los *pellets* a partir de biomásas mixtas son una industria mucho más pequeña que la de los *pellets* de madera, aunque presentan un crecimiento considerable. Mientras que en 2007 la capacidad de producción no superaba los 447 millones de toneladas, un año después era superior a 809 millones de toneladas[32], lo cual significa un aumento superior al 80% en un solo año. La producción se centra principalmente en Dinamarca, Finlandia y Polonia, aunque Francia es el país que posee los mayores niveles de capacidad instalada.

El principal inconveniente que poseen los *pellets* a partir de biomásas mixtas radica en los al-

tos contenidos de azufre y de cloro, lo cual genera problemas de corrosión, taponamiento en los equipos y de emisiones de gases de efecto invernadero al momento de utilizarlos en procesos de combustión[33]. Para controlar esto Francia establece dos tipos de *pellets* de biomásas mixtas que poseen características específicas para su posible comercialización (Tabla III).

TABLA III
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS PARA PELLETS DE BIOMÁSAS MIXTAS
SEGÚN NORMATIVIDAD FRANCESA

Parámetro	Unidades	AGRO+	AGRO
Diámetro	mm	6 - 8	6 - 16
Longitud	mm	10 - 30	10 - 30
Contenido de Humedad	% wt (b.h)	<11	<15
Poder Calorífico inferior	MJ/kg	>15,5	>14,7
Densidad de partícula	Kg/m ³	>650	>650
Durabilidad Mecánica	%	>95	>92
Cantidad de Finos	%	<2	<3
Contenido de Ceniza	% wt (b.s)	<5	<7
Cl	% wt (b.s)	<0,2	<0,3
N	% wt (b.s)	<1,5	<2
S	% wt (b.s)	<0,2	<0,2
Temperatura de Ceniza	C	1000	800
As	mg/kg	<1	
Cu	mg/kg	<40	
Cr	mg/kg	<10	
Cd	mg/kg	<0,5	
Hg	mg/kg	<0,1	
Ni	mg/kg	<15	
Pb	mg/kg	<10	
Zn	mg/kg	<60	

Fuente: Bastian[32]

Con base en los niveles de cloro y azufre estos productos sólo pueden ser utilizados para la producción de energía en grandes industrias que puedan financiar los sistemas de tratamiento de los gases de salida sin perjudicar en gran medida la rentabilidad del proceso, aunque la gran cantidad de residuos agrícolas que poseen muchos países[34] hace de esta industria un nuevo tema de investigación que propone un futuro interesante una vez se superen estos problemas de emisiones.

III. PROCESOS DE GASIFICACIÓN

Para aprovechar el potencial energético que poseen la biomasa y los *pellets* son varios los procesos que se pueden llevar a cabo, entre estos se encuentran; biodigestión, pirólisis, gasificación y combustión. La biodigestión se basa principalmente en la descomposición de la biomasa por

efectos de microorganismos en ausencia de oxígeno, de tal forma que se genera un gas conocido como Biogás compuesto principalmente de Metano (CH_4) y de Dióxido de Carbono (CO_2) de alto valor energético para su uso en motores de combustión y turbinas de gas.

La pirólisis es el proceso de descomposición de la biomasa por efectos térmicos a temperaturas entre 400 y 600 K, en las cuales las grandes cadenas químicas de la biomasa se rompen y liberan material volátil y material condensable (alquitranes); además, dejan un sólido conocido como carbón pirolizado de mayor valor energético y útil para la producción de energía en procesos de gasificación o de combustión.

El proceso de combustión se basa en la relación entre la biomasa o los *pellets* con exceso de Oxígeno (O_2) de tal forma que se genera CO_2 , H_2O y se produce una gran cantidad de energía, la cual se transfiere a un líquido bien sea vapor de agua para sistemas de generación de energía eléctrica mediante ciclo Rankine o al Aire para calentamiento residencial o distrital. Con base en este proceso se lleva a cabo la mayor aplicación actual de los *pellets*, por la cual se genera energía térmica para el calentamiento de espacios; y es sobre este tema que muchos científicos han llevado a cabo estudios dirigidos a evaluar la cantidad de emisiones generadas[35], formación de escorias que deriven en problemas de taponamiento de los quemadores residenciales[34] y la relación entre la ceniza producida con la composición de los *pellets* empleados[36].

El proceso de gasificación consiste en el uso de un agente oxidante, bien sea O_2 , CO_2 , H_2O o Aire a temperaturas entre 750 y 1100 K[37] para la generación de un gas conocido como gas de síntesis, compuesto principalmente por H_2 y CO . Este gas debido a su composición posee un alto poder calorífico para su uso directo en sistemas de generación de energía eléctrica o como agente reactivo en procesos de síntesis de productos químicos. Este proceso es en la actualidad muy empleado en la industria debido al valor agregado que posee este gas, a la eficiencia energética del proceso y al hecho de no generar mayores niveles de emisiones que los procesos tradicionales.

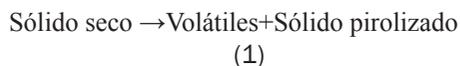
La gasificación de los *pellets* es uno de los temas más estudiados y en los cuales existe un mayor interés debido a las múltiples variables que

afectan el proceso y la calidad del producto final obtenido. Entre estas variables se encuentran el diseño del reactor, la temperatura del proceso, la presión del sistema, el agente oxidante utilizado y las propiedades fisicoquímicas de los *pellets* así como su composición.

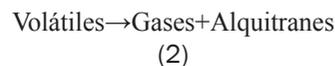
Básicamente el proceso de gasificación consta de una etapa de secado, una etapa de pirólisis, una etapa de combustión y finalmente una etapa de reducción; motivo por el cual los investigadores que desean estudiar el comportamiento del proceso prefieren separar cada etapa y evaluarla independientemente. Sin embargo debido a la poca experimentación que se ha desarrollado para los *pellets* es necesario utilizar las cinéticas reportadas para procesos similares que utilicen Madera o Carbón.

A. Estudios de la cinética para la etapa de pirólisis

En la etapa de pirólisis son múltiples las reacciones que se llevan a cabo, en las cuales se genera la liberación de compuestos volátiles y comienza la transformación de los *pellets* y la biomasa en materiales pirolizados[38]. En general, el proceso se puede describir por la siguiente reacción:



Seguido, a su vez, por una segunda reacción:



Mediante análisis de cromatografía se ha determinado que parte de estos gases son Metoxifenoles, Benceno, Metilbenceno, Fenol y Naftaleno, entre otros[39]. Aunque principalmente se considera que el gas generado de la etapa de pirólisis está compuesto por H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , entre otros. De los cuales el CO equivale al 60% peso, 12% de CO_2 y 15% de H_2O [40]. El uso de *pellets* genera algunas ventajas sobre el uso de la biomasa tradicional debido a la homogeneidad de los cambios en la forma y en la estructura del material sólido durante el proceso. Mientras que la biomasa reacciona de forma heterogénea con cambios sustanciales de tamaño y composición a través de la altura del lecho, los *pellets* se mantienen estables lo que permite despreciar cu-

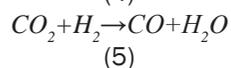
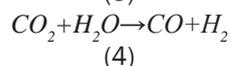
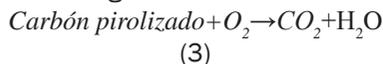
alquier cambio en el volumen de forma radial en el modelamiento de la etapa[41].

El análisis de la cinética química de la etapa de pirólisis puede ser expresada como función de una energía de activación del proceso, generalmente evaluada mediante métodos termogravimétricos con velocidades de calentamiento entre 2 y 5°C/min[42] y a diferentes presiones[43]. De igual forma algunos autores plantean la existencia de modelos sencillos para la evaluación de la cinética de la etapa de pirólisis basados en la separación de las cinéticas del proceso de secado y de pirólisis, tomado únicamente en cuenta la degradación de todo el sólido más no la descomposición de los principales componentes como lo son la celulosa, hemicelulosa y lignina[44].

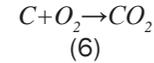
Análisis más detallados del proceso de pirólisis son desarrollados teniendo en cuenta el *flux* de calor, los balances de materia y energía, así como la ley de Darcy para las expresiones de velocidad y para la cinética química, de tal forma que se manejan los modelos como una serie de ecuaciones diferenciales en las cuales se mide el cambio en la densidad del material sólido y en las cuales se consideran otras reacciones competitivas del proceso[45].

A. Estudios de la cinética para la etapa de combustión y reducción

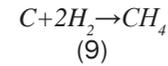
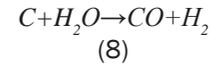
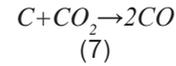
Posterior al proceso de pirólisis el material sufre una serie de reacciones de combustión y reducción en las cuales terminan de formarse los productos finales del proceso de gasificación. En esta etapa el material coquizado se oxida mediante una serie de reacciones altamente exotérmicas las cuales agotan la cantidad de oxígeno presente en el agente oxidante[46]. Posteriormente los gases producidos se reducen debido a reacciones paralelas para generar H₂ y CO[47], principales constituyentes del gas de síntesis.



Otras reacciones consideradas en esta etapa son presentadas por Kayal[48] en el desarrollo de su modelo matemático. Para la zona de oxidación:

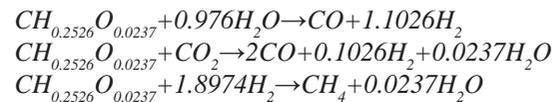


Para la zona de reducción:



Otro enfoque desde el cual se analiza la etapa de combustión y de reducción se basa en el equilibrio termoquímico de las especies[49] o mediante la minimización de las energías libres de Gibbs de cada uno de los distintos compuestos. Sin embargo, este enfoque aunque presenta una buena aproximación tiende a desviarse debido a algunas limitaciones de tipo cinético relacionadas con la Temperatura y con la relación aire biomasa[50].

Para la evaluación de estas etapas Mandl[51] analiza algunas reacciones suponiendo que el material coquizado es principalmente un hidrocarburo constituido por Carbón, Oxígeno e Hidrógeno de fórmula química CH_{0.2526}O_{0.0237} y plantea las siguientes reacciones (10,11,12):



Otro enfoque es desarrollado por Babu[52] en el cual se definen no sólo las reacciones en la etapa de reducción como una serie de reacciones en equilibrio sino que adicionalmente son evaluadas las cinéticas en términos de la energía de activación y el factor de frecuencia.

IV. MODELOS ANALÍTICOS DEL PROCESO SEGÚN EL TIPO DE REACTOR EMPLEADO

La gasificación de biomasa se lleva a cabo en reactores que varían según del tamaño de la partícula, el tiempo de residencia, el agente oxidante, entre otras variables. Los principales tipos de reactores existentes son los reactores de lecho fluidizado, en el cual el lecho se encuentra moviéndose libremente dentro del agente oxidante debido a la presión de este último; y los reactores de lecho fijo, en los cuales el material sólido se mantiene firme por lo cual el agente oxidante debe circular a través de los espacios generados

por las partículas sólidas para llevar a cabo las reacciones.

A. Modelos para lecho fluidizado

Algunos autores desarrollan el análisis de los modelos matemáticos en reactores de lecho fluidizado al separar las fases sólida y gaseosa a pesar de estar en continua mezcla para poder así plantear las ecuaciones del modelo[53] y tienen en cuenta como parámetros críticos la etapa de volatilización, la generación de condensables y alquitranes[54]. Estos modelos son evaluados mediante herramientas computacionales basados en la hidrodinámica de las fases y en la combinación de las expresiones de cinética química con los fenómenos de transferencia de masa y de difusión[55].

Los reactores de lecho fluidizado se han convertido en excelentes equipos para el desarrollo de procesos de gasificación de biomasa debido a los distintos parámetros que pueden ser ajustados; sin embargo, a pesar de que permiten el desarrollo de modelos matemáticos acertados es necesaria aún más investigación[56], habida cuenta de la variedad de biomásas que se pueden utilizar y el comportamiento particular de cada una en el proceso de fluidización.

B. Modelos para lecho fijo

Los reactores de lecho fijo son equipos ampliamente utilizados en países en vías de desarrollo y en sistemas en los cuales no se desean grandes inversiones ni costos elevados por la operación y el control del equipo. Con un gasificador de lecho fijo es posible evaluar el comportamiento del proceso al variar las características de la biomasa, el tamaño de los *pellets*, el consumo y la relación aire combustible, El tamaño de los *pellets* afecta el consumo del proceso más que la composición de los mismos, grandes tamaños de material sólido generan más tiempo en cada una de las etapas del proceso, así mismo, el uso de *pellets* más reactivos genera lechos pirolizados más densos[57].

Con agentes de oxidación como H_2O y CO_2 , han sido planteados diversos modelos matemáticos basados en ecuaciones cinéticas del tipo Langmuir Hinshelwood, que relacionan el área superficial reactiva con la temperatura, empleando para ello técnicas de desorción a temperaturas

programadas (TPD)[58]. Mediante este tipo de análisis se demuestra la relación existente entre el área superficial de los *pellets* y la velocidad de reacción.

Algunos estudios suponen el proceso en estado estacionario, y desprecian los cambios en la temperatura y la composición en dirección radial o angular[59], de tal forma que los modelos puedan ser tratados matemáticamente y que puedan ser verificados mediante experimentación. Generalmente se emplean *pellets* de Carbón y madera como bases para los modelos debido a que no presentan problemas relacionados con tamaños de partícula no uniforme, baja densidad a granel, sinterización de las cenizas, distribución en los perfiles de temperatura no uniformes como si sucede con *pellets* de residuos agrícolas[60]. Sin embargo Ghani[61] plantea que independientemente del material biomásico empleado el gas posee niveles de CO entre 28 y 30%, H_2 entre 6 y 8%, y CO_2 entre 5 y 7%.

Otros modelos de gasificación de biomasa y *pellets* están dirigidos al uso de programas de simulación como Aspen Plus, Aspen Hysys y al planteamiento de sistemas de control mediante redes neuronales[62].

V. CONCLUSIONES

El uso de la biomasa es cada vez más importante para la generación de energía limpia mediante fuentes renovables; un aspecto importante es la necesidad de aumentar la densidad de diversos residuos madereros lo cual ha generado una industria creciente en Europa, Canadá y Estados Unidos capaz de producir cerca de 10 millones de toneladas de *pellets* al año.

Uno de los principales problemas que enfrenta la industria de los *pellets* es el hecho de ser producidos en su gran mayoría a partir de los residuos de las empresas madereras, por lo cual se generara un desabastecimiento puesto que esta industria no tiene la capacidad de generar tantos residuos para suplir la demanda de *pellets* a nivel mundial, por lo cual el desarrollo de *pellets* a partir de residuos agrícolas y diferentes biomásas será de especial interés en el futuro cercano.

Actualmente el aprovechamiento de los *pellets* se da mediante procesos de combustión directa; sin embargo, la gasificación de los mismos puede

generar mayor valor agregado al producir gas de síntesis con elevado poder calorífico y menores cantidades de emisiones aunque el análisis de este proceso es aún poco explorado y modelado.

La evaluación de cada una de las etapas del proceso de gasificación como el secado, la pirólisis, la combustión y reducción es de gran importancia a la hora de desarrollar modelos matemáticos del proceso global empleando *pellets* y son temas muy poco explorados a nivel Latinoamericano.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo hace parte de la primera etapa del trabajo de doctorado del ingeniero Carlos Andrés Forero, los autores agradecen el apoyo de los miembros del grupo de investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética y del programa de Becas a estudiantes de posgrado de la Universidad Nacional de Colombia.

REFERENCIAS

- [1] IEA, *CO2 emissions from fuel combustion Highlight*, 2011.
- [2] REN21, *Renewables 2011 Global Status Report*, 2011.
- [3] E. Comission, *Renewable Energy Technologies en: Long Term Research in the 6th Framework Programme*, 2007.
- [4] N. Lior, *Sustainable neregry development: The present (2009) situation and possible paths to the future*, *Energy*, 35 (2010) 3976-3994.
- [5] F.S. Vargas, C. Guerrero, J. Arango, *Tecnologías para el aprovechamiento de los Biocombustibles*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2008.
- [6] J.G. Speight, *Synthetic Fuels Handbook. Properties, process and performance*, McGraw Hill, 2008.
- [7] M. Parikka, *Global biomass fuel resources*, *Biomass and Bioenergy*, 27 (2004) 613-620.
- [8] UPME, *Análisis y revisión de los objetivos de política energética colombiana de largo plazo y actualización de sus estrategias de desarrollos*, 2010.
- [9] C. Highman, M.v.d. Burgt, *Gasification*, Elsevier, 2003.
- [10] C.A. Forero, G. Díaz, L.C. Hernández, J.N. Arroyo, F.S. Vargas, *Solid Biofuels production from Timber, Coconut and Oil Palm residues bypressing at Universidad Nacional de Colombia*, en: The third international environmental best practices conference, Hochschule Offenburg, Offenburg, 2011, pp. 84.
- [11] N. Kaliyan, R.V. Morey, *Densification of Biomass: Mechanisms, Models and experiments on Briquetting and Pelleting of Biomass*, Saarbrücken, Germany, 2008.
- [12] I. Obernberger, G. Thek, *Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour*, *Biomass and Bioenergy*, 27 (2004) 653-669.
- [13] M. Peksa-Blanchard, P. Dolzan, A. Grassi, J. Heinimo, M. Junginger, T. Ranta, A. Walter, *Global Wood Pellets Markets and Industry: Policy drivers, market status and raw material potential*, IEA Bioenergy, 2007.
- [14] Pelletsa@las, *English Handbook for wood pellet combustion*, 2009.
- [15] J. Vinterbäck, *Pellets 2002: the first world conference of pellets*, *Biomass and Bioenergy*, 27 (2004) 513-520.
- [16] M. Cocchi, *Global wood pellet industry Market and Trade study*, IEA Bioenergy, 2011.
- [17] G.D. Giacomo, L. Taglieri, *Renewable energy benefits with conversion of woody residues to pellets*, *Energy*, 34 (2009) 724-731.
- [18] K. Mahapatra, L. Gustavsson, R. Madlener, *Bioenergy Innovations: The case of wood pellet system in Sweden*, *Technology Analysis & Strategic Management*, 19 (2007) 99-125.
- [19] M. Selkimäki, B. Mola-Yudego, D. Röser, R. Prinz, L. Sikanen, *Present and future trends in pellets markets, raw materials and supply logistics in Sweden and Finland*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (2010) 3068-3075.
- [20] H. Lund, *The implementation of renewable energy systems. Lessons learned from the Danish case*, *Energy*, 35 (2010) 4003-4009.

- [21] M. Ståhl, K. Granström, J. Berghel, R. Renström, *Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets*, Biomass and Bioenergy, 27 (2004) 621-628.
- [22] M. Ståhl, J. Berghel, *Validation of a mathematical model by studying the effects of recirculation of drying gases*, Drying Technology, 26 (2008) 786-792.
- [23] Monsanto Chemical Company, *Method of Making Pellets*, patente US 2436766, Estados Unidos, 1948.
- [24] Waste technology transfer Inc, *Pelletizing and briquetting of combustible organic-waste materials using binders produced by liquefaction of biomass*, patente US 6506223 B2, Estados Unidos, 2003.
- [25] Georgia Pacific Corporation, *Pelletizing wood*, patente US 4612017, Estados Unidos, 1986.
- [26] P. Lethikangas, *Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark*, Biomass and Bioenergy, 20 (2001) 351-360.
- [27] N. Kaliyan, M.R. Vance, *Factors affecting strength and durability of densified biomass products*, Biomass and Bioenergy, 33 (2009) 337-359.
- [28] N. Kaliyan, R.V. Morey, *Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass*, Biosystems engineering, 104 (2009) 47 - 63.
- [29] P. Adapa, L.T.G. Schoenau, *Compression characteristics of selected ground agricultural biomass*, en Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal, Manuscript 1347, 2009.
- [30] C.A. Forero, E.G. Aguilar, A. Cediell, F.E. Sierra, *Evaluación de los modelos de densificación para combustibles sólidos a partir de mezclas aserrín y carbón mineral a bajas presiones*, en: VII Jornada Internacional Ciencia Tecnología y Sociedad, Universidad Cooperativa de Colombia, Bogotá Colombia, 2011, pp. 40 - 55.
- [31] L. Shang, N. Nielsen, J. Dahl, W. Stelte, *Quality effects caused by torrefaction of pellets made from Scots pine*, Fuel Processing Technology, 101 (2012), 23-38.
- [32] Pelletsa@las, *Final report on producers, traders and consumers of wood pellets*, 2009.
- [33] S. Voulgarakai, A. Balafoutis, G. Papadakis, *Development and promotion of a transparent European pellets market: creation of a European real-time pellets atlas*. 2009
- [34] C. Gilbe, M. Öhman, E. Lindström, D. Boström, R. Backman, S. Robert, J. Burvall, *Slagging characteristics during residential combustion of biomass pellets*, Energy & Fuels, 22 (2008) 3536-3543.
- [35] M. Olsson, J. Kjällstrand, *Emissions from burning of softwood pellets*, Biomass and Bioenergy, 27 (2004) 607-611.
- [36] H. Wiinika, R. Gebart, *The influence of fuel type on particle emissions in combustion of biomass pellets*, Combustion Science and Technology, 177 (2010) 741-763.
- [37] K. Gröransson, U. Söderlind, J. He, W. Zhang, *Review of syngas production via biomass DFBGs*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (2010) 482-492.
- [38] H. Thunman, F. Niklasson, F. Johnsson, B. Leckner, *Composition of volatile gases and thermochemical properties of wood for modeling of fixed or fluidized beds*, Energy & Fuels, 15 (2001) 1488 - 1497.
- [39] M. Olsson, J. Kjällstrand, G. Petersson, *Specific chimney emissions and biofuel characteristics of softwood pellets for residential heating in Sweden*, Biomass and Bioenergy, 24 (2003) 51 - 57.
- [40] J. Rath, G. Staudinger, *Cracking reactions of tar from pyrolysis of spruce wood*, Fuel, 80 (2001) 1379-1389.
- [41] C. Erlich, E. Björnbom, D. Bolado, M. Giner, T.H. Fransson, *Pyrolysis and gasification of pellets from sugar cane bagasse and wood*, Fuel, 85 (2006) 1535-1540.
- [42] S.S. Kim, J. Kim, Y.-H. Park, Y.-K. Park, *Pyrolysis kinetics and decomposition characteristics of pine trees*, Bioresource Technology, 101 (2010) 9797-9802.
- [43] P. Wang, L. Jin, J. Liu, S. Zhu, H. Hu, *Analysis of coal tar derived from pyrolysis at different atmospheres*, Fuel, In Press (2010).
- [44] S.M. Andresen, S.T. Pedersen, B. Gobel, N. Houbak, U. Henriksen, *Pyrolysis of thermally thick wood particles- experiments and mathematical modelling*, en: Proceedings of ECOS 2005, Trondheim Norway, 2005.

- [45] M.G. Gronli, M.C. Melaaen, *Mathematical model for wood pyrolysis- Comparison of experimental measurements with model predictions*, Energy & Fuels, 14 (2000) 791-800.
- [46] K.M. Bryden, K.W. Ragland, *Numerical modeling of a deep, fixed bed combustor*, Energy & Fuels, 10 (1996) 269 - 275.
- [47] M. Dogru, C.R. Howarth, G. Akay, B. Keskinler, A.A. Malik, *Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier*, Energy, 27 (2002) 415-427.
- [48] T.K. Kayal, M. Chakravarty, G.K. Biswas, *Mathematical modelling of steady state updraft gasification of jute stick particles of definite sizes packed randomly - an analytical approach*, Bioresource Technology, 60 (1997) 131 - 141.
- [49] A. Melgar, J.F. Pérez, H. Laget, A. Horillo, *Thermochemical equilibrium modelling of a gasification process*, Energy Conversion and Management, 48 (2007) 59 - 67.
- [50] X.T. Li, J.R. Grace, C.J. Lim, A.P. Watkinson, H.P. Chen, J.R. Kim, *Biomass gasification in a circulating fluidized bed*, Biomass and Bioenergy, 26 (2004) 171 - 193.
- [51] C. Mandl, I. Obernberger, F. Biedermann, *Modeling of an updraft fixed-bed gasifier operated with softwood pellets*, Fuel, 89 (2010) 3795-3806.
- [52] B.V. Babu, P.N. Sheth, *Modeling and simulation of reduction zone downdraft biomass gasifier: Effect of char reactivity factor*, Energy Conversion and Management, 47 (2006) 2602 - 2611.
- [53] M.L.d.S.-. Santos, *Solid Fuels Combustion and Gasification. Modeling, Simulation and Equipment Operation*, Marcel Dekker Inc, New York, 2004.
- [54] P. Kaushal, J. Abedi, N. Mahinpey, *A comprehensive mathematical model for biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor*, Fuel, 89 (2010) 3650-3661.
- [55] Z. Deng, R. Xiao, B. Jin, H. Huang, L. Shen, Q. Song, Q. Li, *Computational fluid dynamics modeling of coal gasification in a pressurized spout-fluid bed*, Energy & Fuels, 22 (2008) 1560-1569.
- [56] Z.A.B.Z. Alauddin, P. Lahijani, M. Mohammadi, A.R. Mohamed, *Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14 (2010) 2852-2862.
- [57] C. Erlich, T.H. Fransson, *Downdraft gasification of pellets made of wood, palm-oil residues respective bagasse: Experimental study*, Applied Energy, 88 (2011) 899-908.
- [58] W. Klose, M. Wölki, *On the intrinsic reaction rate of biomass char gasification with carbon dioxide and steam*, Fuel, 84 (2005) 885-892.
- [59] J. Cooper, W.L.H. Halleth, *A numerical model for packed-bed combustion of char particles*, Chemical Engineering Science, 55 (2000) 4451-4460.
- [60] C.D. Blasi, G. Signorelli, G. Portoricco, *Counter-current fixed-bed gasification of Biomass at laboratory scale*, Ind. Eng. Chem. Res., 38 (1999) 2571-2581.
- [61] M.U. Ghani, P.T. Radulovic, S.L. Douglas, *An improved model for fixed-bed coal combustion and gasification: sensitivity analysis and applications*, Fuel, 75 (1996) 1213-1226.
- [62] M. Puig-Arnavat, C.J. Bruno, A. Coronas, *Review and analysis of biomass gasification models*, Renewable Energy Reviews, 14 (2010) 2841-2851.