

Modelado del Proceso de Gasificación de Biomasa para Aprovechamiento Energético: una Revisión al Estado del Arte

Modeling of the biomass gasification process for energy recovery: Review for the actual technology

José Ulises Castellanos

MSc en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia
Investigador Grupo MDL&GE
(Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética),
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
ju Castellanos@unal.edu.co

Fabio Emiro Sierra Vargas

Dr. MSc. Ingeniería Mecánica, Universidad de Kassel
Docente Tiempo Completo, Líder del Grupo MDL&GE
(Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética)
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
fesierrav@unal.edu.co

Carlos Alberto Guerrero Fajardo

Dr. MSc. Ing. Químico, Universidad Nacional de Colombia
Investigador Grupo MDL&GE (Mecanismos de Desarrollo Limpio
y Gestión Energética), Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
caguerrero@unal.edu.co

Resumen— El análisis del uso de biomasa como fuente de energía y el desarrollo de las investigaciones relacionadas con el proceso de gasificación; han originado el planteamiento de diversos modelos para explicar y entender este complejo proceso, tanto en su diseño, como en su simulación, optimización y análisis; los cuales van encaminados a satisfacer la necesidad de cuantificar la producción de energía y su eficiencia. Este artículo presenta un análisis de varios modelos de gasificación basados en el equilibrio termodinámico, la cinética y control basado en redes neuronales artificiales.

Palabras clave— Biomasa, Cinética, Gasificación, Modelado, Redes Neuronales, Termoquímica.

Abstract— The analysis of the use of biomass for energy production and the development of research related to the gasification process, have led to the approach of various models for explaining and understanding this complex process, not only in its design, but also in its simulation, optimization and analysis; which are intended to satisfy the need to quantify the energy production and efficiency. This article presents an analysis of several gasification models based on thermodynamic equilibrium, kinetics and control based on artificial neural networks..

Keywords— Biomass, Gasification, Kinetic, Modeling, Neural networks, Thermo-chemistry.

I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, a causa de los efectos del calentamiento global; han surgido investigaciones de gran importancia en el campo del

uso de la biomasa como una fuente de energía alternativa, se reconoce que esta fuente energética, posee una distribución más homogénea a lo largo del planeta, junto a un potencial energético mayor al de los combustibles fósiles [25]. Dentro de los procesos de aprovechamiento energético de la biomasa, se puede destacar los procesos de generación de gas combustible a partir de procesos de biodigestión (transformaciones biológicas) y gasificación (transformaciones termoquímicas) [30]. El segundo de ellos, se centra en la alta eficiencia de la combustión, puesto que un balance energético positivo, por ende, económicamente viable depende de la eficiencia en las conversiones termoquímicas ocurridas durante el proceso.

Actualmente existen sistemas de combustión directa para generación de energía eléctrica [38] a partir de biomasa como combustible, pero con el problema de la dosificación inherente a un sólido [3], por esta razón la gasificación resulta atractiva, puesto que simplifica los sistemas de dosificación y transporte del combustible. El gas de síntesis de los procesos de gasificación normalmente es un gas compuesto por monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, metano, trazas de etano y eteno, agua, nitrógeno y algunos contaminantes, como pequeñas partículas de carbonizado, ceniza y alquitranes [38]. La energía proveniente de este material gaseoso, determina

la calidad y el porcentaje de este en su obtención, ha sido la base fundamental de muchos estudios; los cuales algunos autores se han enfocado en la construcción de la máquina de gasificación, otros en la biomasa suministrada y algunos en el tratamiento del proceso agregando otros agentes que faciliten el proceso o realizando combinaciones entre los factores anteriores, pero siempre se busca incrementar la calidad del material gaseoso. [38][3]. Por esta razón, en el grupo de investigación “Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética (MDL&GE)” de la Universidad Nacional se planteó, hace unos años, la construcción de un gasificador con fines de investigación para determinar la viabilidad tecnológica y socioeconómica de esta tecnología para Colombia.

II. PROCESO DE GASIFICACIÓN

La gasificación de la biomasa es una tecnología de más de cien años de antigüedad. Se trata de un proceso cuyo objetivo es la descomposición térmica de biomasa, particularmente de los residuos producidos en la industria agrícola, maderera y plantas de tratamiento de aguas, para un aprovechamiento energético de los mismos. El gas generado puede ser quemado en motores de combustión interna, turbinas o en equipos de producción de calor y potencia.

Un sistema de gasificación para producción de calor y potencia consiste en un gasificador, un limpiador de gas y un convertidor de energía que generalmente es un motor o una turbina. En este proceso, la mayor dificultad se encuentra en el filtrado del “gas de síntesis”, pues se requiere de equipos con capacidad para operar con gases a elevadas temperaturas, partículas en suspensión de diferentes tipos y algunas veces altos flujos de masa (Diseño y construcción de un gasificador de lecho fluidizado a escala de laboratorio para el tratamiento térmico de los residuos de tabaco, 2005). Este proceso se cumple en una cámara cerrada y sellada que opera ligeramente por debajo de la presión atmosférica con las siguientes etapas.

Secado: el agua contenida en la biomasa es removida a una temperatura superior a los 100 °C.

Pirólisis: la biomasa experimenta una descomposición térmica en ausencia de oxígeno.

Habitualmente es dividida en pirólisis lenta y pirólisis rápida

Oxidación: El aire, oxígeno, vapor de agua o agentes gasificantes son introducidos mediante un proceso externo al equipo, en algunos casos junto a gases inertes, procedimiento realizado entre 700- 2000 °C.

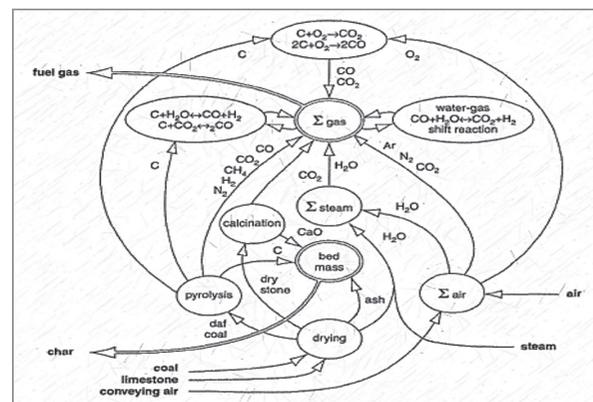
Reducción: En esta zona se producen numerosas reacciones químicas a alta temperatura (Ejemplos. Ecuaciones 1 y 2) [14].

Desde un punto de vista científico, la gasificación, se trata de una reacción endotérmica heterogénea entre el carbono contenido en la biomasa y un gas reactante, sea vapor de agua o dióxido de carbono:



En la Figura 1 se muestran las reacciones químicas presentes en un proceso de gasificación.

Fig 1. GASIFICADOR QUÍMICO



Fuente: S., Guerrero C. Sierra F. Ramírez. 2008

A nivel industrial, el objetivo de la gasificación es favorecer las dos reacciones para producir un gas combustible. Sin embargo, para alcanzar esto, se deberá generar previamente los elementos necesarios para ambas reacciones, es decir, el carbono, y los reactantes (CO₂ y H₂O), así como también una cantidad de energía para la reacción [52]. Por otro lado, el poder calorífico del gas de síntesis se encuentra normalmente entre 3,5 – 6 MJ/m³ [2][41] según el agente gasificante utilizado, por ejemplo, al usar el aire atmosférico, se tiene un gran porcentaje de nitrógeno, que es un gas inerte; por otro lado al usar oxígeno o vapor de agua se incrementa el valor.

III. TIPOS DE GASIFICADORES

A. Gasificador Updraft

Este tipo de gasificador tiene bien definidas las zonas de combustión parcial, de reducción y pirólisis. El aire es suministrado por la parte inferior del gasificador y el gas de síntesis es entregado por la parte superior a unas temperaturas relativamente bajas. En sus desventajas está el alto contenido de alquitrán del gas producido y la capacidad marginal que tiene en su carga, por ende, la imposibilidad de generar de un gas de síntesis en flujo continuo que aumenta las dificultades para la utilización en motores de combustión interna. [9]

B. Gasificador Downdraft

Este gasificador entrega el gas de síntesis por la parte baja y la admisión de aire es realizada por la parte media del mismo. Las dificultades de esta configuración son su contenido de cenizas y humedad; por otra parte, el prolongado tiempo de encendido (20 a 30 minutos). Pero permite tener un flujo continuo, por lo que es el tipo más aceptable para motores de combustión interna y turbinas de gas. [2] [12]

C. Gasificador Crossdraft

Este gasificador tiene un tiempo de arranque corto, alrededor de 5 minutos, capacidad de operar con combustibles húmedos o secos y la temperatura del gas producido es relativamente alta. De ahí que la composición del gas producido tenga un bajo contenido de hidrógeno y de metano. Como desventaja, estos gasificadores, deben ser utilizados con combustibles de bajo contenido de cenizas, como la madera y el carbón mineral.[10] [11]

D. De Lecho Fluidizado

En esta configuración, se suministra el aire a través de un lecho de partículas sólidas a tal velocidad que estas partículas permanezcan en estado de suspensión, comenzando a calentar externamente el lecho y el material de alimentación (biomasa).

Las partículas del combustible se introducen en el lecho del reactor y se mezclan rápidamente con el material, calentándose casi instantáneamente a la temperatura requerida. Como resultado de este tratamiento, el combustible se piroliza

muy rápidamente y da como resultado una mezcla de componentes con una cantidad relativamente elevada de materiales gaseosos [52][14]. La composición de gas de síntesis producida por los diferentes tipos de gasificador se muestra en la Tabla I [10].

TABLA I.
COMPOSICIÓN TÍPICA DE PRODUCCIÓN DE GAS DE LA MADERA EN GASIFICADORES DE TIRO INVERTIDO

| COMPONENTES | [%] |
|------------------|------------------------|
| H ₂ | 12-20 |
| CO ₂ | 9-15 |
| CH ₄ | 2-3 |
| CO | 17-22 |
| N ₂ | 50-54 |
| PODER CALORÍFICO | 5-5.9MJ/m ³ |

Fuente: Stassen HEM, Knoef HAM 1993

IV. AGENTES GASIFICANTES

Los agentes gasificantes son sustancias que se agregan al proceso y permiten la descomposición de los productos de la combustión parcial de la biomasa en componentes del gas de síntesis. Como ya se mencionó anteriormente, el oxígeno como agente gasificante puede lograr un mejor rendimiento pero, a su vez, incrementa el costo de producción. Adicionalmente a permitir las reacciones de gasificación, la combustión parcial brinda el calor necesario para secar la biomasa, producir la pirólisis e iniciar el proceso, ya que las reacciones de gasificación suelen ser de tipo endotérmico, y dan como resultado dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua en los productos [43]. Al emplear vapor de agua como agente gasificante, se facilita la generación de H₂, el poder calorífico del gas de síntesis será mayor, alrededor de 10-15MJ/m³ [43][44]

Otro agente gasificante, que muestra buenos resultados, es el CO₂, debido a su presencia en el gas de síntesis. Por otra parte, una mezcla entre vapor H₂O y CO₂ del aire y/u O₂ también puede ser utilizada, junto con un porcentaje de la combustión de biomasa con aire/O₂ para proporcionar el calor necesario para gasificación [43][44][41].

Estrategias para el Modelado de Procesos de Gasificación

El control de la producción de gas es uno de los grandes inconvenientes del proceso, puesto que las variables de control influyen directamen-

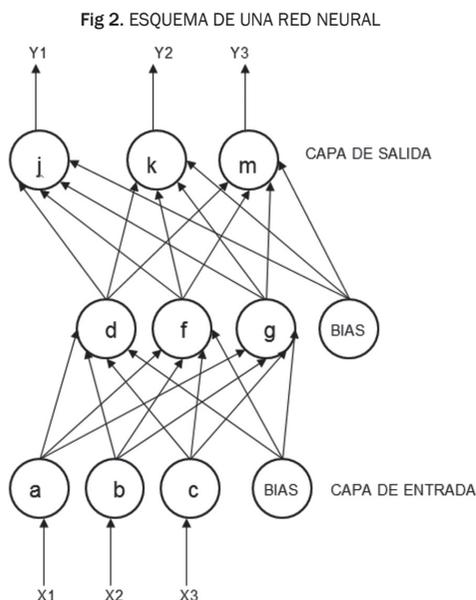
te en la calidad y composición del gas, donde el objetivo es la minimización de los residuos tóxicos y alquitranes. Un aspecto clave para mejorar la eficiencia del proceso, es la integración de la dinámica del proceso de gasificación con la toma de decisiones reales de la operación de la planta. Estrategia evidenciada en el uso de modelos evolutivos inteligentes-adaptables para el control y optimización.

A. Control basado por modelos MBC

El Control (MBC) consiste en hacer un modelo al cual se le aplica una técnica adaptativa sin tener en cuenta retrasos en el tiempo ni variables relacionadas con la biomasa (peso, masa y demás). Una técnica derivada de la anterior es el Modelo Predictivo de Control (MPC), que utiliza un modelo interno para predecir la dinámica del sistema durante un período fijo, característica que hace que las técnicas MPC sean un modelo atractivo para los ingenieros de la planta. Estos modelos pueden ser construidos a partir de ensayos y datos tomados experimentalmente [29].

Estas técnicas, se basan principalmente en modelos mecanicistas, por lo tanto la efectividad del control depende de la exactitud del modelo.

Este problema se ha simplificado considerablemente al utilizar modelos de redes neuronales (RNA) Figura 2. Las cuales han demostrado su utilidad en implementaciones de control de procesos químicos [19].



Fuente: P., Basu. 2006

Algunas de las características relevantes de las RNA son:

- Habilidad para representar a las arbitrarias relaciones no lineales.
- La adaptación y el aprendizaje en los sistemas cerrados, siempre a través de los off-line y en la adaptación de peso en línea.
- Arquitectura de procesamiento distribuido, que permite un rápido tratamiento en gran escala de sistemas dinámicos.
 - La implementación de hardware.
 - Fusión de datos. Las redes neuronales pueden operar simultáneamente en los datos cuantitativos y cualitativos.
 - Los sistemas multivariable, para varias entradas varias salidas. [19][22].

B. Control por modelo ideal

Otro modelo estudiado es el que opera como cero-dimensional. Este aprovecha las condiciones de lo ideal, una reacción química adecuada y el tiempo de permanencia. El modelo trata de suponer el intervalo más largo y observa la necesidad de completar la reacción en ese tiempo; de tal manera que el modelo de equilibrio sea el apropiado. En todos los modelos de equilibrio, un conjunto de ecuaciones no lineales describen la conservación de las especies químicas (C, O_2 , H_2 , N, S) y las ecuaciones adicionales, para el equilibrio térmico de las reacciones independientes (las cuales corresponden a la minimización de la energía libre de reacción) que permite una predicción de la salida a composiciones dadas de los reactivos y las condiciones de operación (presión y temperatura). El conjunto resultante de ecuaciones no lineales es resuelto por iteración de la solución de un sistema lineal que, a su vez, se establece en términos de la matriz de tridiagonalización.

El modelo fue usado para la simulación de gasificación de carbón por Manfrida, 1990 [26], considerando un total de 19 especies de producto comúnmente encontradas en los procesos de gasificación (CO , CH_4 , H_2 , C_2H_4 , C_2H_6); algunas especies que pueden ser relevantes desde el punto de vista ambiental y cuya formación podría ser descrita, al menos en parte, por reacciones de equilibrio, fueron también incluidas las especies (HCN , NH_3 , H_2S y COS). El modelo asume compor-

tamiento de gas perfecto para los reactivos y los productos, de modo que no puede describir procesos de pirólisis donde se producen fracciones significativas de hidrocarburos líquidos; la única excepción al comportamiento de gas perfecto es la posible presencia de carbón sólido entre los residuos de los reactivos. Propiedades termoquímicas de todas las especies fueron tomadas de las tablas de JANAF [16].

Las condiciones termodinámicas, a las cuales las reacciones tienen lugar, pueden ser manipuladas por cambios de presión, temperatura (que puede ser incluso calculada evaluando los procesos a condiciones adiabáticas) o calor transferido por radiación de la zona de reacción. El flujo de biomasa así como el de aire (u Oxígeno, dependiendo de la elección del oxidante) y agua o vapor, puede ser seleccionado por el usuario. El modelo es capaz de ejecutarse a un nivel de temperatura especificado, o para calcular iterativamente las condiciones correspondientes a la temperatura de llama adiabática, o a cierre del balance de energía a un porcentaje del valor calorífico de la biomasa como materia prima.

El vapor inyectado en la zona de reacción puede ser producido regenerativamente dentro del gasificador. En este caso, el intercambio de calor entre el agua y el gas tiene lugar antes de la salida en el gasificador. La producción regenerativa de vapor puede también resolver el problema de enfriamiento de los gases de salida, cuando sea necesario.

En conjunto del gasificador es descrito por un sistema incluyendo muchos bloques (reactor, módulos de transferencia de calor, entre otros), esquematizado en la Figura 3. El modelo proporciona una descripción relativamente exacta del balance de energía del gasificador (entrada y salida de energías químicas, valores caloríficos de la materia prima y el gas de síntesis y condiciones termodinámicas de gas de síntesis a la salida), además se realizó un análisis de exergía [32] [51], que permite una estimación total de la irreversibilidad en el proceso de transformación de la biomasa como materia prima dentro de una corriente caliente del gas de síntesis del combustible y también proporciona detalles internos de las distribuciones perdidas que pueden ser analizadas e interpretadas para buscar la minimización del total de pérdidas.

Un punto que debería ser subrayado es que el programa no toma en cuenta la diferencia de composición de las diversas fuentes de biomasa, proporcionando el mismo análisis definitivo. Corrección válida para balances de energía, pero poco aproximada con la cadena de reacciones que conducen a la formación de algunas especies (como NH_3 , cuya formación es afectada por la forma de los átomos de nitrógeno en el interior de las moléculas de la materia prima). La caracterización de la biomasa se obtiene de ellos sólo porque establezca su composición, como puede ser encontrada por ejemplo en Domalski, 1987 [17][35].

El encabezamiento de una partición primaria (parte) se precede de un numeral romano seguido de punto, espacio y el título en versalita (sólo la primera letra en mayúscula). Todo ello centrado sobre el texto que encabeza.

El encabezamiento de una partición de segundo orden (sección) consiste en una letra mayúscula (en orden alfabético) seguida de punto, espacio y el título (con la primera letra en mayúscula), todo ello en cursiva y justificado a la izquierda de la columna.

El encabezamiento de una partición de tercer orden (apartado) consiste en un número arábigo (en orden natural) seguido de final de paréntesis y del título (con la primera letra en mayúscula), todo ello en cursiva y sangrado.

Las particiones de cuarto orden (subapartados) se necesitan raramente, pero pueden usarse. Se encabezan mediante una letra minúscula (en orden alfabético) seguida de un paréntesis de cierre y el título (con la primera letra en mayúscula), todo ello en cursiva y sangrado.

Si se necesitaran particiones de quinto orden deben encabezarse simplemente mediante una viñeta seguida del título en cursiva, todo ello con doble sangrado.

C. Efectos de la biomasa empleada

Para la validación de los datos del código de simulación, se encontraron datos en experimentos descritos en la literatura. Un ejemplo de ellos es el gasificador [9] que utiliza un aire inyectado circulante en una unidad piloto de lecho fluidizado. Otro ejemplo es el aire inyectado presurizado en el reactor de lecho fluidizado. Gasificador de [45]. Este utilizó un inyector de Oxígeno en un reactor

de lecho de flujo arrastrado. Los datos reportados incluyen la composición del gas, un valor calorífico, la eficiencia del gasificador (incluidos ambos valores caloríficos y calor sensible del gas a la salida del gasificador) y su eficiencia de exergía. [9]

D. Modelo Predictivo

El control predictivo es capaz de tratar muchos problemas prácticos de control, tales como garantías de estabilidad nominal, optimización del rendimiento nominal y manejo de restricción, además puede dar diseños sistemáticos para los sistemas multi-variables como el caso del ciclo combinado de gasificación integrada (IGCC), el cual combina la gasificación de carbón con la tecnología del ciclo convencional dando como resultado un proceso de gasificación limpio del carbón de alta eficiencia. Las ventajas son: un alto rendimiento en la generación de energía, una eficiencia alta con IGCC, disminución en la contaminación.

Límites de entrada: Los límites de flujo de entrada no deben ser excedidos así como la tasa de entrada de los límites de cambio tampoco deben excederse.

Límites de producción (salida): La fluctuación del valor calorífico debe ser minimizado y siempre estar en el rango de +/- 10 kJ/kg, la fluctuación de presión debe ser minimizada y siempre menor que +/- 0.1 bar, la masa en el lecho debe oscilar en menos del 5% del nominal, y la oscilación de temperatura debe guardar un mínimo, que debe ser siempre menor que +/- 1 C

T-S Multi-modelo de control predictivo

Considerado un sistema dinámico no lineal el cual se puede representar por la siguiente fórmula:

$$y(k)=g(y(k-1),\dots,y(k-n),u(k),\dots,u(k-m-1)) \quad (3)$$

Se asume que la función $g()$ es una función no lineal, con salidas $y()$ y entradas $u()$. De la anterior formulación se puede denotar que el modelo T-S se puede linealizar teniendo en cuenta las variables y sus supuestas salidas, dentro de un rango dinámico limitado. [49][40]

VI. PROGRAMACIÓN DE CONTROLADORES

Primero, se obtiene el control-objeto del punto de operación típico en un modelo lineal estacionario en tiempo discreto. Para considerar el impacto

de perturbación en el modelo; el modelo debe ser incorporado dentro de los elementos de perturbación. Asumido que las condiciones del modelo en el punto son variables acotadas. Donde $u(k)$ es la entrada y $y(k)$ es la medida de la perturbación en la entrada. [49][8]

A. Modelo (PID) para un gasificador

El gasificador de carbón es esencialmente un reactor químico donde el carbón reacciona con aire y vapor y cuyos productos del proceso de gasificación son un valor calorífico del gas de síntesis, que puede ser quemado en turbinas de gas.

El controlador debe ajustar las entradas a fin de regular las principales variables de salida del gasificador que, por ejemplo, son la temperatura del gas, la presión del gas, el valor calorífico del gas y la masa en el lecho, entre otras.

Puesto que el gasificador, es un sistema multi-variables y altamente no lineal, con importantes interacciones entre las variables de la entrada y la salida, las actuales estrategias de control son poco eficientes [49][47]. En los gasificadores existentes, el control automático no va más allá del control PI (proporcional/ Integral) o PID (proporcional/ integral/ derivada) enlazados al flujo alrededor de los actuadores de alimentación del sistema. Por ejemplo, en el gasificador experimental del instituto de desarrollo tecnológico de Estados Unidos, el circuito de control es cerrado por un operador humano experto, quien usa su juicio para modular las tasas de flujo de masa (carbón: aire, vapor, aire y otros) y por lo tanto, los puntos establecidos para los controles en el actuador de salida (PID). Procedimiento similar al utilizado en el gasificador de biomasa fluidizado a presión de la Universidad de Delf en los Países Bajos.

B. Modelo Multivariable no Lineal

El modelo empleado para el proceso del gasificador del grupo MDL&GE es un modelo multi-variables no-lineal, que tiene cinco entradas controlables (carbón, caliza, aire, vapor y el caudal) y cuatro salidas (presión, temperatura, masa en el lecho y la calidad del gas) con un alto grado de acoplamiento entre ellos. La piedra caliza se utiliza para absorber el azufre en el carbón, por ende su caudal debe establecer una relación fija con el flujo de carbón (nominalmente 1 caliza: 10 carbón). Esto reduce el problema a cuatro problemas

de regulación para cada entrada. Otras entradas de control pueden incluir a las condiciones en el modelo de límites; mejorando las maniobras de operación en diferentes puntos, mediante el modelo (PSINK) de dos entradas de perturbación externa, las cuales se representan por medio de perturbaciones inducidas por la presión. A continuación se listan las entradas y salidas controlables, producto de este análisis.

Entradas (kg/s)

- Flujo de carbón coquizado WCHR
- Flujo de aire WAIR
- Flujo de carbón WCOL
- Flujo de vapor WSTM
- Flujo de piedra caliza WLS

Las entradas de perturbación son:

- Presión PSINK (Pa)
- Calidad del carbón (%)

Salidas controladas:

- Valor calorífico del gas combustible CV GAS (kJ/kg)
- Masa del lecho MASA (kg)
- Presión del gas combustible PGAS (Pa)
- Temperatura del gas combustible TGAS (K)

C. Control Basado en Estimaciones.

La estimación del estado basado en el control de un gasificador de carbón, junto a las técnicas de estimación de parámetros en línea, proporcionan un medio para inferir valores en tiempo real de las variables claves del proceso, que no pueden medirse directamente. Estas estimaciones de Estado pueden ser útiles para el mejoramiento del control de proceso, mediante la filtración de Kalman (KF), la cual se aplica a un sistema no lineal de gasificación de carbón, operada inicialmente en el marco de la estrategia de control convencional de retroalimentación. Donde, las perturbaciones que no son medibles en la ope-

ración de gasificador, surgen de la presión de descarga y la calidad de carbón de alimentación.

El algoritmo KF es un método fácil de aplicar, sin complicaciones y con un diseño especial para el tratamiento o ajuste de los parámetros en conjunto. La principal motivación para el empleo de estimación de estado es la obtención de los valores de las perturbaciones del proceso no medidas. Para ello, se trata v como variable de estado adicional no medible que varía aleatoriamente sobre un valor fijo (inicialmente desconocido) y se incluyen en un estado aumentado, en consecuencia el vector z [21]

En la línea de control predictivo se ha incorporado una nueva acción de integración para dar libertad al seguimiento. La teoría propuesta por Víctor Becerra (Universidad Ciudad de México), destaca el hecho de que los límites de intervalo de muestreo que se plantean en la práctica, son el problema que se presenta al momento de la programación lineal MBPC cuadrática en cada intervalo de muestreo, y puede tener un efecto perjudicial sobre el rendimiento de circuito cerrado de alcanzar el sistema estable, esto sugiere que el control de entrada tiene limitaciones importantes en el diseño de sistemas de alimentación de gasificación.

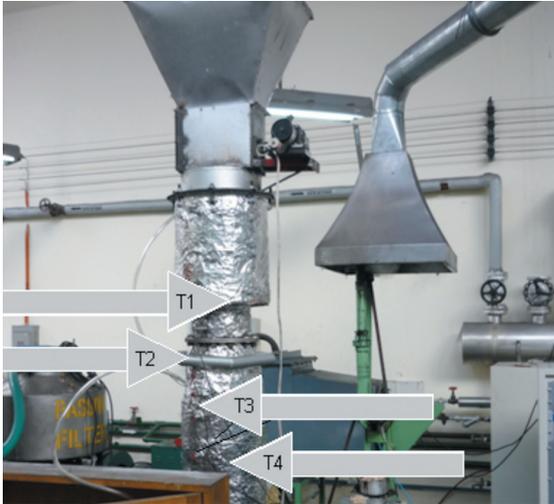
VII. EXPERIENCIA EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

En la Universidad Nacional se han realizado procesos de gasificación a partir de la cascara de cacao, cascarilla de café, cascara de coco y madera, entre otros. Uno de los grandes inconvenientes en el proceso de gasificación, es el control de la producción de gas de calidad y en qué porcentaje obtenerlo; poder minimizar los residuos tóxicos y alquitranes al punto de controlar la totalidad del proceso. Una cuestión clave para mejorar la eficiencia energética y consolidar la gasificación como fuente potencial de energía que permita la implementación de sistemas automáticos en la industria.

Con base en las investigaciones desarrolladas en el grupo MDL&GE, se han incluido sistemas de adquisición de datos de los sensores de temperatura, que están distribuidos de la siguiente forma: la T1 se encuentra ubicada en la zona de pirólisis, T2 en la zona de combustión y T3 y T4 en la

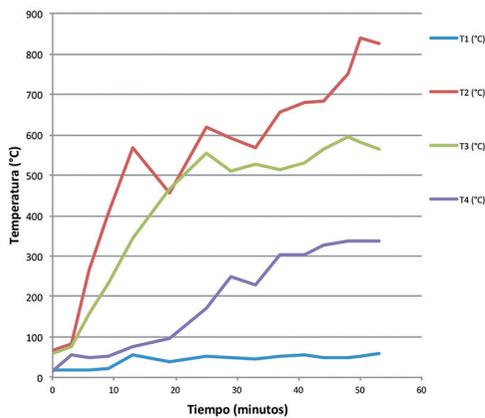
de gasificación. (Figura 3) Mediante estas implementaciones se han implementado aplicaciones de control sencillo pero con grandes resultados. Tabla II y Figura 4 [11]

Fig. 3. GASIFICADOR DE LECHO FIJO



Fuente: Grupo de Investigación MDL&GE

Fig. 4. PERFIL DE TEMPERATURAS



Fuente: Grupo de Investigación MDL&GE

Los perfiles de temperatura como se muestra en la Figura 4 determinan los puntos donde se debe utilizar algún tipo de control para mantener la temperatura en relación con la calidad del gas (estabilización de las temperaturas).

La monitorización en tiempo real de los perfiles de temperatura, garantiza que el control, sea manual o automático, mantenga regímenes de operación para realizar los experimentos con repetitividad de las variables internas al reactor. Esto mejora el diseño de los experimentos.

TABLA II.
TEMPERATURAS DENTRO DEL REACTOR

| tiempo (min) | T1 (°C) | T2 (°C) | T3 (°C) | T4 (°C) |
|--------------|---------|---------|---------|---------|
| 0 | 17,5 | 66,6 | 59,1 | 13,8 |
| 3 | 18,1 | 83,4 | 77,3 | 54,8 |
| 6 | 18,6 | 265,4 | 157 | 47,8 |
| 9 | 22 | 405 | 232,3 | 54 |
| 13 | 56,3 | 568 | 343 | 76,5 |
| 19 | 39,8 | 454,4 | 465,8 | 96,8 |
| 25 | 51,9 | 618,5 | 553 | 170,4 |
| 29 | 50,3 | 592,2 | 510,3 | 250,4 |
| 33 | 47,2 | 568,2 | 526,7 | 230,2 |
| 37 | 52,1 | 656,3 | 513,1 | 303,6 |
| 41 | 55,9 | 679,4 | 531,1 | 303,5 |
| 44 | 49,5 | 683,9 | 564,1 | 327,6 |
| 48 | 49,3 | 751,8 | 596,2 | 336,7 |
| 50 | 52,1 | 839,5 | 582,2 | 336,8 |
| 53 | 59,4 | 826,2 | 562,9 | 336,3 |

Fuente: Grupo de Investigación MDL&GE

VIII. CONCLUSIONES

Se han desarrollado diferentes tipos de modelos para sistemas de gasificación y su reacción cinética. El sistema en equilibrio con las etapas de control por medio de redes neuronales artificiales, hacen que el comportamiento pueda predecir situaciones extremas. En los modelos cinéticos que predicen el progreso y la composición del producto en diferentes posiciones a lo largo de un reactor, ha sido de gran ayuda adaptarlo a un sistema equilibrado, ya que puede predecir el máximo rendimiento posible, en un producto deseado de un sistema de reacción. También proporciona un útil diseño de apoyo, para evaluar el posible comportamiento y sus límites en un complejo sistema de reacción que sea difícil o peligroso para reproducir experimental.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado con recursos de la Universidad Nacional de Colombia, según proyecto código 13151; "Apoyo de la DIB a tesis de investigación en posgrado" y el Proyecto "Alianza

estratégica para la investigación de la obtención de gas de síntesis desulfurado a partir de la gasificación de carbones colombianos” código 12651.

REFERENCIAS

- [1] Proceedings of the 8th International Conference on Machine Learning and Cybernetics: Kinetic model establishment and verification of the biomass gasification fluidised bed. Zhong LD, Mei WH, Hong Z. 2009.
- [2] Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier. Zainal ZA, Rifau A, Quadir GA, Seetharamu KN. s.l. : Biomass Bioenergy, 2002, Vol. v.23:283.
- [3] Biomass resources and conversion in Japan: the current situation and projections to 2010 and 2050. Yoshioka T, Hirata S, Matsumura Y, Sakanishi KW. s.l. : Biomass Bioenergy, 2005, Vol. p. 29.
- [4] INPUT AND OUTPUT CONSTRAINED MULTIPLE-MODELS PREDICTIVE CONTROL FOR GASIFIER Machine Learning and Cybernetics, 2009 International Conference. Yong Wang, Jun-Hong, Yue, Y. Wang. China : s.n., 12-15 July 2009.
- [5] Yang YB, Yamauchi H, Nasserzadeh V, Swithenbank J. Effect of fuel devolatilization on the combustion of wood chips and incineration of simulated municipal wastes in packed bed. s.l. : FUEL, 2003.
- [6] X., Li. Biomass gasification in circulating fluidized bed, PhD dissertation. Vancouver, Canada : University of British Columbia, 2002.
- [7] ESTATE ESTIMATION-BASED CONTROL OF A COAL GASIFIER. Wilson, J.A. Chew, M. y Jones, W. Reino Unido : Univ. of Nottingham, control Theory and Applications, IEE Proceedings, Vols. v153, p. 268-276.
- [8] VEGA. Process Pressure transmitter VEGABAR. [En línea] 2010. http://www.vega.com/en/Process_pressure_VEGABAR14.htm.
- [9] AN EQUILIBRIUM MODEL FOR BIOMASS GASIFICATION PROCESSES M. RUGGIERO Y G. MANFRIDA. Stecco Façoltá, Sergio. Florence, Italy : Dipartimento di energética. di Ingegneria, Università di Firenze. VíaS.Marta 3 Renewable Energy, 1999, Vols. Volume 16, Issues 1-4, January-April 1999.
- [10] Stassen HEM, Knoef HAM. Small scale gasification systems. Twente, Netherland : The Netherlands: Biomass Technology Group, University of Twente, 1993.
- [11] S., Guerrero C. Sierra F. Ramírez. Procesos de Gasificación de materiales orgánicos. Grupo de investigación en Mecanismos de desarrollo Limpio y gestión Energético. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia, Primera Edición, 2008.
- [12] Modelling of a downdraft biomass gasifier with finite rate kinetics in the reduction zone. Roy PC, Datta A, Chakraborty N. s.l. : Int J Energy Res, 2009, Vol. v.33:51.
- [13] Modeling of smoldering process in porous biomass fuel rod. Roshmi A, Murthy J, Hajaligol M. s.l. : Fuel 2004, 2004, Vols. 83:1527-36.
- [14] Reed TB, Das A. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. Colorado : Solar Energy Research Institute, 1988.
- [15] Steam gasification of biomass in a fluidised-bed of olivine particles. Rapagna S, Jand N, Kiennemann A, Foscolo PU. s.l. : Biomass Bioenergy, 2000, Vols. v.19:187-97.
- [16] Biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor: experiments and modeling. Radmanesh R, Chaouki J, Guy C. s.l. : AIChE J, 2006, Vol. v.52:72.
- [17] R, Rauch. Biomass gasification to produce synthesis gas for fuels and chemicals, report made for IEA Bioenergy Agreement. s.l. : Task 33: Thermal Gasification of Biomass, 2003.
- [18] Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. P., McKendry. s.l. : Bioresour Technol, 2002, Vols. v.83:55-63.
- [19] Combustion and gasification in fluidized beds. P., Basu. Londres : Combustion and gasification in fluidized beds., 2006.
- [20] Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. P, McKendry. s.l. : Bioresour Technol, 2002, Vols. v.83:37-46.
- [21] National Instruments. Legacy NI CompactDAQ Chassis. [En línea] 2011. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/202545>.
- [22] Use of neural nets for dynamic modeling and control of chemical process systems. N.P. Bhat, T.J. McAvoy. s.l. : Computers Chem. Engineering, 1990, Vols. 14-4.
- [23] Sustainable biomass power for rural India: Case study of biomass gasifier for village electrification. Centre for Sustainable Technologies, Indian Institute of Science. N. H. Ravindranath, H. I. Somashekar, S. Dasappa and C. N. Jayasheela Reddy. Bangalore, India : CURRENT SCIENCE, OCTOBER 2004, Vols. v87, NO. 7, 10 .
- [24] An assessment of a Biomass Gasification based Power Plant in the Sunderbans. Center For Development and Environment Policy,. Mukhopadhyay, K. Joka, India, Indian Institute of Management Calcutta : Biomass and Bioenergy, 2004, Vol. 27-pp.253 - 264.
- [25] Perspectiva de la Comisión Europea en la biomasa y la conversión termoquímica de residuos. Maniatis

- K, Guiu G, Riesgo J. In: Bridgwater AV : Pyrolysis and gasification of biomass and waste, Proceedings of an Expert Meeting, 2002, Vols. pp. 1–18.
- [26] An equilibrium model for biomass gasification processes. M. Ruggiero, G. Manfrida. s.l. : Renewable Energy, 1999, Vols. V 16, Issues 1-4, P 106-1109. ISSN 0960-1481, 10.1016/S0960-1481(98)00429-7.
- [27] PSE'97 ESCAPE 7 Symposium. M. Morari, H.L. Lee., Trondheim, Norway : s.n., 1997.
- [28] An experimental study on biomass air–steam gasification in a fluidized bed. Lv PM, Xiong ZH, Chang J, Wu CZ, Chen Y, Zhu JX. s.l. : Bioresour Technol, 2004, Vols. v.95:95–101.
- [29] High-temperature air and steam gasification of densified biofuels. Lucas C, Szewczyk D, Blasiak W, Mochida S. s.l. : Biomass Bioenergy, 2004, Vol. v.27:563.
- [30] Fermentación de las Fuentes de biomasa. Estado actual y sus perspectivas. Lin Y, Tanaka S. s.l. : ApplMicrobiolBiotechnol, 2006.
- [31] L, Carlos. High temperature air/steam gasification of biomass in an updraft fixed bed type gasifier. PhD thesis. Stockholm, Sweden : Royal Institute of Technology, Energy Furnace and Technology, 2005.
- [32] Kotas, T.J. The exergy method of thermal plant analysis. Malabar : Krieger Pub, 1995. ISBN 0894649418.
- [33] Kishore VVN, editor. Renewable energy engineering & technology: a knowledge compendium. New Delhi : TERI Press, 2008.
- [34] The air gasification of woody biomass from short rotation forests: PhD Thesis. K., Senelwa. New Zealand : Massey University, 1997.
- [35] Identification of a pilot scale fluidised-bed coal gasification unit by using neural networks. J.M. Nogue Á, Y.G. Pan, E. Velo, L. Puigjaner. Barcelona, Spain : Chemical Engineering Department, E.T.S.E.I.B, Universidad Politécnica de Catalunya, Diagonal 647,, 2000, Vols. E-08028.
- [36] J. Ochoa, M. C. Cassanello, P. R. Bonelli and A. L. Cukierman. CO₂ gasification of Argentinean coal chars: a kinetic characterization. Programa de Investigación y Desarrollo de Fuentes Alternativas de Materias Primas y Energía (PINMATE). Buenos Aires, Argentina : Departamento de Industrias, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Intendente Guiraldes 2620. Ciudad Universitaria, 2001.
- [37] Neural networks for control systems Ð a survey. J. Hunt, D. Sbarbaro, R. Zbikowski, P.J. Gawthrop. s.l. : Automatica, 1992, Vols. 28-6.
- [38] J., Sierra F. Guerrero C. Arango. Tecnologías para el Aprovechamiento de los Biocombustibles. Grupo de investigación en Mecanismos de desarrollo Limpio y gestión Energética. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia. Primera edición, 2008.
- [39] I. Ahmed *, A.K. Gupta. Pyrolysis and gasification of food waste: Syngas characteristics and char gasification kinetics. Maryland, United States : The Combustion Laboratory, University of Maryland, Department of Mechanical Engineering, College Park, 2010. MD 20742.
- [40] HBM, España. Celda de pesaje sencilla 5kg a 1Ton. [En línea] 2010. <http://www.hbm.com/es/menu/productos/componentes-para-pesaje/celulas-de-carga/single/categorie/weighing-load-cells/product/z6/backPID/load-cells/>.
- [41] Effect of woody biomass components on air–steam gasification. Hanaoka T, Inoue S, Uno S, Ogi T, Minowa T. s.l. : Biomass Bioenergy, 2005, Vols. v28:69–76.
- [42] The development of a computer model for a fixed bed gasifier and its use for optimization and control. Gobel B, Henriksen U, Jensen TK, Qvale B, Houbak N. s.l. : BioresourTechnol, 2007, Vol. v.98:52.
- [43] Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidized bed: effect of the type of gasifying agent on the product distribution. Gil J, Corella J, Aznar MP, Caballero MA. s.l. : Biomass Bioenergy, 1999, Vols. 17:389–403. .
- [44] Evaluation of cyclone gasifier performance for gasification of sugar cane Residue part 1: gasification of bagasse. Gabra M, Pettersson E, Backman R, Kjellstrom B. s.l. : Biomass Bioenergy, 2001, Vol. v.21:351.
- [45] Pyrolysis, a promising route for biomass utilization, Bioresource Technology. G. Maschio, C. Koufopoulos, A. Lucchesi. s.l. : Bioresource Technology, 1992, Vols. Volume 42, Issue 3, P 219-231. ISSN 0960-8524, 10.1016/0960-8524(92)90025-S.
- [46] Kinetic models comparison for steam gasification of different nature fuel chars. Feroso J, Arias B, Pevida C, Plaza MG, Rubiera F, Pis JJ. s.l. : J Therm Anal Calorim, 2008, Vol. v.91:86.
- [47] EMERSON, process management. [En línea] 2011. <http://www2.emersonprocess.com/en-US/brands/rosemountanalytical/PGA/process-gas-analyzers/XE/Pages/index.aspx> .
- [48] The kinetics of combustion of chars derived from sewage sludge. Dennis JS, Lambert RS, Milne AJ, Scott SA, Hayhurst AN. s.l. : Fuel 2005, 2005, Vol. v.84:117.
- [49] Colombia., Universidad Nacional de. ADVANCED GASIFIERCONTROL v.10. [Downloaded on March 06, 2010 at 08:29:52 EST from IEEE Xplore. Restrictions apply. COMPUTING & CONTROL ENGINEERING JOURNAL] Bo-

gotá : Authorized licensed use limited to: Universidad Nacional de Colombia., JUNE 1999.

- [50] THE SECOND ALSTOM BENCHMARK CHALLENGE ON GASIFIER CONTROL. Benchmark, Alstom. s.l. : Control Theory and Applications, IEE Proceedings, S.F., Vols. v153, p. 254-261.
- [51] Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. Thermal Design and optimization. s.l. : John Wiley & Sons, 1996.
- [52] Le Point sur la gazéification de la biomase: DOSSIER COGÉNERATION. Francia : Revue Bois Energie , 2003, Vol. N° 1/2003.
- [53] Diseño y construcción de un gasificador de lecho fluidizado a escala de laboratorio para el tratamiento térmico de los residuos de tabaco. Cuba : Universidad de Pinar del Río, 2005, Vol. P. 20.