

Control de una planta prototipo de gasificación de biomasa mediante redes neuronales

Carlos A. Forero Núñez*, José U. Castellanos Contreras †, Fabio E. Sierra Vargas‡

* Grupo de Investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética

Universidad Nacional de Colombia,

caforeon@unal.edu.co,

† Universidad Cooperativa de Colombia,

jose.castellanos@campusucc.edu.co

‡ Grupo de Investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética

Universidad Nacional de Colombia,

fesierrav@unal.edu.co

Resumen

Los sistemas de gasificación de Biomasa son una alternativa para emplear residuos agroindustriales y generar un combustible gaseoso; sin embargo, estos procesos no lineales se ven afectados por las características típicas del material y por la variación en las temperaturas al interior del equipo, por lo tanto se requieren sistemas de control para alcanzar estados estables en el tiempo. Este trabajo analiza el desempeño de un control mediante redes neuronales aplicado a un gasificador de lecho fijo corriente descendente cuando se emplean cascaras de coco o cuesco de palma. Los resultados indican que el uso del sistema de control en el equipo, alimentado con cascaras de coco, permite aumentar las temperaturas en el reactor de 600°C a 800°C en la zona de inyección, superando así el problema derivado de la baja transferencia de energía por conducción a través del sistema. Cuando se emplea el control en la gasificación de cuesco, la temperatura promedio se mantuvo constante en 790°C, el CO presente en el gas estuvo alrededor de 10% mientras que el CO₂ disminuyó a 4%. La aplicación de un sistema de control mediante redes neuronales es una gran alternativa puesto que se puede entrenar para cada tipo de biomasa mejorando la estabilidad del sistema y produciendo un gas de síntesis con menor contenido de CO₂. Esto para un país con gran diversidad de recursos agroindustriales abre la posibilidad de usar estos subproductos en la generación de energía a partir de fuentes renovables.

Abstract

The gasification power systems are a remarkable alternative because they can use agro-industrial wastes to produce clean syngas; although, the differences between the biomass properties and the inner temperatures throughout the equipment make compulsory the use of control systems to achieve stable states. This work aims to analyze the effect of applying a Neural Network Control System on a Downdraft fixed bed gasifier fed with Coconut shells and Oil Palm shells. Results show that the use of the control system on the equipment fed with coconut shells increased the maximum temperature at the air injection zone from 600°C to 800°C, which overcomes the problems found by the low thermal conductivity of the coconut shells. With the control system and the equipment fed with oil palm shells, the maximum temperature was 790°C; the CO in the syngas was stable at 10%, whereas the CO₂ decreased to 4%. The Neural Network control system is useful because this can be trained for each biomass, resulting on stable temperatures and low CO₂ syngas. This improves the chances of producing energy from renewable resources in a country with a lot of agro-industrial byproducts like Colombia.

Palabras clave:

Biomasa, Cascaras de Coco, Control Inteligente
Gasificación, Redes neuronales

Keywords:

Biomass, Coconut Shells, Smart Control
Gasification, Neural Network

Introduction

El aumento en la demanda de energía primaria y de energía eléctrica ha estado directamente relacionado con el constante desarrollo industrial y el crecimiento de la población mundial. Entre 1973 y 2010, la generación de energía eléctrica pasó de 6115 TWh a 21431 TWh; así mismo, la energía primaria llegó a 12717 Mtoe en 2010 (IEA, 2010). En la actualidad, cerca del 80% de esta energía proviene de sistemas convencionales basados en la combustión de fuentes fósiles, de los cuales el carbón se ha convertido en el más empleado debido a su menor costo y a sus mayores reservas en comparación con el gas natural y el petróleo (Gazzani, 2013). Sin embargo, la combustión del carbón produce gran cantidad de efectos perjudiciales para la comunidad, entre los cuales se encuentran: (1) emisión de material particulado, (2)

contribución a la formación de lluvia ácida a causa del SO_x generado, (3) formación de NO_x debida a la necesidad de garantizar una mejor combustión mediante cantidades importantes de aire en exceso, y (4) generación de gases de efecto invernadero tales como CO, CH₄ y CO₂ (Olajire, 2010). De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA), las emisiones de CO₂ a partir de la combustión de carbón aumentaron 4.9% llegando a 13.1 GtCO₂ entre 2009 y 2010; esto significó el 43% del total de gas liberado a causa de sistemas de combustión. Adicionalmente, la emisión de gases de efecto invernadero se debió principalmente a los sistemas de generación de energía térmica y eléctrica (41%) seguidos por el sector transporte (21%) (IEA, 2012).

Múltiples estudios se vienen desarrollando con el ánimo de mitigar estos efectos y de generar alternativas para el uso más limpio de algunas fuentes fósiles, entre los cuales se encuentran: el desarrollo de tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ (Pettinau, 2013), sistemas de combustión por plasma (Messerle, 2013), sistemas de limpieza de gases de combustión (Eslamimanesh 2013), entre otros. A pesar de que cada una de estas alternativas contribuye a disminuir el impacto derivado de la combustión de fuentes fósiles; la velocidad con la cual aumenta el consumo energético y la estrecha relación existente con el desarrollo económico hacen necesaria la búsqueda de fuentes de energía alternativas y limpias (Al-mulali, 2012). Según la Red de políticas de energía renovable para el siglo XXI (REN21, 2013) las fuentes renovables generaron aproximadamente el 20.3% de la electricidad para finales de 2011 y tuvieron un aumento en la inversión mundial equivalente a 17% llegando a USD 257 billones. Después de los grandes sistemas de energía a partir de fuentes hídricas y de los parques eólicos, la biomasa es la tercera fuente más importante para la generación de energía eléctrica; así mismo, es la principal fuente renovable para aplicaciones térmicas (Forero-Núñez, 2012). Colombia es un país que posee una gran diversidad de Biomasa con un potencial de aprovechamiento interesante. Dentro de los diversos tipos de biomasa se pueden encontrar residuos de madera, forestales y de la agroindustria. Cada uno de estos materiales posee características propias tales como tamaño, contenido de humedad, densidad y composición química. Motivo por el cual es necesario seleccionar la tecnología más adecuada para su aprovechamiento; algunas de estas son: combustión (Roy, 2012), pirólisis (Chhiti, 2012), licuefacción (Toor, 2011), torrefacción (Kim, 2012), fermentación, gasificación (Erlich, 2006), entre otras.

La gasificación es un proceso termoquímico mediante el cual se llevan a cabo una serie de reacciones entre la biomasa y un agente gasificante –puede ser Aire, H₂O, CO₂ u O₂– para la producción de un gas –compuesto principalmente de CO e H₂– con un valor energético considerable denominado gas de síntesis (Forero-Núñez, 2012). Este gas posee grandes ventajas puesto que permite su uso en sistemas de combustión interna, en celdas de combustible o como materia prima de procesos químicos para la síntesis de compuestos de mayor valor agregado; sin embargo, es un proceso complejo que posee algunos problemas relacionados con el pre-tratamiento de las materias primas, la generación de alquitranes y la inestabilidad debido a las múltiples variables que afectan la calidad del gas derivadas de todas aquellas reacciones químicas que se llevan a cabo simultáneamente. Por estos motivos se han desarrollado investigaciones para establecer la incidencia de las condiciones de operación y del diseño de los equipos en la composición del gas generado; así mismo, se vienen planteando modelos numéricos para caracterizar el proceso y evaluar su eficiencia energética (Erlich, 2011), (Mandl, 2010) y (Texeira, 2012). Forero *et. al.* (Forero-Núñez, 2012) presenta el potencial del proceso de gasificación de cascara de coco y cuesco de palma en un reactor de

lecho fijo corriente descendente para la generación de gas de síntesis; sin embargo, muestra la necesidad de llevar a cabo procesos de mayor duración para lograr la estabilidad térmica del sistema y promover la transferencia de energía a través del reactor. De igual forma, Ramírez (Ramírez, 2010) muestra el potencial del uso de carbón madera en el mismo equipo y la necesidad de instalar sistemas de control para mantener estable el perfil de temperaturas en el proceso dinámico. Este trabajo busca analizar el efecto que causa la aplicación de un sistema de control mediante redes empleando cascaras de coco y cuesco de palma como materias primas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materias primas

Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Plantas Térmicas y Energías Renovables de la Universidad Nacional de Colombia (4.638°N -74.084°W, 2630 m sobre el nivel del mar). El proveedor de la cascara de Coco fue la empresa Amerteck Ltda y el Cuesco de palma proveniente de la planta de extracción de aceite de palma “El palmar del Llano S.A”. Las propiedades fisicoquímicas de la biomasa aparecen en la Tabla 1 de acuerdo con Forero et al. (Forero-Núñez, 2012), los resultados del análisis próximo aparecen reportados en base húmeda (%masa b.h.) mientras que los del análisis último en base seca (%masa b.s.). Aunque la forma del cuesco de palma y de las cascaras de coco es irregular, debido a que el proceso de molienda no arroja material totalmente uniforme, tienen en promedio 3 cm largo y 2,5 cm ancho. Con base en este análisis último el poder calorífico del residuo del coco es 21,48 MJkg⁻¹ y 23,83 MJkg⁻¹ para el cuesco.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de las cascaras de coco y el cuesco de palma

	Coco	Cuesco		Coco	Cuesco
	Análisis próximo (% masa _{b.h.})			Análisis último (% masa _{b.s.})	
			C	44.76	47.30
Humedad	12.01	7.92	O ₂	44.73	39.39
Volátiles	71.45	72.74	H ₂	8.92	9.72
Carbón Fijo	15.28	16.87	N ₂	0.16	0.84
Cenizas	1.26	2.47	S	0.03	0.07
			Cenizas	1.4	2.68
Total	100	100	Total	100	100

Descripción del sistema de gasificación

El sistema prototipo de gasificación de lecho fijo está constituido por un reactor cilíndrico de 1.28m de altura y 0.34m diámetro, construido en acero con una capa interna de material refractario; en la parte superior se forma un embudo que disminuye el área interna de 0.047m² a 0.023m², área que se mantiene constante en la sección inferior, para un volumen de procesamiento igual a 0.0352m³ de material. Debido a las altas temperaturas alcanzadas en el interior del reactor, el equipo cuenta con un recubrimiento en fibra de vidrio disminuyendo las pérdidas de calor por radiación y convección. Este reactor cilíndrico posee una salida lateral inferior para

el gas y una cámara de almacenamiento de cenizas, sobre un soporte metálico de tres bases ubicadas de forma equidistante. En la parte superior, el reactor posee un sistema de alimentación constituido por una tolva hecha en acero con capacidad de almacenar 106,48m³ de material y un mecanismo de tornillo sinfín acoplado a un motor eléctrico. El reactor cuenta con 8 puntos de medición de temperatura interna distribuidos a lo largo en los cuales se acoplaron termocuplas tipo K.

El gas de síntesis generado del proceso pasa a un tubo Venturi en el cual se mezcla con agua disminuyendo así su temperatura y generando la condensación de alquitranes y compuestos intermedios de bajo punto de evaporación. Esta mezcla sigue a un hidrociclón en el cual se separa la fase líquida de la gaseosa; la primera es almacenada en un tanque para su posterior tratamiento, mientras tanto la fase gaseosa sigue a una sección de dos filtros en serie. El primero de estos emplea aserrín como material filtrante permitiendo la remoción de material sólido y de la humedad del gas; el segundo filtro es de manga de polipropileno que retiene el

material particulado más fino. Después de pasar por estos sistemas se toma una pequeña muestra del gas limpio para su caracterización en un analizador de gas EMERSON X-STREAM que permite determinar en tiempo real la cantidad de CO y CO₂ presente con una precisión de 0,01%. El gas restante se puede llevar a una chimenea donde es quemado o a una planta a gas modelo Prakash PNG-15BG, compuesta de un motor bicilíndrico, de 1550 rpm de 2280Lts volumen barrido con aspiración de aire automático, y de un generador eléctrico de 220V, 60Hz, 3 fases capacidad para generar 10KWe. El aire suministrado al sistema se regula con una válvula proporcional ubicada entre el compresor y el reactor, la cual permite su apertura y cierre a partir de una señal eléctrica de 4-20mA, la calibración del flujo de aire se llevó a cabo mediante la medición de la velocidad lineal que pasa a través de la tubería con un anemómetro de hilo caliente manteniendo constante la presión de descarga del compresor. La figura 1 muestra el sistema de gasificación descrito junto con el lazo de control empleado en la aplicación del sistema de redes neuronales.

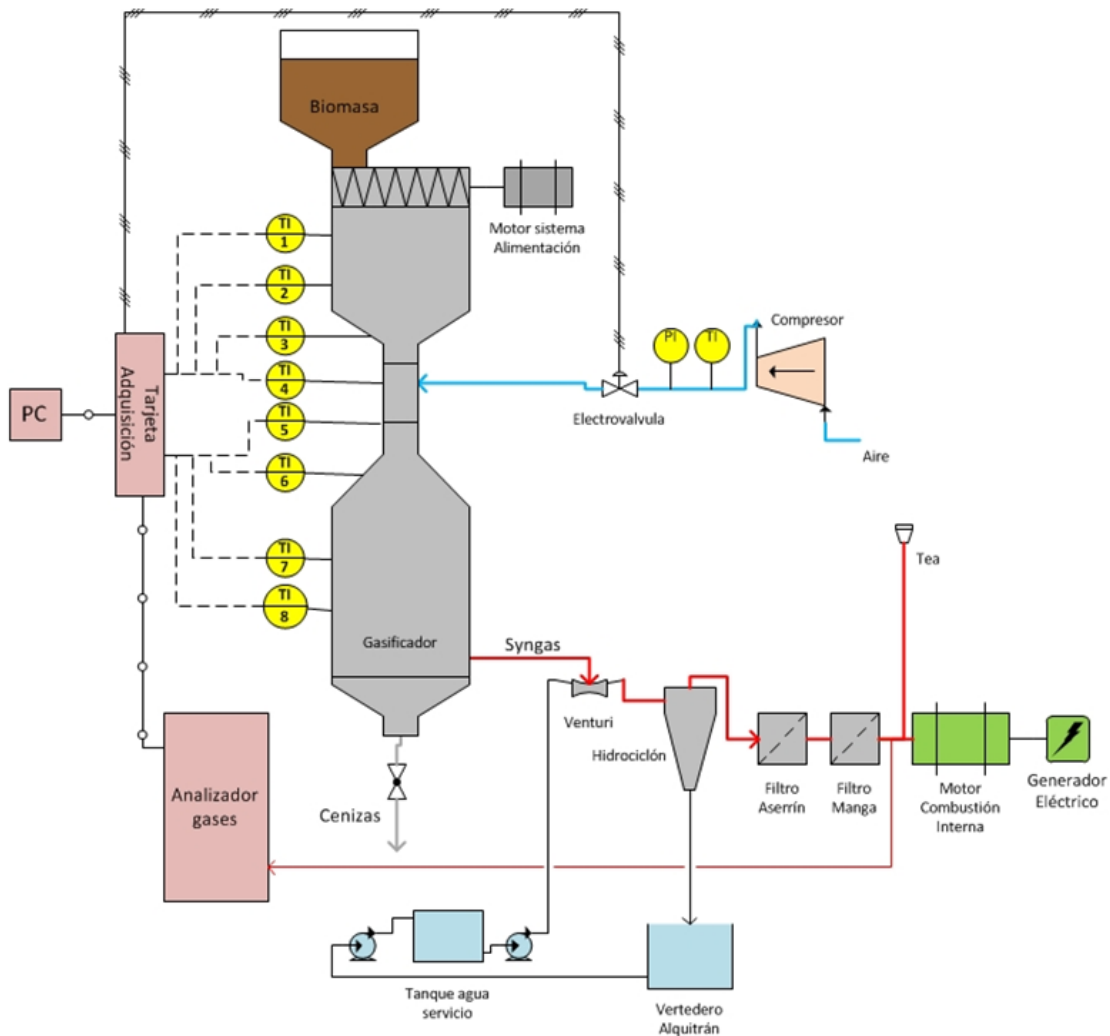


Figura 1. Esquema general del sistema de gasificación con sistema de control sobre la válvula de suministro de aire

Sistema de control mediante redes neuronales

Los sistemas de control con redes neuronales se basan en un algoritmo de entrenamiento y validación mediante el cual se aplica un sistema retroalimentado en que se sustituye la estructura PID por la red neuronal (Niño, 2010). En este caso se empleó una red del tipo percepción multicapa debido a ser un sistema robusto y capaz de representar correctamente modelos altamente no lineales. Según Castellanos (Castellanos-Contreras, 2011) la implementación de más de dos capas ocultas dificulta el procesamiento numérico y no mejora la calidad de la red, por lo tanto, se decidió implementar una sola capa oculta con un sistema conocido como ARMAX manejando dos instantes anteriores de acuerdo a la Ec. 1.

$$u(s) = r_0 + \sum_{i=1}^{n_1} ai * u(s-i) + \sum_{i=1}^{n_2} bi * y(s-i) \quad (1)$$

$$u(s) = r(s) + \sum_{i=1}^2 ai * u_i(s) + \sum_{i=1}^2 bi * y_i(s) \quad (2)$$

La Ec. 2 describe el sistema ARMAX aplicado al proceso de gasificación donde $u_1(s)$ es la señal de corriente de la válvula proporcional en el instante anterior, $u_2(s)$ la señal de la válvula en dos instantes anteriores, $r(s)$ la señal de referencia, $y_1(s)$ es la temperatura de la zona de inyección en el instante anterior, $y_2(s)$ la temperatura de la zona de inyección en dos instantes anteriores. Con el uso de dos instantes anteriores, el sistema es capaz de identificar si la válvula de aire viene de un proceso de cierre o de apertura; y/o si el proceso está aumentando o disminuyendo la temperatura de combustión dándole mayor precisión. La programación del sistema de control se llevó a cabo en Matlab™ lo cual permite establecer el peso de cada nodo, y se integró a un aplicativo desarrollado en labview Control NNTM permitiendo operar el sistema en modo manual o automático como se puede ver en la Figura 2. Este aplicativo recibe las señales de cada una de las termocuplas instaladas en el reactor y las de CO y CO₂

provenientes del analizador de gases mediante una tarjeta de adquisición de datos National Instruments™. Así mismo permite, de forma manual, ajustar la señal enviada a la válvula proporcional para controlar el ingreso de aire. Para el entrenamiento de la red neuronal se llevaron a cabo 10 ensayos variando el flujo de aire de alimentación entre 1,5 y 4,5 ms⁻¹ después de haber alcanzado un punto de equilibrio térmico por más de 20 minutos, de esta manera se da una perturbación al sistema de control afectando los perfiles de temperatura. Esta afectación en el sistema es almacenada por el programa y necesaria para mejorar la efectividad del control neuronal ante cambios en los perfiles de temperatura. Las redes neuronales se entrenan mediante un algoritmo de retroalimentación “back propagation” en el cual no solo las variables de salida son empleadas nuevamente como entrada, sino que se considera el error, se trata mediante mínimos cuadrados y se retroalimenta este como parámetro de entrada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el desarrollo de los ensayos se evaluaron: el comportamiento térmico y la estabilidad del gasificador cuando se utilizan cascaras de coco y huesco de palma como materias primas, y el efecto del sistema de control mediante redes neuronales. De acuerdo con Forero (Forero-Núñez, 2012) las cascaras de coco presentan algunos inconvenientes de conductividad y transferencia de calor, motivo por el cual llevar a cabo la gasificación de esta biomasa requiere un sistema de control adecuado. La figura 3 muestra el comportamiento de la temperatura en las distintas zonas del proceso sin la aplicación del control mediante redes neuronales. Las temperaturas que se muestran en la zona de inyección son el promedio instantáneo de la lectura generada por las termocuplas 5 y 6, las de la zona de secado son el promedio de 1 y 2, la zona de pirólisis es el promedio de los medidores 3 y 4, y la zona de reducción corresponde a los sensores 7 y 8. Sin el uso del sistema de control las máximas temperaturas alcanzadas fueron: 600°C

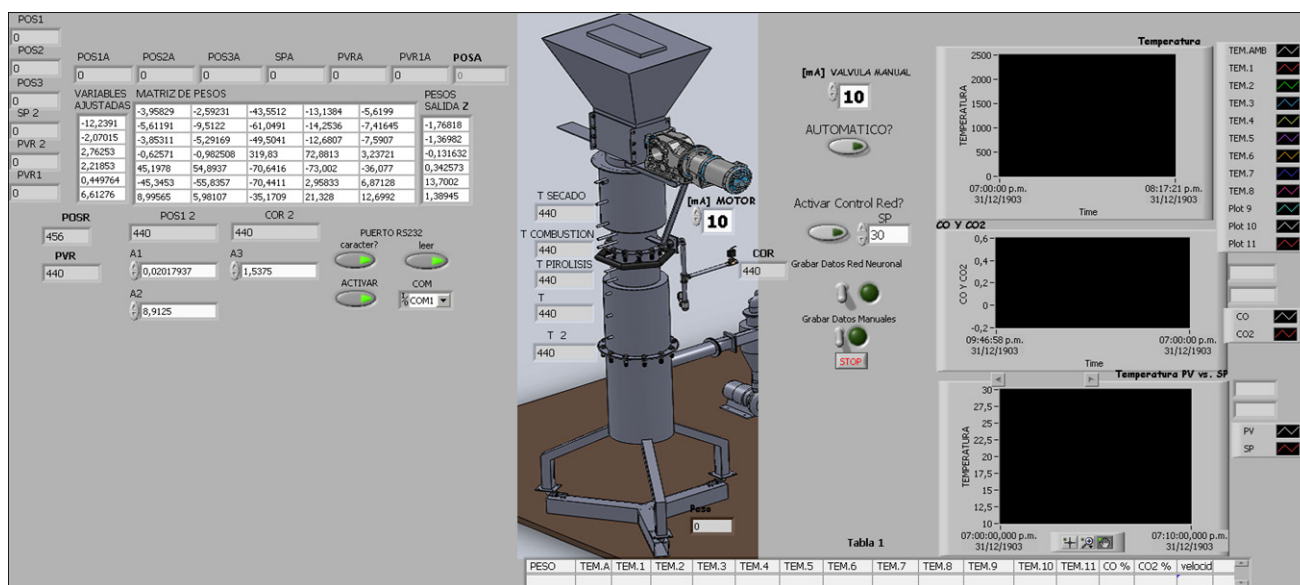


Figura 2. Aplicativo desarrollado para el control del sistema de gasificación mediante redes neuronales

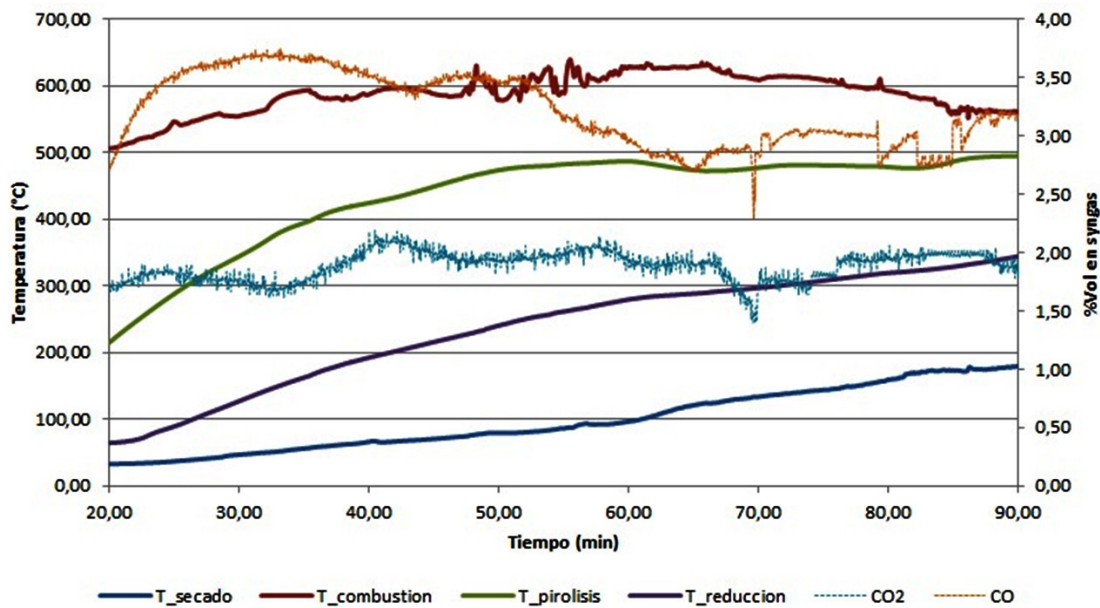


Figura 3. Perfil de temperaturas y composición de CO y CO₂ en el gas de síntesis para el proceso de gasificación de cascara de Coco sin control asistido.

en la zona de inyección, 500°C en la zona de pirolisis, 350°C en la zona de reducción y 170°C en la de secado. En la zona de inyección no se alcanzó el set-point (800°C) debido entre varios aspectos a la falta de control en el agente gasificante y a la baja conductividad térmica del material. A pesar de que el proceso mantuvo una inyección de aire constante y de que las temperaturas a través del sistema no varían de forma importante, se puede ver en la figura 3 que la cantidad de CO y CO₂ presentes en el gas de síntesis no paso de 3,5%vol. Al contrario, la aplicación del control mediante redes neuronales permitió alcanzar el set-point y mayores temperaturas en el reactor; generando un gas de síntesis con más CO y menos CO₂ como se puede ver en la figura 4. En la zona de inyección se logran 800°C, 600°C en la de pirolisis y temperaturas supe-

riores a 200°C en las zonas de secado y reducción. El control de la temperatura es de gran importancia debido a su efecto en la composición del gas de síntesis; es posible ver como a partir del minuto 65, instante en el cual la zona de inyección alcanza el set-point, la composición del CO aumenta hasta llegar a 6% debido a la activación de reacciones secundarias entre el CO₂ y el coque presente en el lecho fijo en las zonas de pirolisis y de reducción del reactor.

A diferencia de los problemas encontrados durante la gasificación de la cascara de coco, el cuesco de palma ha demostrado ser un material adecuado para su uso como materia prima en los sistemas de producción de gas de síntesis (Forero-Núñez, 2012), (Erlich, 2011), (Castellanos-Contreras,

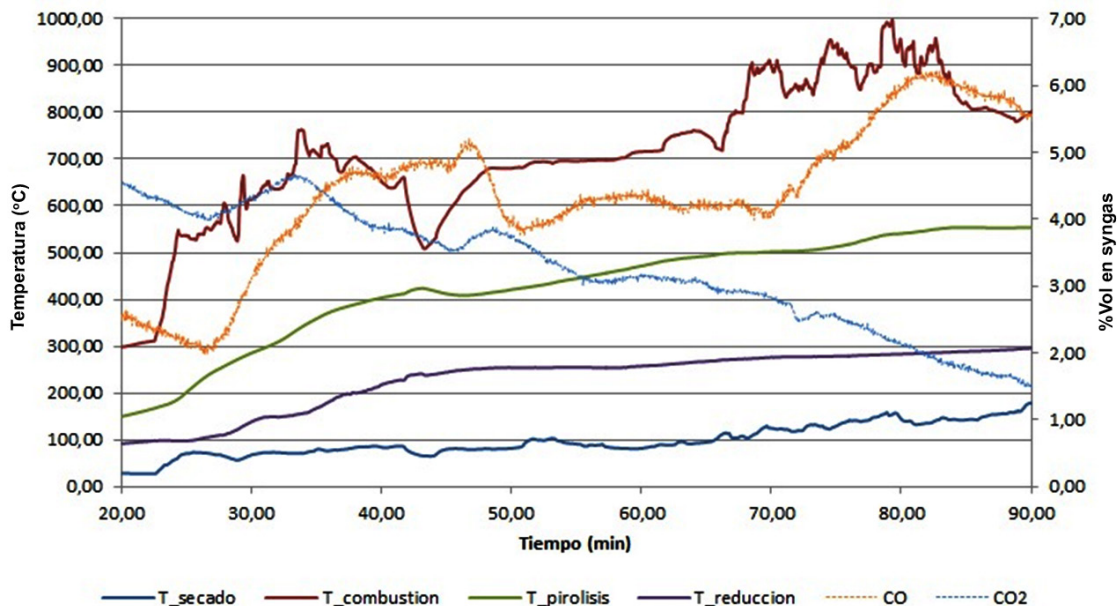


Figura 4. Perfil de temperatura y composición del gas de síntesis generado a partir de cascara de coco empleando el sistema de control por redes neuronales.

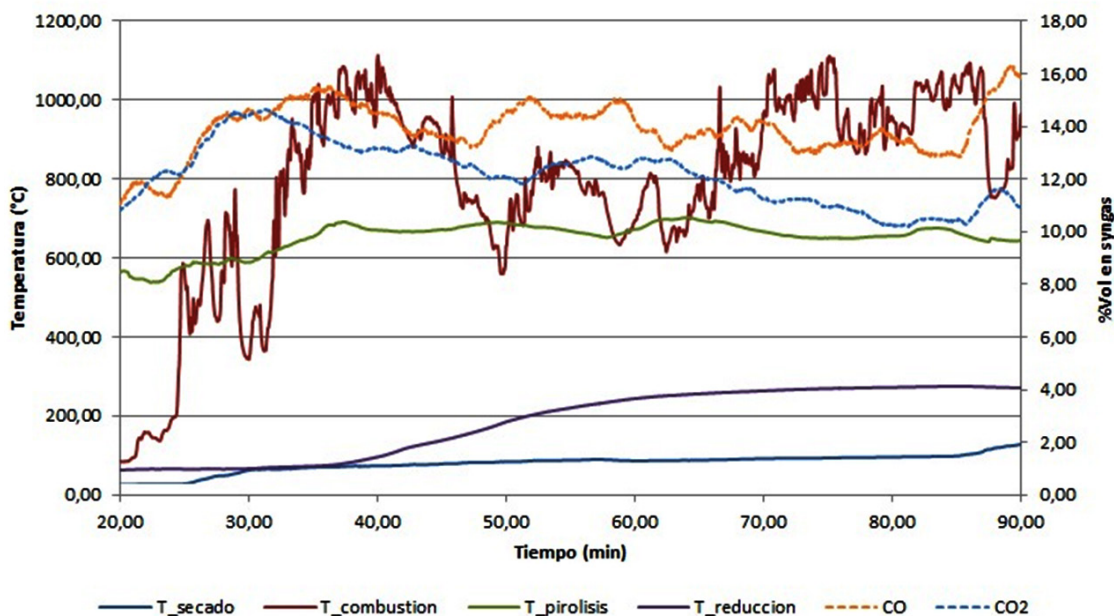


Figura 5. Perfil de temperatura y composición del gas generado del proceso de gasificación de cuesco de palma sin aplicar el sistema de control.

2011). Como se puede ver en la figura 5, las temperaturas alcanzadas manteniendo un flujo constante de aire cambian con el tiempo siendo principalmente la temperatura en la zona de inyección la más volátil, entre 600 y 1000°C; mientras tanto, en las demás zonas se ve como su comportamiento es más estable logrando una temperatura promedio de 620°C en la zona de pirolisis, 250°C en la de reducción y 110°C en la de secado. Al igual que sucede con la gasificación de coco, la temperatura tiene un papel importante en la composición de gas de síntesis, puesto que, al lograr valores más elevados en la zona de inyección se favorece la generación de CO y CO₂; sin embargo, este no es el único factor que afecta,

como se puede ver de la tabla 1 el cuesco de palma posee una mayor cantidad de Carbón elemental (47%masab.s) y de material volátil (72,74%masab.s) los cuales reaccionan aumentando la cantidad de CO al 14% y la de CO₂ al 12%.

La aplicación del sistema de control mediante redes neuronales en el proceso de gasificación de cuesco de palma produjo resultados interesantes, en este caso, el control mantuvo el perfil de temperatura estable como se puede ver en la figura 6. En la zona de inyección la temperatura fue equivalente a 790°C, 600°C en la zona de pirolisis y 310°C en la de reducción. Al observar el comportamiento de la composición del gas de síntesis cuando se aplica el sistema de control se apre-

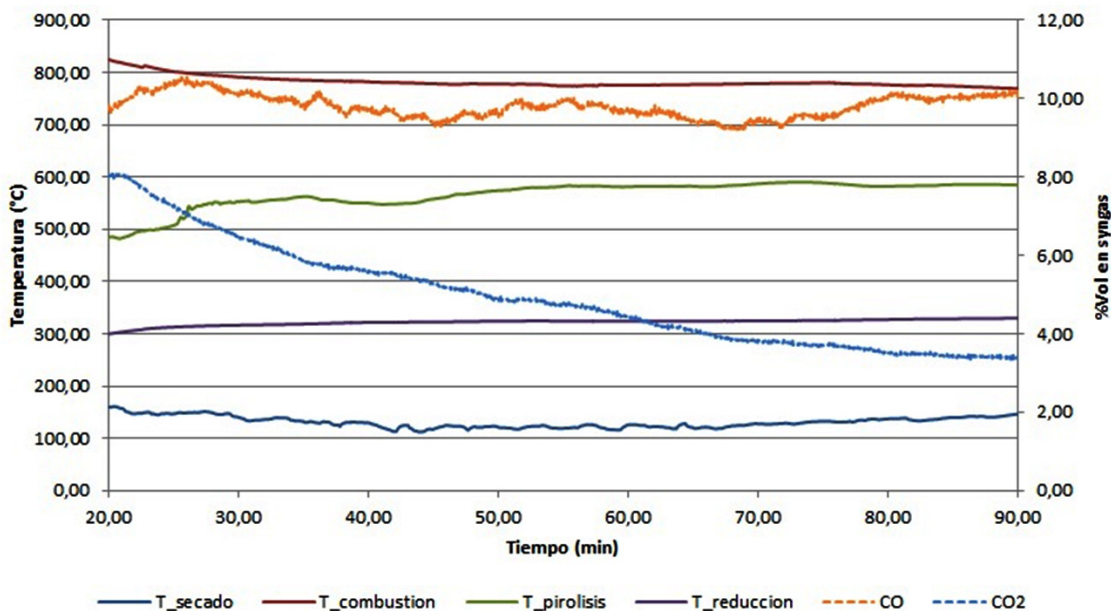


Figura 6. Comportamiento térmico del proceso de gasificación de cuesco de palma al aplicar el sistema de control mediante redes neuronales.

cion algunos aspectos relevantes. El mantener temperaturas estables inferiores a 810°C hace que la reactividad del cuesco de palma disminuya generando menores contenidos de CO en el gas. Así mismo, la aplicación del control inteligente reduce la producción de CO₂ en el gas de síntesis debido a las temperaturas estables que promueven la disociación de este compuesto causada por su reacción con el coque generado en la pirolisis. Finalmente, el uso del sistema de control tiene un efecto en el consumo de biomasa en el proceso, en el ensayo de gasificación sin control la biomasa se consume a una tasa de 3,56 kg h⁻¹ mayor que los 2,25 kg h⁻¹ equivalentes a la velocidad de consumo con las redes neuronales aplicadas. Esto derivado a las mayores temperaturas alcanzadas y a que el sistema de control regula la entrada de agente gasificante para mantener el proceso estable.

CONCLUSIONES

La aplicación del sistema de control mediante redes neuronales en un proceso de gasificación de lecho fijo presenta varias ventajas relacionadas especialmente con la estabilidad térmica del equipo, el aumento de la calidad del gas de síntesis en función de una mayor relación CO vs CO₂ presente en el gas de síntesis tanto cuando se usa cascara de coco como cuando se emplea cuesco de palma. Sin embargo los problemas derivados de la baja conductividad térmica de la cascara de coco hacen que alcanzar valores cercanos a 800°C requiera más tiempo aún para el sistema de control por redes neuronales. Por otro lado este sistema de control demuestra ser útil para estos procesos térmicos debido a la posibilidad de entrenar las redes neuronales dependiendo de las características físico-químicas propias de cada biomasa.

La gasificación es un proceso termoquímico en el cual la temperatura tiene una incidencia preponderante sobre la composición del gas de síntesis; se pudo verificar como el aumento en la temperatura del sistema promueve la reactividad del material e incrementa la tasa de consumo de biomasa; lo cual no siempre es adecuado puesto que a pesar de generar un gas de síntesis más rico en CO tiene un mayor contenido de CO₂, el cual, es un compuesto sin valor energético que se comporta como un material inerte en los procesos subsecuentes. Aun así, se requiere de una mayor investigación en sistemas de gasificación continuos y semicontinuos que sean capaces de emplear diversos materiales durante periodos de tiempo más prolongados. Es recomendable el desarrollo de sistemas de control mediante redes neuronales para sistemas de gasificación teniendo en cuenta que se mantienen en entrenamiento constante, ideal para casos donde las características físico-químicas de la biomasa alimentada varían con el tipo de material; sin embargo, su aplicación en sistemas de escala comercial está sujeta a la instalación de sistemas de medición y respuesta en línea que permitan el almacenamiento y tratamiento de las variables del sistema en tiempo real.

El proceso de gasificación de Biomasa se constituye como una oportunidad interesante para el uso energético de residuos agroindustriales; se pudo analizar la posibilidad

de generar gas de síntesis a partir de cascara de coco y de cuesco de palma, dos materiales que actualmente son considerados subproductos sin valor del sector agroindustrial. La aplicación de estos sistemas en el sector agroindustrial puede aumentar la competitividad de la industria al emplear sus subproductos como fuentes de energía limpias disminuyendo así los costos derivados del consumo de combustibles fósiles en sistemas tradicionales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del personal técnico del grupo de investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética (MDL&GE) de la Universidad Nacional durante la experimentación; así mismo, agradecen la financiación de la Universidad Nacional de Colombia mediante su programa de Becas a Estudiantes Sobresalientes de Posgrado (BESP).

REFERENCIAS

- Al-mulali Usama, Binti Che Sab Che Normee, "The impact of energy consumption and CO₂ emission on the economic and financial development in 19 selected countries", *Renew Sust Ener Rev*, 2012; 16: 4365-4369
- Castellanos-Contreras Jose Ulises, *Evaluar la aplicación de un sistema de control basado en Redes Neuronales, para el proceso de gasificación con aire y oxígeno, del reactor de lecho fijo del laboratorio de Plantas Térmicas y Energías Renovables*, <<tesis de Maestría>>, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2011, 130p
- Chhiti Younes, Salvador Sylvain, Commandré Jean-Michel, Broust Francois. "Thermal decomposition of bio-oil: Focus on the products yields under different pyrolysis conditions", *Fuel*, 2012; 102: 274-281
- Erlich Catharina, Björnbom Emilia, Bolado David, Giner Marian, Fransson Torsten H. "Pyrolysis and gasification of pellets from sugar cane bagasse and wood", *Fuel*, 2006;85: 1535-1540
- Erlich Catharina, Fransson Torsten H, "Downdraft gasification of pellets made of wood, palm-oil residues respective bagasse: Experimental study", *Appl Energ* 2011; 88: 899-908
- Eslamimanesh Ali, Gharagheize Farhad, Mohammadi Amir H, Richon Dominique, "Assessment test of sulfur content of gases", *Fuel Process Technol*, 2013; 110: 133-140
- Forero-Núñez Carlos Andrés, Jochum Joachim, Sierra-Vargas Fabio E, "Characterization and feasibility of biomass fuel pellets made of Colombian timber, Coconut and Oil Palm residues regarding European standards", *Environmental Biotechnology, Olsztyn, Polonia* 2012; 8, 2: 67-76
- Forero-Núñez Carlos Andrés, Guerrero Fajardo Carlos, Sierra Vargas Fabio E, "Producción y uso de pellets de Biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación", *Revista Iteckne, Bucaramanga, Colombia*, 2012; 9: 21-30

Forero-Núñez Carlos Andrés, Cediell-Ulloa Alexandra, Hernández Laura, Castellanos-Contreras Jose Ulises, Sierra-Vargas Fabio E, *Oil Palm empty bunch fruits and coconuts shells gasification using a lab-scale downdraft fixed bed gasifier at Universidad Nacional de Colombia*, 20th European Biomass conference and exhibition; Junio 18-22 2012, Milan

Gazzani Mateo, Macchi Enni, Manzonili Giampaolo. “*CO₂ capture in integrated gasification combined cycle with SEWGS-Part A: Thermodynamic performances*”, *Fuel*, 2013; 105: 206-219

International Energy Agency Statistics, *CO₂ emissions from fuel combustion Highlights*, <<informe técnico>>, IEA, Paris 2012, 138p

International Energy Agency, *Key World Energy Statistics*, <<informe técnico>>, IEA, Paris, 2012, 82p

Kim Young-Hun, Lee Soo-Min, Lee Hyung-Woo, Lee Jae-Won. “*Physical and chemical characteristics of products from the torrefaction of yellow poplar (Liriodendron tulipifera)*”, *Bioresource Technol* 2012; 116: 120-125

Mandl C, Obernberger I, Biedermann F, “*Modelling of an updraft fixed-bed gasifier operated with softwood pellets*”, *Fuel* 2010; 89: 3795-3806

Messerle VE, Karpenko EI, Ustimenko AB, Lavrischshev OA, “*Plasma preparation of coal to combustion in power boilers*”, *Fuel Process Technol*, 2013; 107: 93-98

Olajire Abass A. “*CO₂ capture and separation technologies for enf-of-pipe applications - A review*”, *Energy*, 2010;35: 2610-2628

Pettinau Alberto, Ferrara Francesca, Amorino Carlo, “*Combustion vs Gasification for a demonstration CCS (carbon capture and storage) Project in Italy: A techno-economic analysis*”, *Energy*, 2013; 50: 160-169

Ramirez 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>>, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2010, 150p

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century REN21, *Renewable 2012 Global Status Report*, informe técnico, REN21, Paris 2013, 176p

Roy Murari Mohon, Corscadden Kenny W. “*An experimental study of combustion and emissions of biomass briquettes in a domestic wood stove*”, *App Energy*, 2012; 99: 206-212

Teixeira G, Van de Steene L, Martin E, Gelix F, Salvador S, “*Gasification of char from Wood pellets and from Wood chips: Textural properties and thermochemical conversion along a continuous fixed bed*”, *Fuel* 2012; 102: 514-524

Toor Saqib Sohail, Rosendahl Lasse, Rudolf Andreas. “*Hydrothermal liquefaction of biomass: A review of subcritical water technologies*”, *Energy*, 2011; 36: 2328-2342

Niño Johany, *Diseño de un programa para el entrenamiento y simulación de redes neuronales usadas en el control de procesos térmicos*, <<tesis de Maestría>>, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2010, 180p