

Ingeniería básica y de detalle para la instrumentación de una planta prototipo de gasificación de lecho fijo

Basic and detailed engineering for instrumentation of a fixed bed gasification prototype plant

José Ulises Castellanos-Contreras
M. Sc. Ingeniería Mecánica
Universidad Cooperativa de Colombia
Bogotá, Colombia
jose.castellanos@campusucc.edu.co

Carlos Andrés Forero-Núñez
Ph. D. Ingeniería
Universidad ECCI
Bogotá, Colombia
cforeron@ecc.edu.co

Fabio Emiro Sierra-Vargas
Ph. D. Ingeniería
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
feserrav@unal.edu.co

Resumen- Los sistemas de gasificación demandan un análisis a la hora de seleccionar la instrumentación (temperaturas, caudales, peso, válvulas, motores, entre otros), un costo de mantenimiento, calibración, esquemas de instalación, sistemas de control y una fácil manipulación; que hace necesaria una ingeniería básica y de detalle. En el presente documento se esboza un análisis de la instrumentación y una aplicación de un sistema de control no lineal en una planta prototipo de gasificación de lecho fijo. La selección de la instrumentación industrial se desarrolló en función de la posición de los sensores y actuadores, en el tratamiento de limpieza de algunas variables, en la linealización alrededor del punto de operación, en el acondicionamiento y tratamiento de la señal; que solo la parte experimental valida la instrumentación, aunque factores externos afectan el proceso de gasificación (condiciones climáticas, tiempos de operación, tiempos de mantenimiento, etc.) que hace dispendioso una constante supervisión.

Palabras clave- Calibración, instrumentación, gasificación, sensor, variable.

Abstract- The Gasification systems require an analysis when selecting instrumentation (temperature, flow, weight, valves, motors, etc.) cost of maintenance and calibration, installation diagrams, control systems and easy handling; necessitating a basic and detail engineering. Herein one analysis instrumentation and an application of a nonlinear control system prototype in the fixed bed gasification plant are outlined. Selecting industrial instrumentation was based on the position of the sensors, actuators, in the cleaning treatment of some variables in the linearization around the operating point in the conditioning and signal processing;

only validates the experimental part we instrumentation, although external factors affecting the gasification process (weather conditions, operating times, maintenance times, etc.) which makes continuous monitoring wasteful.

Keywords- Calibration, instrumentation, gasification, sensor, variable.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales, principalmente los sistemas de generación de energía a partir de sistemas no convencionales como la gasificación, carecen de una descripción de ingeniería básica y de detalle desde el punto de vista instrumental y de control; debido a que su temática de estudio se enfoca principalmente en los resultados físico-químicos obtenidos, un ejemplo es el potencial energético del gas producido y la diversificación de las formas de construcción de las plantas de gasificación haciendo necesario un planteamiento casi individual para cada planta. La instrumentación para estos procesos ha sido derivada de estudios en laboratorio basados en los conocimientos químicos y físicos del proceso de gasificación [1].

En anteriores trabajos se han presentado resultados de investigación relacionados con el funcionamiento de sistemas de gasificación de lecho fijo corriente descendente. A partir de estos resul-

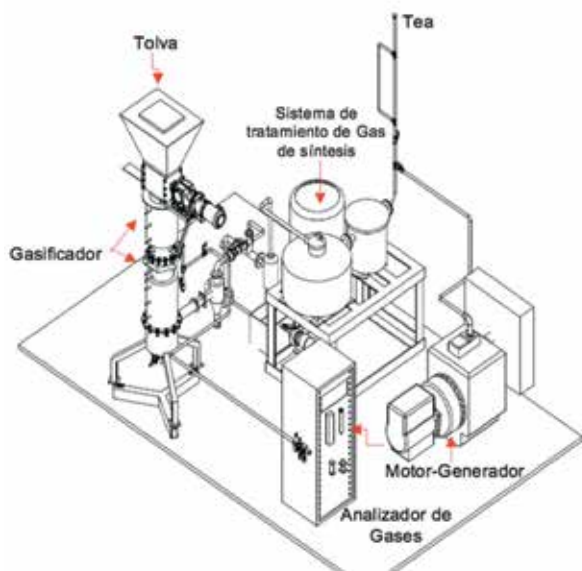
tados se ha desarrollado una ingeniería básica y de detalle alrededor de la instrumentación y la aplicación de un prototipo de control que establecen las bases necesarias para la obtención de un proceso confiable [2].

2. INGENIERÍA BÁSICA

La ingeniería básica comprende la ingeniería conceptual o la ingeniería de proceso. Los principales fundamentos en esta fase de ingeniería son los criterios de diseño del gasificador; las variables de entrada y salida para medir, su ubicación determinada por el estudio previo físico-químico de la biomasa a emplear [3]. El panel de adquisición de datos debe ser confiable y de una gran robustez, teniendo en cuenta la cantidad de señales por trabajar. Los niveles de señales deben cumplir con normas internacionales donde la mayoría de señales son de 4 a 20mA o de 0 a 10 Volt [3].

El esquema general del sistema de gasificación de lecho fijo por tratar se presenta en la Fig. 1.

Fig. 1. ESQUEMA PLANTA DE GASIFICACIÓN



Fuente: autores.

2.1 Variables de entrada

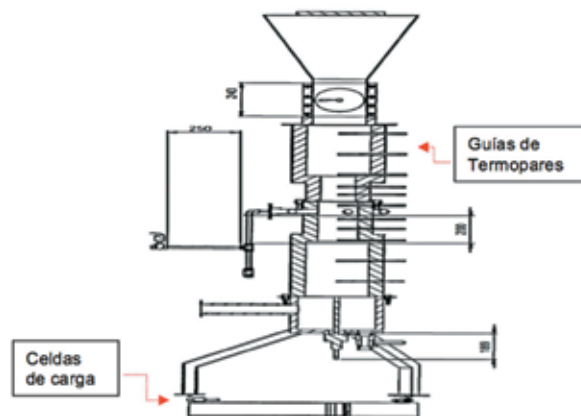
Las variables de entrada que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del sistema de instrumentación fueron: temperatura, masa consumida, flujo y composición del gas. Para la medición

de la temperatura se emplearon termopares tipo K (Cromel (aleación de Ni-Cr) / Alumel (aleación de Ni -Al)). Estos constan de dos conductores eléctricos de diferentes materiales conectados entre sí en un extremo (unión de medida). Los dos extremos libres constituyen un punto de compensación o unión de referencia de acuerdo con la Norma DIN IEC 584-2 [5].

Estos termopares se escogieron basados en dos factores. El primero es el rango de temperatura que son capaces de soportar, el cual va desde $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el segundo es el bajo costo que tienen [3].

El protocolo de calibración de los termopares se hace por comparación con un patrón (Micro-mite II) que posee el laboratorio de Energías Renovables y Plantas Térmicas, este procedimiento consta de una mufla que llega a los $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se introducen todos los termopares con el patrón dentro de la cámara, tomando comparaciones cada $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los termopares se ubicaron en varias guías instaladas a lo largo del reactor (Fig. 2).

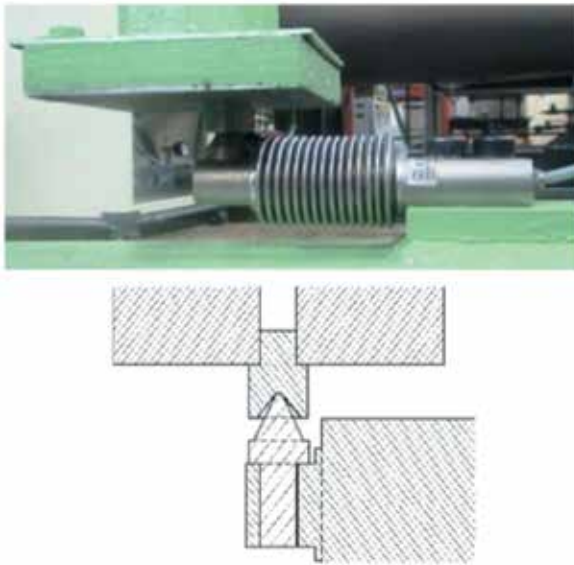
Fig. 2 CORTE VERTICAL DEL GASIFICADOR. GUÍAS DE TERMOPARES Y CELDAS DE CARGA



Fuente: [4].

El consumo de biomasa se registró empleando celdas de carga. Estas se basan en la deformación de un material que varía en este caso la resistencia de una galga extensiométrica; esta convierte el desplazamiento o deformación en señales eléctricas. La señal eléctrica de salida es típicamente del orden de unos pocos milivoltios y debe ser amplificada [3]. En las figuras 2 y 3 se observa el lugar y punto de apoyo donde fueron ubicadas las celdas de carga.

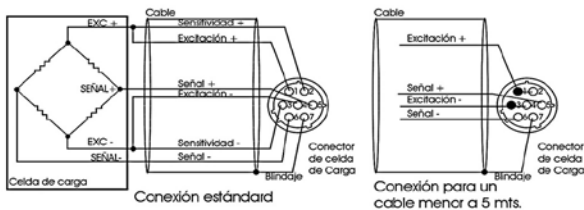
Fig. 3 CELDA DE CARGA Y PUNTO DE APOYO



Fuente: autores.

El sistema de conexión se presenta para una sola celda (Fig. 4), en donde la señal (+) y (-) es la conexión a la fuente de voltaje con un valor de 12 V. Se mide el diferencial de potencia entre las dos señales; cuando se presentan más de una celda de carga para determinar el mismo peso, es necesario conectarlas todas en paralelo, para este proceso se siguió la norma ASTM E1012. Los problemas más significativos que se presentaron fueron el punto de apoyo del gasificador con el sistema de tratamiento de gases y la resolución de los sensores, teniendo en cuenta que se pesa todo el equipo (peso aprox. 500 kg) para determinar el consumo medido en gramos.

Fig. 4. DIAGRAMA DE CONEXIÓN DE CELDA DE CARGA



Fuente: [4].

El flujo de gas de síntesis se evaluó mediante un medidor de caudal tipo tambor de marca Ritter (Fig. 5) él presenta ventajas importantes debido a sus bajos niveles de medición de presión, su precisión y alta resolución. Por otro lado, se evaluó un medidor por diferencial de presión con un orificio

patronado según norma ASME MFC-14M, sin embargo la resolución no fue la adecuada y presentó dificultades en el momento de calibrarlo a bajas presiones.

Fig. 5. MEDIDOR DE FLUJO POR DIFERENCIAL DE PRESIÓN Y MEDIDOR DE FLUJO TIPO TAMBOR (RITTER)



Fuente: autores.

La composición del gas de síntesis se determinó empleando dos sistemas de análisis de gas (Fig. 6). Un analizador de gas EMERSON X-STREAM, capaz de medir CO y CO₂ con un alto grado de precisión (0.01%), capaz de transmitir línea simultáneamente con una salida de 4-20 miliamperios. El otro es el analizador de gas GAS-BOARD CUBIC, el cual tiene una resolución menor (0.1%) capaz de medir simultáneamente CO, CO₂, CH₄, H₂, y C_NH_M, y con salidas de 4 a 20 miliamperios por cada medición. Los dos equipos necesitan un sistema de filtración, el cual debe garantizar un gas de síntesis sin humedad ni alquitranes (Fig. 6).

Finalmente, se registran todas las señales de los sensores mediante un sistema de adquisición de datos que utiliza un Chasis NI cDAQ-9172 de National Instruments (Fig. 7) conectado a diferentes tarjetas de adquisición de datos (NI9211_Termopar, NI9265_Salida miliamperios, NI9203_entrada miliamperios).

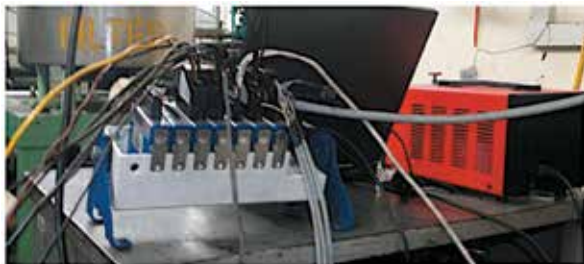
Adicionalmente se desarrolló un programa de adquisición de datos y control basado en Labview, el cual puede ser ejecutado en modo manual, semiautomático o completamente automático, integrando diferentes métodos de control como redes neuronales, PID y un control manual, favoreciendo la experimentación. La Fig. 8 presenta la interfaz, donde se visualiza el seguimiento de las variables, la posibilidad de almacenar los datos en un archivo.txt y la activación del control.

Fig. 6. SISTEMA DE ANALIZADORES DE GASES



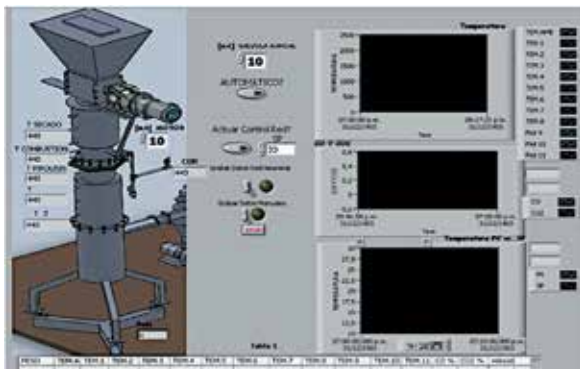
Fuente: autores.

Fig. 7. CHASIS Y TARJETAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS



Fuente: autores.

Fig. 8. INTERFAZ DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL



Fuente: [6].

3. SELECCIÓN DE LA BIOMASA POR EMPLEAR

Uno de los principales aspectos para tener en cuenta en el proceso de gasificación está relacionado con la selección del material por utilizar. La biomasa comprende una gran diversidad de materiales que van desde los residuos forestales y agrícolas, hasta los residuos orgánicos y municipales. Teniendo en cuenta esta diversidad de materiales es necesario evaluar las diferentes características físico-químicas que cada uno comprende con el ánimo de establecer el proceso de transformación más adecuado entre los existentes. Para este caso, se buscaron materiales cuya humedad fuera baja teniendo en cuenta que la presencia de grandes cantidades de agua disminuye la eficiencia energética del sistema, gastando parte de la energía térmica generada en el proceso de evaporación de la humedad. Así mismo se buscó que la biomasa contuviera un contenido alto de material volátil que hiciera ignición rápidamente y que desprendiera diversos compuestos en la zona de pirolisis. Por último, se tuvo en cuenta la ceniza contenida en la biomasa con el ánimo de evitar problemas relacionados con el taponamiento de las tuberías, formación de escoria promovida por la sinterización de los compuestos y posterior recristalización.

A la biomasa empleada se le llevan a cabo los diversos ensayos de caracterización propios del análisis próximo (humedad, material volátil, carbón fijo, y cenizas) y del análisis último (C, H₂, N₂, S, O₂). La humedad se estableció siguiendo la norma ASTM E871-82 [7], el material volátil de acuerdo con la ASTM E872 [8], contenido de ceniza mediante la norma ASTM E1755-01 [9] y el carbón fijo fue calculado por balance [10]. Los análisis últimos se llevan a cabo de acuerdo con la metodología descrita en trabajos previos. Algunos autores [11], [6] [12] han presentado resultados de diversos estudios de caracterización desarrollados con materiales lignocelulósicos y al carbón madera empleado posteriormente en los ensayos de gasificación en la planta de lecho fijo corriente descendente.

4. INGENIERÍA DE DETALLE

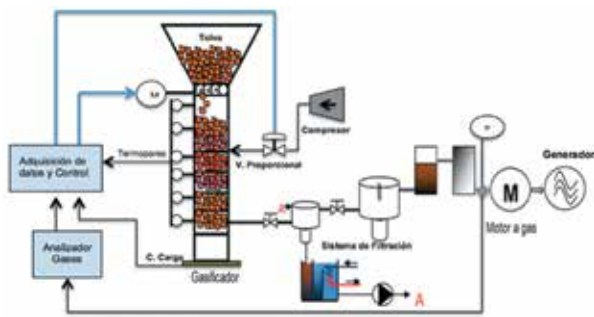
4.1 Metodología de experimentación

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 y H₂) con un valor energético considerable denominado gas de síntesis [13]. Este gas tiene su uso en sistemas de combustión interna, en celdas de combustible o como materia prima de procesos químicos [1]. Con anterioridad se desarrollaron sistemas de entrenamiento de redes neuronales para procesos térmicos [12], [14], pero de acuerdo con la información recopilada por los autores no se han desarrollado mayores análisis aplicados a sistemas de gasificación debido a las múltiples reacciones químicas que suceden al tiempo.

Para la experimentación se empleó carbón vegetal como materia prima para el gasificador; esta fue pesada por las celdas de carga. Una vez evaluado esto se encendió el motor de alimentación de la biomasa, llenando la zona de pirólisis por encima de la zona de combustión. Posteriormente se inició el sistema de limpieza del gas y se procedió a adicionar energía a la zona de combustión con una llama externa y una apertura de la válvula proporcional para dar arrastre al agente gasificante proveniente de un compresor externo. El proceso se mantuvo en estas condiciones hasta cuando la temperatura de la zona de combustión superó los 100 °C. Al superar el umbral de los 100 °C, se procedió a cerrar la ignición de llama externa y se dio apertura a la válvula proporcional lentamente desde el sistema de adquisición y control (Fig. 9). Cuando superó los 200 °C se dio entrada al aire a una velocidad entre 2 y 3 m/s a través de la válvula proporcional que lleva a la zona de combustión. Este proceso se siguió hasta que la temperatura en la zona de combustión llegó a un intervalo entre 800 y 1000 °C. Esta temperatura se mantuvo constante durante el desarrollo del proceso mediante el uso del sistema de control programado en Labview [6].

Fig. 9. ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN CON SISTEMA DE CONTROL



Fuente: autores.

4.2 Metodología de calibración

Para la alimentación de la biomasa fue necesario calibrar el tornillo sinfín con relación a la velocidad del motor trifásico y al peso que cae de biomasa desde la tolva al gasificador en un determinado tiempo. El control de velocidad del motor trifásico se hizo a través de un variador de frecuencia, que permite el ingreso de una señal de 4 a 20 miliamperios, como referencia, variando su frecuencia proporcionalmente (Fig. 10).

Fig. 10. VARIADOR - MOTOR TRIFÁSICO ACOPLADO DEL TORNILLO SINFIN



Fuente: autores.

Para determinar la rata de ingreso de la biomasa al gasificador, se calibró el motor en función de la corriente de referencia recibida desde el variador de frecuencia y las RPM medidas en el tornillo sinfín, para cuantificar el peso que se deposita en el gasificador en un tiempo determinado, esto se hace para diferentes tipos de biomasa; se toma como condición inicial un tamaño de partícula de 17mm. En la Fig. 11 se observa el peso que se deposita desde la tolva en función de las rpm para diferentes biomasa, permitiendo establecer que su comportamiento es similar e independiente del tipo de biomasa empleada.

Fig. 11. RELACIÓN DE ALIMENTACIÓN DE DIFERENTES BIOMASAS



Fuente: [4].

Para poder caracterizar la alimentación de la biomasa por el tornillo sinfín en función de la corriente que se le suministra al variador, se determinó el promedio sobre el tiempo de cada prueba hallando la relación gramo por segundo en relación con la corriente de control. En la Fig. 12 se observa cómo existe una correlación de linealidad R^2 equivalente a 0.986, lo cual se puede aproximar a una linealidad entre la corriente de control y el suministro de la biomasa. En este caso se encontró adicionalmente que la histéresis del proceso es muy baja debido principalmente a la corta duración de la alimentación y a las bajas revoluciones del motor.

Sin embargo, es necesario considerar la alta humedad, debido principalmente a que esta apelmaza la biomasa en el tornillo y se sale de todo rango de medición.

Fig. 12. RELACIÓN ENTRE CORRIENTE Y LA CANTIDAD DE BIOMASA



Fuente: autores.

La dosificación de la entrada de aire se realiza mediante la calibración de la velocidad del aire de entrada a través de una tubería de 1/2 pulgada en función de la corriente de control variada en un rango de 5.5 a 10.2 mAmp (Figura 12). En este rango se encuentra una relación directa ajustada mediante regresión lineal con un coeficiente R^2 equivalente a 0.983 y 0.991. Se tomó para el proceso de control, la fórmula Y cerrada-abierta

(Secuencia de apertura de la válvula de cerrada hasta abierta), por tener una correlación más cercana y no presentar mayor desviación entre las dos fórmulas lineales.

Fig. 13. DOSIFICACIÓN VÁLVULA PROPORCIONAL DEL AGENTE GASIFICANTE



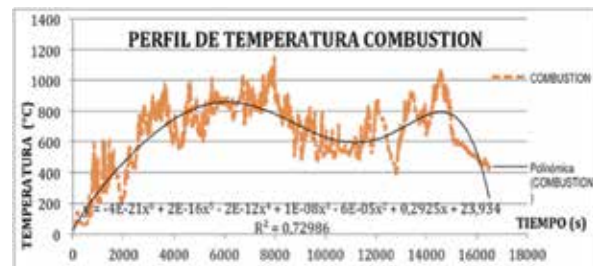
Fuente: autores.

4.3 Control PID del gasificador

Para establecer el controlador PID de la planta, se estableció como variable controlada la velocidad de ingreso del agente gasificante asociada al funcionamiento de un actuador (Válvula proporcional). Así mismo se estableció la temperatura de la zona de combustión como variable de referencia.

La Fig. 14 muestra el comportamiento de la variable de referencia durante el tiempo de operación permitiendo determinar el comportamiento promedio de la temperatura de combustión y generar una ecuación característica. Dicha ecuación está dada por un polinomio de grado 6 que permite determinar las constantes del sistema de control PID.

Fig. 14. PERFIL DE TEMPERATURA COMBUSTIÓN

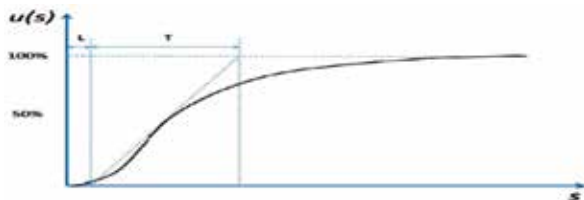


Fuente: [4].

A pesar de la inestabilidad presentada en la zona de combustión, tomamos la ecuación polinómica de grado 6 para sintonizar el PID mediante

la técnica de respuesta al escalón de Ziegler & Nichols (Fig. 15). De acuerdo con esta técnica se espera a que el sistema se establezca completamente mientras la válvula está en una sola posición de apertura. Para esto se optó por definir un modelo polinómico, que caracterizara la respuesta al sistema y definir así el valor de la pendiente máxima [15]. Derivando la ecuación y mediante la implementación de la ecuación de la tangente que pasa por punto equivalente al 50% del valor más alto, se obtiene que $L = 185,523$ s y $T = 5050,2697$ s. Con estos valores se calcularon las siguientes constantes para un controlador tipo PID.

Fig. 15. MÉTODO DE SINTONIZACIÓN DE ZIEGLER & NICHOLS



Fuente: [14].

En la Tabla I se presentan los parámetros de sintonización de los controladores tipo PID según el método de respuesta en escalón de Ziegler & Nichols.

TABLA I
CONSTANTES PID EMPLEADAS EN EL SISTEMA DE CONTROL DE LA PLANTA DE GASIFICACIÓN

CONTROLADOR	K_p	K_i	K_d
P	T/L	0	0
PI	$0,9T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2T/L$	$2L$	$L/2$

Con estos valores se obtienen las siguientes constantes para un controlador tipo PID.

$$K_p = 32,666 \quad K_i = 0,0027 \quad K_d = 92,762$$

4.4 Controlador de redes neuronales (NN) en el gasificador

El control neuronal es basado en un algoritmo de entrenamiento y validación desarrollado por el grupo de Investigación MDL&GE de la Universidad Nacional, el cual es un sistema realimentado en el que se sustituye la estructura PID por una red neuronal, este tipo de control es también conocido como control con predictor [13]. La selección y estimación de los parámetros de la red neuronal utilizada se describen a continuación:

Tipo de red neuronal: Red neuronal tipo perceptrón multicapa adecuada para el control de procesos por su robustez y posibilidad de representar correctamente modelos altamente no lineales [13].

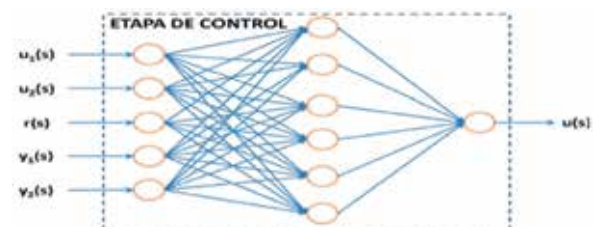
Número de capas ocultas: De acuerdo con la revisión bibliográfica se ha demostrado que implementar más de dos capas ocultas no mejora la capacidad de la red, por el contrario, dificulta el procesamiento numérico, por lo que se decide usar una sola capa oculta.

Las variables de entrada que se plantean en el modelo son la señal de corriente de válvula proporcional en el instante anterior $u1(s)$, en dos instantes anteriores $u2(s)$, la señal de referencia $r(s)$, la temperatura de combustión en el instante anterior $y1(s)$ y en dos instantes anteriores $y2(s)$. Adicionalmente, se inducen dos retrasos en la señal de la corriente de la válvula para que el modelo neuronal tenga en cuenta el efecto causado por la trayectoria previa de la válvula, bien sea de apertura o de cierre. De la misma forma, se incluyen dos retrasos en la señal de temperatura de combustión para incluir el efecto del valor que presenta la variable en el instante anterior bien sea que venga de un proceso de aumento o de disminución de temperatura. Este sistema es conocido como ARMAX, ya que su salida depende de ella misma en estados pasados "(1)" [16].

$$u(s) = r_0 + \sum_{i=1}^{n_u} a_i * u(s-i) + \sum_{i=1}^{n_y} b_i * y(s-i) \quad (1)$$

Las variables de salida empleadas se basaron en la corriente de la válvula proporcional $u(s)$, que como se mencionó anteriormente, es la salida del controlador. La Fig. 16 presenta un esquema general del modelo aplicado a la red neuronal donde se tienen en cuenta las diversas variables de entrada, los nodos intermedios y una única variable de salida dada por $u(s)$.

Fig. 16. MODELO DE LA RED NEURONAL IMPLEMENTADA



Fuente: [2].

En la ecuación 2 se muestra la ecuación particular para el modelo que se aplicó a la red implementada para contralar el gasificador “(2)” [12].

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

5. RESULTADOS

5.1 Discusión del control PID en el gasificador

El control PID no llega a la estabilización debido a que el sistema es altamente no lineal y los experimentos que se efectuaron dependían del estado de trabajo del sistema de gasificación. Analizando la temperatura de combustión en la Fig. 17, se observa que la temperatura sube bruscamente al comienzo afectando negativamente el proceso y aumentando el consumo de biomasa en la zona de combustión. Debido a esto disminuye la transferencia de calor a la zona de pirólisis y el secado de la biomasa.

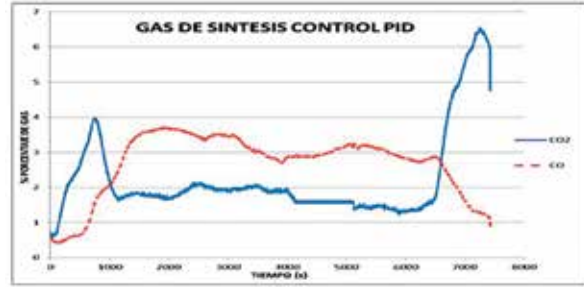
Fig. 17. PERFIL DE TEMPERATURAS (CARBÓN VEGETAL) CONTROL PID



Fuente: autores.

La composición del gas de síntesis se muestra en la Fig. 18. Se puede ver cómo en el tiempo de operación se mantuvo una concentración de CO mayor a la de CO₂, lo cual es algo característico del proceso de gasificación. Sin embargo, los niveles de CO son muy bajos en comparación con ensayos de gasificación realizados a nivel mundial, empleando sistemas de lecho fijo corriente descendente. Una de las causas de esto es que el proceso cuenta con muchos factores que se deben tener en cuenta, como son las temperaturas de pirólisis y secado; el estado de humedad de la biomasa y el grado de limpieza del gasificador.

Fig. 18. GAS DE SÍNTESIS (CARBÓN VEGETAL) CONTROL PID

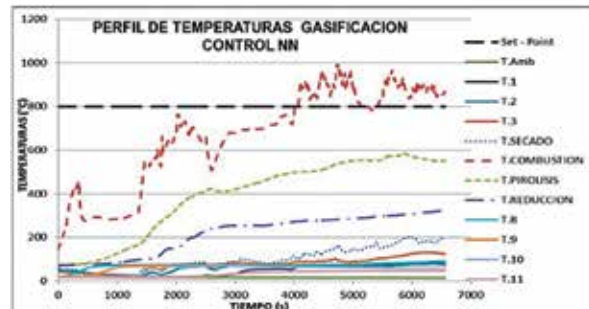


Fuente: autores.

5.2 Discusión del control NN en el gasificador

La técnica utilizada para el entrenamiento del sistema de control mediante redes neuronales fue la máquina de aprendizaje extremo, que reduce considerablemente los tiempos de entrenamiento [17]. En la Fig. 19 se observa un mejor comportamiento en el estado transitorio, dando un crecimiento a la temperatura de combustión no muy pronunciada. A diferencia del ensayo realizado con el sistema de control PID, emplear las redes neuronales permitió alcanzar mayores temperaturas en un tiempo más corto.

Fig. 19. PERFIL DE TEMPERATURAS (CARBÓN VEGETAL) CONTROL NN



Fuente: autores.

A partir del t=4000 s. se observa un acercamiento de la temperatura de pirólisis a los 600 °C, donde empieza a incrementar una diferencia entre el CO y el CO₂ como se observa en la Fig. 20. Se ha de suponer que si se incrementara la temperatura en la zona de pirólisis, mejoraría el porcentaje del CO independiente de donde estuviera la zona de combustión. De igual manera que sucedió con la temperatura, el uso del sistema de gasificación con el control mediante redes neuronales permitió aumentar los niveles de CO en el gas de síntesis. Esto a su vez aumenta la cantidad de energía que tendrá dicho combustible gaseoso

y mejora la eficiencia energética del sistema de gasificación.

Fig. 20. GAS DE SÍNTESIS (CARBÓN VEGETAL) CONTROL NN



Fuente: autores

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En los procesos térmicos, especialmente cuando el proceso depende no solo de una variable, sino de varias y la variable central depende a su vez de otras variables dependientes, es necesario utilizar controles robustos capaces de manejar sistemas cuyo comportamiento es altamente no lineal.

El control con redes neuronales de múltiples entradas y una sola salida (MISO), no es el más adecuado por lo cual se debe implementar un sistema de múltiples entradas, múltiples salidas (MIMO) para el proceso de gasificación; ya que en la experimentación, fue necesario, no solo controlar la válvula de suministro del agente gasificante (válvula proporcional), sino que aparecieron otras variables significativas en el proceso de control como son: el motor que controla el vacío en la línea de gasificación, ya que este vacío hace que me disminuya o aumente el arrastre del gas producido dentro del gasificador hacia el motor a gas.

El equipo de gasificación, construido y diseñado por el grupo de Investigación MDL&GE; es un equipo apto para realizar diversos tipos de investigaciones relacionadas con la gasificación de residuos agroindustriales; para control de procesos industriales y análisis de producción energética por biomasa. El equipo actualmente cuenta con una gran instrumentación que nos garantiza un seguimiento continuo, en cada momento de la generación del gas de síntesis y unos analizadores de composición química del gas producido en línea.

El proceso de control y automatización aun tiene mucho camino por recorrer, ya que no existe un solo sistema inteligente capaz de resolver todo el problema y, por tanto, es necesario plantear soluciones individuales para los sistemas complejos. entre estos los sistemas de gasificación.

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 Colciencias y de la Universidad Nacional de Colombia mediante su proyecto "Cogeneración a partir de la biomasa residual del procesamiento de palma africana para la empresa productora de aceite Inversiones la Mejorana S.A. en el departamento del Meta", Código 1101-543-32104 y contrato 0464-2013.

REFERENCIAS

- [1] C. Guerrero, F. Sierra y S. Ramírez, *Procesos de gasificación de materiales orgánicos*, Bogotá, Colombia, Asociación de Ingenieros Mecánicos de la Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [2] J. U. Castellanos, F. E. Sierra-Vargas y C. Guerrero-Fajardo, «Modelado del proceso de gasificación de biomasa para aprovechamiento energético: una revisión al estado del arte,» *Revista ITECKNE*, vol. 9, n° 2, pp. 95-105, 2012.
- [3] A. Creus, *Instrumentación Industrial*, Editorial Marcombo, 2011.
- [4] J. U. Castellanos, *Evaluar la aplicación de un sistema de control basado en redes neuronales, para el proceso de gasificación con aire u oxígeno del reactor de lecho fijo del laboratorio de plantas térmicas y energías renovables*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2012.
- [5] Deustches Institut für Normung, *DIN IEC 584-2*, 2002. [En línea]. Available: www.din.de.
- [6] C. A. Forero-Núñez, J. U. Castellanos y F. E. Sierra-Vargas, «Control de una planta prototipo de gasificación de biomasa mediante redes neuronales,» *Revista Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo SOMIM*, vol. 4, n° 5, pp. 161-168, 2013.
- [7] ASTM Standard E871-82, *Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*, ASTM International, West Conshohocken, 2013.

- [8] ASTM Standard E872-82, *Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels*, ASTM International, West Conshohocken, 2013.
- [9] ASTM Standard E1755-01, *Standard test method for ash in biomass*, ASTM International, West Conshohocken, 2007.
- [10] C. A. Forero-Núñez, J. Jochum y F. E. Sierra-Vargas, «Effect of the particle size and the addition of cocoa pod husks on the properties of sawdust and coal pellets,» *Ingeniería e Investigación*, vol. 35, n° 1, p. In press, 2015.
- [11] C. A. Forero-Núñez, J. Jochum y F. E. Sierra-Vargas, «Characterization and feasibility of biomass fuel pellets made of Colombian timber, coconut, and oil palm residues regarding European standards,» *Environmental Biotechnology*, vol. 8, n° 2, pp. 67-76, 2012.
- [12] S. Ramírez R., «Simulación computacional del proceso de gasificación de biomasa en el reactor de lecho fijo,» tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Grupo de Investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética, 2010.
- [13] R. F. López y J. M. F. Fernández, *Las redes neuronales artificiales. Fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas*, Madrid: Netbiblo S.L., 2008.
- [14] J. F. Niño F., «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 Grupo de Investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética, Bogotá, Colombia, 2010.
- [15] C. Galeano, *Modelamiento matemático: Aplicaciones*, Bogotá, Colombia, 2010.
- [16] S. Huailin y G. Xiucai, *Decoupling control of multivariable time-varying systems based on PID neural network*, China: Department of Information and Control Engineering, Guangzhou University, 2004.
- [17] J. García, *Nuevas tendencias en redes neuronales artificiales: Extreme Learning Machine*, Cartagena, Colombia: Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena, 2006.