



Modelamiento dinámico de un sistema de gasificación de lecho fijo estratificado

Dynamic modelling of a stratified-fixed-bed gasification system

Yuhan Arley Lenis ^a, José Reinaldo Garzón ^b, Iván Portnoy ^c,
Arnaldo Verdeza ^d & Celso Lins de Oliveira ^e

^a Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia, yuhan.lenis@pascualbravo.edu.co

^b Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia, jose.garzon044@pascualbravo.edu.co

^c Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia, iportnoy@cuc.edu.co

^d Universidad Simón Bolívar, Barranquilla, Colombia, averdeza@unisimonbolivar.edu.co

^e Universidade de São Paulo - USP/ FZEA, Sao Paulo, Brasil, celsooli@usp.br

Recibido: octubre 14, 2021. Aceptado: noviembre 30, 2021.

Resumen

La gasificación de biomasa es un proceso termoquímico que viene ganando interés a nivel mundial debido a que permite transformar un material carbonáceo en un gas combustible de bajo contenido energético, pero de fácil aprovechamiento en motores de combustión interna. Los equipos de gasificación en lecho fijo para baja potencia usualmente no cuentan con sistemas de control de la posición del frente de llama, lo que conduce a inestabilidades del proceso y variaciones en la calidad del gas producido. Buscando facilitar el proceso de desarrollo de estrategias de control, se presenta un modelo dinámico que permite predecir de forma adecuada la respuesta de la velocidad del frente de llama ante perturbaciones en el flujo de agente gasificante, la densidad y humedad de la biomasa. Para ello, se hace uso de funciones transferencia de primer orden cuyas constantes se derivan a partir de estudios experimentales reportados en la literatura. Dicho desarrollo constituye una importante herramienta tanto para el diagnóstico del proceso como para el diseño de estrategias de control orientadas a gasificadores de lecho fijo.

Palabras Clave: Biomasa, reactor de lecho fijo, control, modelamiento dinámico.

Abstract

Since gasification allows syngas production from carbonaceous materials, this technology has been gaining worldwide interest. Gas from gasification has low energy content, but it is easy to use as fuel for internal combustion engines. Since the low-power fixed bed gasification equipment usually does not have control systems for flame front position, they are frequently prone to instability in performance when there are changes in the biomass properties. Consequently, a dynamic model was carried out to facilitate the development of control strategies. The studied model improves the precision when predicting parameters such as the response of the flame front velocity after disturbances in the gasifying agent flow and the density and humidity of the biomass. This model uses first-order plus dead time transfer functions whose constants are derived from experimental studies reported in the literature. Such a development constitutes an essential tool for diagnosing the process and designing control strategies focused on fixed-bed gasification technology.

Keywords: Biomass, fixed bed gasification, control, dynamic modelling.

1 INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales asociados con el uso de recursos de origen fósil han fomentado el desarrollo de tecnologías de transformación de recursos renovables. Es el caso de los sistemas de gasificación, que si bien fueron desarrollados hace cerca de 200 años, durante las últimas décadas se viene reconsiderando su uso para la transformación de materiales carbonosos. Este proceso termoquímico permite transformar un combustible sólido, como la biomasa, en un gas combustible compuesto principalmente por CO, CO₂, CH₄, H₂, N₂, cuya concentración de inertes supera el 50%vol, ocasionando que su Poder Calorífico Inferior (PCI) rara vez supere los 6 MJ/Nm³, lo que es considerablemente bajo si se compara con el gas natural cuyo PCI se encuentra alrededor de 38 MJ/Nm³. Sin embargo, pese a su bajo poder calorífico, el gas de gasificación puede ser usado en las máquinas térmicas convencionales con un mínimo de modificaciones [1], lo que lo hace particularmente atractivo para procesos de generación de electricidad en grupos electrógenos basados en biomasa. Esta característica ha llevado a los sistemas de gasificación a un considerable nivel de madurez tecnológica, en el que se dispone de ofertas comerciales principalmente para la generación de potencia, en equipos que van desde lecho fijo para

Citar como:

Y. Lenis, J. Garzón, I. Portnoy, A. Verdeza & C. Lins de Oliveira. "Modelamiento dinámico de un sistema de gasificación de lecho fijo estratificado" Revista CINTEX, Vol. 26(2), pp. 47-54. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.33131/24222208.380>

bajos niveles de generación, hasta los sistemas de lecho fluidizado, considerados principalmente para potencias superiores a los 2 MWe [2]. Si bien a los sistemas de lecho fijo se les asocian dificultades de escalabilidad y mayores inestabilidades en comparación con los sistemas fluidizados, su uso se justifica principalmente desde una perspectiva costo-efectiva, en la que su simplicidad, la baja producción de alquitranes y el uso de tecnologías ampliamente disponibles como los motores de combustión interna alternativos, les permiten alcanzar los menores costos de generación de electricidad a partir de biomasa cuando se comparan con otras tecnologías de aprovechamiento de biomasa por la ruta termoquímica [2], [3].

Un sistema de gasificación de lecho fijo es básicamente un reactor tubular cuyos componentes principales son la tolva de alimentación de biomasa, las entradas de aire, la zona de reacción y la parrilla. En la figura 1, se muestra la configuración en equicorriente, donde el aire (AG, por ser el agente gasificante) y la biomasa fluyen de forma descendente por el reactor. De arriba hacia abajo se distinguen los subprocesos de secado, pirólisis (desvolatilización), oxidación y reducción, siendo la zona de oxidación la encargada de proveer, mediante reacciones exotérmicas, el calor requerido por los demás subprocesos los cuales son globalmente endotérmicos [4], [5]. De esta manera, los sistemas de gasificación convencionales no requieren del aporte de calor externo, por lo que también se les conoce como autotérmicos. En la zona de oxidación, ligeramente por debajo de las boquillas de suministro del aire, se desarrolla el frente de reacción del proceso o frente de llama, donde se alcanzan las temperaturas más altas del equipo, y por tanto una de las zonas más influyentes sobre la calidad del gas y la estabilidad del proceso. La configuración en equicorriente requiere, para su puesta en marcha, del suministro del aire y de una llama que asista el proceso inicial de oxidación [6]. Luego de que se consigue la ignición de la biomasa, el frente de llama comienza su desplazamiento de manera ascendente por el reactor, consumiendo la biomasa; por lo tanto, para mantener el proceso en estado estable, se debe contar con un sistema auxiliar que ocasione el desplazamiento de la biomasa en la dirección contraria al movimiento natural del frente de llama. Con esto se logra que el frente de llama permanezca dentro de unos límites en la zona de oxidación. De hecho, la garganta o uso de un doble cono, del cual disponen la mayoría de estos equipos, también cumple la función de estabilización del frente de llama [7], [8].

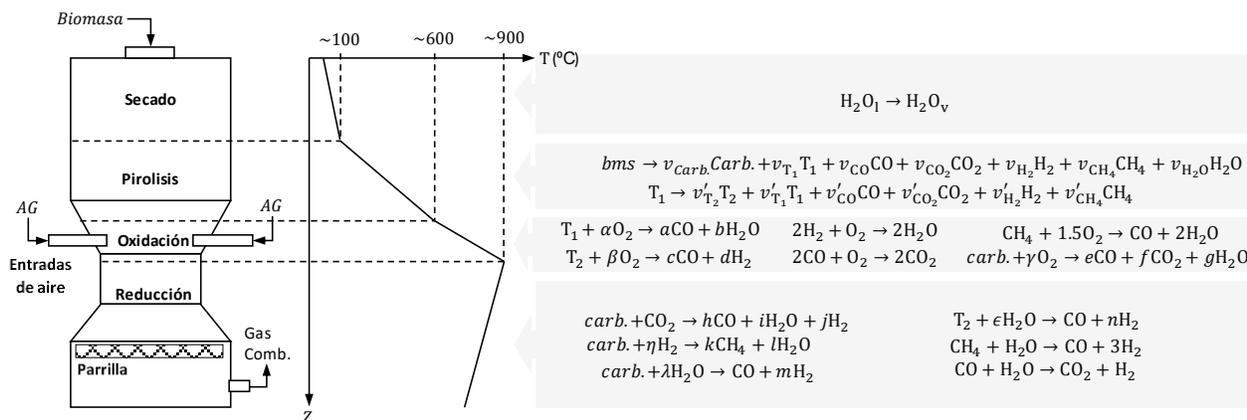


Fig. 1. Esquema de un gasificador de lecho fijo en equicorriente, con temperaturas típicas y reacciones asociadas a cada subproceso.

El diseño de los sistemas de gasificación de lecho fijo es considerablemente simple, siendo el componente móvil más crítico el empleado para originar el desplazamiento de la carga al interior del reactor, que define la ubicación del frente de llama y, por tanto, al que se le asocian gran parte de las inestabilidades del proceso. En este sentido, los equipos comerciales de bajo costo emplean sistemas de control ON-OFF que, aunque logran mantener bajo control el proceso, inducen inestabilidades que afectan la calidad del gas producido [6], [9]. De los resultados presentados por Verdeza et al [6], se infiere que el uso de un sistema de control continuo de posición del frente de llama podría reducir las variabilidades en la concentración del gas, así como aumentar la eficiencia del proceso. Dicho sistema puede ser diseñado bajo una filosofía de bajo costo, siempre y cuando se conozca el efecto de las principales variables del proceso sobre la velocidad del frente de llama.

En el caso de los flujos de aire y de biomasa, se suele caracterizar el proceso mediante la relación de equivalencia (ER), la cual indica la relación en masa entre dichos flujos comparada con la requerida para combustión estequiométrica. Usualmente, se indica una ER cercano a 0.3 como un valor óptimo para procesos de gasificación [10]. Sin embargo, varios autores coinciden en que el valor óptimo depende de la composición fisicoquímica de la biomasa, de su granulometría y de las características del lecho. De esta manera, se han indicado dosados de entre 4 y 6 para la gasificación en lecho fijo de cascarilla de arroz [11], y cercanos a 3 para el mismo material pero en lecho fluidizado [12]. Aunque el flujo de aire es una variable fácilmente

manipulada, dicha condición no se cumple para la biomasa en los reactores de lecho fijo. El procesamiento de la biomasa depende de las temperaturas alcanzadas y de las reacciones que se llevan a cabo al interior del equipo. El aumento del flujo de aire deriva en aumentos de ER, temperatura, velocidad del frente de llama y tasa de consumo de biomasa [13].

Por su parte, la humedad de la biomasa afecta principalmente el subproceso de secado, haciendo que éste demande una mayor cantidad de energía, por lo que, a mayor humedad, hay menor energía disponible para los demás subprocesos, lo que deriva en menor temperatura en la zona de reducción y menor velocidad del frente de llama. A este respecto, varios autores han indicado que para procesos de gasificación la máxima humedad admisible es del 20%, humedad que puede ser alcanzada mediante secado convencional usando radiación solar [10].

Respecto a la granulometría, se ha indicado para los sistemas de lecho fijo que, cuando se tienen biomasa con diámetros de partícula considerablemente grandes en relación con el diámetro de la garganta del lecho, se pueden presentar problemas de obstrucción o atascamiento del lecho; además, con el aumento de tamaño disminuye el área superficial para la misma cantidad de masa, por lo que también se ve disminuida la velocidad de reacción del proceso. Por otro lado, partículas muy pequeñas ocasionan que la radiación de energía desde la zona de oxidación tenga poca penetración, por lo que disminuye el espesor del frente de llama y también se ve reducida la tasa de reacción del proceso [6], [14], [15]. Adicionalmente, en la mayoría de los equipos disponibles comercialmente para lecho fijo se tienen limitaciones de densidad mínima que oscilan entre 200 y 250 kg/m³; sin embargo, se han desarrollado sistemas especializados en procesar biomasa con baja densidad aparente, como por ejemplo los gasificadores de lecho fijo para procesar cascarilla de arroz, cuya densidad suele estar en torno a 125 kg/m³. La densidad de la biomasa juega un rol importante en la termoquímica del proceso, pues para la misma cantidad de aire, una mayor densidad ocasiona que el proceso se desarrolle con una mayor ER, lo que conduce el proceso hacia la zona de gasificación con menores velocidades del frente de llama [16]–[18].

De forma general, la velocidad del frente de llama se verá favorecida si aumenta el flujo de aire o si disminuye la humedad y densidad de la biomasa. Las demás variables, aunque ayudan a la comprensión de la fenomenología, no se pueden manipular con facilidad, por lo tanto, solo se precisa conocer su efecto para estrategias de control avanzado, las cuales no se consideran en sistemas de baja potencia como el aquí estudiado. Partiendo de dicha información, en el presente estudio se desarrolla un modelo dinámico de un reactor de lecho fijo en equicorriente, que puede ser empleado para el diseño y optimización de estrategias de control continuo en lazo cerrado, que procuren una mejora en la calidad del gas producido y la estabilidad del proceso. De acuerdo con el conocimiento de los autores, dicho estudio no se encuentra reportado en la literatura.

2 METODOLOGÍA

El modelo se desarrolla para un reactor de lecho fijo estratificado bajo configuración de equicorriente sin garganta. El diámetro del reactor se supone constante en la dirección axial e igual a 0.1 m, mientras que la longitud del equipo se supone en 1 metro. No se considera la existencia de una garganta, buscando analizar el escenario donde se dificulte de mayor manera el control del equipo. Se considera que la velocidad del frente de llama responde como una función de primer orden más tiempo muerto ante las variaciones del flujo volumétrico (F) de aire. De igual manera, se simulan como perturbaciones los efectos de los cambios de densidad (D), humedad de la biomasa (M) y el encendido del sistema de vibración (V), tal como se muestra en la Figura 2.

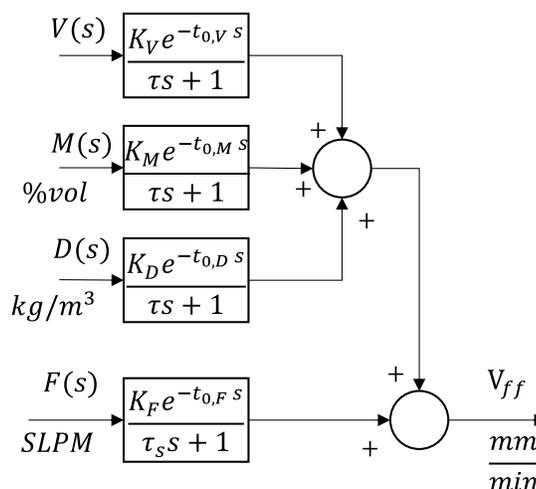


Fig. 2: Diagrama del modelo del sistema de gasificación.

Considerando el alto potencial energético de la cascarilla de arroz, así como las dificultades asociadas al control del proceso debidas a su baja densidad aparente ($\rho = 125 \text{ kg/m}^3$), esta biomasa es seleccionada para la simulación; sus propiedades pueden ser consultadas en detalle en [19]. Las ganancias de las funciones empleadas fueron obtenidas a partir de pruebas experimentales en un reactor de lecho fijo equicorriente invertido [20]. Además, también son considerados los resultados reportados en [10]. Las variables relacionadas con la dinámica son derivadas de los resultados experimentales reportados en [6]. En este último trabajo se disponía de un sistema on/off programable para mantener bajo control el proceso. La tabla 1 presenta las variables y las respectivas unidades consideradas para cada función de transferencia.

TABLA 1.

VARIABLES DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPLEADAS

Variable	K (unidades)	τ_s (s)	t_0 (s)
Intensidad de Vibración	$20 \left(\frac{\frac{mm}{min}}{\%vibración} \right)$	60	0
Contenido de humedad	$-2 \left(\frac{\frac{mm}{min}}{\%humedad} \right)$	108	120
Densidad de la biomasa	$-0.06 \left(\frac{\frac{mm}{min}}{kg/m^3} \right)$	108	120
Flujo de aire	$0.455 \left(\frac{\frac{mm}{min}}{SLPM} \right)$	108	120

A partir de resultados experimentales reportados en [21], se ha establecido que la temperatura del proceso sigue un perfil como el mostrado en la figura 3. Por lo tanto, una vez conocida la posición del frente de llama, es posible conocer la temperatura en cualquier posición del reactor.

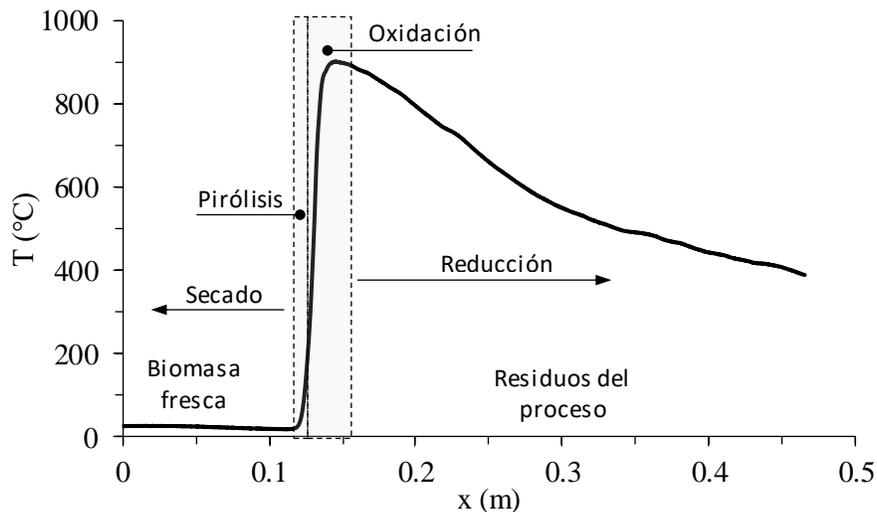


Fig. 3. Perfil del temperatura y localización de subprocesos en un reactor de lecho fijo en equicorriente.

Si bien las ganancias de las funciones de transferencia dependen del gasificador y biomasa utilizada, este tipo de información se puede obtener de manera sencilla mediante experimentación a escala de laboratorio en un equipo de caracterización como el empleado en [22]–[24].

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Buscando dar validez a los resultados, inicialmente se considera el proceso transitorio que se desarrolla cuando no se dispone de un sistema de vibración. Para esta simulación, se mantienen constantes las variables del proceso: 20 SLPM para el flujo de aire, 125 kg/m^3 para la densidad y 10% de humedad para la biomasa.

Luego de iniciar la gasificación, encendiendo el reactor en la zona de oxidación, ubicada a 0.15 m por encima de la parrilla del reactor, el frente de llama comienza su desplazamiento en dirección ascendente a una velocidad aproximada de 20 mm/min. Un sensor de temperatura ubicado a 0.2 m por encima de la parrilla mostraría el comportamiento que se presenta en la figura 4. En dicha figura, también es posible notar que, luego de aproximadamente 2500 segundos, se habría consumido toda la biomasa dispuesta en el reactor, por lo que la gasificación llegaría a su fin con la extinción de la llama.

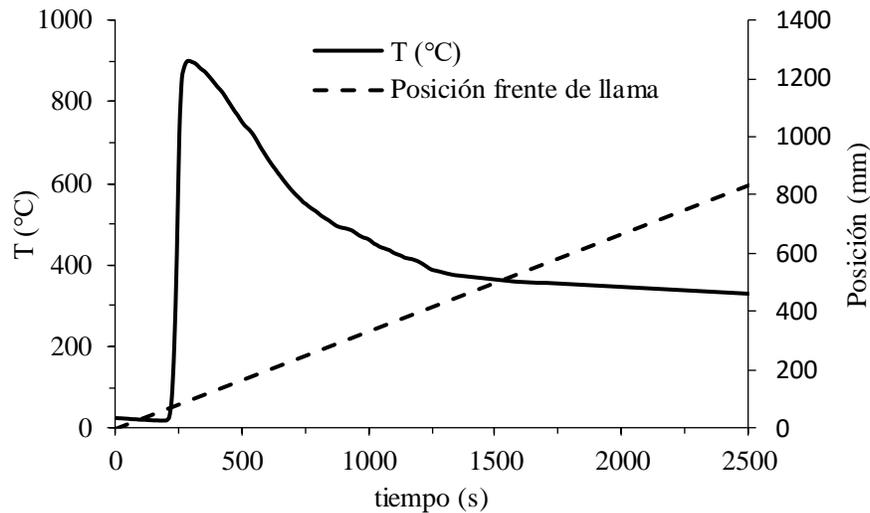


Fig. 4. Desplazamiento del frente de llama a lo largo del reactor (línea punteada) y temperatura del proceso (línea continua)

El segundo escenario simulado parte de los resultados del escenario anterior. Sin embargo, en este caso se mantiene una agitación constante del reactor, de manera que se contrarreste la velocidad del frente de llama y no se tenga ningún desplazamiento a lo largo del reactor. Es decir, aunque el frente de llama se desplace de forma ascendente a una velocidad de 20 mm/min, la agitación ocasiona que la biomasa se desplace en la dirección contraria a la misma velocidad; así, la velocidad del frente de llama vista por un observador inmóvil en la pared del reactor sería cero. Luego de tenerse la condición estable se inicia con una serie de perturbaciones del tipo escalón, que se mantienen de forma momentánea durante 300 segundos, estas se inducen en el flujo de aire, densidad y humedad de la biomasa, lo que se hace con el fin de analizar el comportamiento del proceso. La Figura 5 muestra la respuesta del sistema ante dichos cambios.

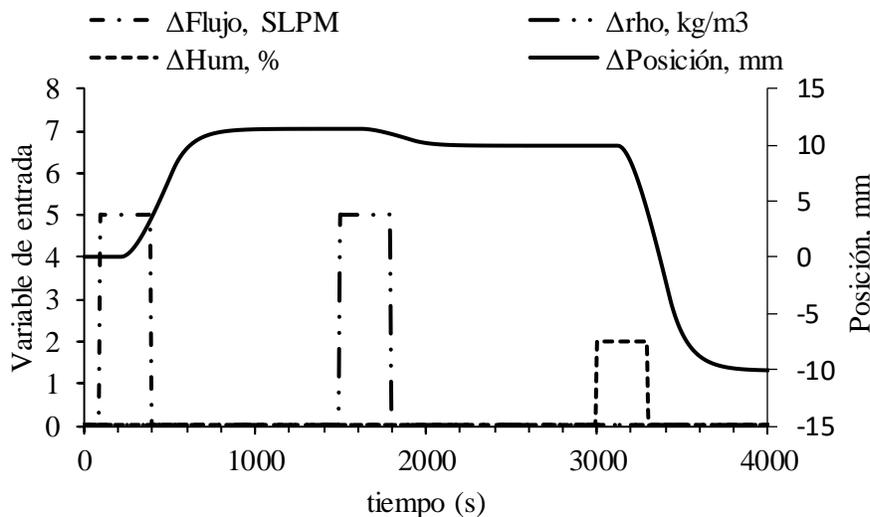


Fig. 5: Respuesta dinámica del gasificador.

Un cambio positivo de 5 SLPM en el flujo de aire ocasiona un aumento en la velocidad de propagación del frente de llama, por lo que, con esta perturbación, se tiene un desplazamiento de la llama de aproximadamente 11 mm hacia la parte superior del reactor. Toda vez que desaparece la perturbación, el frente de llama vuelve a una posición estable, aunque en una nueva ubicación en el reactor. Comportamientos similares se obtienen para las demás perturbaciones, con cambios acordes al efecto de la variable sobre la velocidad del frente de llama (Ver Figura 5).

Finalmente, se simula un escenario en el que la agitación ocasiona una variación en la velocidad de la biomasa superior a la que bajo condiciones de estado estable se tendría en el frente de llama. Sin embargo, en este caso, se simulan condiciones de vibración bajo una estrategia de control ON/OFF. Buscando la comparación con estudios previos, se mantiene apagada la vibración durante 1200 segundos, luego se enciende con su máxima intensidad (100%) durante 10 segundos, ciclo que se repite durante toda la simulación. La figura 6 muestra la respuesta ante la intermitencia en la agitación, resultado consistente con lo reportado previamente en [6]. Las temperaturas T_g y T_r son medidas a 150 mm y 50 mm por encima de la parrilla, respectivamente. La variación en las temperaturas medias en puntos fijos del reactor es originada por el desplazamiento del frente de llama en la región de oxidación del gasificador. Este desplazamiento acarrea mayores pérdidas de calor debidas al ciclo de calentamiento-enfriamiento constante de la pared del reactor. Este resultado necesariamente se verá relacionado con la pérdida de eficiencia y la variación en calidad del gas obtenido.

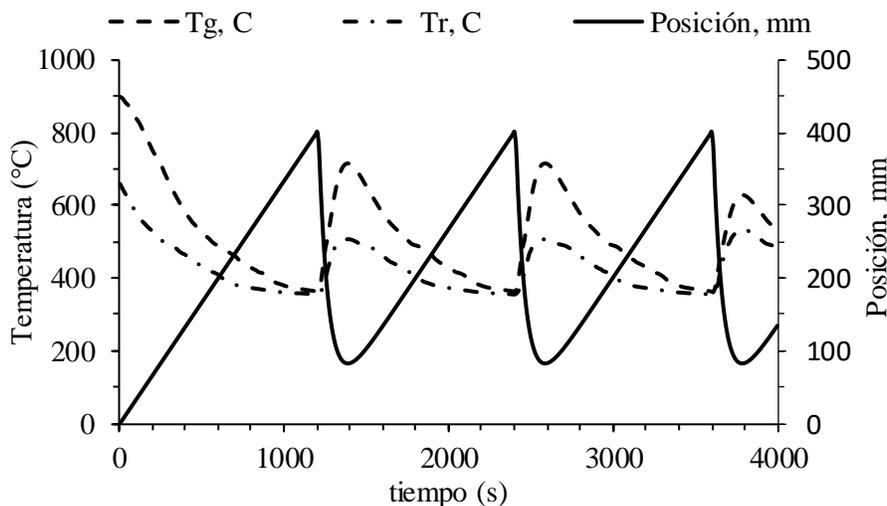


Fig. 6: Respuesta ante variación ON/OFF en la agitación.

Considerando que las tendencias y valores hallados son similares a los reportados previamente por Verdeza et al. [6], se considera que el modelo predice adecuadamente el desempeño del proceso en modo dinámico, resaltándose su utilidad para el desarrollo de sistemas de control, lo que eventualmente facilitará el desarrollo local y la masificación de la tecnología de gasificación.

4 CONCLUSIONES

Partiendo de resultados experimentales reportados en la literatura, se desarrolló un modelo dinámico de un gasificador estratificado de lecho fijo en equicorriente que predice adecuadamente la velocidad del frente de llama y las temperaturas del proceso ante variaciones en el flujo de aire, la humedad y la densidad de la biomasa. La simulación permitió detectar el desplazamiento del frente de reacción hacia la parte superior del gasificador cuando no se dispone de un sistema de agitación que obligue el desplazamiento del lecho de biomasa. De igual manera se reprodujeron tendencias y valores similares a lo reportado en la literatura en sistemas que emplean agitación ON-OFF como estrategia de control de posición del frente de llama. El modelo desarrollado constituye una herramienta de gran utilidad para el diseño de sistemas de control en continuo por retroalimentación para gasificadores de lecho fijo.

REFERENCIAS

- [1] F. V. Tinaut, A. Melgar, J. F. Pérez, y A. Horrillo, «Effect of biomass particle size and air superficial velocity on the gasification process in a downdraft fixed bed gasifier. An experimental and modelling study», *Fuel Processing Technology*, vol. 89, n.º 11, pp. 1076-1089, nov. 2008, doi: 10.1016/j.fuproc.2008.04.010.
- [2] J. F. Perez, Y. Lenis, S. Rojas, y C. León, «Decentralized power generation through biomass gasification: A technical-economic analysis and implications by reduction of CO₂ emissions | Generación distribuida mediante gasificación de biomasa: Un análisis técnico - económico e implicaciones por reducir», *Revista Facultad de Ingeniería*, n.º 62, 2012.
- [3] A. V. V Bridgwater, «The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation», *Fuel*, vol. 74, n.º 5, pp. 631-653, may 1995, doi: 10.1016/0016-2361(95)00001-L.
- [4] F. Pinto, R. N. André, y I. Gulyurtlu, «Innovation on biomass wastes utilization through gasification and co-gasification. Stage of deployment and needs for further R&D», en *Biomass Gasification: Chemistry, Processes and Applications*, New York: Nova Science Publishers, Inc, 2009, pp. 7-69.
- [5] D. A. Quintero-Coronel, E. E. Espinel-Blanco, y E. N. Flórez-Solano, «Development of a Chemical Equilibrium Model of the Downdraft Fixed Bed Gasification Process with known Product Temperature, Using air as an Oxidizing Agent», *IyU*, vol. 24, n.º 1, feb. 2020, doi: 10.11144/Javeriana.iyu24.dcem.
- [6] A. Verdeza-Villalobos, Y. A. Lenis-Rodas, A. J. Bula-Silvera, J. M. Mendoza-Fandiño, y R. D. Gómez-Vásquez, «Performance analysis of a commercial fixed bed downdraft gasifier using palm kernel shells», *CT&F Cienc. Tecnol. Futuro*, vol. 9, n.º 2, pp. 79-88, nov. 2019, doi: 10.29047/01225383.181.
- [7] J. Rodríguez, J. Tobón, M. Frías, y M. I. Sánchez de Rojas, «Aprovechamiento de un residuo del carbón para reducción del impacto ambiental de la minería del carbón en Colombia: estudio del potencial de uso en la industria del cemento», *Rev. Cintex*, vol. 23, n.º 2, pp. 95-102, dic. 2018, doi: 10.33131/24222208.323.
- [8] A. A. P. Susastriawan, H. Saptoadi, y Purnomo, «Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 989-1003, sep. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.112.
- [9] C. A. García, Á. Peña, R. Betancourt, y C. A. Cardona, «Energetic and environmental assessment of thermochemical and biochemical ways for producing energy from agricultural solid residues: Coffee Cut-Stems case», *Journal of Environmental Management*, vol. 216, pp. 160-168, jun. 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.04.029.
- [10] Y. A. Lenis, L. F. Osorio, y J. F. Pérez, «Fixed Bed Gasification of Wood Species with Potential as Energy Crops in Colombia: The Effect of the Physicochemical Properties», *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 35, n.º 17, pp. 1608-1617, sep. 2013, doi: 10.1080/15567036.2012.704486.
- [11] A. A. P. Susastriawan, H. Saptoadi, y Purnomo, «Comparison of the gasification performance in the downdraft fixed-bed gasifier fed by different feedstocks: Rice husk, sawdust, and their mixture», *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 34, pp. 27-34, ago. 2019, doi: 10.1016/j.seta.2019.04.008.
- [12] C. Loha, H. Chattopadhyay, y P. K. Chatterjee, «Energy generation from fluidized bed gasification of rice husk», *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 5, n.º 4, p. 043111, jul. 2013, doi: 10.1063/1.4816496.
- [13] Y. A. Lenis, J. F. Pérez, y A. Melgar, «Fixed bed gasification of Jacaranda Copaia wood: Effect of packing factor and oxygen enriched air», *Industrial Crops and Products*, vol. 84, pp. 166-175, jun. 2016, doi: 10.1016/j.indcrop.2016.01.053.
- [14] J. Porteiro, D. Patiño, J. Collazo, E. Granada, J. Moran, y J. L. Miguez, «Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor», *Fuel*, vol. 89, n.º 1, pp. 26-35, ene. 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2009.01.024.
- [15] J. Porteiro, D. Patiño, J. Moran, y E. Granada, «Study of a Fixed-Bed Biomass Combustor: Influential Parameters on Ignition Front Propagation Using Parametric Analysis», *Energy Fuels*, vol. 24, n.º 7, pp. 3890-3897, jul. 2010, doi: 10.1021/ef100422y.
- [16] S. Heredia Quintana y A. D. Morales-Rojas, «Desarrollo y validación de un modelo cero dimensional de dos zonas para el análisis de la combustión en motores de encendido provocado», *Rev. Cintex*, vol. 23, n.º 2, pp. 25-33, dic. 2018, doi: 10.33131/24222208.321.
- [17] M. Bharath, V. Raghavan, B. V. S. S. S. Prasad, y S. R. Chakravarthy, «Co-gasification of Indian rice husk and Indian coal with high-ash in bubbling fluidized bed gasification reactor», *Applied Thermal Engineering*, vol. 137, pp. 608-615, jun. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.035.

- [18] Y.-H. Li y H.-H. Chen, «Analysis of syngas production rate in empty fruit bunch steam gasification with varying control factors», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, n.º 2, pp. 667-675, ene. 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.117.
- [19] A. A. P. Susastriawan, H. Saptoadi, y Purnomo, «Design and experimental study of pilot scale throat-less downdraft gasifier fed by rice husk and wood sawdust», *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 37, n.º 9, pp. 873-885, oct. 2018, doi: 10.1080/14786451.2017.1383992.
- [20] Y. A. Lenis-Rodas, G. Maag, C. E. Lins de Oliveira, L. A. Corredor, y M. E. Sanjuan, «Biomass gasification under external heating and using steam as a gasifying agent: Numerical analysis», *redin*, may 2020, doi: 10.17533/udea.redin.20200475.
- [21] Y. A. Lenis y J. F. Pérez, «Gasification of Sawdust and Wood Chips in a Fixed Bed under Autothermal and Stable Conditions», *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 36, n.º 23, pp. 2555-2565, dic. 2014, doi: 10.1080/15567036.2013.875081.
- [22] Y. A. Lenis, A. F. Agudelo, y J. F. Pérez, «Analysis of statistical repeatability of a fixed bed downdraft biomass gasification facility», *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, n.º 1-2, pp. 1006-1016, mar. 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.09.046.
- [23] A. Susastriawan, H. Saptoadi, y P. Purnomo, «Propagation Characteristic and Performance of Rice Husk Gasification at Different Tuyen Inclination Angle», *IJRER*, n.º v9i1, 2019, doi: 10.20508/ijrer.v9i1.8602.g7558.
- [24] D. A. Quintero-Coronel, Y. A. Lenis-Rodas, L. A. Corredor, P. Perreault, y A. Gonzalez-Quiroga, «Thermochemical conversion of coal and biomass blends in a top-lit updraft fixed bed reactor: Experimental assessment of the ignition front propagation velocity», *Energy*, vol. 220, p. 119702, abr. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119702.