



Evaluación Exegética del Sistema de Gasificación Tipo Downdraft de 5 kW para su Aplicación en un Proceso de Cogeneración y el Efecto Producido en el Gas de Síntesis.

Exergy Evaluation of the 5 kW Downdraft Type Gasification System for its Application in a Cogeneration Process and the Effect Produced in the Synthesis Gas.

BRYAN AUSAY OLEAS¹, ALEX USHIÑA PACHA¹, EDUARDO GUTIÉRREZ GUALOTUÑA¹

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados investigativos sobre el efecto que se produce en las propiedades del gas de síntesis que se obtiene como resultado de un proceso de gasificación downdraft de biomasa, al trabajar con un sistema de cogeneración interno al reactor. Se realizó un estudio de los trabajos previos relacionados, a partir de los cuales se determinaron las variables de tipo dependiente e independientes necesarias para evaluar la calidad final del gas del proceso en presencia y ausencia de cogeneración. Para ello, se implementó un diseño estadístico experimental de cuatro niveles de tipo 4ⁿ, el cual permitió la realización de un análisis estadístico comparativo de los estados de trabajo del gasificador. Por otra parte, se presenta un análisis energético y exergético de ambos estados donde se puede comprobar las potencialidades y la disponibilidad energética que tiene el proceso de gasificación para reutilizar energía térmica mediante la incorporación de un sistema de cogeneración.

Palabras Claves: gasificación; exergía; biomasa; cogeneración; gas de síntesis; reutilización

¹Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Sangolquí, Ecuador

©Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Aporte Santiaguino de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite: Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato, Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

ABSTRACT

The research results obtained on the effect that occurs on the properties of the synthesis gas obtained as a result of a biomass downdraft gasification process is presents in this paper, working with a cogeneration system internal to the reactor. A study of the previous related works was carried out, from which the dependent and independent variables necessary to evaluate the final quality of the process in the presence and absence of cogeneration were determined. For this, an experimental statistical design of four levels of type 4ⁿ was implemented, which allowed the performance of a comparative statistical analysis of the working states of the gasifier. On the other hand, an energy and exergy analysis of both states is presented where the potential of the gasification process to reuse thermal energy can be verified by incorporating a cogeneration system.

Keywords: gasification; exergy; biomass; cogeneration; syngas; energy reuse

INTRODUCCIÓN

A pesar de que cerca del 85% de la demanda mundial de energía se satisface mediante el empleo de combustibles fósiles convencionales, su futuro agotamiento ha fomentado el uso cada vez más creciente de fuentes energéticas alternativas que permitan reducir su consumo y atenuar el impacto ambiental derivado de la explotación tradicional de los hidrocarburos (Sharma et al., 2018). En este aspecto, las fuentes de energías renovables (FER), constituyen la alternativa más viable en la actualidad para la realización de una transición energéticamente sostenible y amigable con el ambiente. Una opción muy atractiva para países con recursos biomásicos es el empleo de biocombustibles obtenidos mediante la gasificación de biomasa, cuya aplicación en la generación de calor y movilidad crece progresivamente (World Energy Outlook, 2018).

En el caso del proceso de gasificación, se han realizado investigaciones dirigidas hacia el aprovechamiento de la energía térmica que se produce y que se presenta como pérdida energética. Una de las formas de reutilizar esta energía es mediante el desarrollo de sistemas integrados como la cogeneración, los que se basan en el análisis tanto energético y exergético, para evaluar su potencial (Bhering, Martínez y Almazán, 2017; González, Silva y Escobar, 2018).

Si bien los autores (Borello et al., 2015; Cheng Yan et al., 2018), denominan cogeneración al proceso donde se reutiliza el gas obtenido como una fuente de energía, no se aprovecha la energía térmica del proceso de generación del gas quedando sin utilidad en el sistema. En el trabajo de (Eftekhari et al., 2017), se emplea el concepto de exergía para determinar la forma de extraer factiblemente el calor generado en un proceso de gasificación de biomasa con un sistema de cogeneración, donde, a su vez, se demuestra la mejora en su eficiencia energética y redundancia en el cuidado ambiental, todo esto cuando se compara con el empleo de combustión directa (Martínez, Lesme y Silva, 2020).

Los autores (Gholamian, Mahmoudi y Zare, 2016; Borello et al., 2017), en sus investigaciones muestran los análisis realizados a plantas combinadas de calor y de generación de electricidad alimentadas con gas de síntesis proveniente de gasificadores donde se utilizan sistemas de recuperación de calor para el calentamiento de agua a partir de intercambiadores de calor dispuestos en la salida de los gases, lo cual recupera parte de la energía calórica generada, aunque se desaprovecha el calor desprendido al ambiente por las paredes de los reactores. Los autores (Nwokolo, Mamphweli y Makaka, 2016), analizan de forma similar, la recuperación de calor en un depurador de gases provenientes de un proceso de gasificación de biomasa en el que se recupera cerca del 65 % del calor, aunque de igual forma la recuperación de calor en esta propuesta se desarrolla en un proceso posterior al de gasificación, con lo cual se desaprovecha el calor del proceso en sí de obtención del gas.

Dentro de las tecnologías empleadas para la gasificación de biomasa, el empleo de gasificadores de tipo downdraft resulta de mucho interés para los investigadores, fundamentalmente porque posibilita la obtención de bajos porcentajes de alquitrán (Gutiérrez et al., 2014; Hernández, 2018). En este tipo de proceso de gasificación se tienen perfiles de temperaturas superiores a los 800 °C en las paredes del reactor, lo que produce una pérdida significativa de calor la cual puede ser aprovechada en un proceso regenerativo, razón por la cual existe en la actualidad un gran interés por el estudio del aprovechamiento energético en este tipo de gasificador (Vicente, Albesa y Condorí, 2016; Chidiebere et al., 2018; Herrera, 2019). Así, (Quiñonez y Taipe, 2017), realizan el análisis de recuperación de calor en un gasificador downdraft con la implementación de un sistema de cogeneración incorporado a las paredes laterales, donde los autores demuestran la efectividad de recuperar la energía disipada. Todos estos trabajos evidencian la utilidad que se puede obtener al recuperar la energía del proceso de gasificación y sus posibles aplicaciones para el calentamiento de agua, precalentamiento del aire, generación de vapor, entre otras.

A pesar de la importancia de este tema y los aportes presentados por diversos autores, no se muestran evidencias de un análisis que relacione tanto el sistema de gasificación y el de cogeneración con el efecto que se tiene en el gas de síntesis obtenido, centrándose los resultados investigativos en el análisis de la recuperación de calor y no en el impacto que pudiera tener la cogeneración en el proceso de gasificación.

Por estas razones y tomando en consideración las referencias analizadas, en el presente artículo se muestra un análisis comparativo basado en el diseño experimental, mediante el cual se indica el impacto de la presencia o ausencia de un proceso alterno como la cogeneración y su influencia sobre la calidad del gas obtenido en el proceso de gasificación de tipo downdraft. En este caso, el calor recuperado es del propio reactor y no de procesos posteriores, es decir, la cogeneración se realiza tomando como fuente de calor el generado por el propio proceso de gasificación, con lo que se determinó en qué medida el gas de síntesis producido es afectado en sus propiedades por el funcionamiento del sistema de cogeneración.

MATERIALES Y MÉTODOS

En un proceso de gasificación de biomasa intervienen parámetros importantes que determinan el estado del proceso y la calidad del mismo, los que pueden clasificarse en variables de entrada y variables de salida (Gutiérrez et al., 2018). Parte de las variables de entradas pueden ser manipuladas a voluntad para lograr un adecuado proceso de gasificación y una calidad requerida en el gas obtenido. Para el desarrollo de la experimentación se consideran las siguientes variables de entrada o variables independientes: Tipo de biomasa (T_{bio}), humedad de la biomasa (H_{bio}), masa de aire que se incorpora al gasificador (Ma). Al considerar el proceso de cogeneración, se debe tener en cuenta, además, las siguientes variables de entrada o variables independientes: Caudal de agua a la entrada del cogenerador (Ca), temperatura del agua a la entrada del cogenerador (T_{ae}).

En la presente investigación se seleccionó como biomasa la leña de eucalipto, valorada por su alto poder calórico (Hernández, 2018). Cerca del 40 % de este árbol es desechado por el proceso de aserrado en forma de astillas, corteza y aserrín, con lo cual se tiene una alta disponibilidad de este tipo de biomasa (Medina et al., 2014). Las propiedades fisicoquímicas presenta tamaños de 1 mm a 12 mm, una humedad entre un 10 % y un 20 % y una densidad aparente de 90 kg/m³ (Orozco, 2017).

Las propiedades y disponibilidad mencionadas nos permiten aprovechar esta fuente energética en un proceso de gasificación de tipo downdraft.

La masa de aire que entra al Venturi del gasificador requiere ser regulada, pues esta aporta una cantidad mínima de oxígeno necesario para el proceso de gasificación. En el caso que nos ocupa, la entrada de aire se controla mediante el establecimiento de un porcentaje de apertura de la válvula del Venturi, el cual se requiere para la extracción del gas mediante el denominado “efecto cigarro”, Apv . La temperatura del agua a la entrada del sistema de cogeneración se considera constante. En cuanto al caudal del agua, se establece un valor constante e igual a $7,056 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ (25,2 kg/h), lo que representa el 100 % de apertura de la válvula de regulación. Este valor se toma en base a la investigación realizada por (Mathew et al., 2020). De esta forma, las variables independientes en la experimentación se simplifican a dos: la humedad de la biomasa (H_{bio}) y el porcentaje de apertura de la válvula del dispositivo Venturi (Apv).

En base al análisis planteado anteriormente, se establece un diseño experimental de tipo 4^n , con $n = 2$, obteniendo 16 experimentos activos, a los cuales se les suma una réplica de control, para un total de 32 muestras experimentales. La consideración de un diseño experimental con cuatro niveles para cada una de las variables de entrada (nivel alto, medio alto, medio bajo y bajo), se debe a la necesidad de evaluar con precisión el comportamiento de los indicadores de calidad del gas en el intervalo de los límites mínimo y máximo que se establecen para cada una de las variables independientes consideradas, lo que permite evaluar con mayor rigor las interacciones que se dan entre estas variables. Esta estructura de experimentación tiene como finalidad, además, la consideración del carácter no lineal de las relaciones entre estas variables y para reflejar los factores casuales que se presenten, incluyendo los errores de medición (Cash et al., 2016).

Para evaluar la calidad del gas obtenido en el proceso de gasificación se consideran las siguientes variables de salida o variables dependientes: Poder calórico del gas (PCG), composición del gas ($\%H_2$, $\%O_2$, $\%N_2$, $\%CO$, $\%CH_4$, $\%CO_2$, $\%C_2H_6$, $\%H_2O$), temperatura del gas a la salida del gasificador (T_{gy}). Al considerar el sistema de cogeneración, se deben de tener en cuenta, además, las siguientes variables de salida o variables dependientes: Temperatura de agua a la salida del cogenerador (T_{as}), temperatura externa en el gasificador (T_{ext}), temperatura en la zona de pirólisis (T_{pir}). Como se puede notar, se tiene un número amplio de variables a medir en la experimentación, lo cual permite tener un conjunto importante de parámetros

a comparar en la ausencia y presencia de la cogeneración durante el proceso de gasificación de la biomasa. Para realizar este proceso, se utiliza como equipo básico experimental un gasificador de tipo downdraft con una capacidad instalada a pequeña escala de 5 kW. En la figura 1 se muestra el esquema de trabajo del gasificador y su relación con los equipos requeridos para su funcionamiento.

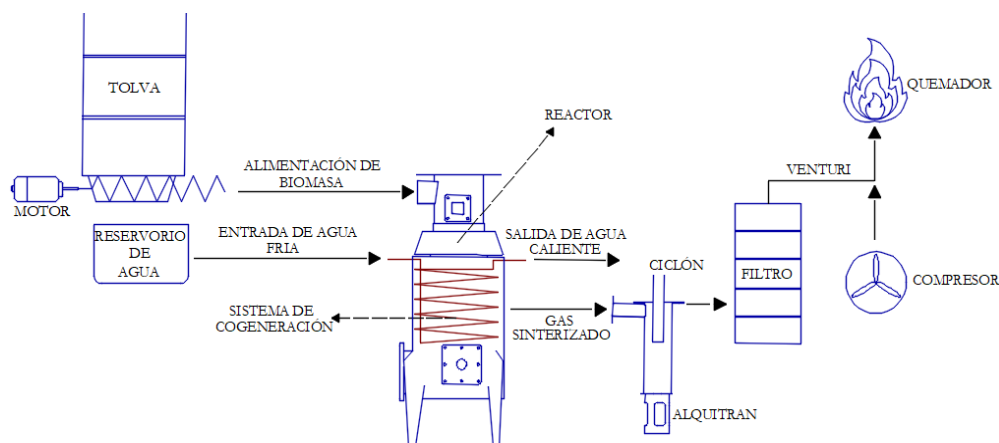


Figura 1. Esquema del sistema de gasificación y de cogeneración de la experimentación.

Como se puede observar en la figura 1, el gasificador es alimentado por una tolva mediante un motor acoplado a un tornillo sinfín para asegurar una cantidad de biomasa constante al reactor. El gas de síntesis que se genera es absorbido mediante el Venturi hacia un ciclón para extraer el contenido de alquitrán. Posteriormente el gas es filtrado, con lo cual queda listo para su recolección y toma de muestras. A la pared exterior del reactor se le acopla un sistema de cogeneración, el cual consiste en un intercambiador de calor desarrollado como un encamisado de tipo serpentín construido con tubos de cobre y ubicado en la zona interior de la pared.

Para la toma de datos de las temperaturas se utiliza un termómetro digital de registro de datos M-309 con termocuplas tipo k de cromo - aluminio, con intervalo de medición de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura con un límite de error $\pm 0,4\%$ y un cable de compensación KX. El aseguramiento experimental está compuesto, además, por un medidor de humedad MD812 con un intervalo de medición del 5% al 40% y una precisión de $\pm 1\text{ HR}$, un sensor de nivel controlado mediante una paleta para censar el nivel de biomasa, una alarma digital de detección de CO, marca Kidde, con un intervalo de $30\text{-}999\text{ PPM}$ y un error de $\pm 30\%$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso de experimentación, bajo las características y esquemas de desarrollo presentados anteriormente, se realiza considerando dos estados de funcionamiento del gasificador:

- El primer estado de experimentación se realiza bajo condiciones constantes y de trabajo normal sin presencia de cogeneración, es decir, sin presencia de circulación de agua en el intercambiador de calor acoplado en la pared lateral.
- En el segundo estado se adiciona un caudal de agua constante al intercambiador, lo cual determina la presencia de la cogeneración en el proceso de gasificación.

En ambos estados se emplean una cantidad de biomasa constante e igual a 2 kg, un tamaño de virutas de biomasa de 2 mm a 3 mm, una temperatura inicial en el reactor de 600 °C a presión atmosférica constante. Los niveles de las variables independientes se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Valores establecidos para los niveles indicados de las variables independientes.

Parámetro	Nivel			
	<i>alto</i>	<i>medio-alto</i>	<i>medio-bajo</i>	<i>bajo</i>
% de Humedad (<i>H_{bio}</i>)	18	16	14	12
% de apertura de la válvula (<i>A_{pv}</i>)	100	75	50	25

A partir de la combinación de cada uno de los niveles establecidos de las variables independientes, se obtiene el poder calorífico del gas para cada uno de los estados. Las mediciones del poder calorífico del gas y de la composición de los gases se realizan en un cromatógrafo de gases con espectrómetro de masa GC-MS a partir de muestras tomadas.

Bajo estas condiciones de experimentación, se tomaron 32 muestras experimentales, incluyendo una réplica de control, tanto para el primer estado (sin cogeneración) como en el segundo estado (con cogeneración) para un total de 64 muestras experimentales. Para la realización del análisis estadístico requerido para evaluar el comportamiento de las variables se utilizó el software profesional Statgraphics® v19.1.2. En la tabla 2 y tabla 3 se muestra el análisis estadístico realizado sobre las muestras tomadas sin y con la presencia de cogeneración respectivamente para cada una de las variables dependientes.

Tabla 2. Valores de los principales estadígrafos obtenidos sin la presencia de cogeneración.

Estadígrafos	Variables independientes								
	PCG [kJ/kg]	%H ₂	%O ₂	%N ₂	%CO	%CH ₄	%CO ₂	%C ₂ H ₆	%H ₂ O
Media	3991,13	6,5693	10,3425	44,0344	18,9106	1,7962	16,2637	16,2637	0,78
Desviación Estándar	772,87	2,2706	2,8940	3,8680	2,9771	0,8928	4,5947	4,5947	0,6175
Variación [%]	19,3647	34,564	27,9819	8,7840	15,743	49,704	28,2516	28,2516	97,62
Coef. Asimetría	-0,7725	-0,9049	-1,8807	0,6865	-0,4928	1,1058	2,1676	2,1676	2,8096
Coef. Kurtosis	-0,3661	-0,4884	0,3672	-1,1760	-0,8679	-0,9783	2,6969	2,6969	1,3912

En la tabla 2, se muestran los valores medios, de desviación estándar, variación y los coeficientes de asimetría y kurtosis tipificada. Los valores de estos últimos coeficientes son de especial interés y reflejan un comportamiento normal al tenerse valores entre 2 y -2, lo cual, a su vez, se interpreta como un adecuado comportamiento de trabajo del gasificador y de estabilidad de la experimentación. En el caso de la variable %H₂O, se observa una variación mucho mayor, esto se debe fundamentalmente a que su comportamiento está relacionado directamente con el porcentaje de humedad *H_{bio}*, el cual varía durante la experimentación causando este comportamiento.

Tabla 3. Valores de los principales estadígrafos obtenidos con la presencia de cogeneración.

Estadígrafos	Variables independientes								
	PCG [kJ/kg]	%H ₂	%O ₂	%N ₂	%CO	%CH ₄	%CO ₂	%C ₂ H ₆	%H ₂ O
Media	3143,36	2,8712	2,1406	58,1288	17,5988	1,5812	17,4162	0,195	0,001
Desviación Estándar	749,524	1,9434	1,0199	7,8562	4,5285	1,1032	6,2914	0,1349	-
Variación [%]	23,8446	67,685	47,6492	13,5152	25,7323	69,773	36,1242	69,1833	-
Coef. Asimetría	0,1064	0,1798	1,3457	1,9352	0,3479	0,8590	0,5205	1,9076	-
Coef. Kurtosis	-0,6980	-1,4405	1,6155	1,2104	-0,8533	-0,8050	-0,1789	1,9596	-

En la tabla 3, los valores de los coeficientes de asimetría y kurtosis muestran valores entre 2 y -2, lo cual, a su vez, se interpreta como un comportamiento normal de trabajo del gasificador y de la estabilidad de la experimentación realizada en las condiciones de cogeneración. En este caso, la humedad registrada es muy baja en presencia de la cogeneración. Este comportamiento se debe a que, en presencia de cogeneración, las temperaturas disminuyen y se logra un enfriamiento de los gases, tanto en la zona

superior del gasificador como en la salida del gas resultante, lo cual provoca que se extraiga mayor cantidad de humedad junto al alquitrán en el ciclón. De esta forma, se obtuvo durante la experimentación sin cogeneración, un promedio de 0,0993 kg de agua y alquitrán, mientras que, en presencia de cogeneración, se obtuvo un promedio de 0,43 kg de agua y alquitrán, lo cual corrobora lo planteado anteriormente.

En la tabla 4 se muestran los valores de las temperaturas de la zona de pirólisis (T_{zpir}), de combustión (T_{zcom}), del gas (T_{gs}) y la temperatura externa del gasificador (T_{ext}), tanto para la operación del gasificador sin cogeneración y con cogeneración. Como se puede apreciar en esta tabla, los coeficientes de asimetría y kurtosis tipificada para el caso del estado de operación sin cogeneración sobrepasan los valores de 2 y -2 para el caso de las temperaturas en las zonas del gasificador, lo cual es muestra de un comportamiento muy variable y que puede generar gradientes importantes al hacer cambios de las variables de operación del gasificador.

Tabla 4. Valores de los principales estadígrafos para el análisis de temperaturas.

Estadígrafos	Temperaturas [°C] (sin cogeneración)				Temperaturas [°C] (con cogeneración)			
	T_{zpir}	T_{zcom}	T_{gs}	T_{ext}	T_{zpir}	T_{zcom}	T_{gs}	T_{ext}
Media	370,769	837,925	87,525	345,712	217,081	706,775	68,9375	316,156
Desviación Estándar	22,4349	46,1138	6,7861	26,4937	13,3433	52,6426	13,1541	24,3388
Variación [%]	6,0509	5,5033	7,7533	7,6635	6,1466	7,4482	19,0812	7,6983
Coef. Asimetría	-2,9289	3,8865	0,7339	0,7792	-0,8985	-0,6008	-0,2461	-1,6048
Coef. Kurtosis	5,9671	5,7731	0,3853	-0,9158	0,4888	-0,6058	-0,0652	1,3464

En el caso de las temperaturas de las zonas de pirólisis y de combustión del gasificador con la cogeneración, se muestra un comportamiento normal, lo cual puede interpretarse como una mejoría en el proceso de gasificación cuando es operado en estas condiciones. Este comportamiento se puede apreciar más claramente en la figura 2.

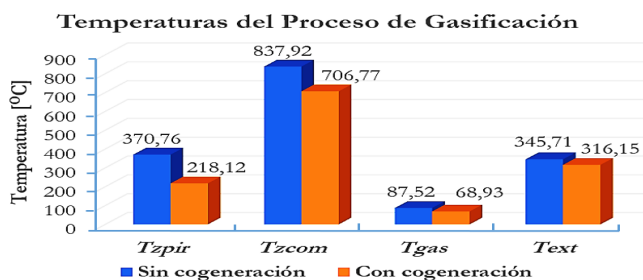


Figura 2. Gráfico de comparación de temperaturas en los estados de trabajo del gasificador.

Los valores de reducción más significativos se dan en las temperaturas de la zona de pirolización y de combustión, con una reducción de 152,64 °C y 131,15 °C respectivamente. Esta reducción en las zonas internas trae como resultado, además, una reducción de 29,56 °C en la pared externa del gasificador. A su vez, la temperatura del gas a la salida del gasificador también experimenta una reducción de su valor de 18,59 °C, lo cual propicia una mejor condensación del vapor de agua y el alquitrán para su posterior extracción en el ciclón.

En cuanto los resultados experimentales obtenidos sobre la calidad del gas, se puede observar en la figura 3, que durante el proceso de gasificación con presencia de cogeneración se obtienen menores porcentos de gases combustibles. Como se puede apreciar en este gráfico, se obtiene un 3,69 % menos de dihidrógeno, un 1,32 % menos de monóxido de carbono y un 0,4 % menos de hidrocarburos como promedio.

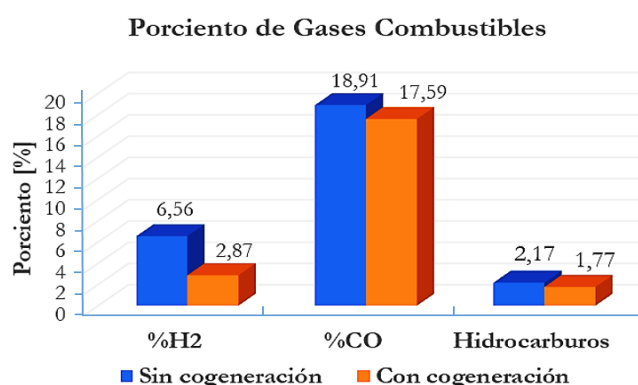


Figura 3. Comparación de gases combustibles en los estados de trabajo

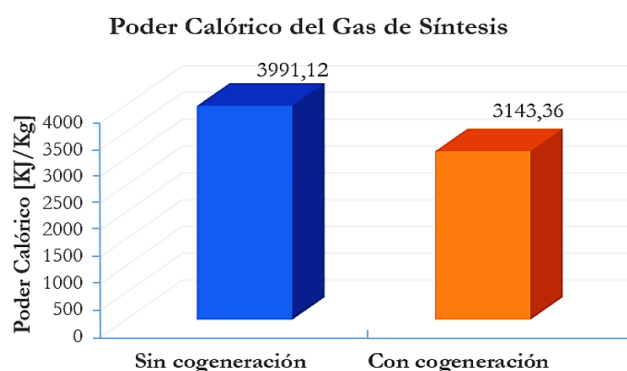


Figura 4. Comparación del poder calórico en los estados de trabajo

La reducción de los porcentos de composición de gases combustibles que se obtienen bajo la operación con cogeneración, provoca además una reducción del poder calórico del gas final. En la figura 4 se muestra un gráfico donde se aprecia el comportamiento de esta variable de salida. Como se puede apreciar, se experimenta una reducción promedio de 847,76 kJ/kg en el poder calórico del gas de síntesis, lo que equivale a un 21,2 % de reducción en relación al valor que se obtiene en promedio sin la presencia de cogeneración en el gasificador.

A pesar de la reducción que se experimenta del poder calórico del gas cuando el gasificador es operado en el estado de cogeneración, también se tiene un efecto importante en la recuperación de la energía térmica que se pierde al ambiente y que es absorbida por el agua. Para ello, fue necesario realizar un análisis del balance energético del proceso de gasificación con la ausencia y presencia de la cogeneración en el gasificador, como se muestra en la tabla 5, para lo cual se consideran las pérdidas de calor en distintos puntos.

Tabla 5. Valores de los calores perdidos considerados en el balance energético.

Tipos de Calores	Pérdidas (kW)	Pérdidas (kW)
	Sin Cogenerador	Con Cogenerador
Calor perdido por el gas producido	2,8	2,8
Calor perdido en la pared de combustión	0,039	0,039
Calor perdido en el aire entre la pared de combustión e interna	1,73	1,72
Calor perdido en la pared interna	0,003	0,04
Calor perdido en la zona del cogenerador	1,78	0,82
Calor perdido en la pared externa	0,29	1,33
Calor perdido al ambiente	1,61	1,47
Total	≈8,25	≈8,25

Como se puede observar, las pérdidas hacia el ambiente sin cogenerador y con la resistencia que presenta el cogenerador son de 1,61 kW y 1,47 kW respectivamente, lo que equivale al 19 % y 17 % del calor de entrada total respecto a los valores mencionados. Esta situación permite verificar que al momento de hacer el análisis de disponibilidad energética (exergía), estos porcentajes pueden ser utilizados para el proceso de cogeneración, lo cual se corrobora en la experimentación realizada para un caudal de agua equivalente al 0,007 kg/s. El efecto exergético se puede determinar mediante evaluación de las expresiones (1), (2) y (3) (Cengel y Boles, 2009):

$$E_{entrada} - E_{salida} = (dE_{sistema} / dt) = 0 \quad (1)$$

$$Q_{rec} = Mag \cdot Cp \cdot (Tas - Tae) \quad (2)$$

$$X_{entrada} - X_{salida} - X_{destruida} = (dX_{sistema} / dt) = 0 \quad (3)$$

Donde $E_{entrada}$, E_{salida} y $E_{sistema}$ son las energías de entrada, salida y del sistema respectivamente, la relación $(dE_{sistema} / dt)$ representa la tasa de cambio de energía. Q_{rec} es la energía en forma de calor recuperada, Mag es el caudal de agua que circula por el serpentín durante la cogeneración, Cp es el calor específico del agua a presión atmosférica y temperatura ambiente, Tas es la temperatura promedio del agua a la salida del cogenerador obtenida experimentalmente e igual a 64,4 °C, Tae es la temperatura promedio inicial del agua a la entrada del cogenerador medida experimentalmente con un valor de 21,64 °C, según las condiciones de realización de la experimentación presentada. La relación $X_{entrada} - X_{salida}$ es la transferencia neta de exergía, $X_{destruida}$ es la cantidad de destrucción de exergía, mientras que la relación $(dX_{sistema} / dt)$ es la tasa de cambio exergético que experimenta el sistema.

Al evaluar los valores presentados anteriormente en la expresión (2), se tiene un valor de recuperación energética de 1,24 kW, lo cual equivale al flujo de calor necesario para calentar el agua a la temperatura media obtenida experimentalmente. Este valor de recuperación equivale al 15 % del flujo de calor total en el sistema de gasificación, lo que indica que en la práctica es posible el aprovechamiento de las pérdidas, reduciéndose a un remanente máximo del 4 % las pérdidas al ambiente según se puede analizar por los valores que se muestra en la tabla 5.

En la tabla 6 se muestran resultados del análisis exergético realizado al proceso de gasificación con la ausencia de cogeneración, donde se muestran los valores de las pérdidas de calor a los alrededores (Q_{sale}), la potencia térmica de salida, (W_{sale}), la potencia reversible de salida ($W_{ren,sale}$), la eficiencia (η), la exergía destruida (X_{dest}), y la exergía del flujo de salida (Ψ_2).

Tabla 6. Valores obtenidos en el análisis exergético del estado de trabajo sin cogenerador.

Balance exergético				Irreversibilidades	
Q_{sale} [kW]	W_{sale} [kW]	$W_{ren,sale}$ [kW]	η [%]	X_{dest} [kW]	Ψ_2 [kJ/kg]
-1,90	3,15	5,15	61,1	2,59	736,40

Como se puede observar en los resultados del análisis exergético mostrados en la tabla 6, la disponibilidad energética resultante del proceso de gasificación y sus respectivas irreversibilidades sin considerar la presencia de cogeneración es superior a 1,24 kW,

por lo que se puede afirmar que existe energía suficiente, la misma que puede ser aprovechada para incorporar un sistema de cogeneración al gasificador, lo cual además concuerda con el análisis de pérdidas energéticas realizado.

CONCLUSIONES

El trabajo realizado permite extraer las siguientes conclusiones principales:

El análisis realizado sobre los factores que inciden en el proceso de gasificación, asociados a la determinación de la calidad final del gas de síntesis y su estabilidad, permite la identificación adecuada de las variables dependientes e independientes necesarias para la realización de un diseño experimental que evalúa la presencia de la cogeneración en el proceso.

La toma de datos realizada a partir de la planificación experimental presentada, tanto para el estado de presencia de la cogeneración como para su ausencia bajo las mismas condiciones iniciales y de variabilidad de las variables de entrada, posibilita la evaluación y contrastación de los aspectos fundamentales que diferencian a ambos estados mediante el análisis estadístico de los datos obtenidos.

La presencia de cogeneración en el proceso de gasificación de biomasa disminuye considerablemente la presencia de humedad en el gas de síntesis obtenido, lo cual se debe a la disminución progresiva de la temperatura en las zonas del gasificador y a la salida del gas, lo que permite extraer mayor cantidad de agua y alquitrán en el proceso posterior de limpieza.

La operación del gasificador bajo las condiciones de cogeneración permite que se tengan presentes menores gradientes de temperaturas en el reactor, lo cual puede prolongar la vida útil del mismo al posibilitarse un mejor control de las tensiones térmicas que se generan.

La comparación de los valores medios de la composición de los gases obtenidos mediante la experimentación refleja una disminución de los porcentajes de los gases combustibles presentes cuando el gasificador opera con cogeneración, por lo que se observa una reducción del poder calórico del gas, lo cual afecta en cierta medida a su calidad desde este punto de comparación.

A partir del empleo de la cogeneración durante el proceso de gasificación de la biomasa se logra aprovechar parte de la energía que escapa al ambiente sin utilidad,

recuperándose cerca de 1,24 kW en promedio, lo que equivale a un aprovechamiento medio del 15 % del calor total generado, según el análisis energético y exergético realizado sobre los resultados experimentales obtenidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bhering, A.; Martínez, A.; Almazán, O. 2017. «Advanced exergy analysis and environmental assesment of the steam cycle of an incineration system of municipal solid waste with energy recovery». *Energy Conversion and Management*, Vol. 157, pp. 195-214. <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.083>>
- Borello, D. *et al.* 2015. «Thermo-Economic Assessment of a olive pomace Gasifier for Cogeneration Applications». *Energy Procedia*, Vol. 75, pp. 1876-6102. <<https://core.ac.uk/download/pdf/82444642.pdf>> [Consulta: 11-12-2020]
- Borello, D. *et al.* 2017. «Modeling and Experimental Study of a Small-Scale Olive Pomace Gasifier for Cogeneration: Energy and Profitability Analysis». *Energies*, Vol. 10, No. 12, pp.1930. <<https://doi.org/10.3390/en10121930>>
- Cash, P. *et al.* 2016. «Experimental Design Research Approaches, Perspectives, Applications». *Experimental Design Research Series*, Springer International Publishing Switzerland, ISBN 978-3-319-33779-1. <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-33781-4>>
- Cengel, Y. A.; Boles, M. A. 2009. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 6ta. Ed. Boston: McGraw-hill. ISBN: 97897010728668.
- Cheng Yan, W. *et al.* 2018. «Model-based downdraft biomass gasifier operation and design for synthetic gas production». *Journal of Cleaner Production*, Vol. 178, pp. 476-493. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.009>>
- Chidiebere, C. *et al.* 2018. «Modelling of down-draft gasification of biomass - an integrated pyrolysis, combustion and reduction process». *Applied Thermal Engineering*, Vol. 142, pp. 444 - 456. <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.079>>
- Eftekhari, A. *et al.* 2017. «Energy and exergy analysis of alternating injection of oxygen and steam in the low emission underground gasification of deep thin coal». *Applied Thermal Energy*, Vol. 208, pp. 62-71. <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.063>>

- Gholamian, E.; Mahmoudi, S.; Zare, V. 2016. «Proposal, exergy analysis and optimization of a new biomass-based cogeneration system». *Applied Thermal Engineering*, Vol. 93, pp. 223-235. <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.095>>
- González, A.; Silva, E.; Escobar, J. 2018. «Syngas production from oil sludge gasification and its potential use in power generation system: An energy and exergy analysis». *Energy*, Vol. 169, pp.1175 – 1190. <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.087>>
- Gutiérrez, E. *et al.* 2014. «Análisis de un sistema de gasificación de biomasa tipo downdraft». *Rev. Aporte Santiaguino*, Vol. 7, No. 2, pp. 32 – 38, ISSN 2070-836X. <<http://dx.doi.org/10.32911/as.2014.v7.n2.472>>
- Gutiérrez, E. *et al.* 2018. «Modelado por redes neuronales artificiales de los indicadores de desempeño de operación en instalaciones de gasificación termoquímica downdraft». *Rev. Aporte Santiaguino*, Vol. 11, No. 2, pp. 211-224, ISSN-L 2616-9541. <<http://dx.doi.org/10.32911/as.2018.V11.n2.576>>
- Hernández, K. 2018. *Análisis de eficiencia energética a través de la determinación del poder calorífico de la biomasa forestal en forma de briqueta de la especie eucalyptus grandis, para la región del Municipio de Palencia en el Departamento de Guatemala*. Tesis de Máster, Facultad de ingeniería, Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala. <<http://www.repositorio.usac.edu.gt/10920/1/Kevin%20Roberto%20Hern%C3%A1ndez%20Tavico.pdf>> [Consulta: 20-12-2020]
- Herrera, R. 2019. *Análisis térmico de un gasificador tipo downdraft al combustionar residuos forestales*. Tesis de Grado, Facultad de Mecánica, SPOCH, Riobamba, Ecuador. <<http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/13243/1/15T00721.pdf>> [Consulta: 21-12-2020]
- Martínez, A.; Lesme, R.; Silva E. 2020. «Thermodynamic assessment of the integrated gasification-power plant operating in the sawmill industry: An energy and exergy analysis». *Renewable Energy*, Vol. 147, pp. 1151-1163. <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.045>>
- Mathew, A. *et al.* 2020. «Performance analysis of a high-temperature magnesium hydride reactor tank with a helical coil heat exchanger for thermal storage». *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 1, pp. 1038-1055. <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.191>>

Evaluación Exegética del Sistema de Gasificación Tipo Downdraft de 5 kW para su Aplicación en un Proceso de Cogeneración y el Efecto Producido en el Gas de Síntesis.

Medina, S. *et al.* 2014. «Atlas Energético de la República del Ecuador». *ESIN Consultora S. A.* 1ra Ed, pp. 150 <<http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00194.pdf>> [Consulta: 05-01-2021]

Nwokolo, N.; Mamphweli, S.; Makaka, G. 2016. «An investigation into heat recovery from the surface of a cyclone dust collector attached to a downdraft biomass gasifier». *Applied Thermal Engineering*, Vol. 98, pp. 1158-1164. <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.014>>

Orozco, L. 2017. *Levantamiento y análisis del potencial energético aprovechable de la biomasa forestal en el cantón Riobamba y su viabilidad a través de gasificación tipo downdraft.* Tesis de Máster, Facultad de Ingeniería Mecánica, EPN, Quito, Ecuador. <<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18894/1/CD-8286.pdf>> [Consulta: 17-12-2020]

Quiñonez, A.; Taipe, C. 2017. *Optimización termodinámica de un gasificador tipo downdraft para la implementación de un Sistema generador de vapor para aplicaciones térmicas,* Tesis de Grado, Carrera de Ingeniería Mecatrónica, ESPE, Quito, Ecuador. <<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/12836/T-ESPE-053727.pdf?sequence=1&isAllowed=ys>> [Consulta: 17-12-2020]

Sharma, T. *et al.* 2018. «An Experimental and Theoretical Study of the Gasification of Miscanthus Briquettes in a Double-Stage Downdraft Gasifier: Syngas, Tar, and Biochar Characterization». *Energies*, Vol. 11, No. 3225, pp. 2-10. <<https://doi.org/10.3390/en11113225>>

Vicente, P.; Albesa, F.; Condorí, M. 2016. «Estudio experimental de gasificación en un gasificador downdraft prototipo», *SEDICI*, Vol. 4, pp. 06.151-06.161. <http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/65769/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Consulta: 05-01-2021]

World Energy Outlook. 2018. *International Energy Agency*, OECD/IEA 2018. <<https://webstore.iea.org/download/summary/190?fileName=Spanish-WEO-2018-ES.pdf>> [Consulta: 21-12-2020]

Recepción: 06/06/21

Aceptación: 03/08/21

Correspondencia:

Eduardo Gutiérrez Gualotuña

ergutierrez@espe.edu.ec