



Gasificación por plasma de residuos sólidos urbanos con requisitos de temperatura y composición del gas

Plasma gasification of municipal solid waste with gas composition and temperature requirements

Jorge Jadid Tamayo-Pacheco^{I,*}, Ángel Luís Brito-Sauvanell^{II}, Sadding Lamar-Carbonell^I, Héctor Mauricio Hernández-Sarabia^{III}, Jorge Martínez-Crespo^{IV}

I. Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Santiago de Cuba, Cuba

II. Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería Mecánica, Centro de Estudios de Energía y Refrigeración. Santiago de Cuba, Cuba

III. Universidad de Ibagué. Facultad de Ingeniería. Ibagué, Tolima, Colombia

IV. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. Madrid. España

*Autor de correspondencia: jadid@uo.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) 

Recibido: 8 de junio de 2020

Aceptado: 12 de agosto de 2020

Resumen

En el presente trabajo fue estudiada la valorización de residuos sólidos municipales mediante la gasificación por plasma con aire y vapor como agentes gasificantes. Cuando en este proceso se establecen requisitos de calidad del gas producido, se generan correlaciones entre los parámetros operacionales que dificultan la predicción de su desempeño. Dicha problemática fue abordada mediante la modelación inversa del proceso y el análisis de sensibilidad. Para ello se estableció un procedimiento, que empleó el método gráfico y la exploración de las regiones de operación utilizando un modelo matemático del proceso. Como resultados se

determinó la región de operación donde se cumplen los requisitos del proceso y los efectos conjuntos de los parámetros operacionales en ella. Además, se comprobó que es posible producir un gas adecuado para integración directa a un esquema de producción de combustibles sintéticos y se determinaron los parámetros más influyentes sobre los indicadores de desempeño.

Palabras claves: gasificación por plasma; modelación computacional; región de operación.

Abstract

In the present work, the recovery of municipal solid waste was studied through plasma gasification with air and steam as gasifying agents. When the quality requirements of the gas produced are met in this process, correlations are generated between the operational parameters that make it difficult to predict its performance. This problem was addressed through inverse modeling of the process and sensitivity analysis. For this, a procedure was established, which used the graphic method and the exploration of the operating regions using a mathematical model of the process. As results, the operating

region where the process requirements are met and the joint effects of the operational parameters in it were determined. In addition, it was verified that it is possible to produce a suitable gas for direct integration into a synthetic fuel production scheme and the most influential parameters on the performance indicators were determined.

Key words: plasma gasification; computational modeling; region of operation.

Cómo citar este artículo:

Tamayo Pacheco JJ, Brito Sauvanell AL, Lamar Carbone S, et al. Gasificación por plasma de residuos sólidos urbanos con requisitos de temperatura y composición del gas. Ingeniería Mecánica. 2020;23(3):e607. ISSN 1815-5944.

Introducción

La gasificación por plasma es una técnica emergente con potencial crecimiento en la valorización energética de los residuos sólidos urbanos (RSU), dada su capacidad para convertir dicho material en un gas combustible de forma amigable con el medio ambiente [1]. Al ser una técnica de termoconversión con insuficiente madurez tecnológica se requieren estudios para describir las relaciones entre las variables del proceso con ello incrementar el aprovechamiento energético del material gasificado.

El presente trabajo está enfocado al estudio del aprovechamiento energético de materiales carbonosos mediante la gasificación por plasma para producir un gas rico en hidrógeno. Esta temática ha contado con recientes investigaciones a nivel mundial. En [2] se empleó la modelación computacional para analizar el efecto

de la temperatura de gasificación y del flujo másico en la composición del gas producido, y la eficiencia del gas frío (en esta última se omite la entalpía del vapor adicionado). En [3], además de la temperatura de gasificación, se incorporan en la simulación otros parámetros operacionales: la razón de equivalencia y la relación vapor-biomasa en inglés *steam-biomass ratio* (SBR), teniendo como indicadores de desempeño solamente la composición, la concentración de hidrógeno y el poder calorífico del gas producido. En [4] varios materiales fueron empleados en experimentos y los resultados fueron comparados con cálculos teóricos, teniendo como variables la temperatura de gasificación, y los flujos de los agentes gasificantes vapor de agua, monóxido de carbono y oxígeno. En [5] el material gasificado fue el residuo sólido municipal, y el estudio se enfocó en el comportamiento del proceso ante cambios en la razón equivalente, el SBR y la temperatura de gasificación, y como indicadores de desempeño la composición y el poder calorífico del gas producido.

En estos trabajos se destaca la utilización de vapor de agua como agente gasificante o como gas de plasma, pues está comprobado su efecto beneficioso en la formación de dihidrógeno. También es común la utilización de modelos de equilibrio termoquímico para predecir la composición del gas producido, ya que este tipo de modelo calcula estimaciones realistas para dicho proceso [4]. En ninguno de los trabajos anteriormente citados se tuvo en cuenta la influencia de la razón energética entre el plasma y el poder calorífico del material conocida en inglés como *plasma energy ratio* (PER). Esta razón en [6] se considera uno de los parámetros operacionales determinantes sobre la eficiencia del proceso. En dichos trabajos no existen requisitos específicos de las características del gas producido, por lo que las conclusiones de los mismos no son estrictamente aplicables al proceso bajo restricciones.

A diferencia de los anteriores, en este estudio se considera el proceso en cuestión sometido a restricciones que garantizan que el gas producido pueda ser convertido posteriormente en combustible sintético. Las dos restricciones son: una relación volumétrica $H_2/CO = 2$ [7], y una temperatura de gasificación de 1200 °C que garantice la minimización del contenido de alquitranes [8]. Bajo las restricciones antes mencionadas, se establecen relaciones de interdependencia entre los parámetros operacionales que dificultan la predicción del comportamiento del mismo y que no pueden ser explicadas mediante los razonamientos de los trabajos anteriores. Estas correlaciones también modifican las relaciones causa-efecto entre los parámetros operacionales del proceso y los indicadores de desempeño, así como entre estos y otras variables de entrada del proceso, por lo que la pregunta de investigación a la que responde este trabajo es: ¿cómo se relacionan las condiciones de operación con los indicadores de desempeño en la gasificación por plasma de RSU, con aire y vapor como agentes gasificantes, cuando a dicho proceso se le imponen restricciones de temperatura de gasificación y relación H_2/CO ? El objetivo perseguido consiste en desarrollar la modelación matemática y análisis de sensibilidad del proceso de gasificación por plasma con aire y vapor como agentes gasificantes, con restricciones operacionales.

Otro asunto que diferencia al presente trabajo de los anteriores es la aplicación del método inverso en la modelación. En el cual, partiendo de las características deseadas del gas producido y de las restricciones operacionales, se determinan cuáles deben ser los valores de los parámetros operacionales adecuados. Para ello se emplea el método gráfico y el concepto de región restringida de operación. Mientras que para el análisis de sensibilidad se emplea el método de gráficos de tornado.

Como principal resultado del estudio realizado consta la determinación de la región de operación donde el proceso cumple las restricciones y de las relaciones entre las variables del proceso en dicha región. Así como el análisis de sensibilidad en un punto singular.

Métodos y Materiales

En este trabajo se utiliza un modelo del proceso basado en el equilibrio termoquímico no-estequiométrico, similar al utilizado en [9] cuyas entradas son: las características del RSU tomadas de [10], la relación entre la masa de aire y la del material húmedo a gasificar conocida como relación aire-combustible (*rel*), la temperatura del aire (T_{aire}), la relación SBR, la temperatura del vapor (T_{H_2O}), la fracción de carbono no convertido (*ncC*), la razón PER, las pérdidas energéticas en el proceso (*Perd*) y la eficiencia de las antorchas ($\eta_{antorcha}$).

Para el cálculo del modelo se emplea el programa computacional *Chemical Equilibrium with Application* (CEA). El mismo fue desarrollado en el Centro de Investigación Lewis (ahora Glenn) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) y se puede descargar de forma gratuita [11]. Asociadas con el programa hay bases de datos independientes con propiedades de transporte y termodinámicas de más de 200 especies individuales. Para realizar esta investigación, se desarrolló un programa computacional capaz de interactuar con el ejecutable del CEA, enviando los datos según plantilla prestablecida y capaz de interpretar los resultados para proporcionar como salida la composición del gas producido.

En cuanto a la simulación, inicialmente se aplica un enfoque inverso para establecer la región donde se cumplen las restricciones (región restringida de operación) y luego se aplica el enfoque directo para determinar las relaciones entre las entradas y salidas en dicha región. En el trabajo se hace énfasis en la utilización del método gráfico para representar y analizar los resultados obtenidos y se aprovecha el poder de cálculo para analizar múltiples puntos de operación.

A efectos del presente trabajo investigativo serán consideradas las restricciones que a continuación se exponen:

1. Relación H₂/CO. Esta relación debe tener un valor de 2 para que el gas producido sea adecuado para la síntesis de hidrocarburos líquidos [12].
2. La temperatura de gasificación de 1200 °C para disminuir el contenido de alquitranes y favorecer la conversión total del carbono del material [8].

El ajuste de la relación H₂/CO del gas se puede realizar aprovechando la reacción de desplazamiento agua-gas en otro reactor y la eliminación de CO₂; pero esto demanda de equipos secundarios y costos adicionales de inversión y operación [7]. Entonces, si el ajuste de esta relación puede hacerse en un solo paso en el propio gasificador, no solo se logrará el gas con las características deseadas, sino que además es beneficioso desde el punto de vista económico.

Conocidas las cantidades de las especies que componen el gas producido, se procede a calcular otras salidas del modelo que constituyen indicadores de desempeño. El primero es el poder calorífico inferior del gas producido seco y en condiciones normales, este puede ser obtenido mediante la expresión 1:

$$PCI_{gas} = 0.126 \cdot X_{CO} + 0.358 \cdot X_{CH_4} + 0.108 \cdot X_{H_2} \quad (MJ/Nm^3) \quad (1)$$

Donde:

Los X_i son las concentraciones molares de cada sustancia *i* en el gas producido seco expresado en porcentaje.

También puede ser calculado como en [13] expresado en términos de energía por cantidad de sustancia, expresión 2)

$$PCI_{gas}^* = 282993x_{CO} + 802303x_{CH_4} + 241827x_{H_2} \quad (2)$$

Los x_i son las cantidades de sustancia de cada especie en el gas producido.

Uno de los indicadores de desempeño más empleados es la eficiencia del gas frío (EGF) cuya definición de acuerdo con [6] es la expresión 3:

$$EGF = \frac{\dot{m}_{gas} PCI_{gasM}}{\dot{m}_{bio} PCI_{RSUM} + \dot{m}_{bio} Q_{plasmaM} / \eta_{antorch} + \dot{m}_{vapor} \cdot H_{vapor}} \cdot 100 \quad (3)$$

Donde:

PCI_{gasM}: poder calorífico del gas expresado en kJ/kg

PCI_{RSUM}: poder calorífico del RSU expresado en kJ/kg

\dot{m}_{RSU} , \dot{m}_{gas} y \dot{m}_{vapor} : flujos máxicos de RSU, de gas producido y de vapor.

H_{vapor}: entalpía del vapor en kJ/kg

Q_{plasmaM}: entalpía aportada al proceso por el plasma por masa de RSU en kJ/kg

Para los efectos de este trabajo es más conveniente calcular la EGF por cada mol de RSU gasificado expresión 4.

$$EGF = \frac{PCI_{gas}^*}{PCI_{RSU} + \frac{Q_{plasma}}{\eta_{antorch}} + s \cdot H_{vapor}^* + m \cdot H_{aire}^*} \cdot 100 \quad (4)$$

Donde:

H_{vapor}^{*} y H_{aire}^{*}: entalpías del vapor y del aire que se adicionan como agentes gasificantes; kJ/kmol

Q_{plasma}: la cantidad de calor aportada por el plasma para gasificar 1 mol de RSU

s, m: las cantidades de vapor y aire que reaccionan con 1 mol de RSU

PCI_{RSU}: el poder calorífico inferior de 1 mol de RSU

La producción específica de gas *y* es la razón entre el flujo de gas producido en Nm³/h y el flujo máxico de alimentación de RSU húmedo en kg/h [14]. Esta puede ser calculada como en la expresión 5:

$$y = \frac{\sum x_i V_{m,i}}{M_{RSUH}} \quad (5)$$

Donde:

V_{m,i}: volumen molar del gas *i* en condiciones normales de presión y temperatura

Otro indicador de desempeño empleado es el consumo eléctrico por kg de H₂ producido, expresión 6:

$$E_{H_2} = \frac{Q_{plasma}}{\eta_{antorch} \cdot 2 \cdot x_{H_2} \cdot 3600} \quad (6)$$

En cuanto al análisis de sensibilidad local, se propone emplear los gráficos de tornado. Como herramienta de análisis de sensibilidad, los diagramas de tornados tienen la ventaja de evaluar la sensibilidad de múltiples entradas sobre una salida a la vez. Para su elaboración previamente se calcula la sensibilidad de las entradas del modelo variando en un porcentaje determinado su valor nominal.

Resultados y Discusión

El procedimiento de análisis comenzó con una exploración de la región de operación, es decir, evaluar el modelo en 690 puntos en coordenadas de PER y SBR; para cada punto se fue aumentando la relación aire combustible hasta obtener una temperatura de 1200 °C.

En la figura 1 se muestra cómo ante esta primera restricción los valores calculados de *rel* se encuentran relacionados con los parámetros PER y SBR al estar todos los puntos simulados sobre un plano transversal, observándose que en la medida que SBR aumenta y PER disminuye, *rel* se hace mayor. Esto se comprobó mediante la expresión matemática que define el modelo de regresión lineal múltiple entre los tres parámetros antes mencionados, ver expresión 7:

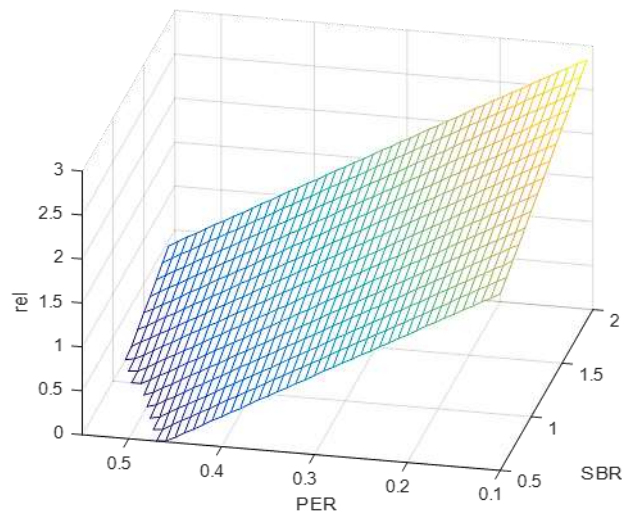


Fig. 1. Relación entre *rel*, PER y SBR. Temperatura de gasificación 1200 °C. Fuente autores

$$rel = 0.678 \cdot SBR - 5.581 \cdot PER + 2.227 \tag{7}$$

Luego se graficaron las curvas de nivel para ciertos valores notables de las variables de salida: producción de gas, relación volumétrica H_2/CO y poder calorífico del gas, tal y como se muestra en la figura 2. Por debajo de la línea azul se cumple que la temperatura de gasificación es de 1200 °C, es decir, cualquier punto por encima de la línea tendría una temperatura de gasificación mayor a 1200 °C.

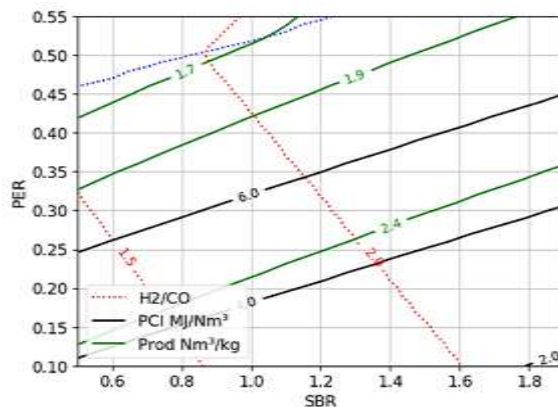


Fig. 2. Exploración de la región de operación. Nota: La línea azul define el límite de 1200 °C. Fuente: autores

En la figura 2 se observa que las isolíneas de la producción del gas y del *PCI* son curvas visualmente similares a rectas con pendiente positiva, notándose que en el sentido del aumento de SBR el *PCI* disminuye mientras que la producción de gas aumenta. La explicación de este fenómeno radica en que si se aumenta SBR, entonces se produce un enfriamiento del reactor que debe ser contrarrestado con un aumento de *rel* y por tanto el efecto conjunto de estas dos modificaciones conlleva a producir más gas, pero más diluido en nitrógeno y por tanto de menor *PCI*.

Las curvas de nivel de la relación H_2/CO , en la región de los 1200 °C tienen pendientes negativas aumentando de valor en el sentido del aumento de SBR. Esto es consistente con investigaciones anteriores que aseguran el efecto beneficioso de *SBR* sobre H_2/CO . Debe notarse que en el sentido del incremento de PER también aumenta

H_2/CO y esto resulta a priori más difícil de explicar ya que responde al efecto conjunto del aumento de PER y a la disminución de rel .

En la figura 2 también se resaltan la curva de nivel correspondiente a $H_2/CO = 2$. Los puntos sobre esta curva y que además se encuentran por debajo de la línea azul, son puntos en los que se cumplen las dos restricciones en la operación del gasificador, en lo adelante esta será conocida como la región restringida de operación. Puede observarse que dicha región es más bien un segmento de curva, por lo que para un valor de uno de los parámetros operacionales (PER , SBR , rel) los otros dos quedan determinado de forma única.

Sobre la región restringida de operación se colocaron 8 puntos para su análisis. Esto permitió encontrar el modelo de regresión lineal que relaciona los tres parámetros operacionales, constituido por las ecuaciones 8 y 9. El valor unitario de R^2 evidencia un ajuste lineal elevado y el signo de las pendientes reafirma la relación directa entre rel y SBR , e inversa entre PER y SBR . Los módulos de las pendientes también ofrecen información sobre la magnitud de estas relaciones, es decir, ante un cambio en SBR la magnitud del cambio en rel es mayor que lo que varía PER . Esto último resulta significativo a la hora de describir los efectos conjuntos.

$$rel = 3.708 \cdot SBR - 3.164, \tag{8}$$

$$PER = -0.541 \cdot SBR + 0.963 \tag{9}$$

Para un análisis más detallado del comportamiento del proceso en la región restringida de operación se procedió a graficar la composición del gas producido, obteniéndose los gráficos de la figura 3. En el sentido del aumento de SBR la concentración de H_2 y de CO disminuye mientras que la concentración de N_2 aumenta y por tanto el PCI del gas producido disminuye también. Como anteriormente se constató, en el sentido del aumento de SBR , rel aumenta en mayor medida que PER y por tanto su efecto se hace significativo. Este aumento de rel equivale a mayor presencia de aire en la reacción de gasificación y por tanto de mayor nitrógeno, causando dilución del gas producido. En cuanto a la concentración de H_2 , pareciese que debía aumentar debido a una mayor presencia de vapor de agua en la reacción; sin embargo esto no es así ya que al mismo tiempo hay más presencia aire con lo cual el efecto conjunto conlleva a una disminución del contenido de H_2 .

Para esclarecer la causa del comportamiento de la concentración de H_2 en el gas producido se procedió a graficar la producción de gas y la producción de H_2 . Como puede observarse en la figura 4 la producción de gas por kg de material gasificado aumenta en el sentido del aumento de SBR , lo cual es lógico desde el punto de vista del balance de masa ya que responde a un aumento del vapor y el aire en el proceso. Pero la producción de H_2 por cada kg de material gasificado disminuye en el sentido del aumento del SBR , debido a la influencia del incremento del oxígeno que participa en el proceso. Ambos comportamientos conllevan a la disminución de la concentración de H_2 en el gas producido como anteriormente se expuso.

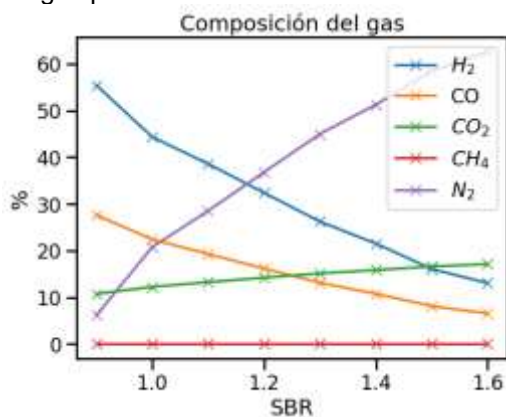


Fig. 3. Composición del gas producido. Fuente: autores

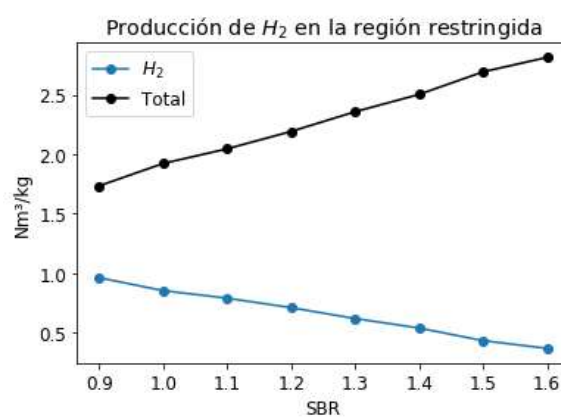


Fig. 4. Producción total de gas y de dihidrógeno. Fuente: autores

Desde el punto de vista energético, los dos indicadores estudiados tienen comportamientos favorables. Como puede observarse en la figura 5, el consumo eléctrico por kg de hidrógeno es inferior al consumo eléctrico promedio en el proceso de hidrólisis (47-50 kWh/kg de H_2). La eficiencia del gas frío se encuentra en el rango de 30 % a 67 %. Este indicador exhibe mayores valores en la medida que SBR disminuye, lo cual a priori pareciese contradictorio porque en ese sentido aumenta el consumo eléctrico. La explicación de este fenómeno tiene que ver con que además de aumentar el consumo eléctrico también disminuyen las cantidades de aire y vapor, y el efecto conjunto de estos cambios es favorable a la EGF.

La simulación computacional también demostró que existe un punto de operación tal que el gas producido puede utilizarse directamente en la síntesis de biocombustibles mediante la técnica conocida como Fischer Tropsch (ver Fig. 6). En dicho punto se cumple que la relación $X_{H_2}/X_{CO_2} = 3$ lo cual es un requisito adicional para este proceso según [12]. En dicho punto se produce un volumen de dihidrógeno de 0.80 Nm^3/kg de RSU, con el cual se logrará un rendimiento de 0.28 kilogramos de combustible sintético líquido por kg de RSU.

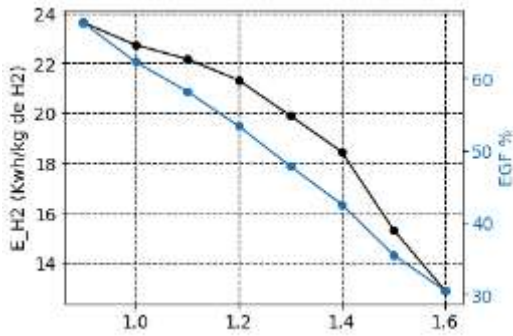


Fig. 5. Indicadores energéticos. Consumo eléctrico por kg de H₂ producido y eficiencia del gas frío.
Fuente: autores

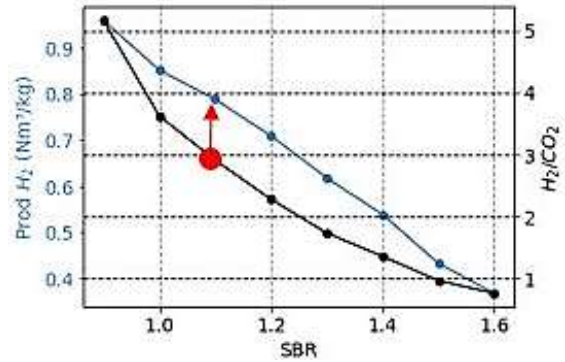


Fig. 6. Características del gas producido para la obtención directa de combustible sintético mediante Fischer Tropsch. Nota: El punto resaltado en rojo representa el punto de operación donde $H_2/CO_{2v} = 3$.
Fuente autores

El análisis de sensibilidad local se realizó en el punto de operación anteriormente determinado. En la tabla 1 se muestran los valores nominales, máximos y mínimos que fueron utilizados para elaborar los diagramas de tornado, para lo cual se supuso un variación de un 10 %. En el carbono no convertido, el valor nominal con el que se realizaron las simulaciones es además el mínimo posible, algo similar ocurre con las pérdidas térmicas y la eficiencia de la antorcha.

Tabla 1. Valores nominales, máximos y mínimos para el análisis de sensibilidad.
Fuente: autores

Parámetros	Valor mínimo	Valor nominal	Valor máximo
Humedad del material (%)	18	20	22
Temperatura del Vapor (°C)	360	400	440
Carbono no convertido nCC	0	0	0,1
Pérdidas térmicas (% de la Energía del Plasma)	0	0	10
Eficiencia de las Antorchas	0,86	0,94	0,94
SBR	0,99	1,1	1,21
PER	0,33	0,37	0,41
rel	0,81	0,90	0,99

Los dos primeros gráficos de tornado ilustran cómo impactaría cada una de las variables estudiadas en el cumplimiento de las restricciones, es decir en la temperatura de gasificación y en la relación H_2/CO , figura. 7. En el caso de la temperatura de gasificación es impactada fuertemente y en forma directa (gris a la izquierda y blanco a la derecha) por el PER, por el nCC y en menor medida por rel, esto es consistente con las afirmaciones de otros autores. El efecto inverso se manifiesta en las pérdidas térmicas, en el SBR y en menor magnitud en la humedad del material. Estos efectos tienen un fundamento energético, con el aumento de PER se incorpora más energía en el proceso, y aumento de ER significa más aire y por tanto se favorecen las reacciones exotérmicas, el aumento del vapor enfría el reactor y la mayor presencia de humedad en el material absorbe calor.

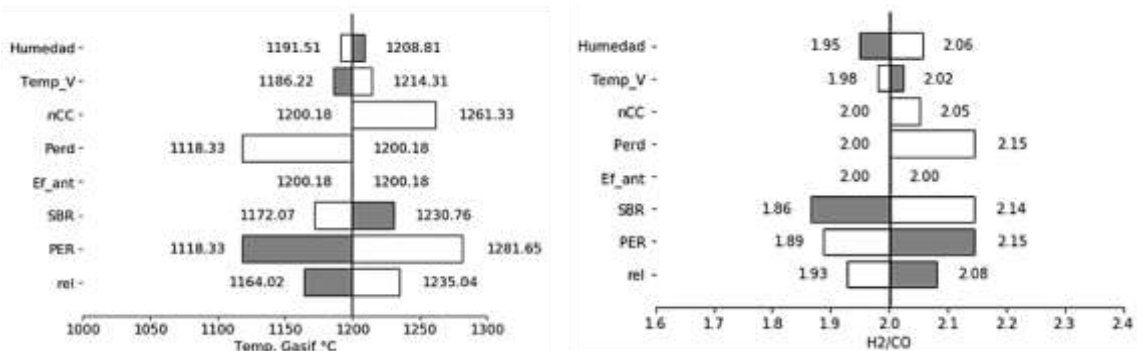


Fig. 7. Diagramas de tornado de las restricciones. Temperatura de gasificación y relación H_2/CO .
Fuente: autores

Los efectos sobre la relación H_2/CO se pueden observar en la figura 8. Los impactos directos más fuertes son del SBR, las pérdidas y la humedad del material en ese orden. Los impactos inversos los ocasionan PER, rel y la temperatura del vapor. Es de destacar que la magnitud del impacto de PER es casi similar al de SBR. Este último favorece el aumento de concentración de H_2 y disminuye la de CO basado en el principio de Le Chatelier, mientras que el PER tiene el efecto inverso debido a su efecto primario sobre la temperatura de gasificación. Otros dos indicadores de desempeño son la eficiencia del gas frío y el poder calorífico inferior del gas producido,

que aparentemente están muy ligados, pero el análisis de sensibilidad mostró cómo algunas variables de entrada pueden impactar a ambos en modos diferentes, figura 8.

Sobre el *PCI* del gas tiene mayor impacto inverso la *rel* y así mismo es su efecto sobre la *EGF*. Como anteriormente se explicó, con el aumento de la cantidad de aire, las concentraciones de los gases combustibles en el gas producido disminuyen y por tanto el *PCI*. El hecho de que no todo el carbono se convierta afecta negativamente al *PCI* y así mismo a la *EGF*. Otra es la situación con el *PER* que tiene un efecto directo sobre el *PCI*, pero al mismo tiempo deteriora la *EGF*. Las pérdidas térmicas afectan inversamente a ambos indicadores, así como la humedad del material y el *SBR*.

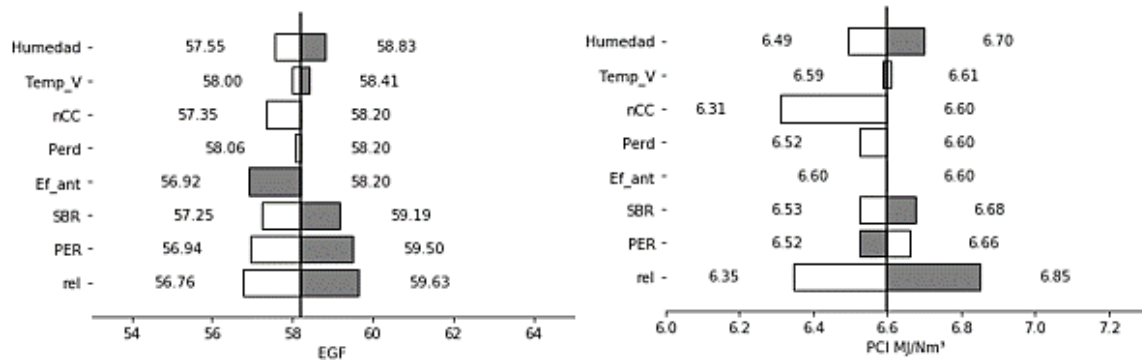


Fig. 8. Diagramas de tornado indicadores energéticos. Eficiencia del gas frío y *PCI*. Fuente: autores

El efecto de la variación en la temperatura del vapor es de una magnitud pequeña comparado con los efectos de las otras variables de entrada del proceso sobre el *PCI* y la *EGF*. No obstante, resulta notorio el hecho de que un aumento en la temperatura del vapor conllevaría a una disminución de la *EGF*, a pesar de provocar un aumento en el *PCI* del gas producido. Esto se explica porque el aumento en el consumo energético para elevar la temperatura del vapor es mayor que el aumento de la energía del gas que se consigue.

Los otros dos indicadores de desempeño que fueron analizados son los que caracterizan la producción de H_2 : la producción de H_2 por kilogramo de material gasificado y el consumo de electricidad por kg de H_2 producido, figura 9.

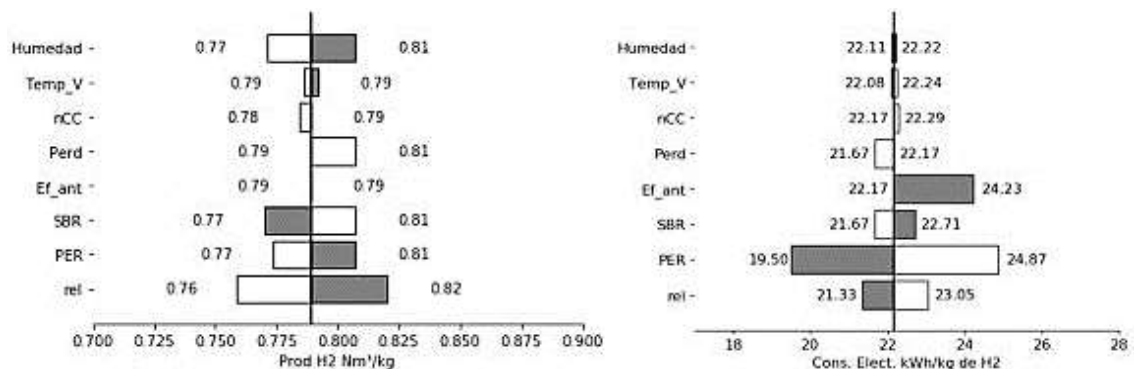


Fig. 9. Diagramas de tornado de la producción de H_2 . Producción de H_2 y consumo eléctrico por kg de H_2 producido. Fuente: autores

La producción de hidrógeno es favorecida solamente por el *SBR* y por las pérdidas, esto último está relacionado con que si las pérdidas aumentan, la temperatura de gasificación disminuye y la concentración de H_2 en el gas aumenta, lo cual coincide con la afirmación de [3] y contradice lo expresado en [15]. En la situación de la gasificación por plasma es más acertada la afirmación expresada en [3], donde considera que la causa de los cambios en la concentración de H_2 está en la reacción de desplazamiento gas-agua y esta reacción con la disminución de la temperatura se desplaza hacia la formación de H_2 y CO_2 .

En el consumo eléctrico por kg de hidrógeno producido el parámetro *PER* es decisivo, lo cual es evidente ya que este parámetro operacional está vinculado directamente al consumo eléctrico e inversamente a la producción de hidrógeno. Otros parámetros como son el *SBR*, la *rel* y las pérdidas térmicas afectan este indicador en menor magnitud.

Otra situación a enfatizar es el efecto de la humedad del material a gasificar sobre los indicadores de desempeño estudiados, ya que esta es una variable de entrada sometida a cambios aleatorios según las características del material y en el caso del RSU incluso hasta de la época del año en que se recolecta, por lo que se recomienda realizar un proceso previo de secado. Nótese que, con excepción de la relación H_2/CO , el resto de los indicadores de desempeño son impactados negativamente por un aumento de la humedad del material.

La eficiencia de la antorcha, solamente afecta y de forma directa a la EGF, y de forma inversa al consumo eléctrico por kg de H₂ producido. Esta variable no tiene influencia sobre los otros indicadores de desempeño anteriormente analizados.

Es de destacar que PER y rel producen efectos en igual sentido (directos o inversos), pero con diferentes magnitudes sobre todos los indicadores de desempeño con excepción del PCI del gas, el cual es favorecido por PER mientras rel lo desfavorece. La causa de esto último también está relacionada con la incorporación de nitrógeno con el aumento del rel y su efecto de dilución en el gas producido. Esta coincidencia puede ser aprovechada en la operación de una planta de gasificación por plasma.

Los resultados anteriormente expuestos constituyen un punto de partida para posteriores estudios sobre el diseño y operación de un gasificador por plasma, así como para la evaluación de las tecnologías propuestas en el mercado. El método empleado es generalizable a otros procesos de termo-conversión que son objetos de estudio en la Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial de la Universidad de Oriente. Además, este trabajo se inserta en la estrategia de dicha facultad de aplicar la modelación computacional al desarrollo de la ingeniería.

Conclusiones

Se comprobó que la imposición de restricciones al proceso estudiado provoca correlación entre los parámetros operacionales: PER, rel y SBR, quedando estos interrelacionados mediante modelos de regresión lineal. Se describieron los efectos simultáneos de los parámetros operacionales sobre los indicadores de desempeño, así como las causas de estos efectos.

El método de exploración de las regiones de operación permitió establecer las interacciones entre los parámetros operacionales con los criterios de desempeño de la gasificación por plasma. En la región restringida de operación para los puntos donde SBR es mínimo (rel es mínimo y PER máximo) el gas tiene mayor composición de hidrógeno, mayor PCI y la eficiencia del gas frío es mayor. Sin embargo, en estos puntos el consumo eléctrico del plasma es más alto.

Se comprobó que en un punto de la región restringida de operación es posible producir un gas adecuado para integración directa a un esquema de producción de combustibles sintéticos por el método de Fischer Tropsch, pudiéndose obtener producciones de dihidrógeno de 0.80 Nm³/kg de RSU.

Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto *Cuban energy transformation Integration of renewable intermittent sources in the power system* (IRIS) financiado por la Academia de Ciencias de Finlandia y al Programa VLIR-IUC-UO, por su ayuda a financiar esta investigación.

Referencias

- Achinas S. An Overview of the Technological Applicability of Plasma Gasification Process. 2020:261-75. DOI 10.1007/978-981-32-9595-7_15.
- Diaz G, Sharma N, Leal-Quiros E, Munoz-Hernandez A. Enhanced hydrogen production using steam plasma processing of biomass: Experimental apparatus and procedure. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015;40(5):2091-8. DOI 10.1016/j.ijhydene.2014.12.049.
- Favas J, Monteiro E, Rouboa A. Hydrogen production using plasma gasification with steam injection. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(16):10997-1005. DOI 10.1016/j.ijhydene.2017.03.109.
- Hrabovsky M, Hlina M, Kopecky V, Maslani A, Zivny O, Krenek P, et al. Steam Plasma Treatment of Organic Substances for Hydrogen and Syngas Production. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2017;37(3):739-62. DOI 10.1007/s11090-016-9783-5.
- Tavares R, Ramos A, Rouboa A. A theoretical study on municipal solid waste plasma gasification. *Waste Manag*. 2019;90:37-45. DOI 10.1016/j.wasman.2019.03.051.
- Qinglin Zhang YW, Liran Dor, Weihong Yang, Wlodzimierz Blasiak. A thermodynamic analysis of solid waste gasification in the Plasma Gasification Melting process. *Applied Energy*. 2013;112:405-13. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.03.054.
- Im-orb K, Simasatitkul L, Arpornwichanop A. Analysis of synthesis gas production with a flexible H₂/CO ratio from rice straw gasification. *Fuel*. 2016;164:361-73. DOI 10.1016/j.fuel.2015.10.018.
- Basu P. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. 3rd ed: Academic press; 2018. 582 p.
- Rutberg PG, Bratsev AN, Kuznetsov VA, Popov VE, Ufimtsev AA, Shtengel' SV. On efficiency of plasma gasification of wood residues. *Biomass and Bioenergy*. 2011;35(1):495-504. ISSN 09619534. DOI 10.1016/j.biombioe.2010.09.010
- Llanes JL, Kalogirou E. Waste-to-Energy Conversion in Havana: Technical and Economic Analysis. *social sciences*. 2019:1-17. [Citado 2020]. Disponible en: <https://www.grc.nasa.gov/www/CEAWeb/>
- Molino A, Larocca V, Chianese S, Musmarra D. Biofuels Production by Biomass Gasification: A Review. *Energies*. 2018;11(4):811. DOI 10.3390/en11040811
- Karamarkovic R, Karamarkovic V. Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures. *Energy*. 2010;35(2):537-49. DOI 10.1016/j.energy.2009.10.022
- La Villetta M, Costa M, Massarotti N. Modelling approaches to biomass gasification: A review with emphasis on the stoichiometric method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;74:71-88. DOI 10.1016/j.rser.2017.02.027
- Silva IP, Lima RMA, Silva GF, Ruzene DS, Silva DP. Thermodynamic equilibrium model based on stoichiometric method for biomass gasification: A review of model modifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;114:109305. DOI 10.1016/j.rser.2019.109305.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Jorge Jadid Tamayo-Pacheco. <https://orcid.org/0000-0001-5997-588X>

Trabajó en la modelación computacional el diseño de investigación y el análisis de antecedentes., en la interpretación de los resultados, en la elaboración y aprobación del informe final.

Ángel Luís Brito-Sauvanel. <https://orcid.org/0000-0003-2862-0984>

Trabajó en la modelación matemática de los aspectos termodinámicos, en la revisión crítica y en la elaboración y aprobación del informe final.

Saddid Lamar-Carbonell. <https://orcid.org/0000-0002-4299-3648>

Realizó contribuciones en el análisis e interpretación de los datos del análisis de sensibilidad. En la revisión crítica y en la elaboración y aprobación del informe final.

Héctor Mauricio Hernández-Sarabia. <https://orcid.org/0000-0002-4299-3648>

Participo en la validación del modelo empleado y en la aplicación del programa CEA y en la revisión crítica y en la elaboración y aprobación del informe final.