

Simulación en equilibrio de la gasificación con plasma de residuos hospitalarios

Equilibrium simulation of the medical waste plasma-gasification

Héctor Miguel Maldonado¹, Luz Angy Hernández², Carlos Enrique Daza Velásquez^{3*}

¹Ingeniero Industrial, Columbus Networks de Colombia LTDA, Bogotá, Colombia.

hmaldonadovilla@gmail.com

²M. Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

angiehernandez33@gmail.com

³Ph.D. Químico, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Grupo de Investigación en Fotoquímica, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

daza-carlos@javeriana.edu.co

Resumen — En este artículo, se aplicó un modelo de equilibrio químico para estudiar la gasificación con plasma de residuos hospitalarios. Para emplear el modelo, se tomaron caracterizaciones físicas reportadas para este tipo de materiales generados en países en vía de desarrollo. Se llevaron a cabo cálculos paramétricos que involucraron la composición de los productos de la gasificación en función de la temperatura, humedad del residuo y tipo de gas generador del plasma. Los datos arrojados por el modelo determinaron que el mejor escenario es aquel en el cual la temperatura del proceso es 1,273 K y la humedad relativa es la menor posible. Bajo estos parámetros se determinó que el gas de síntesis estará compuesto por 13.34 % v/v H₂, 20.10 % v/v CO, 8.41 % v/v CO₂, 0.02 % v/v CH₄ y 58.17 % v/v N₂. Igualmente, se determinó un poder calorífico del gas de síntesis (HHV) de 1,024 kWh/m³ a 1,273 K. De acuerdo con los resultados obtenidos, la tecnología de gasificación con plasma es una buena alternativa para el aprovechamiento de los residuos hospitalarios en países en vía de desarrollo.

Palabras clave — Equilibrio, Gasificación, Plasma, Residuo.

Abstract — In this paper, we applied a chemical equilibrium model for the evaluation of the plasma gasification technology over medical wastes. Reported physical characterizations made in developing-countries were employed in order to use this model. Parametric calculations were developed involving the composition of the gasification products, the temperature, plasma-gas type, and moisture content of the waste. The best scenario founded is the system where the process temperature is 1,273 K and moisture content as low as possible. Model evaluation under these parameters determined that the syngas is composed of 13.34% v/v H₂, 20.10% v/v CO, 8.41% v/v CO₂, 0.02% v/v CH₄ and 58.17% v/v N₂. A Higher Heating Value (HHV) for the syngas of 1.024 kWh/m³ at 1,273 K was determined. According to the results, the plasma gasification technology is a good alternative to the friendly use of medical waste in developing-countries.

Key Word — Equilibrium, Gasification, Plasma, Waste.

I. INTRODUCCIÓN

Los desechos hospitalarios y similares son definidos como las sustancias, materiales o subproductos generados por la prestación de servicios de salud, la docencia e investigación con organismos vivos o con cadáveres; los bioterios y laboratorios de biotecnología; los cementerios, morgues, funerarias y hornos crematorios; los consultorios, clínicas, farmacias, centros de pigmentación y/o tatuajes, laboratorios veterinarios, centros de zoonosis y zoológicos (Decreto 2676 de 2000 del Ministerio de Salud de la República de Colombia).

Los residuos hospitalarios se clasifican en: residuos no peligrosos y peligrosos encontrándose en este último grupo los residuos infecciosos o de alto riesgo biológico que se subdividen a su vez en: biosanitarios, anatomopatológicos, cortopunzantes y de animales [1].

En Colombia, y específicamente en la ciudad de Bogotá D.C., el gobierno distrital ha encargado la recolección, tratamiento y disposición a una empresa privada. Dicha empresa, maneja principalmente residuos biosanitarios, anatomopatológicos y cortopunzantes. Según datos no oficiales, a Junio de 2010, en Bogotá, D.C. se prestaba el servicio a aproximadamente 10,748 usuarios, los cuales generaron 641 ton de residuos biosanitarios y cortopunzantes y 140 ton de residuos anatomopatológicos y de animales por mes. La empresa recolectora, hasta hoy, utiliza la esterilización en autoclave por calor húmedo para el tratamiento de los residuos biosanitarios y cortopunzantes y la termo-destrucción

controlada para el tratamiento de los residuos Anatomopatológicos y de Animales.

Cuando se utiliza la tecnología de incineración, se pueden identificar múltiples problemas asociados al medio ambiente. En primer lugar, al tratarse de la combustión incompleta de materiales sólidos, se están generando emisiones de contaminantes como óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), cloruro de hidrógeno (HCl), dioxinas y furanos [2]. El otro gran problema relacionado con el manejo de los desechos es la disposición final ya que los remanentes de los diferentes tratamientos son llevados a fin de cuentas a un relleno sanitario en donde se acumulan grandes cantidades de basura. Un relleno sanitario además de contaminar los suelos y recursos hídricos subterráneos debido a la filtración de lixiviados, actúa como un digestor a gran escala generando gas metano el cual está relacionado con el efecto invernadero [3, 4].

En países industrializados se han venido utilizando métodos, como la gasificación con plasma, para tratar los residuos, tanto peligrosos como ordinarios el cual reduce el impacto al medio ambiente y a la salud de las personas [5]. Además de buscar evitar los problemas ya mencionados, estas técnicas han demostrado una inmensa capacidad para aprovechar la energía química de los desechos a fin de generar energía eléctrica, térmica y otros productos aprovechables como el gas de síntesis y el hidrógeno [6-8].

El plasma se genera mediante la transmisión de una alta corriente eléctrica entre dos electrodos en presencia de un gas que fluye entre ellos el cual presenta baja conductividad eléctrica para disipar la energía, dando como resultados puntos localizados de alta temperatura. A esta alta temperatura, las moléculas se disocian generando un gas ionizado que se conoce como plasma. El gas ionizado tiene la suficiente energía para favorecer los rompimientos moleculares mediante la formación de radicales libres, iones o moléculas excitadas. El plasma tiene la ventaja de incrementar sustancialmente la tasa de reacciones de fraccionamiento molecular que difícilmente por otros métodos de descomposición térmica ocurrirían [9].

En el presente manuscrito, presentamos un estudio de una alternativa para el tratamiento y disposición de los residuos hospitalarios en el cual se emplea un modelo matemático de equilibrio químico que ya ha sido reportado [10]. Para la aplicación del modelo se emplearon datos reportados de la composición de residuos hospitalarios generados en países en vías de desarrollo. Los métodos de modelamiento de equilibrio químico son herramientas predictivas para estimar las composiciones químicas de los productos de una reacción. Dichos métodos están basados principalmente en variables termodinámicas que asumen condiciones de equilibrio químico [11]. Mediante estos modelos se puede realizar el cálculo del poder calorífico de los productos volátiles para estimar la capacidad energética del sistema.

Este estudio tuvo como objetivo estimar los productos de gasificación y la energía química aprovechable generada mediante la gasificación con plasma de residuos hospitalarios (RDF).

II. METODOLOGÍA

A. Cálculo de variables del RDF

En primer lugar y con el objetivo de determinar los datos necesarios para aplicar el modelo de equilibrio químico, se calcularon: *i*). La entalpía de formación del RDF, *ii*). La humedad del RDF y, *iii*). La fórmula química con base a un átomo de carbono del RDF.

Para estos cálculos fue necesario conocer la clasificación (tipo de residuo) y la composición química del RDF. Como el presente trabajo es netamente de modelamiento, se realizó una búsqueda bibliográfica en donde se documentaron datos que corresponden a clasificaciones realizadas a residuos hospitalarios generados en países en vía de desarrollo, dichos datos son presentados en la Tabla 1.

Sin embargo, la clasificación encontrada en la literatura no presenta datos correspondientes a los residuos anatomopatológicos. Según datos proporcionados por la empresa recolectora de residuos hospitalarios en Bogotá D.C., aproximadamente el 20 % en peso del RDF en dicha ciudad, corresponde a residuos anatomopatológicos. Para efectos de este trabajo, las caracterizaciones tomadas de la literatura (Tabla 1) fueron ajustadas al 80 % en peso siendo los residuos anatomopatológicos el 20 % restante. Esto permitió acercar el presente trabajo al caso de Bogotá, D.C., dado que actualmente no se encuentran datos reportados para esta ciudad ni para ninguna otra en Colombia.

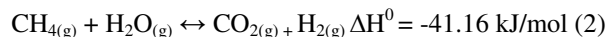
La composición elemental para cada tipo de residuo (Tabla 1) fue calculada con base en datos reportados [12], mientras que el HHV (*Higher Heating Value*, Poder calorífico superior) del RDF fue calculado mediante un modelo de correlación reportado [13].

Con estos datos de partida, se realizaron los cálculos de la fórmula del RDF, la humedad de RDF daf (residuo seco y sin cenizas) y la entalpía de formación (H^0_{RDF}) con cada una de las caracterizaciones documentadas en la Tabla 1. Estos cálculos fueron realizados de acuerdo con el diagrama de flujo presentado en la Figura 1. Al final se tomó el promedio de cada valor obtenido para las variables calculadas y se realizaron pruebas de *Kolmogorov-Smirnov* para confirmar la normalidad de los datos.

B. Modelo de equilibrio químico

Dentro de un reactor de gasificación con plasma se pueden presentar diferentes reacciones simultáneas, sin embargo,

debido a la dificultad de modelar este gran número de reacciones se utilizará un modelo de equilibrio que incluye solamente 2 de estas reacciones, la formación de metano (Ec. 1) y la reacción reversa agua-gas (Ec. 2) el cual ha sido reportado en la literatura [14].



Algunos autores [15], aplicaron y realizaron ajustes al modelo para predecir la composición química de un sistema de gasificación con plasma para el aprovechamiento de los lodos del alcantarillado. Estos autores demostraron que este modelo presenta un error del 2.75 % por debajo de los resultados experimentales.

MUESTRA	ANATOMO-PATOLÓGICOS (% p/p)	PAPEL (% p/p)	PLÁSTICOS (% p/p)	TEXTILES (% p/p)	VIDRIO (% p/p)	METALES (% p/p)
Irán [17]	20.00	11.89	37.38	21.81	7.50	1.41
Portugal [18]	20.00	20.00	27.00	27.00	2.00	4.00
Egipto [19]	20.00	26.67	23.33	18.89	10.00	1.11
Perú (Tumbes) [20]	20.00	39.46	16.24	17.68	6.62	0.00
Perú (Trujillo) [20]	20.00	46.11	11.41	17.87	4.61	0.00
Perú (Ica) [20]	20.00	32.40	17.21	19.63	10.76	0.00
Perú (Cusco) [20]	20.00	28.01	19.05	14.76	18.17	0.00
Perú (Huancayo) [20]	20.00	23.00	17.90	30.03	9.07	0.00
Perú (Iquitos) [20]	20.00	33.31	14.60	18.71	13.38	0.00
Jordania [21]	20.00	33.49	22.33	8.37	10.23	5.58
Bangladesh [22]	20.00	11.76	39.51	19.93	8.53	0.27

Tabla 1. Caracterizaciones de residuos hospitalarios en países en vía de desarrollo. Datos empleados en la modelación del presente trabajo.

Las constantes de equilibrio para estas dos reacciones (Ec. 1 y 2), en función de la temperatura, fueron calculadas mediante las relaciones expresadas en las Ec. 3-6:

$$Y = \frac{\Delta A}{R} \ln \frac{T}{T_0} + \frac{\Delta B}{2R} (T - T_0) + \frac{\Delta C}{6R} (T - T_0)^2 + \frac{\Delta D}{12R} (T - T_0)^3 + \frac{\Delta E}{20R} (T - T_0)^4 \quad (3)$$

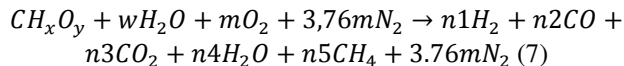
$$\ln K^0 = - \sum \frac{v_i \Delta G_{f_i}(T_0)}{RT_0} \quad (4)$$

$$Z = \Delta H * 1000 - \frac{\Delta A}{2} (T_0) - \frac{\Delta B}{3} (T_0)^2 - \frac{\Delta C}{3} (T_0)^3 - \frac{\Delta D}{5} (T_0)^4 - \frac{\Delta E}{5} (T_0)^5 \quad (5)$$

$$\ln K = \ln K^0 + Y + \int_{298.15}^T \frac{Z}{RT^2} dT \quad (6)$$

En estas ecuaciones R es la constante universal de los gases ideales, T es la temperatura de la reacción (K), T_0 es la temperatura estándar (298.15 K), v_i es el coeficiente estequiométrico de cada especie en cada reacción con el signo ajustado según si es reactivo o producto, ΔG_{f_i} es la energía de Gibbs de cada especie a T_0 y ΔH es la entalpía de la reacción a T_0 . Las variables de correlación ΔA , ΔB , ΔC , ΔD y ΔE se emplearon para calcular el calor específico en función de la temperatura (Ec. 3), valores que fueron tomados de la literatura [16].

La reacción principal de la gasificación con plasma considerando un RDF con composición CH_xO_y es (Ec. 7):



En esta ecuación solo se consideran los productos de las reacciones representadas en las Ec. 1 y 2 donde w es el valor de la humedad del RDF, m es la cantidad de oxígeno para transformar un mol de RDF, $n1$, $n2$, $n3$, $n4$ y $n5$ son los coeficientes estequiométricos de los productos y $3.76m$ es la cantidad de nitrógeno correspondiente a m moles de oxígeno. En la Ec. 7, se identifican 6 variables desconocidas que corresponden a los coeficientes estequiométricos de los productos y a la cantidad de oxígeno m .

Los balances en masa de carbono (Ec. 8), hidrógeno (Ec. 9) y oxígeno (Ec. 10) con base en la reacción principal de la gasificación con plasma son:

$$1 = n2 + n3 + n5 \quad (8)$$

$$2w + x = 2n1 + 2n4 + 4n5 \quad (9)$$

$$w + y + 2m = n2 + 2n3 + n4 \quad (10)$$

La constante de equilibrio de la reacción reversa agua-gas es (Ec. 11):

$$k_1 = \frac{\frac{n1}{n1+n2+n3+n4+n5+3.76m} \cdot \frac{n3}{n1+n2+n3+n4+n5+3.76m}}{\frac{n2}{n1+n2+n3+n4+n5+3.76m} \cdot \frac{n4}{n1+n2+n3+n4+n5+3.76m}} \quad (11)$$

La constante de equilibrio de la reacción de formación de metano es (Ec. 12):

$$k_2 = \frac{\frac{n_5}{n_1+n_2+n_3+n_4+n_5+3.76m}}{\left(\frac{n_1}{n_1+n_2+n_3+n_4+n_5+3.76m}\right)^2} \quad (12)$$

El balance de energía de la reacción de gasificación con plasma es (Ec. 13):

$$H_{f,RDF}^0 + wH_{f,H_2O}^0 + mH_{f,O_2}^0 + 3.76mH_{f,N_2}^0 = n_1H_{f,H_2}^0 + n_2H_{f,CO}^0 + n_3H_{f,CO_2}^0 + n_4H_{f,H_2O}^0 + n_5H_{f,CH_4}^0 + 3.76mH_{f,N_2}^0 + \int_{T_0}^T (n_1c_{p,H_2}(T) + n_2c_{p,CO}(T) + n_3c_{p,CO_2}(T) + n_4c_{p,H_2O}(T) + n_5c_{p,CH_4}(T) + 3.76mc_{p,N_2}(T))dT \quad (13)$$

Este sistema de ecuaciones no lineales fue resuelto con la ayuda del software MathCAD® usando diferentes temperaturas y empleando las variables del RDF determinadas según la Figura 1. Este modelo se aplicó considerando que el gas ionizante es aire y también se hizo el ajuste correspondiente para oxígeno con una pureza de 99.7 % en donde el coeficiente estequiométrico del nitrógeno fue modificado a 0.003m en la Ec. 7. Después de obtener los resultados, se calculó el HHV del gas por medio de una correlación matemática [13]. Se obtuvo paralelamente, el consumo de aire (u_{O_2}) y la cantidad de energía disponible al transformar 1,000 kg de RDF con el fin de plantear los balances de masa y energía del proceso.

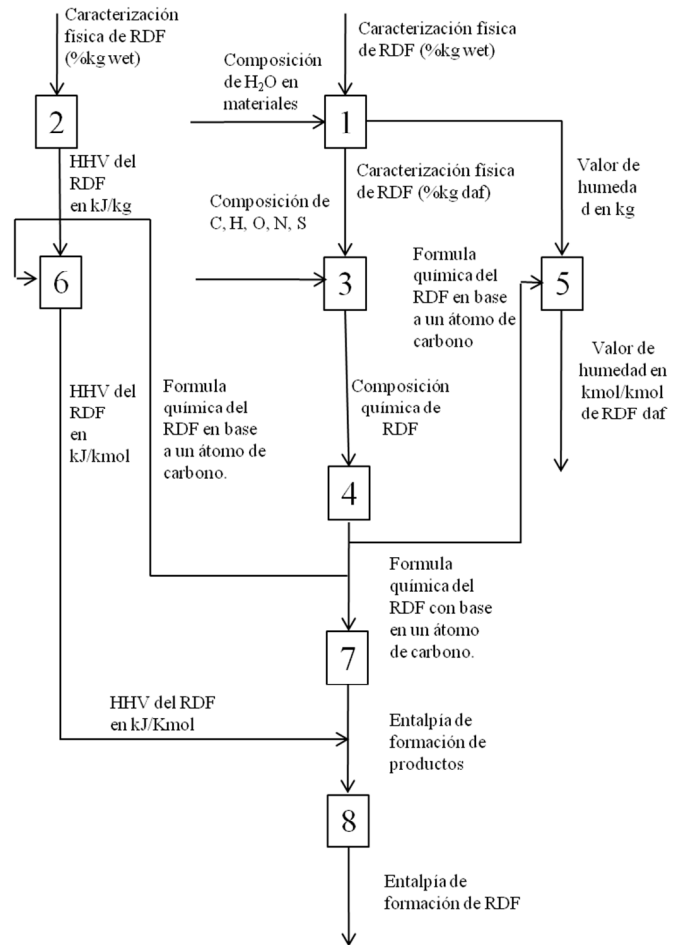


Figura 1. Diagrama de flujo que presenta como se realizaron los cálculos de variables del RDF.

III. RESULTADOS

A. Predicciones del modelo de equilibrio químico

A partir de los cálculos de variables, se obtuvo que la fórmula del RDF promedio para países en vía de desarrollo es $CH_{1.51}O_{0.49}$, la humedad es 0.266 kmol/kmol de RDF daf y la entalpía de formación (H_{RDF}^0) es -135,964 kJ/kmol. Para todas las variables, el valor de prueba fue mayor que el valor crítico de 0.05, por lo tanto se pudo afirmar con un 95% de confianza que existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y afirmar que los datos son normales.

En la Figura 2a se presenta la composición química de la corriente gaseosa producto de la gasificación usando aire como generador del plasma en función de la temperatura. Se observa que a medida en que aumenta la temperatura dentro del reactor, la proporción de H_2 y CO disminuye. En la Figura 2b se presenta la composición gaseosa para la gasificación usando oxígeno como generador de plasma. Para este caso, se favorece la producción de CO con el aumento de la temperatura. Sin embargo, la tendencia del H_2 es descendente.

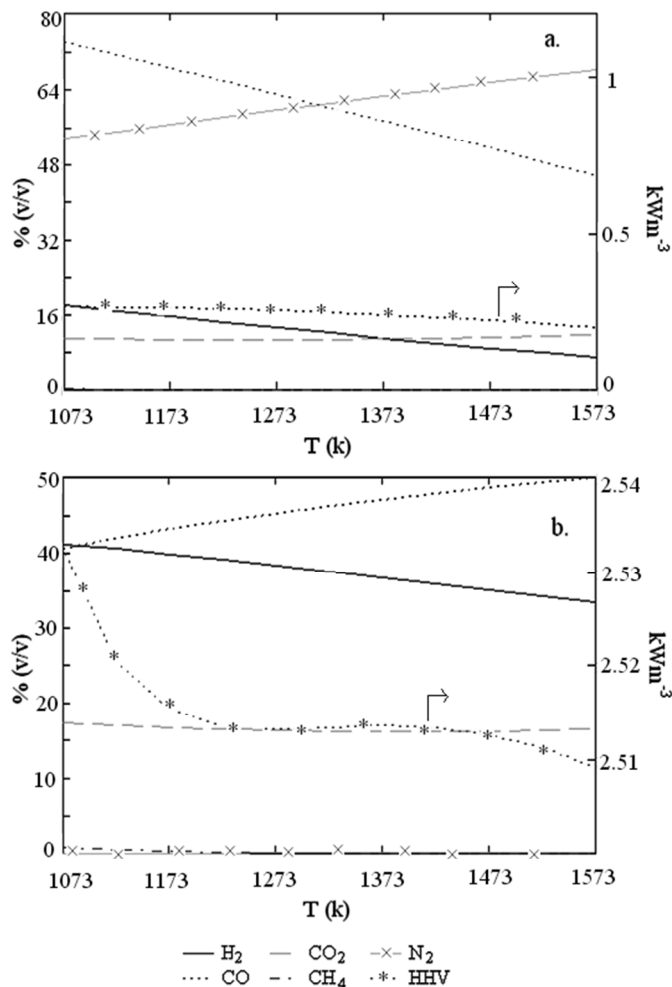


Figura 2. Composición del gas de síntesis, a. utilizando aire como gas generador de plasma, b. utilizando oxígeno puro como gas generador de plasma.

En la Figura 3a se presenta la cantidad de energía química aprovechable, derivada de la transformación de 1,000 kg de RDF cuando se usa aire como generador de plasma en función de la temperatura. Se identifica una tendencia descendente a medida que aumenta la temperatura. Conjuntamente, se aprecia que el consumo de aire para sustentar el proceso aumenta con la temperatura. Aunque se identifica un significativo potencial energético es preciso señalar que a temperaturas superiores a 900 °C el HHV del gas de síntesis es demasiado bajo lo que se puede atribuir a una concentración alta de N₂.

En la Figura 3b se presenta la cantidad de energía química aprovechable para el caso del uso de oxígeno como generador de plasma en función de la temperatura, se observa una tendencia descendente de la energía total del gas pero la cantidad de energía aprovechable es mayor que al usar aire en la reacción. Bajo estos parámetros (uso de oxígeno a cambio

de aire) se identifica un escenario favorable para la generación de energía eléctrica.

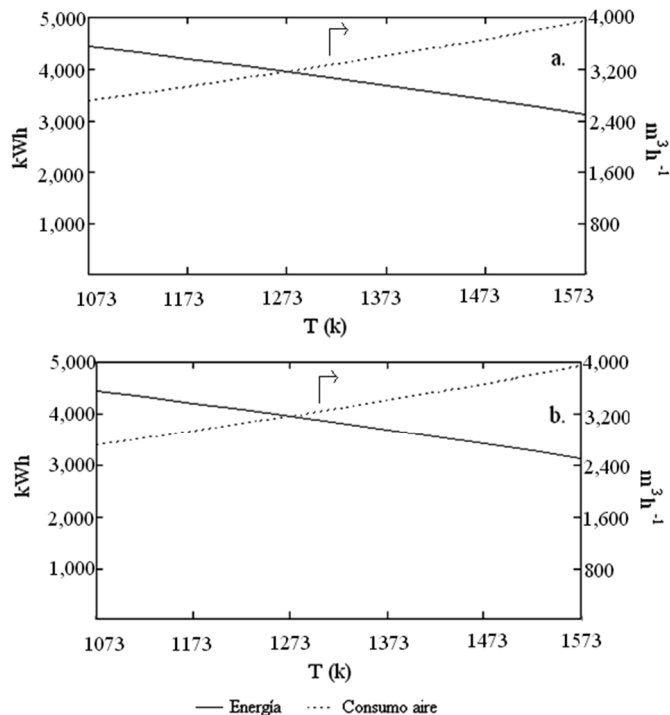


Figura 3. Energía interna del gas de síntesis resultante al transformar 1000 kg de RDF, a. utilizando aire como gas generador de plasma, b. utilizando oxígeno puro como gas generador de plasma.

En la Figura 4a se presenta la composición de la corriente gaseosa producto de la gasificación usando aire como generador del plasma en función de la humedad del RDF. Se identifica una disminución en la concentración de H₂ y CO, a medida que aumenta la humedad del RDF. La Figura 4b corresponde a la composición de la corriente gaseosa usando oxígeno como generador del plasma en función de la humedad del RDF, para este caso la humedad favorece un incremento en la formación de H₂.

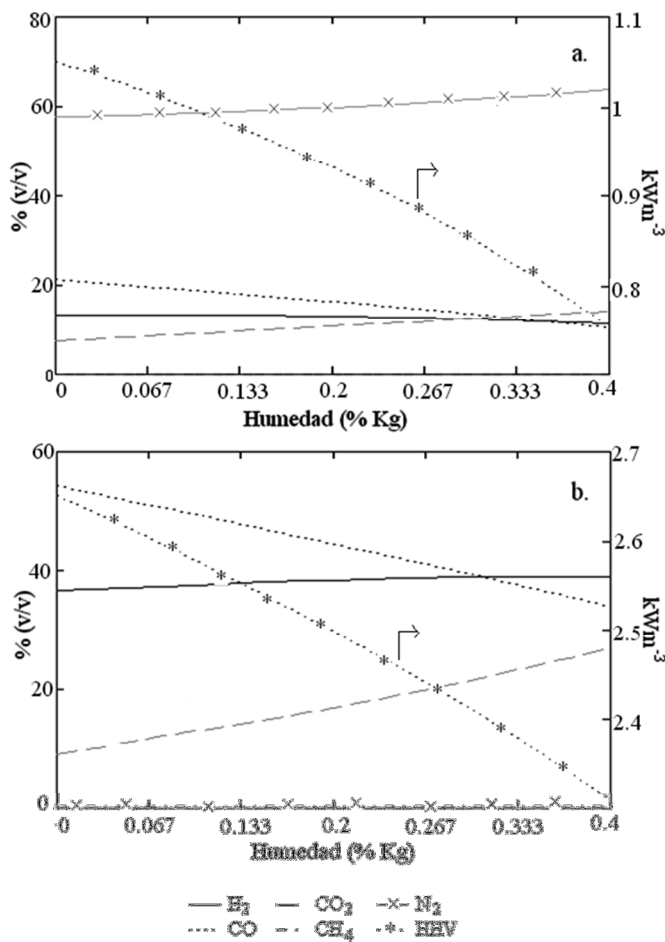


Figura 4. Composición del gas de síntesis en función de la humedad, a. utilizando aire como gas generador de plasma, b. utilizando oxígeno puro como gas generador de plasma.

En las Figuras 5a y 5b se presenta la cantidad de energía química aprovechable derivada de la transformación de 1,000 kg de RDF cuando se usa aire y oxígeno, respectivamente, en función de la humedad. Se observa una disminución de la energía total del gas y un aumento en el consumo de aire. En el caso del oxígeno como generador de plasma, la energía total producida es superior a la generada en el evento de utilizar aire.

De acuerdo con estos resultados, los parámetros más favorables en cuanto a generación de energía interna total del gas de síntesis y consumo de recursos (O₂, aire) corresponden a una temperatura del reactor de 1,273 K y una humedad del RDF baja.

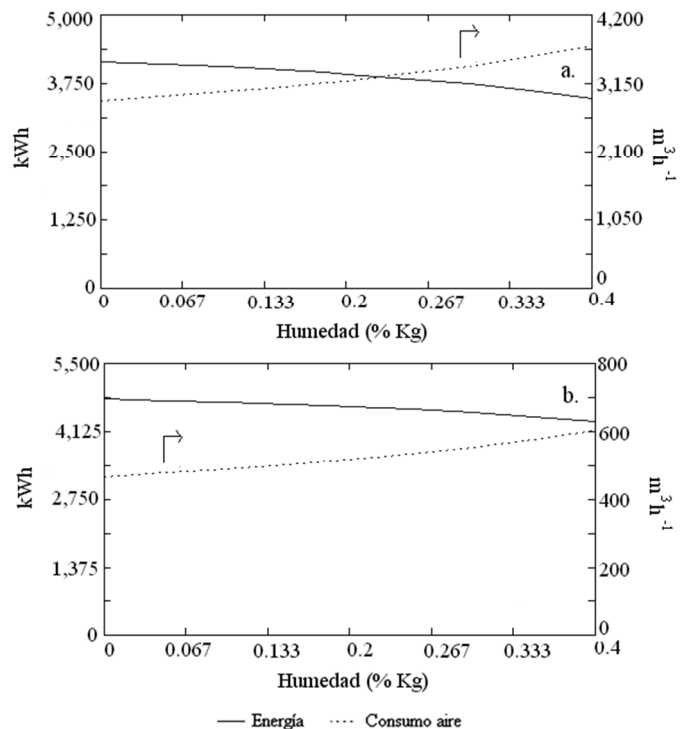


Figura 5. Energía interna del gas de síntesis resultante al transformar 1000 kg de RDF en función de la humedad, a. utilizando aire como gas generador de plasma, b. utilizando oxígeno puro como gas generador de plasma.

B. Balances de masa y energía para la gasificación con plasma

La alternativa propuesta para el aprovechamiento de residuos hospitalarios y similares, tiene 4 productos principales que pueden ser aprovechados: energía eléctrica, energía térmica, agua y residuos inorgánicos. Es necesario determinar la parte orgánica e inorgánica del RDF a fin de calcular la cantidad de masa que será gasificada y la cantidad de masa que será vitrificada. Para realizar esta labor se utilizaron las caracterizaciones de los desechos presentadas en la Tabla 1.

En La Figura 6a se ilustra el balance de masa al procesar 1,000 kg de RDF daf con un nivel de humedad del 5 %. Estos cálculos fueron realizados considerando una temperatura de 1,273 K y utilizando los datos obtenidos de la modelación anteriormente realizada a dicha temperatura. Teniendo en cuenta la caracterización de los desechos secos (Tabla 1), se calculó la proporción que representan los componentes orgánicos del residuo con respecto al total del RDF, encontrándose un valor promedio de 87.681 % en peso. Por lo tanto, se puede determinar que al procesar 1,000 kg de RDF se producirían en promedio 123.184 kg de viruta vitrificada, resultante de la parte inorgánica que no es posible gasificar.

Para el balance de energía del proceso (Figura 6b), en primer lugar es necesario determinar la energía que el RDF es capaz de liberar a la hora de gasificarlo, esta energía es representada

por el poder calorífico del material (HHV). Para realizar esta labor con la modelación se determinó un valor de 22,131.982 kJ/kg a 1,273 K, el cual equivale a 6,148 kWh/kg de acuerdo con una correlación reportada [13].

Después fue necesario determinar el consumo energético del equipo de gasificación con plasma para el cual fueron considerados datos reportados en la literatura [10]. Estos autores determinaron un consumo de 1.35 MW para un planta que procesa 250 TPD y que también utiliza la misma temperatura de operación (1,273 K), por lo tanto, proporcionalmente para procesar 1,000 kg de DAF se requerirían 216 kW. Sin embargo, con el fin de establecer un exceso energético en este parámetro, se adicionan 100 kW de consumo eléctrico con el fin de llevar a cabo cálculos más cercanos a la realidad. Este proceso muestra entonces una eficiencia energética del 55.66% con respecto a la energía aprovechable (energía química del gas de síntesis).

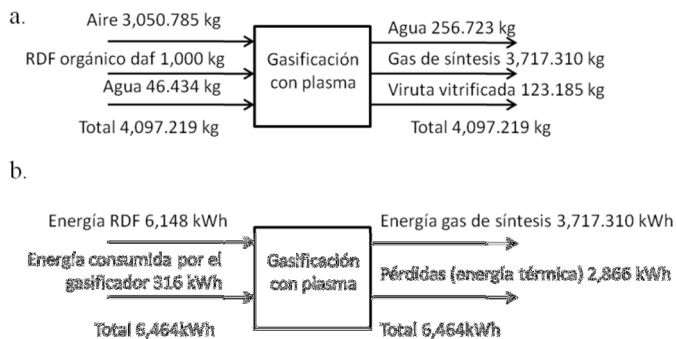


Figura 6. Balances para la gasificación con plasma, a. de masa, b. de energía.

IV. CONCLUSIONES

Se propone una alternativa para el aprovechamiento de los residuos hospitalarios y similares en países en vía de desarrollo. Este estudio se basó en el modelamiento matemático del proceso de gasificación con el cual se determinó, basándose en caracterizaciones físicas de materiales realizadas en países en vía de desarrollo, una fórmula química atribuible a los residuos hospitalarios que corresponde a $CH_{1.51}O_{0.49}$. Igualmente, se determinó una humedad relativa del 18.29 % y una entalpía de formación de -135,964 kJ/kmol. El análisis paramétrico determinó que la temperatura del proceso debería ser 1273K y la humedad relativa debería ser la menor posible. La evaluación del modelo bajo estos parámetros estableció que el gas de síntesis estará compuesto por 13.34 % v/v H_2 , 20.10 % v/v CO , 8.41 % v/v CO_2 , 0.02 % v/v CH_4 y 58.17 % v/v N_2 . Se determinó un poder calorífico (HHV) de 1,024 kWh/m³ a 1,273 K.

La tecnología de gasificación con plasma puede constituirse como una solución efectiva para canalizar la energía química de un material definido como inapropiado para el reciclaje y

que presenta serios riesgos para la salud humana debido a sus características infecciosas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Departamentos de Química y de Ingeniería Industrial de la Pontificia Universidad Javeriana por su apoyo para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] M.S. Hossain, A. Santhanam, N.A. Nik Norulaini, and A.K.M. Omar, "Clinical solid waste management practices and its impact on human health and environment – A review," *Waste Manag.*, vol. 31(4), pp. 754-766, Apr. 2011
- [2] A. Yazawa, S. Nakazawa, and N. Menad, "Thermodynamic evaluations on the formation of dioxins and furans in combustion gas," *Chemosphere*, vol. 39(14), pp. 2419-2432, Dec. 1999
- [3] L. Lombardi, E. Carnevale, and A. Corti, "Greenhouse effect reduction and energy recovery from waste landfill," *Energy* 31(15), pp. 3208-3219, Dec. 2006
- [4] F. Meunier, "The greenhouse effect: A new source of energy," *Appl. Thermal Eng.*, vol. 27(2-3), pp. 658-664, Feb. 2007.
- [5] E. Gomez, D.A. Rani, C.R. Cheeseman, D. Deegan, M. Wise, and A.R. Boccaccini, "Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review," *J. Hazard. Mat.*, vol. 161(2-3), pp. 614-626, Jan. 2009
- [6] C.J. Lupa, S.R. Wylie, A. Shaw, A. Al-Shamma'a, A.J. Sweetman, and B.M.J. Herbert, "Gas evolution and syngas heating value from advanced thermal treatment of waste using microwave-induced plasma," *Ren. Energy*, vol. 50, pp. 1065-1072, Feb. 2013.
- [7] A. Tamošiūnas, V. Grigaitienė, P. Valatkevičius, and V. Valinčius, "Syngas production from hydrocarbon-containing gas in ambient of water vapor plasma," *Cat. Today*, vol. 196(1), pp. 81-85, Nov. 2012.
- [8] S.J. Yoon, and J.-G. Lee, "Hydrogen-rich syngas production through coal and charcoal gasification using microwave steam and air plasma torch," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37(22), pp. 17093-17100, Nov. 2012.
- [9] I. Janajreh, S.S. Raza, and A.S. Valmundsson, "Plasma gasification process: Modeling, simulation and comparison with conventional air gasification," *Energy Conv. Manag.*, vol. 65 pp. 801-809, Jan. 2013. [10] A. Mountouris, E. Voutsas, and D. Tassios, "Solid waste plasma gasification: Equilibrium model development and exergy analysis," *Energy Conv. Manag.*, vol. 47(13-14), pp. 1723-1737, Aug. 2006.
- [11] M. Materazzi, P. Lettieri, L. Mazzei, R. Taylor, and C. Chapman, "Thermodynamic modelling and evaluation of a two-stage thermal process for waste gasification," *Fuel*, vol. 108, pp. 356-369, Jun. 2013.
- [12] L. Meraz, A. Domínguez, I. Kornhauser, and F. Rojas, "A thermochemical concept-based equation to estimate waste combustion enthalpy from elemental composition," *Fuel*, vol. 82, pp. 1499-1507, Aug. 2003.

- [13]S.A. Channiwala, and P.P. Parikh, "A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels," *Fuel*, vol. 81, pp. 1051-1063, May. 2002.
- [14]Z.A. Zainal, R. Ali, C.H. Lean, and K.N. Seetharamu, "Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials," *Energy Conv. Manag.* 42(12), pp. 1499-1515, Aug. 2001.
- [15]A. Mountouris, E. Voutsas, and D. Tassios, "Plasma gasification of sewage sludge: Process development and energy optimization," *Energy Conv. Manag.* 49(8), pp. 2264-2271, Aug. 2008.
- [16]C.L. Yaws, X. Lin, L. Bu, S. Nijhawan, D.R. Balundgi, and S. Tripathi, *Chemical Properties Handbook*, Vol. I, New York, NY: Knovel 1999, cap. 2.
- [17]H. Taghipour, and M. Mosaferi, "Characterization of medical waste from hospitals in Tabriz, Iran," *Sci. Total Env.* 407(5), pp. 1527-1535, Feb. 2009.
- [18]M.C.M. Alvim-Ferraz, and S.A.V. Afonso, "Incineration of healthcare wastes: management of atmospheric emissions through waste segregation," *Waste Manag.*, vol. 25(6), pp. 638-648, Jan. 2005
- [19]M.M. Abd El-Salam, "Hospital waste management in El-Beheira Governorate, Egypt," *J. Env. Manag.* 91(3), pp. 618-629, Jan.-Feb. 2010
- [20]L.F. Diaz, L.L. Eggerth, S. Enkhtsetseg, and G.M. Savage, "Characteristics of healthcare wastes," *Waste Manag.*, vol 28(7), pp. 1219-1226, Jan. 2008.
- [21]A. Bdour, B. Altrabsheh, N. Hadadin, and M. Al-Shareif, "Assessment of medical wastes management practice: A case study of the northern part of Jordan," *Waste Manag.*, vol. 27(6), pp. 746-759, Jan. 2007.
- [22]M.M. Alam, M. Sujauddin, G.M. Iqbal, and S.M. Huda, "Report: Healthcare waste characterization in Chittagong Medical College Hospital, Bangladesh," *Waste Manag. Res.*, vol. 26(3), pp. 291-296, Jun. 2008