

EVALUACIÓN EXERGÉTICA DE LA GASIFICACIÓN DE BIOMASA EN LECHO FLUIDIZADO

Raúl A. Pérez Bermúdez,
Centro de Estudios de Energía y Tecnologías Ambientales (CEETA), Facultad de Ingeniería Mecánica, UCLV

Recibido: Abril/2005

Aceptado: Julio/2005

Aparece aquí el análisis exergético de la gasificación de biomasa en lecho fluidizado, partiendo del reconocimiento de que la exergía es la propiedad que expresa el valor de los productos. Se exponen las ecuaciones de cálculo de las exergías de todos los flujos del proceso, donde se incluye aquellas que permiten determinar las exergías de los alquitranes y las partículas considerándolos como productos del proceso. También se evaluaron dichas ecuaciones a partir de resultados experimentales; que permiten valorar la influencia del factor de aire en la eficiencia exergética y en los costes exergéticos.

Palabras clave: Biomasa, gasificación, exergía, costo exergético

EXERGETIC ANALYSIS OF FLUIDIZED BED BIOMASS GASIFICATION

In this work the exergetic analysis of fluidized bed biomass gasification is approached leaving of the recognition that the exergy is the property that expresses the products value. The exergy models of all flows of the process are exposed, where it is included those that allow to determine the tars and particles exergy considering them as products of the process. These equations were also evaluated with experimental results; that allow valuing the influence of the air factor in the exergetic efficiency and the exergy costs.

Key words: Biomass, gasification, exergy, exergy cost

INTRODUCCIÓN

Desde mediados del siglo pasado han surgido y se han consolidado varias metodologías para el análisis de los sistemas térmicos, entre las que se pueden mencionar: Tecnología *Pinch*, los análisis LCA, Método Exergético y la Termoeconomía,^{1,4} entre otras. Sin lugar a dudas, el Método Exergético se ha afianzado como una eficaz herramienta para el análisis de estos sistemas al reconocer la exergía como la

propiedad que expresa el valor de los productos funcionales de índole energética.^{5,10}

Con el objetivo de determinar el impacto que tienen los parámetros de operación sobre la producción de contaminantes y sobre la composición del gas producto se realizaron experimentos en una instalación de gasificación de biomasa de lecho fluidizado, partiendo del reconocimiento de que es la exergía, y no la energía, la propiedad que expresa el valor de estos productos.

* M.Sc. del Centro de Estudios de Energía y Tecnologías Ambientales (CEETA), Facultad de Ingeniería Mecánica, UCLV.
Tel: 281194. .E-mail: raulito@uclv.edu.cu.

DESARROLLO

Aplicación del análisis exergético

Tal como se señala en la literatura consultada^{2,5,9,10}, la mayor complicación de la exergía radica en definir el ambiente de referencia (AR) para el cálculo del componente químico de la exergía, lo que se hace particularmente complejo en el caso del reservorio de masa para los potenciales químicos, cuando en el proceso objeto de análisis se desarrollan reacciones químicas. Se debe tomar un AR común para determinar las exergías de todas las sustancias involucradas en el proceso a partir de los valores absolutos de cada flujo.

La definición de un AR base debe estar condicionada por el medio ambiente natural, partiendo de que la exergía del sistema es la medida de su potencial de transformación, como consecuencia de no estar en equilibrio termodinámico con el medio ambiente. Entre varios criterios se seleccionó el de Szargut,⁹ ya que proporciona mayor acercamiento al medio ambiente natural del proceso de gasificación de biomasa. Este propone un AR caracterizado por la no existencia de equilibrio termodinámico, lo cual establece que debe adoptarse una única sustancia de referencia para cada elemento químico; estas deben ser comunes, abundantes y estables en la naturaleza. De acuerdo con este criterio se seleccionaron las sustancias siguientes como las formas químicamente más estables. (Ver tabla 1)

Tabla 1. Especies estables en el medio ambiente (MA)

Fases	Sustancia del MA
Líquida	H ₂ O (l)
Gaseosa	Aire atmosférico sat.

Cada una de estas sustancias de referencia caracteriza un elemento químico como su forma estable en el ambiente natural. Para el caso del AR que se define, la tabla 2 muestra la caracterización.

Tabla 2. Relación sustancia-elemento químico

Sustancia del MA	Configuración estable
H ₂ O (l)	H
O ₂ (aire sat.)	O
N ₂ (aire sat.)	N
CO ₂ (aire sat.)	C

Para caracterizar el AR desde el punto de vista termodinámico se definió una presión de 1 ata (~ 0,1 MPa) y una temperatura ambiental de referencia de 25 °C (298,16 K).

Expresiones de cálculo de las exergías en las sustancias de interés en la gasificación de biomasa

El análisis exergético⁴ usa la exergía como principio en el análisis de sistemas energéticos, en vez de la energía, pues es un concepto más adecuado, ya que clasifica a sus diversas manifestaciones de acuerdo con su calidad o su capacidad para realizar trabajo.

La exergía puede definirse como la medida del potencial de evolución de un sistema, por no estar en equilibrio termodinámico con el medio ambiente.⁹ Esta depende del estado termodinámico en que se encuentra la sustancia que constituye el sistema,^{1,5} por lo que su valor está compuesto por las componentes siguientes: térmica, mecánica y química, debidas a los desequilibrios térmico, de presión, de potenciales químicos y de composición, de dicha sustancia con respecto a la composición del AR. La exergía es una propiedad termodinámica aditiva que puede expresarse por la suma de sus componentes^{2,5,9}, como:

$$B_{total} = B_p + B_t + B_q \tag{1}$$

donde:

B_{total} : Exergía total de la sustancia respecto al AR

B_p : Componente que expresa el desequilibrio mecánico respecto al AR

B_t : Componente que expresa el desequilibrio térmico respecto al AR

alquitranes y las partículas. A continuación se muestran las expresiones de cálculo de la exergía de cada sustancia.

B_q : Componente que expresa el desequilibrio químico respecto al AR

Biomasa

Las sustancias que componen los flujos en un proceso de gasificación de biomasa que cobran importancia para el análisis del proceso son la biomasa, el aire, los gases de gasificación, los

Partiendo de la proposición de Szargut⁹ para el cálculo de la exergía de los combustibles sólidos, la exergía específica de la biomasa se puede obtener por la expresión siguiente:

$$B = \frac{1,0438 + 0,1882 \frac{h}{c} - 0,2509 \left(1 + 0,7256 \frac{h}{c} \right) + 0,03883 \frac{n}{c}}{1 - 0,3035 \frac{O}{c}} \cdot V_{CS}^{DAF} \cdot \frac{100 - W - A}{100} + Cp \left[(T - T_0) - T_0 \cdot \ln \frac{T}{T_0} \right] \quad (2)$$

donde:

c, h, o, n : Representan la composición elemental en base seca

W, A : Representan los contenidos de humedad y ceniza (%) de la biomasa

C_p : Representa el calor específico de la biomasa.

V_{CS}^{DAF} : Representa el valor calórico superior del combustible seco y sin cenizas

Aire

Exergía física específica

$$B_{aire} = Cp_{aire} \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) + RT_0 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (3)$$

Gases de gasificación

dos por una mezcla de gases permanentes, en su mayoría combustibles y se consideran un gas ideal.

Los gases que se producen en el gasificador son el producto principal del proceso. Estos están forma-

Exergía específica

$$B_{Gas} = B_i^{ph} + B_i^{ch} = \sum x_i \left((h_i - h_0) - T_0 (s_i - s_0) \right) + \sum x_i \tilde{\varepsilon}_{0i} + \tilde{R}T_0 \sum x_i \ln x_i \quad (4)$$

donde:

que no se encuentran tabuladas, se pueden calcular considerando reacción reversible de formación como sigue (4):

x_i : es la fracción molar de cada especie gaseosa i en la mezcla

$\tilde{\varepsilon}_{0i}$ [kJ/kmol]: es la exergía química estándar.

$$\tilde{B}_{0i} = \Delta \tilde{g}_f^0 + \sum B_{el}^0 \quad (5)$$

Alquitranes

donde:

La exergía de los alquitranes se calcula de forma similar que la de los gases permanentes. Las exergías químicas específicas de los compuestos

: Función de formación de Gibbs molar estándar.

B_{el}^0 : Exergía química estándar de los elementos químicos constituyentes.⁴

formadas por cenizas, material del lecho y carbón. La exergía del carbón puede considerarse igual a su Poder Calórico Inferior (PCI), (32804 kJ/kg).

Partículas

El gas de gasificación contiene partículas

Exergía específica de las partículas

$$B_{part} = p \cdot v_{gas} \cdot x_{carbón} VCI_{carbón} + Cp_{part} \left[(T - T_0) - T_0 \cdot \ln \frac{T}{T_0} \right] \quad (6)$$

donde:

p : representa el contenido de partículas en el gas (g/Nm³).

v_{gas} : representa el flujo volumétrico de gas producido (Nm³/s)

$x_{carbón}$: representa la fracción de carbón en la mezcla de partículas

(Exergía entrante)-(exergía saliente) = irreversibilidades >0 (7)

Balance de exergía del proceso de gasificación de biomasa

El segundo principio de la termodinámica plantea que la exergía entrante en un sistema que realiza un proceso siempre será mayor que la resultante.

A partir de un análisis exergético a nivel de componente, se puede visualizar el comportamiento del sistema desde el punto de vista del segundo principio y se pueden determinar las irreversibilidades generadas, así como las causas que las originan y el grado de perfección termodinámica del proceso.

El balance de exergía se calcula por la ecuación siguiente:

$$B_{Biomasa} + B_{Aire} = B_{gascrudo} + I = B_{gas} + B_{Alquitranes} + B_{Part} + I \quad (8)$$

donde:

I : representa las irreversibilidades del proceso de gasificación, que es consecuencia de las irreversibilidades termodinámicas internas del

proceso. Estas destrucciones de exergía o irreversibilidades pueden representarse en función de los flujos de exergía de entrada o salida por:

$$I = \sum B_e - \sum B_s = B_{Biomasa} + B_{Aire} - B_{gas} - B_{Alquitranes} - B_{Partícula} \quad (9)$$

No existe una máquina perfecta, y el concepto de eficiencia permite calcular el grado de

perfección termodinámica; esta se define a partir de su relación funcional:

$$\psi = \frac{B_P}{B_F} = 1 - \frac{I}{B_F} \quad (10)$$

Resultando para el proceso de gasificación de la biomasa:

(11)

Considerando que el producto principal sea solo el gas de gasificación se puede establecer un nuevo

término de eficiencia que permita evaluar la perfección termodinámica de la producción del gas:

(12)

Coste exergético

Con el análisis exergético no es suficiente para tener una valoración adecuada global del proceso, ya que es necesario conocer todos los recursos que han sido usados para producir los productos, por lo tanto se necesita una contabilidad sistemática de los recursos utilizados para la obtención de un producto. Es necesario un profundo análisis adicional del proceso para cuantificar e identificar el origen de las pérdidas en el proceso. Lo importante no es la exergía, que puede contener un producto funcional, sino su coste, que se denota por B^* , y que es igual a su exergía más las irreversibilidades acumuladas:

$$B^* = B + \Sigma I \quad (13)$$

Dado que B^* es una magnitud expresada en términos de exergía la llamaremos coste exergético, que equivale a la cantidad de exergía necesaria para obtenerla. Según esto, la eficiencia y el coste tienen la misma base conceptual. Analizando ambos, la eficiencia exergética (ζ), es la inversa del consumo exergético de recursos, k y esto es justamente su coste exergético, que se denota por k^* .

$$\frac{1}{\eta} = k = \frac{F}{P} = k^* \quad (14)$$

Descripción de los ensayos experimentales realizados y análisis de los resultados

Los experimentos permitieron determinar el efecto que tienen los parámetros de operación

sobre la producción de contaminantes y la composición del gas producto para alcanzar altas eficiencias exergéticas. Los experimentos se llevaron a cabo en la Universidad Estatal de Campinas, Brasil, en el marco del proyecto Alfa II-0185-FA” de la CE.

Las variables de mayor influencia en la composición del gas y la cantidad de contaminantes, establecidas en la literatura científica ^{3,6,8}, entre otras, son:

- 1) Factor de aire (FA),
- 2) Temperatura del lecho.

Como la temperatura del lecho es función directa del FA, ^{7,8} se puede descartar una de estas variables. Por cuestiones prácticas y en consonancia con la práctica de gasificación se escoge el FA como variable de influencia. Siendo el flujo de aire constante, se varía el flujo de alimentación de biomasa.

En la tabla 3 se describen los resultados experimentales relativos a la composición de los gases producidos para diferentes condiciones de gasificación y utilizando dos biomásas diferentes: bagazo de caña y cáscara de arroz; además, se muestran los niveles de contaminantes presentes. Se varió el FA en un rango de 0,28-0.40, con una réplica de cada ensayo, ya que los experimentos de gasificación poseen poca desviación patrón ⁸, dando un total de 20 experimentos.

Como puede apreciarse en la tabla 4, a medida que aumenta el FA se obtienen mezclas gaseosas

con una composición más pobre de los gases combustibles, lo cual disminuye su poder calórico. Esto se debe a que al aumentar el FA las condiciones de operación tienden a condiciones de combustión, alcanzándose una temperatura de reacción superior.

Se observa que cuando varía el FA en el rango de estudio se verifica una disminución del PCI del gas, cuestión esta que influye negativamente en los resultados del proceso, al disminuir apreciablemente la eficiencia del mismo. Esto sugiere que las mejores con-

diciones de operación podrían ser utilizar FA bajos que permitan obtener altas composiciones de los gases combustibles. Pero esto implicaría operar a bajas temperaturas, lo cual provoca que el gas de gasificación contenga una mayor cantidad de alquitranes, lo que aumentaría y encarecería, lógicamente, su procedimiento de limpieza.

En la tabla 5 se cuantifican los costes exergéticos de la gasificación de biomasa en lecho fluidizado.

Tabla 3. Composición y contenidos de alquitranes y partículas del gas de gasificación respecto a las condiciones de gasificación

Biomasa	FA	Temp. (°C)	Concentración media de los gases						PCI (MJ/m ³)	Alquit. (g/Nm ³)	Partic (g/Nm ³)
			CO (%)	CH ₄ (%)	H ₂ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	N ₂ (%)			
Bagazo de caña	0,28	732,5	18,32	5,01	5,72	16,34	0,49	55,92	4,72	12,74	1,14
	0,31	784,0	16,23	3,99	5,64	16,34	0,57	58,31	4,08	11,34	1,34
	0,34	803,5	15,94	3,56	5,05	15,62	0,45	59,38	3,83	10,40	1,51
	0,37	849,5	14,91	3,27	4,56	16,63	0,68	58,84	3,54	10,04	1,89
	0,40	869,5	14,15	3,21	3,94	16,98	0,70	59,28	3,36	8,92	2,65
Cáscara de arroz	0,28	732,5	18,21	4,09	5,75	16,49	0,34	56,31	4,38	6,13	12,15
	0,31	794,0	16,38	3,74	5,68	15,81	0,24	58,42	4,02	4,71	12,41
	0,34	801,5	16,18	3,54	5,40	13,67	0,72	60,21	3,89	4,11	13,10
	0,37	857,1	15,41	3,63	5,27	13,64	1,01	60,57	3,81	3,79	13,53
	0,40	866,0	14,47	3,49	4,56	15,61	0,77	60,39	3,56	2,91	14,37

Tabla 4. Resultados de la aplicación del análisis exergético al reactor de gasificación en lecho fluidizado

Biomasa	FA	B _{Biomasa}	B _F	B _{Gas}	E _{Alquitrán}	E _{Partículas}	B _F	I	Ψ	Ψ _{gas}
Bagazo de caña	0,28	297,73	299,51	247,25	6,10	0,35	253,70	45,80	84,71	82,55
	0,31	268,86	270,63	197,92	5,71	0,38	204,02	66,62	75,38	73,13
	0,34	252,59	254,36	176,28	5,18	0,40	181,86	72,50	71,50	69,30
	0,37	225,31	227,09	149,32	4,85	0,45	154,62	72,47	68,09	65,76
	0,40	208,39	210,16	132,82	4,27	0,58	137,67	72,49	65,51	63,20
Cáscara de arroz	0,28	332,25	334,02	245,12	2,95	4,03	252,10	81,92	75,47	73,38
	0,31	282,08	283,85	193,29	2,12	3,49	198,91	84,94	70,07	68,10
	0,34	268,00	269,78	182,12	1,98	3,50	187,60	82,18	69,54	67,51
	0,37	257,12	258,90	173,55	2,02	3,47	179,03	79,87	69,15	67,03
	0,40	246,24	248,02	156,85	1,43	3,53	161,81	86,21	65,24	63,24

Tabla 5. Costes exergéticos de fueles y productos del gasificador a diferentes condiciones de operación

FA	Flujos	Bagazo de caña			Cáscara de arroz		
		B	B*	k*	B	B*	k*
0.28	Gas	247,25	291,86	1,18	245,12	324,78	1,32
	Alquitrán	6,12	7,22	1,18	2,95	3,91	1,32
	Partículas	0,35	0,42	1,18	4,03	5,33	1,32
0.31	Gas	197,93	262,55	1,33	193,29	275,84	1,43
	Alquitrán	5,71	7,58	1,33	2,12	3,03	1,43
	Partículas	0,38	0,50	1,33	3,49	4,98	1,43
0.34	Gas	176,28	246,55	1,40	182,12	261,90	1,44
	Alquitrán	5,19	7,25	1,40	1,98	2,85	1,44
	Partículas	0,40	0,56	1,40	3,50	5,03	1,44
0.37	Gas	149,32	219,31	1,47	173,55	250,97	1,45
	Alquitrán	4,85	7,12	1,47	2,02	2,92	1,45
	Partículas	0,45	0,66	1,47	3,47	5,01	1,45
0.40	Gas	132,82	202,76	1,53	156,85	240,41	1,53
	Alquitrán	4,27	6,52	1,53	1,43	2,20	1,53
	Partículas	0,58	0,88	1,53	3,53	5,41	1,53

CONCLUSIONES

1. La metodología desarrollada para la evaluación exergética del proceso de gasificación en lecho fluidizado, que incluye la determinación de la exergía de los contaminantes del gas, permite la caracterización termodinámica basada en la 2da Ley.
2. Al aplicar un análisis exergético y determinar los costes exergéticos del proceso de gasificación de biomasa se comprobó que al aumentar el FA, aunque se obtiene una menor concentración de alquitranes, el gas obtenido disminuye 45,74 % su exergía, y 22,66 % la eficiencia exergética del proceso.
3. Los costes exergéticos aumentan en 0,35 kW al aumentar el FA, lo que representa que se invierten 0,35 kW más por cada kW generado. Esto complementa el análisis anterior y sugiere la operación del gasificador con FA bajos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bejan, A.; G. Tsatsaronis; M. Moran: *Thermal Design and Optimization*, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc, USA, 1996.

2. Brodyanski, V. M.; P. Sorin; T. Le Goff: *The Efficiency of Industrial Processes*, 512 pp., Elsevier Pub., New York, 1994.
3. Kinoshita C. M.; Y. Wang; J. Zhou Tar: "Formation Under Different Biomass Gasification conditions", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 29:169-81, 1994.
4. Kotas, T. J.: *The Exergy Method of Plant Analysis*, Butterworths, London, 1985.
5. Lozano, M. A.; A. Valero: "Determinación de la exergía para sustancias de interés industrial", *Ingeniería Química*, pp.119-128, marzo 1986.
6. Morf, P. O.: *Secondary Reactions of Tar during Thermochemical Biomass Conversion*, A dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Switzerland, 2001.
7. Sánchez Prieto, M.; C. G. Sánchez: Exergetic considerations on the use of simulation in fluidized bed reactor for sugar cane bagasse.
8. Sánchez, C. G.: "Estudo da volatilização e da gaseificação de biomassa em leito fluidizado", Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, 1994.

9. Szargut, J.; R. Petela: *Egzergia* (in Polish), Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warsaw, 1965.
10. Tsatsaronis, G.; J. J. Pisa; L. M. Gallego: *Chemical exergy in exergoeconomics*, TAIES'89. Intl. Conf., 5-8 Jun 1989, Beijing; Pergamon Books Inc; NY, USA, 1989.