

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LOS GENERADORES DE VAPOR F1-2 Y BH-109 DE UNA REFINERÍA CUBANA DE PETRÓLEO

ENERGY EVALUATION OF THE STEAM GENERATORS F1-2 AND BH-109 OF CUBAN OIL REFINERY



Anliet Valles Cruz¹, Lidarsi Acosta Cordero², Alain Pérez González³

*Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría,
Cujae La Habana, Cuba*

¹avallesc@quimica.cujae.edu.cu

²lide@quimica.cujae.edu.cu

³alainspg11@gmail.com

Recibido: 14 /07/2013 • Aprobado: 02/09/2013

RESUMEN

La refinería cubana produce muchos productos para el mercado cubano como los combustibles, aceites, asfaltos y Jet-A1. Los sistemas auxiliares como vapor, aire comprimido y agua se utilizan para la obtención de los productos derivados del petróleo. La generación de vapor es uno de los sistemas auxiliares más importantes dentro de la refinería. La caldera de vapor garantiza que el vapor tenga las condiciones de operación de acuerdo con las normas internacionales. En este trabajo, se realizó la evaluación energética de F1-2 y BH-109 de calderas que utilizan los balances de energía y de masas convencionales. Se obtuvo una eficiencia energética de 61,89 y 77,31 por ciento para F1-2 y BH-109, respectivamente. Las principales pérdidas se debieron al calor sensible de los gases de combustión y a la combustión no química. Para reducir estas pérdidas, mejorar el rendimiento de la caldera y disminuir la temperatura de los gases de salida, se recomienda montar el sistema de control de exceso de aire y volver a examinar o cambiar el sistema de inyección de aire.

Palabras clave: *aire comprimido, calor sensible, combustión no química, eficiencia energética, masas convencionales, refinería.*

ABSTRACT

The Cuban refinery produces many products for Cuban markets such as fuels, oils, asphalts, Jet-A1. Auxiliary systems like steam, compressed air and water are used for obtaining the petroleum products. The steam generation is one of more important auxiliary systems within refinery. Steam boiler guarantees that vapor has the operational conditions according to international standards. In this paper, the energy evaluation of F1-2 and BH-109 boilers using conventional energy and mass balances was realized. The energy efficiency of 61,89 and 77,31 percent for F1-2 and BH-109 boilers was respectively obtained. Major losses were due to sensible heat on combustion gases and chemical non-combustion. For reducing these losses and improving the boiler performance, to decrease out gases temperature, to have fitted excess air control system and to reexamine or change the air injection system was recommended.

Key words: *energy efficiency, compressed air, chemical combustion, conventional mass, sensible heat, refinery.*



I. INTRODUCCIÓN

La función principal de una refinería es obtener productos comerciables, entre otros, diesel, keroseno, naftas, gas *oil* y asfaltos en la forma más económica posible, a partir de los diferentes crudos disponibles. En las refinerías, uno de los servicios industriales auxiliares más importantes es la generación de vapor. Los generadores de vapor son equipos complejos de intercambio de calor en los que se transforma la energía química almacenada en el combustible, en energía térmica contenida en el vapor de agua [1], [4]. En esta transformación de energía, el agua de alimentación pasa de la fase líquida a la de vapor, en la cual, este último, puede producirse en estado físico técnico saturado o sobrecalentado dependiendo del tipo de generador y de los requerimientos de la instalación a la que abastece.

El vapor producido en la refinería es enviado por tuberías aisladas a los diferentes procesos. Estos procesos, a su vez, requieren vapor a diferentes valores de presión y temperatura para propósitos de calentamiento, como servicio auxiliar, o para fines tecnológicos, como servicio general [5]. Resulta muy importante garantizar la estabilidad y seguridad en el suministro de vapor a las condiciones que cada uno de estos precisa, con

el menor consumo de combustible y el mínimo impacto ambiental [1]. Con el objetivo de velar por que estas condiciones se cumplan, es necesario evaluar energéticamente los generadores de vapor. Para la evaluación de los generadores de vapor F1-2 y BH-109 de la refinería, es necesario realizar los balances de materiales y energía con el fin de conocer las pérdidas térmicas y la eficiencia energética de los mismos. Esto se realiza aplicando un procedimiento tradicional para la evaluación de generadores de vapor.

II. CONTENIDO

A. Descripción del Proceso de Generación de Vapor

Como ya se había mencionado, en un generador de vapor se transforma la energía química almacenada en el combustible en energía calorífica mediante la combustión [6], [8]. Cuando los gases de combustión intercambian energía calorífica con el agua, esta incrementa su energía termodinámica específica. En esta transformación de energía, el agua pasa de la fase líquida (agua de alimentación) a la fase vapor (vapor de agua).

En la refinería bajo estudio, las calderas son acuotubulares con igual capacidad nominal de generación. En estas calderas, la mezcla de agua-vapor circula por el interior de los tubos. La combustión se produce en los denominados hogares de los generadores; en estos, sus paredes se encuentran recubiertas por paneles de tubos, por cuyo interior circula el agua. Los gases, producto de la combustión, van cediendo energía como calor sensible en las diferentes superficies de transferencia constituidas por los tubos dispuestos al efecto.

El agua, luego de recibir el tratamiento químico o químicofísico adecuado, entra al generador de vapor a una temperatura de 98°C para evitar daños estructurales debidos a cambios bruscos de temperatura que se producirían de hacerla entrar a 25°C; y, además, por el impacto que tiene en el índice de generación. El agua intercambia calor con los gases calientes de la combustión hasta alcanzar la temperatura de ebullición a la presión de trabajo. Esto da como resultado alrededor de 13400 kg/h de vapor sobrecalentado a 216°C y 1,03 MPa que es distribuido a los diferentes puntos de la refinería a las condiciones que requiere cada proceso. Los gases de combustión salen a 430°C.

El valor de la temperatura de salida de los gases de combustión en ambos generadores de vapor permite pensar en la forma de aprovechar la energía que poseen estos gases una vez que abandonan la zona de precalentamiento del agua de alimentación. Existen distintas herramientas dentro del Análisis Pinch que permiten, por un lado, reducir el consumo de combustible quemado en este tipo de equipamiento con un impacto favorable en la reducción de emisiones gaseosas contaminantes [9], [11] y, por otro, generar diferentes escenarios para el uso de utilidades, los cuales pueden ser evaluados rápidamente para incluir de manera conveniente las posibilidades de cogeneración [12], [14]. A pesar de las ventajas que proporciona el uso de herramientas del Análisis Pinch, su aplicación está fuera del alcance de este trabajo.

B. Evaluación de los Generadores de Vapor F1-2 y BH-109

Los cálculos del balance de materiales y energía realizados para la evaluación de los generadores F1-2 y BH-109 fueron llevados a cabo con ayuda de una hoja Excel. Se utilizaron los datos del Orsat y otras mediciones directas.

1) Cálculo del rendimiento térmico bruto por el método directo:

el rendimiento térmico bruto (E_b) es una medida del potencial energético del combustible para generar vapor. Caracteriza el grado de aprovechamiento de la energía suministrada al agua que se alimenta a la caldera [7]; la parte de esa energía que no ha sido transferida constituye las pérdidas. Más adelante serán desglosadas por diferentes aspectos.

El método directo para el cálculo del E_b es termodinámicamente exacto pero solo permite estimar las pérdidas térmicas totales [1], [15]. La ecuación (1) se utiliza para su estimación.

$$E_b = \frac{D \cdot (hv - hl)}{mc \cdot VCI} \cdot 100 \quad (1)$$

donde: D es la producción de vapor (kg/h), hv la energía termodinámica específica del vapor de agua producido (kJ/kg), hl la energía termodinámica específica del agua líquida alimentada (kJ/kg), mc el consumo de combustible (kg) y VCI el valor calórico inferior del combustible (kJ/kg).

Las pérdidas térmicas totales (% PT) se obtienen por la ecuación (2).

$$\%PT = 100 - E_b \quad (2)$$

2) Cálculo del rendimiento térmico bruto (E_b) por el método indirecto:

este método se basa en calcular el porcentaje de las diferentes pérdidas energéticas y luego calcular el rendimiento bruto del generador de vapor [7]. Inicialmente, se realiza el balance de materiales y energía en el generador de vapor aplicando las leyes de la Termodinámica, las que permitirán evaluar las pérdidas térmicas [16], [18].

Las pérdidas por calor sensible (%Pcs) se deben a la temperatura de salida de los gases producto de la combustión y se pueden calcular por la ecuación (3), en la cual, Q_{cs} es el calor sensible para cada sustancia (kcal) y se obtiene por la ecuación (4), n es el flujo molar (kmol), C_p es la capacidad calorífica específica (kcal/kmol), T_g es la temperatura de salida de los gases (°C) y T_b es la temperatura base del balance (25°C); la base de cálculo es una hora.

$$\%P_{cs_i} = \frac{\sum_i Q_{cs_i}}{mc \cdot VCI} \cdot 100 \quad (3)$$

Donde:

$$Q_{cs_i} = n_i \cdot C_{p_i} \cdot (T_g - T_b) \quad (4)$$

En la tabla I se muestran los resultados del balance de materiales y calor sensible para cada sustancia.

TABLA I
RESULTADOS DEL BALANCE DE MATERIALES Y CALOR SENSIBLE PARA CADA SUSTANCIA

Sustancia	n (kmol)	Cp (kcal/kmol)	Qcs×10 ⁻⁴ (kcal)	Qcs×10 ⁻⁵ (kJ)
CO ₂	108	8,87	38,90	16,30
CO	17	6,96	4,90	2,05
O ₂	107	7,02	30,40	12,70
N ₂	1025	6,96	289,00	121,00
H ₂ O	130	9,51	50,00	20,90
ΣQcs			413,00	173,00

Las pérdidas por incombustión química (%Piq) dependen de la presencia de inquemados o sea del contenido de monóxido de carbono (CO) y, a su vez, del exceso de aire. La

magnitud de exceso de aire que corresponde con el mínimo valor de pérdidas por incombustión química depende del tipo de combustible, de la construcción de la cámara del horno, de la distribución de los quemadores, etc. El %Piq se estima por la ecuación (5).

$$\%P_{iq} = \frac{n_{CO} \cdot VC_{CO}}{mc \cdot VCI} \cdot 100 \quad (5)$$

El valor del calor de combustión del CO (VC_{CO}) es de 283433,99 kJ/kmol.

Las pérdidas por incombustión mecánica (%Pim) se estimaron por el método de cálculo basado en el índice de Bacharach. Para combustibles líquidos y un índice de Bacharach de 3 se hallaron estas pérdidas.

La evaluación de las pérdidas por transferencia de calor al medio exterior (%Pme) es muy compleja debido al cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección–radiación. Por esta razón se emplean métodos indirectos tales como aparece en la ecuación (6).

$$\%P_{me} = \left(\frac{100}{D_{max}} \right)^{0,5} \cdot A \quad (6)$$

En la ecuación (6) el término D_{max} es la producción de vapor nominal (kg/h), D es la producción de vapor (kg/h) y A es el factor de capacidad. El porcentaje de capacidad (%Cap) se calcula según la ecuación (7).

$$\%Cap = \left(\frac{D}{D_{max}} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

En la tabla II se muestra la dependencia del factor de capacidad (A) para diferentes valores de porcentaje de capacidad (%Cap).

TABLA II

DEPENDENCIA DEL FACTOR DE CAPACIDAD(A)
CON EL PORCENTAJE DE CAPACIDAD (%CAP)

A	% de capacidad
1,00	100%
1,28	75%
1,82	50%

La extracción de purgas en las calderas trae aparejada unas pérdidas (%Pp) que corresponden a la energía absorbida por el agua en la caldera y que es eliminada al realizar las purgas. Se calculan según la ecuación (8).

$$\% Pp = \frac{P \cdot (hp - hl)}{mc \cdot VCI} \cdot 100 \quad (8)$$

Finalmente, el rendimiento térmico bruto (Eb) por el método indirecto se calcula con la siguiente ecuación (10).

$$Eb = 100 - (\%Pcs + \%Piq + \%Pim + \%Pme + \%Pp)_{(10)}$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los productos de la combustión regularmente son dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂), agua (H₂O), dióxido de azufre (SO₂), carbono libre, cenizo y combustible que no se quema. En las tablas III y IV se puede observar un resumen de los cálculos realizados.

TABLA III

RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LOS FLUJOS
DE GASES DE COMBUSTIÓN

Gases	F1-2	BH-109
CO ₂	108	166
CO	17	14
H ₂ O	130	176
N ₂	1025	1 125
O ₂	107	56

Siendo P calculado según ecuación (9).

$$P = \frac{m \cdot D \cdot ppm(a)}{ppm(p) - ppm(a)} \quad (9)$$

Donde *m* es la fracción que representa el porcentaje de agua de aportación con respecto al flujo másico de agua que se inyecta a la caldera expresada en %; en la refinería no se aprovechan los condensados, por lo que *m* = 1; *ppm(a)* son los sólidos totales del agua de alimentación a la caldera (250 ppm) y *ppm(p)* son los sólidos totales máximos en la caldera, según la norma (3500ppm).

Para las calderas de petróleo las pérdidas por residuos (%Pres) se consideran despreciables.

TABLA IV

RESUMEN DE LAS CORRIENTES DE SALIDA
Y EL BALANCE DE ENERGÍA

Variables	F1-2	BH-109
Flujo de gas seco (kg/h)	37 357	32 790
Flujo de agua en los gases (kg/h)	2 335	2 531
Flujo de gases de combustión (kg/h)	39 692	35 321
Coefficiente de exceso de aire	1,56	1,19
Eb (método directo)(%)	50,11	59,98
Eb (método indirecto)(%)	61,89	77,31
Piq (%)	7,44	4,25
Pcs (%)	26,08	15,12
Pim (%)	0,40	0,40
Pme (%)	3,64	2,44
Pp (%)	0,55	0,48
Pres (%)	0	0

Los generadores de vapor F1-2 y BH-109 tienen una eficiencia de 61,89% y 77,31%, respectivamente, por el método indirecto, siendo las mayores fuentes de pérdidas térmicas por calor sensible de los gases de combustión y por incombustión química. El método directo arroja que para generar vapor se emplean el 50,11% y 59,98% del potencial energético del combustible en el F1-2 y BH-109, respectivamente. Por ambos métodos se aprecia que la eficiencia del generador de vapor F1-2 es baja; se presta mayor atención a este y las recomendaciones a continuación se encaminan a mejorar su funcionamiento.

En relación con las pérdidas por calor sensible de los gases de combustión, la posibilidad es disminuir la temperatura de salida de los gases. Esta disminución debe ser tal que no se alcance la temperatura de rocío ácido de los gases de combustión, pues de lo contrario se acelerarían los procesos de corrosión sobre las superficies metálicas. Los gases de combustión pueden tener una temperatura mínima de 145°C.

En las calderas que utilizan petróleo, la disminución de la temperatura de los gases está limitada por la aparición del punto de rocío ácido debido a la presencia de azufre en el combustible. Si se disminuye la temperatura de los gases se incrementa el consumo de energía en el tiro inducido (aumento de la resistencia del flujo de gases) y, por tanto, requiere mayor área de transferencia por ser menor la variación de temperatura en el último equipo de intercambio. Se recomienda realizar un balance para determinar hasta qué valor se puede bajar esta temperatura, e instalar un economizador que aproveche la energía recuperativa de los gases con el objetivo de incrementar la temperatura del agua y mejorar el rendimiento del generador de vapor.

Se conoce que para que un generador opere bien, el contenido de CO debe ser menor del 0,1% en el que las pérdidas por incombustión química son pequeñas. En este caso, el valor del contenido de CO es mayor que el recomendado (1,38%). Si el coeficiente en exceso de aire es

inferior al necesario no se garantiza el oxígeno requerido para la combustión total. Si la mezcla aire-combustible es inadecuada, el contacto no se propicia. Si la temperatura en la cámara del horno es baja y el tiempo de residencia de los gases de combustión es pequeño, provocan la presencia de CO en los gases de combustión. Esto puede deberse a una mala operación o a un mal diseño de los quemadores. Para que el combustible se quemara completamente es necesario mezclarlo con más que la cantidad ideal de aire. Para la combustión completa se necesita un exceso de aire el cual varía en dependencia del proceso en cuestión. El inyectar aire en exceso tiene el inconveniente de que una masa de aire se calentará y saldrá con los gases productos de la combustión llevando consigo energía y por lo tanto una pérdida; por otro lado, una cantidad demasiado pequeña provoca el aumento de las pérdidas energéticas por combustión incompleta. El porcentaje en exceso de aire por utilizar depende de diversos factores; entre estos, desempeñan un papel importante el tipo de combustible y el diseño del horno. Se requiere utilizar en las cámaras de combustión de petróleo un coeficiente de exceso de aire igual a 1,1; el coeficiente para la caldera evaluada es de 1,56 estando por encima del valor recomendado. Al no tener un control adecuado del coeficiente de exceso de aire, la eficiencia de la combustión se ve afectada disminuyendo su valor y aumentando las pérdidas por incombustión química. Se deben revisar los inyectores de aire y en caso de ser necesario cambiarlos.

Las pérdidas por incombustión mecánica (0,4%) se estimaron por un método de cálculo que se basa en el índice de Bacharach, que cuantifica el ennegrecimiento de un papel de filtro especial ante el paso a través de este de una corriente de gases de combustión. Se requiere realizar cuando las partículas se escapan sin quemar, ya sea en los gases de combustión o en la ceniza.

Es conveniente usar generadores con capacidad cercana a la nominal. Para este caso no se

cumple; existe una diferencia entre la producción de vapor nominal y la real de 11600 kg/h. Al aumentar la producción de vapor el porcentaje de capacidad aumenta trayendo consigo que disminuya el factor de capacidad y finalmente que disminuyan las pérdidas por transferencia de calor al medio exterior (3,6%).

La recuperación de condensados conduce a la disminución de las purgas y, por tanto, a la reducción de las pérdidas por este concepto; la refinera cubana bajo estudio no cuenta con un sistema de recuperación de condensados.

Una parte de los productos sale por la chimenea de los hornos y son los llamados gases, producto de la combustión, y otra parte queda en el horno como un sólido, que constituye el residuo. Las pérdidas en residuos no son significativas por lo que no se trata de disminuirlas.

Los diagramas de Sankey muestran a simple vista cuáles son las mayores pérdidas térmicas que existen en el sistema de generación de vapor. En las Figs.1 y 2 se muestran los diagramas de Sankey para ambos generadores de vapor.

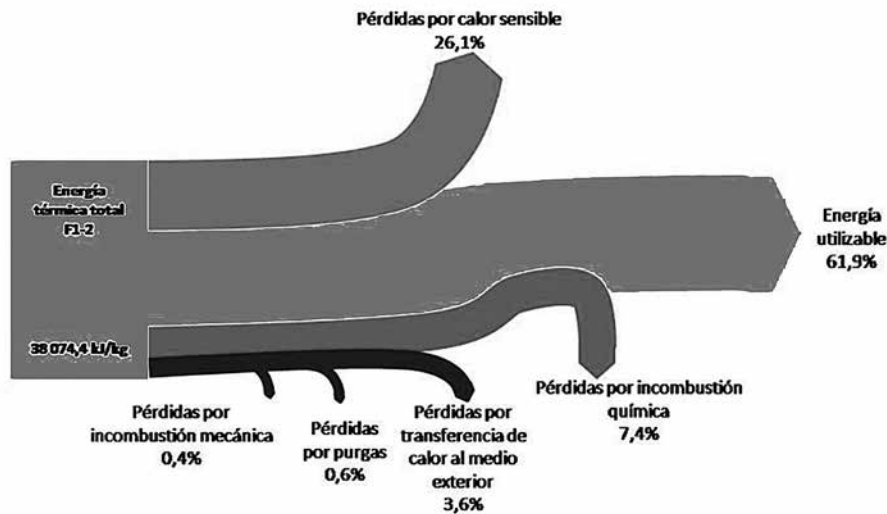


Fig. 1 Diagrama de Sankey para el generador de vapor F1-2.

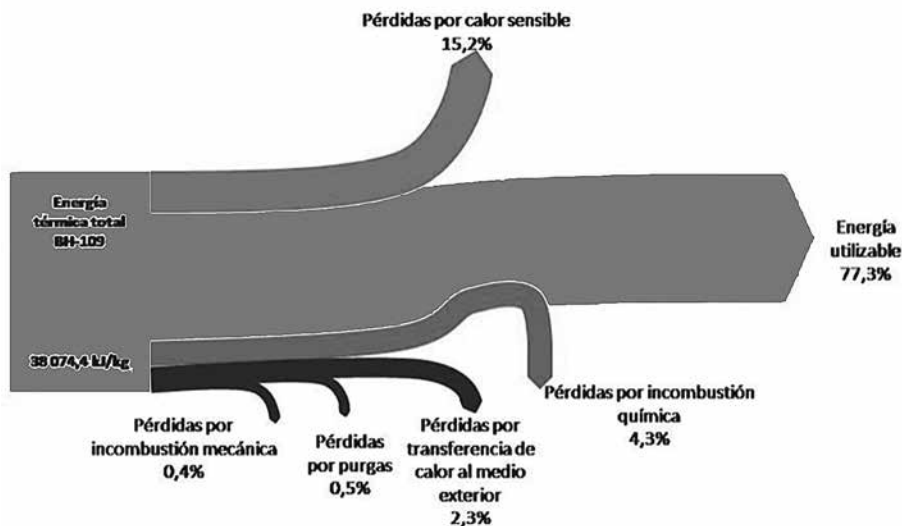


Fig. 2 Diagrama de Sankey para el generador de vapor BH-109.

IV. CONCLUSIONES

Se evaluaron los generadores de vapor F1-2 y BH-109 de una refinería cubana. Los resultados obtenidos muestran que la eficiencia del generador F1-2 es baja. Se deben tomar medidas para mejorar la combustión del combustible en este generador.

Las mayores pérdidas de energía térmica están asociadas fundamentalmente a la recuperación de calor sensible de los gases de combustión y por incombustión química. Se recomienda evaluar la posibilidad de instalar un economizador para la recuperación del calor sensible en los gases de combustión y con ello se mejoraría la eficiencia de este equipamiento. Se deben revisar o cambiar los inyectores de aire; además, se sugiere realizar un control adecuado del exceso de aire para mejorar la eficiencia de la combustión e instalar un sistema de recuperación de condensados.

REFERENCIAS

- [1] *Curso Básico de Operación de Calderas*, Alastor, 2005.
- [2] *Técnicas de conservación energética en la industria. Tomo 1*, Centro de Estudios de Energía. España, 1982.
- [3] M. Torres, T. Rodríguez, A. Prieto y O. Llanes, "Diagnóstico de fallos en el generador de vapor BKZ-340-140-29M," *RIELAC*, vol. XXXII, núm. 2, pp. 31–41, 2011.
- [4] L. Zumalacárregui, *Materiales de combustión*, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Facultad de Ingeniería Mecánica, Ciudad de La Habana, 2002.
- [5] S. Khamis Abadi, M. H. Khoshgoftar Manesh, M. Amidpour y A. A. Hamidi, "Integration of steam power plant with process utility system," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 29, pp. 133–138, 2012.
- [6] A. Dalby y A. Fernández, *Generadores de vapor*, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, 2008.
- [7] A. Kohan, *Manual de calderas*, España, 2000.
- [8] D. Oliva, *Balance térmico*, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Facultad de Ingeniería Mecánica, Ciudad de La Habana, 2004.
- [9] B. Linnhoff, "Use pinch analysis to knock down capital costs and emissions," *Chemical Engineering Progress*, vol. 90, núm. 8, pp. 33–57, 1994.
- [10] I. C. Kemp, *Pinch analysis and process integration: A user guide on process integration for the efficient use of energy*, 2nd ed., Elsevier, 2007.
- [11] V. R. Dhole y B. Linnhoff, "Total site targets for fuel, co-generation, emissions, and cooling," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 17, suppl. 1, pp. S101–S109, 1993.
- [12] R. Smith, *Chemical process design and integration*, John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- [13] O. Aguilar, S. J. Perry, J. K. Kim y R. Smith, "Design and optimization of flexible utility systems subject to variable conditions: Part 1: Modelling framework," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 85, núm. 8, pp. 1136–1148, 2007.
- [14] Ch-L. Chen, Ch-Y. Lin y J-Y. Lee, "Retrofit of steam power plants in a petroleum refinery," *Applied Thermal Engineering*, vol. 61, núm. 1, pp. 7–16, 2013.
- [15] A. E. Borroto Nordelo, *Ahorro de energía en sistemas de vapor*, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Editorial Universidad de Cienfuegos, 2005.
- [16] F. Franck, M. Golato, W. Morales, C. Cruz y D. Paz, "Rendimiento térmico de calderas bagaceras modernas," *Revista Industrial Agrícola de Tucumán*, vol. 88, núm. 2, pp. 18–29, 2011.
- [17] M. Golato, F. Franck, G. Aso, C. Correa y D. Paz, "Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor," *Revista Industrial Agrícola de Tucumán*, vol. 85, núm. 2, pp. 17–31, 2008.
- [18] M. Domingo, W. Ortiz y E. Medina, "Cálculo de los índices de consumo energéticos en la Panificadora Toyo," *Aplicaciones Industriales*, vol. XXIII, núm. 1, pp. 28–32, 2002.

