

# METODOLOGIA PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA ENERGETICA DE CALDERAS DE BAJA POTENCIA

Güiza Pineda, Ronald Fabian (1), Rangel Hernández, Victor Hugo (2)

1 [Ingeniería en Energía, Universidad Autónoma de Bucaramanga - UNAB, Bucaramanga, Colombia] | [rguiza787@unab.edu.co]

2 [Departamento de Ingeniería Mecánica, División de ingenierías, Campus Irapuato - Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [vrangel@ugto.mx]

## Resumen

Actualmente es muy común el uso de calderas y generadores de vapor a nivel industrial, en una gran cantidad de aplicaciones y procesos que cuentan con consumos considerables de combustible a lo largo del tiempo. Por tal razón, es necesario realizar monitoreo y control de estos equipos, mediante la determinación de su eficiencia energética, con el objetivo de caracterizar su comportamiento energético y de esa forma poder proponer e implementar mantenimiento, mejoras o reformas que incrementen la eficiencia energética de los mismos. En este trabajo se desarrolla una metodología para determinar la eficiencia energética y exergética de calderas piro tubulares, las cuales son consideradas de baja potencia. Posteriormente, se realiza un análisis de la influencia de algunos parámetros del proceso, como la temperatura de los gases de escape de la combustión a la salida, en el valor de la eficiencia energética y la eficiencia energética. En el artículo se presentan los resultados de la metodología al ser aplicada usando la información de una caldera piro tubular típica, la cual se encuentra ubicada en la División de Ingenierías del Campus Irapuato – Salamanca de la Universidad de Guanajuato.

## Abstract

Currently, the use of boilers and steam generators at the industry level, in a great quantity of applications and processes that have considerable consumption of fuel over time is very common. For this reason, it is necessary to realize monitoring and control of these equipment, by means of the determination of his energy efficiency, with the aim to characterize his energetic behavior and of this form to be able to propose and to implement maintenance, improvements or reforms that increase the energy efficiency of the same ones. This paper develops a methodology to determine the energy and exergetic efficiency of firetube boilers, which are considered as low power boilers. Later there is realized an analysis of the influence of some parameters of the process, as the temperature of the combustion exhaust gas at the outlet, in the value of the energy efficiency and the exergetic efficiency. The article presents the results of the methodology on having been applied using the information of a typical firetube boiler, which is located in the Division of Engineering of the Campus Irapuato - Salamanca of the Universidad de Guanajuato.

## Palabras Clave

Eficiencia energética; Caldera de vapor; Baja potencia, Piro tubulares

## INTRODUCCIÓN

Actualmente los sistemas y cadenas de producción industriales y comerciales abarcan muchos procesos, gran parte de estos procesos requieren del uso y aprovechamiento de fluidos caloportadores, los cuales son suministrados por calderas o generadores de vapor. Las aplicaciones de las calderas industriales son muy diversas, dentro de las que se incluyen: la industria alimenticia, cervecerías, empresas de limpieza, hospitales, industrias de materiales de construcción, industrias automotrices, generación de electricidad, industria metalúrgica, refinerías de petróleo, entre otras [1].

A medida que transcurre el tiempo, aumenta la demanda continua de productos y servicios, lo que conlleva al crecimiento de la capacidad instalada de las calderas en el sector industrial.

Las calderas son equipos de transformación de energía que normalmente operan continuamente o durante largos periodos de trabajo, condición que propicia un alto consumo energético en el tiempo. Tal situación hace que sea importante conocer el desempeño energético de estos equipos. Ya que, sabiendo su comportamiento energético, se puede programar su mantenimiento para reducir los costos de operación de los mismos.

Las calderas o generadores de vapor son equipos que transfieren el calor proveniente de la combustión de algún combustible, ya sea gaseoso, líquido o sólido, para producir vapor o calentar fluidos y luego ser aprovechado en determinado proceso.

Las calderas varían extensamente en su diseño dependiendo del método de combustión usado, el combustible utilizado, el campo de uso, tipo de circulación de agua empleada, y la presión del vapor. A continuación, se presentan solo dos de las clasificaciones encontradas en la literatura para calderas: en función de la disposición de los fluidos y del tipo de fluido caloportador [2].

Según el paso del fluido caloportador, existen calderas acuatubulares y calderas pirotubulares. Las primeras son aquellas en las que el agua o fluido caloportador se desplaza por el interior de los tubos, mientras que los gases de combustión circulan por el exterior de los mismos; contrario a

las calderas pirotubulares, donde los gases de combustión circulan por el interior de los tubos.

Según la tecnología existen: calderas de agua caliente que llevan el agua a una temperatura inferior a los 100 °C, calderas de agua sobrecalentada que calientan por encima de los 110 °C, calderas de vapor que calientan el agua y producen su cambio de estado de la fase líquida a la gaseosa y las calderas de fluido térmico que utilizan un fluido caloportador diferente al agua.

Las calderas pirotubulares son de baja potencia, mientras que las acuatubulares son de alta potencia ya que la producción de vapor de las primeras puede llegar hasta un máximo de 60 ton/h en el caso de calderas pirotubulares de dos pasos, a una presión máxima de 30 bar. En el caso de las calderas de alta potencia, estas alcanzan producciones de vapor de hasta 2.000 ton/h a presiones superiores a los 100 bar [3].

En un estudio realizado por M. A. Lozano y A. Valero [4], los autores utilizan el método de separación de pérdidas para la determinación de la eficiencia energética en calderas.

En otro estudio titulado “Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor [5], se realiza la evaluación energética de dos calderas acuatubulares y una comparación entre el método de entrada salida y el método de balance de energía para el cálculo de la eficiencia.

Por otra parte, en el 2007 se publicó una guía técnica sobre el procedimiento de inspección periódica de eficiencia energética para calderas [6]. La guía detalla los procedimientos para la determinación de la eficiencia energética mediante el método directo y el método indirecto, así como ensayos y los equipos de medición necesarios.

En este trabajo se desarrolla una metodología para determinar la eficiencia energética y exérgica de calderas de baja potencia. Posteriormente, se realiza la aplicación de la metodología a un equipo ubicado en la División de Ingenierías del campus Irapuato - Salamanca de la Universidad de Guanajuato, para finalmente comparar su comportamiento usando como combustibles GLP y gas natural por separado. Para el desarrollo del proyecto se utiliza el software de solución de ecuaciones de ingeniería “EES”.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto abarca la determinación de dos indicadores importantes, primero se presenta la metodología para la determinación de la eficiencia energética y en segundo lugar la metodología para establecer la eficiencia exergética.

En la imagen 1 se presenta la metodología para la determinación de los indicadores, la cual se podrá aplicar una vez se haya desarrollado el simulador en EES para cálculo de las eficiencias.



**Imagen 1: Procedimiento para la determinación de la eficiencia energética**

En cuanto al primer indicador, la norma internacional ASME PTC 4-2008 [7], propone dos métodos para su estimación: el método de entrada-salida y el método de balance de energía. Otros autores hablan del método directo e indirecto, los cuales son equivalente al de entrada-salida y de balance de energía respectivamente.

En la tabla 1 se muestran las variables que deben ser medidas para la determinación de la eficiencia energética. A la hora de realizar las mediciones debe haber repetitividad en los datos, lo cual indicada que la información es acertada. Se recomienda que la frecuencia de observaciones sea a intervalos de 15 minutos como mínimo.

**Tabla 1: Parámetros requeridos para la determinación de la eficiencia energética**

Parámetro	Unidad de referencia
Composición del combustible	Porcentaje volumétrico o molar (%)
Temperatura de entrada del combustible y del aire	Kelvin (K)
Composición de los gases de salida de la combustión	Porcentaje volumétrico o molar (%)
Temperatura de salida de los productos de combustión	Kelvin (K)
Poder calorífico del combustible	(KJ/Kmol)

Para la determinación de la eficiencia exergética se requiere la medición de las variables mostradas en la tabla 2, además de las de la tabla 1.

**Tabla 2: Parámetros para la determinación de la eficiencia exergética**

Parámetro	Unidad de referencia
Flujo de combustible	(Kg/h) o (Kg/s)
Flujo de agua o vapor	(Kg/h) o (Kg/s)
Temperatura de entrada del agua	Kelvin (K)
Temperatura de salida del vapor	Kelvin (K)
Presión de trabajo de la caldera	KJ/Kmol

Luego de realizar la lectura y registro de parámetros de los que no se espera que presenten variaciones, se calculará el promedio de las lecturas tomadas en el tiempo de los valores para cada uno de ellos.

### Eficiencia energética

Para la determinación de la eficiencia la norma recomienda usar el método de balance de energía ya que tiene menos incertidumbre, aunque se puede escoger entre ambos dependiendo de la instrumentación disponible y de la exactitud que se desea.

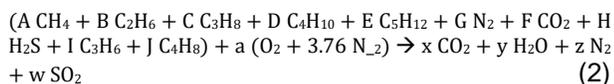
La metodología que se aplicará se deriva de la ASME PTC 4-2008, teniendo en cuenta que la norma detalla especificaciones para calderas industriales de gran tamaño, para este estudio la metodología es más sencilla. De acuerdo con la primera ley de termodinámica, el balance de energía alrededor del sistema del generador de vapor que no tiene acumulación de energía se presenta en la ecuación 1:

$$\text{Energía entrando al sistema} = \text{Energía saliendo del sistema} \quad (1)$$

A partir de esta premisa parte la determinación de la eficiencia energética, donde se determinan las pérdidas energéticas en el equipo a prueba.

### 1. Balance teórico de la combustión

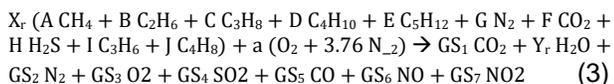
Conociendo la composición molar del combustible se realiza el balance teórico de 1 Kmol, para calcular la aireación teórica de la reacción en la ecuación 2.



Los coeficientes de la A a la J constituyen el porcentaje de cada gas o sustancia que compone el combustible y los coeficientes x, y, z y w representan la cantidad de moles de la sustancia respectiva que se forman por la reacción. Se aclara que la reacción se presenta de manera general, para combustión de GLP y gas natural; el que sea uno u otro se define mediante los valores de los coeficientes.

### 2. Análisis inverso de la combustión

Este se realiza con los datos suministrados por un analizador de gases. De la ecuación 3, los coeficientes GS representan el porcentaje de cada gas presente en los humos de combustión. Aquí se determina la cantidad de moles de combustible ( $X_r$ ) y de agua en los humos ( $Y_r$ ).



### 3. Cálculo de las pérdidas de energía

El cálculo de las pérdidas se divide en dos categorías de acuerdo con el método en el que se miden y calculan. En la primera categoría están las pérdidas en función de la entrada de combustible, tales como las debidas a productos de combustión

(gas seco, agua de combustible, etc.). En la segunda categoría están las pérdidas no relacionadas con la entrada de combustible, que se calculan más fácilmente como una energía por unidad de tiempo, en esta categoría se encuentran las pérdidas debidas a la radiación superficial y la convección.

- *Pérdidas por calor sensible de los humos*

Estas representan la energía de los gases de escape en forma de calor sensible que se desaprovecha al ser emitidos al ambiente; se calculan así:

$$P_{csh} = F_h * \sum (h_i - h_0)_i \quad (4)$$

$F_h$  es el flujo másico de los humos en (Kg/s),  $h_i - h_0$  es la entalpía a temperatura de humos menos la entalpía a temperatura de referencia en (KJ/Kg) para cada gas presente en los humos.

- *Pérdidas por inquemados o combustión incompleta*

Esta representa la energía desaprovecha al producirse CO en los gases de escape; se calcula así:

$$P_{inq} = F_{CO} * PCS_{CO} + F_{SO} * PCS_{SO} \quad (5)$$

$F_{CO}$  y  $F_{SO}$  son el flujo másico del monóxido de carbono y del monóxido de azufre en [kg/s] respectivamente,  $PCS_{CO}$  y  $PCS_{SO}$  son el poder calorífico del monóxido de carbono y del monóxido de azufre respectivamente.

- *Pérdidas por radiación superficial y convección*

Se determinan indirectamente midiendo la temperatura superficial media del generador de vapor y la ambiental próxima a ella (0.5-1.5 mts).

La temperatura de la superficie, la temperatura ambiente y la velocidad del aire ambiente deben determinarse en un número suficiente de lugares para determinar valores medios representativos; normalmente oscila entre 0-5% de la energía de entrada del sistema. La pérdida se calculará así:

$$P_{r\&c} = 0.293 * (H_c + H_r) * A_s * (T_s - T_a) \quad (6)$$

$H_c$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección para el área superficial de la caldera,  $H_r$  es el coeficiente de transferencia de calor de radiación para el área, es el área superficial,  $T_s$  y

Ta son la temperatura superficial y la temperatura ambiente.

#### 4. Cálculo de la eficiencia energética

La eficiencia energética se calculará así:

$$E_{ene} = (F_{fuel} * PCI_{fuel}) - P_{csh} - P_{inq} - P_{r\&c} \quad (7)$$

$F_{fuel}$  es el flujo de combustible en (Kg/s),  $PCI_{fuel}$  es el poder calorífico del combustible.

### Eficiencia exergética

El análisis de exergía combina la primera y segunda ley de la termodinámica, y es una herramienta eficaz para analizar tanto la cantidad como la calidad de la utilización de la energía.

Éste es el máximo trabajo útil que puede obtenerse conforme a la irreversibilidad de los procesos y la forma en que las irreversibilidades destruyen la exergía [8]. A continuación, se describe brevemente la metodología para la determinación de la eficiencia exergética en calderas de baja potencia.

#### 1. Cálculo de exergía del fluido caloportador

En este caso el fluido caloportador es el agua, por lo tanto, se calculan sus exergías así:

$$\varepsilon_1 = (h_1 - h_{1,0}) - T_0 * (s_1 - s_{1,0}) \quad (8)$$

$$\varepsilon_2 = (h_2 - h_{2,0}) - T_0 * (s_2 - s_{2,0}) \quad (9)$$

$\varepsilon_2$  y  $\varepsilon_1$  son la exergía del agua a la salida y a la entrada de la caldera en (KJ/Kg),  $h_1$  y  $h_2$  son la entalpía a la entrada y a la salida en (KJ/Kg),  $s_1$  y  $s_2$  son la entropía a la entrada y a la salida en (KJ/Kg-K); las expresiones con subíndice cero, son las propiedades a temperatura de referencia.

#### 2. Cálculo de la exergía del combustible

Se calcula la exergía de entrada del combustible de la siguiente forma:

$$\varepsilon_{fuel} = \sum (h_{fuel} - h_{f,0}) - T_0 * (s_{fuel} - s_{f,0}) + \varepsilon_q \quad (10)$$

Para cada componente del combustible  $h$  es la entalpía en (KJ/Kg),  $s$  es la entropía en (KJ/Kg-K) y  $\varepsilon_q$  representa la exergía química.

#### 3. Cálculo de la eficiencia exergética

La eficiencia exergética se calculará de la siguiente manera:

$$E_{exe} = (F_{agua} * (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)) / (F_{fuel} * \varepsilon_{fuel}) \quad (11)$$

$F_{fuel}$  es el flujo de combustible en (Kg/s),  $F_{agua}$  es el flujo de agua en (Kg/s).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para facilitar la evaluación de la eficiencia energética y exergética de calderas de baja potencia, se desarrolló un simulador en "EES".

Esta herramienta facilita el análisis, ya que solo se requiere ingresar los valores medios de los parámetros del sistema o equipo que se quiera caracterizar. Los parámetros de entrada son los mencionados en las tablas 1 y 2. En la imagen 2 se presenta la interfaz gráfica del simulador, desde la que se pueden ingresar los datos y obtener resultados.

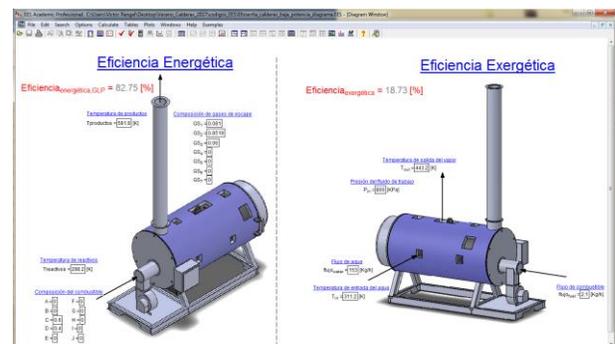
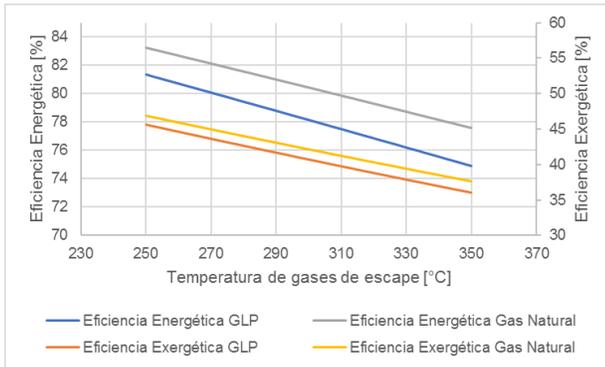


Imagen 2: Interfaz del simulador en EES para el cálculo de la eficiencia energética y exergética

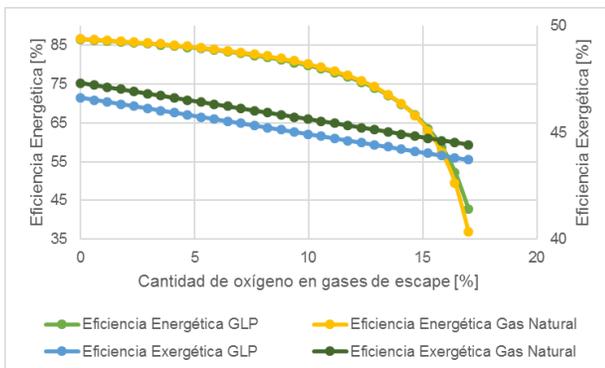
Posteriormente, se realizó un análisis del efecto de la variación en ciertos parámetros de los equipos y los resultados se presentan en las imágenes 3, 4, 5 y 6. Como se observa, estas variaciones afectan en mayor grado a la eficiencia energética que a la eficiencia exergética.

De la imagen 3 presentada a continuación, se observa que tanto la eficiencia energética como la exergética decrecen al aumentar la temperatura de los gases de escape de la combustión. Ya que ese calor sensible adicional que se va en los humos, equivale a energía que el fluido caloportador está dejando de recibir.



**Imagen 3: Eficiencia energética y exergética de una caldera pirotubular en función de la temperatura de los gases de escape**

En la imagen 4 se puede apreciar claramente que a medida que aumenta el porcentaje de oxígeno en la lectura del análisis de gases secos, los dos indicadores energéticos, la eficiencia energética y la eficiencia exergética, disminuyen gradualmente.

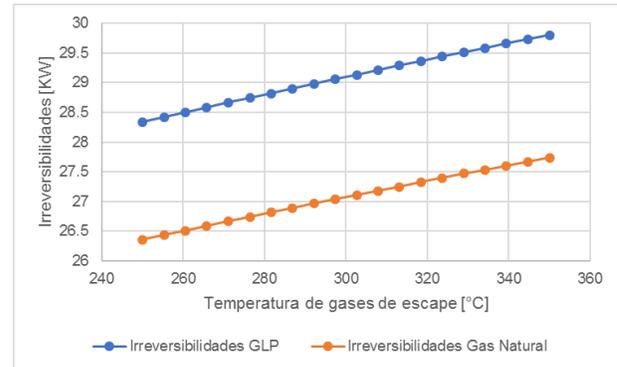


**Imagen 4: Eficiencia energética y exergética de una caldera pirotubular en función de la cantidad de O<sub>2</sub> presente en los gases de escape**

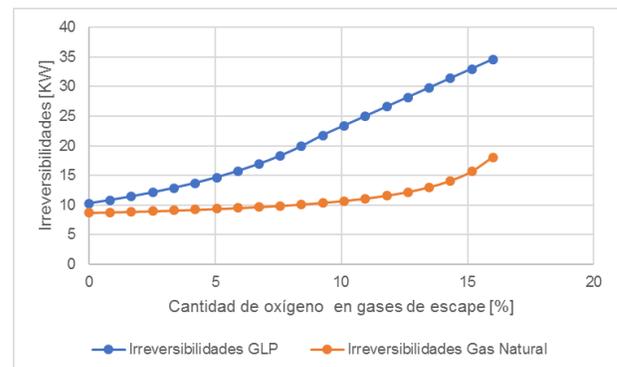
En la imagen 5 se observa que las irreversibilidades del proceso de combustión aumentan al incrementarse la temperatura de los gases de chimenea. Por otra parte, cuando el porcentaje de oxígeno presente en los gases de chimenea aumenta, las irreversibilidades también se incrementarán, lo cual se presenta en la imagen 6.

En todas las comparaciones realizadas entre el gas natural y el GLP en la misma caldera, los indicadores presentaron un mejor desempeño cuando el equipo opera con gas natural. Esto se debe a que en el análisis para el GLP se tomaron los mismos datos de parámetros como la

composición de los humos y las condiciones del fluido de trabajo, situación que en un entorno real podría variar, posicionando los indicadores del proceso con GLP por encima de los del gas natural.



**Imagen 5: Efecto de la temperatura de los gases de escape sobre las irreversibilidades de la combustión**



**Imagen 6: Efecto de la cantidad de O<sub>2</sub> en los gases de escape sobre las irreversibilidades de la combustión**

Se recomienda realizar más pruebas a la caldera, usando GLP y gas natural por separado. Con el objetivo de obtener información verídica que permita determinar con cuál de los dos combustibles el equipo es más eficiente.

La eficiencia energética y exergética que se determinan mediante la herramienta desarrollada, son solamente indicadores de que dan una idea global del estado en el que se encuentran las calderas pirotubulares. Si se quiere conocer en detalle su comportamiento energético es necesario realizar una metodología más profunda, que incluya, por ejemplo, un análisis de transferencia de calor entre los gases y el fluido de trabajo.

## CONCLUSIONES

Aunque el método de balance de energía (método indirecto) para la determinación de la eficiencia energética requiere más medidas, es más acertado que el método de entrada - salida (método directo), porque las cantidades medidas (pérdidas) representan sólo una pequeña fracción de la energía total.

El simulador en “EES” obtenido durante el desarrollo del trabajo, realiza el análisis energético y exergético de un equipo simultáneamente. Es fácilmente extrapolable a cualquier caldera pirotubular, además de que se puede trabajar con distintas composiciones de combustible; lo cual, hace que tenga mucha aplicabilidad en calderas de baja potencia.

Del análisis realizado, se concluye que la eficiencia energética es más sensible a variaciones de la temperatura de los gases de escape y el porcentaje de oxígeno presente en los gases secos. A medida que la temperatura de los humos se incrementa, la eficiencia energética y exergética disminuye; lo mismo ocurre a mayores concentraciones de oxígeno en los humos.

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a Dios por haberme permitido tener esta experiencia. A mis padres por su apoyo. A la Universidad de Guanajuato por la oportunidad de realizar una investigación. Al Ph.D Victor Hugo Rangel quien dirigió esta investigación y aportó su asesoría durante el desarrollo de la misma.

## REFERENCIAS

[1] BOSCH. (2012). Tecnología en calderas industriales. Lo que todos debemos saber. Santiago. Robert Bosch S.A. Recuperado de [https://www.bosch-climate.cl/files/Low\\_210x297\\_Folleto\\_1\\_Bosch\\_Calderas\\_Industriales\\_CL.pdf](https://www.bosch-climate.cl/files/Low_210x297_Folleto_1_Bosch_Calderas_Industriales_CL.pdf)

[2] Uceda Martínez, J. (2012). Calderas. En C. López Jimeno, Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes. (pp. 71-78). Móstoles, Madrid: Consejería de Economía y Hacienda. Comunidad de Madrid. Fenercom.

[3] Franz, Eberhard. (2012). Comparativa de caldera pirotubular y caldera acuotubular. Informe técnico. Alemania. Markus Tuffner, Bosch Industriekessel GmbH. Recuperado de [https://www.bosch-industrial.com/files/fb013\\_sp.pdf](https://www.bosch-industrial.com/files/fb013_sp.pdf)

[4] Lozano, M. A. & Valero, A. (1986). Evaluación de los rendimientos energético y exergético de calderas de vapor por pérdidas separadas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales ETSII. Revista ENERGÍA-enero-febrero, 109-128.

[5] Golato, M. A., Franck Colombres, F. J., Aso, G., Correa, C. A. & Paz, D. (2008). Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor. Revista industrial y agrícola de Tucumán, 85(2), 17-31. Recuperado de [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1851-30182008000200003&lng=es&tng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-30182008000200003&lng=es&tng=es).

[6] ATECYR. (2017). Guía técnica sobre procedimiento de inspección periódica de eficiencia energética para calderas. En IDAE, Ahorro y Eficiencia Energética en Climatización. (pp. 1-34). Madrid. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Recuperado de [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10540\\_Procedimientos\\_inspeccion\\_calderas\\_GT5\\_07\\_bb7a33cc.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540_Procedimientos_inspeccion_calderas_GT5_07_bb7a33cc.pdf)

[7] The American Society of Mechanical Engineers. (2009). An American National Standard. Fired Steam Generators - Performance Test Codes. ASME PTC 4-2008. (Revision of ASME PTC 4-1998). New York, USA. ASME. Recuperado de [http://nethd.zhongsou.com/wtimg/i\\_6253417/67829-ASME%20PTC%204-2008%20%E9%94%85%E7%82%89%E6%80%A7%E8%83%BD%E8%AF%95%E9%AA%8C%E8%A7%84%E7%A8%8B.pdf](http://nethd.zhongsou.com/wtimg/i_6253417/67829-ASME%20PTC%204-2008%20%E9%94%85%E7%82%89%E6%80%A7%E8%83%BD%E8%AF%95%E9%AA%8C%E8%A7%84%E7%A8%8B.pdf). ASME PTC 4 – 2008

[8] Kotas, T. J. (2012). The Exergy Method of thermal plant analysis. London, LDN: Exergon Publishing Company UK Ltd.