

Análisis de la Eficiencia Energética de una Caldera Industrial Alimentada por Leña
Análise da eficiência energética de uma caldeira industrial movida a madeira
Analysis of the Energy Efficiency of a Wood-Powered Industrial Boiler

Recibido: 06/09/2019 | Revisado: 11/09/2019 | Aceito: 17/09/2019 | Publicado: 04/10/2019

Raoni Caetano Barbieri

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9783-464X>

Universidade Federal de Viçosa, Brasil

E-mail: raoni.barbieri@ufv.br

Júlio Cesar Costa Campos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9488-8164>

Universidade Federal de São João Del Rei, Brasil

E-mail: juliomcampos20@gmail.com

Rogério Fernandes Brito

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6833-7801>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail rogbrito@unifei.edu.br

Antônio Marcos Siqueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9334-0394>

Universidade Federal de Viçosa, Brasil

E-mail: antonio.siqueira@ufv.br

Luciano José Minette

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2038-334X>

Universidade Federal de Viçosa, Brasil

E-mail: minette@ufv.br

Edison Javier Acevedo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4291-740X>

Universidad Industrial de Santander, Colombia

E-mail: j.edison.acevedo@gmail.com

Resumen

El objetivo de este trabajo fue caracterizar el rendimiento térmico de un generador de vapor con la intención de reducir el desperdicio de combustible y los costos involucrados. El potencial

económico y social de un país tiene gran relación con su reserva energética y la manera como es explotada. El desarrollo provoca impactos ambientales significativos, siendo que la mayoría se debe a la generación y al uso de energía, cuya demanda se ha tornado cada vez mayor. La metodología empleada fue el análisis de una caldera industrial del tipo pirotubular modelo ATA 14 H 3N, de la marca ATA, con capacidad de 33,3 kg/s de vapor y una presión de hasta 1034 kPa, alimentada por combustible sólido (leña de eucalipto en troncos). Los datos necesarios para el análisis fueron obtenidos por medio de mediciones en campo y de informes de análisis químicos elaborados por empresas especializadas. El resultado de la eficiencia térmica de la caldera fue obtenido, por el método indirecto, en torno al 74%. Se concluye que para mejorar la eficiencia de la caldera será necesario optimizar el exceso de aire, así como el aislamiento de más tramos de la línea de vapor y la instalación de purgadores de condensado en los puntos distantes del centro de generación de vapor.

Palabras clave: pirotubular; pérdidas energéticas; método indirecto.

Resumo

O objetivo deste trabalho foi caracterizar o desempenho térmico de um gerador de vapor com a intenção de reduzir o desperdício de combustível e os custos envolvidos. O potencial econômico e social de um país está intimamente relacionado à sua reserva de energia e à maneira como é explorada. O desenvolvimento causa impactos ambientais significativos, a maioria devido à geração e uso de energia, cuja demanda se torna cada vez maior. A metodologia utilizada foi a análise de uma caldeira industrial do tipo pirotubular ATA 14 H 3N, da marca ATA, com capacidade de 33,3 kg / s de vapor e pressão de até 1034 kPa, alimentada a combustível sólido (lenha eucalipto em troncos). Os dados necessários para a análise foram obtidos através de medições de campo e relatórios de análises químicas elaborados por empresas especializadas. O resultado da eficiência térmica da caldeira foi obtido, pelo método indireto, em torno de 74%. Conclui-se que, para melhorar a eficiência da caldeira, será necessário otimizar o excesso de ar, o isolamento de mais trechos da linha de vapor e a instalação de purgadores de condensado nos pontos distantes do centro de geração de vapor.

Palavras-chave: pirotubular; perdas de energia; método indireto.

Abstract

The objective of this work was to characterize the thermal performance of a steam generator with the intention of reducing the waste of fuel and the costs involved. The economic and social potential of a country is closely related to its energy reserve and the way it is exploited.

Development causes significant environmental impacts, the majority being due to the generation and use of energy, of which the demand has become increasingly large. The methodology used was the analysis of an industrial boiler of the ATA 14 H 3N pyrotubular type, of the ATA brand, with a capacity of 33.3 kg / s of steam and a pressure of up to 1034 kPa, fueled by solid fuel (eucalyptus firewood trunks). Data needed for the analysis were obtained through field measurements and chemical analysis reports prepared by specialized companies. The result of the thermal efficiency of the boiler was obtained, by the indirect method, around 74%. It has been concluded that in order to improve the efficiency of the boiler it will be necessary to optimize the excess air, as well as the isolation of more stretches of the steam line and the installation of condensate traps in distant points from the steam generation center.

Keywords: pirotubular; energy losses; indirect method.

1. Introducción

La economía mundial ha crecido un poco más del 3,0% al año desde 2010, y tiene una proyección de crecimiento de 3,5% y 3,6% para los años 2017 y 2018, respectivamente, (International Monetary Found, 2017). Si el aumento en el Producto Interno Bruto (PIB) del mundo mantiene este ritmo entre 2010 y 2030, se espera que la economía mundial se duplique para 2030. Sin embargo, el desarrollo económico tiende a estar acompañado por un aumento en la demanda de energía. Se espera que el consumo de energía crezca en casi un 39% para 2030, con un promedio de 2.5% por año entre 2000 y 2010, 2.0% por año entre 2010 y 2020 y 1.3% por año entre 2020 y 2030, (Alves, 2012). Sin embargo, en 2016, el consumo mundial de energía creció solo un 1%, casi la mitad del crecimiento promedio de los últimos diez años, (British Petroleum, 2017). La desaceleración en el crecimiento del consumo mundial de energía se debe al aumento de la eficiencia energética y refleja una disminución histórica en la intensidad energética (la cantidad de energía necesaria para aumentar una unidad de PIB), según (Alves, 2012; British Petroleum, 2017).

En Brasil, la demanda de energía tiene una tendencia a aumentar más del doble entre 2013 y 2050, pasando de 267 millones de toneladas de petróleo equivalente (toe) en 2013 a 605 millones de toe en 2050, un crecimiento promedio de 2.2 % por año, (Empresa de Pesquisas Energéticas, 2014). Es de destacar, en este período, la ganancia de espacio en la matriz energética nacional del gas natural y la electricidad, mientras que la proporción de derivados de petróleo y madera/carbón está disminuyendo, (Empresa de Pesquisas Energéticas, 2014).

El sector industrial es responsable de gran parte del consumo de energía del mundo; en los Estados Unidos, por ejemplo, representa hasta un tercio del consumo de energía, según (U.S. Department of Energy, 2008). En Brasil, la situación es similar: la industria contribuyó con un 34,4% en 2013 y un estimado de 33,4% en 2050, (Empresa de Pesquisas Energéticas, 2014). Además del alto consumo, la eficiencia del sector industrial es de aproximadamente el 49%. Aunque es mayor que la eficiencia del sector comercial (40%) y el transporte (19%), hay espacio para mejoras en el uso de energía en la industria, (Forman et al., 2016).

El desarrollo de este trabajo se basó en una investigación bibliográfica cuyo propósito fue encontrar una manera práctica y confiable de evaluar el rendimiento térmico de un generador de vapor tipo caldera piro-tubular que funcionaba con combustible sólido. Como las empresas generalmente no recopilan información sobre su consumo de combustible ni de la generación de vapor y se considera poco práctico realizar mediciones de estas variables, se dio preferencia a los métodos que calculan la eficiencia térmica por unidad de masa de combustible. Después de encontrar el método de evaluación de desempeño descrito por (ASME, 2008), se adoptaron algunas simplificaciones propuestas por (Bazzo, 1995; Centrais Elétricas Brasileiras, 2005). Los datos requeridos para los cálculos se obtuvieron mediante mediciones realizadas por el autor durante la operación de la caldera y los informes de análisis químicos realizados por compañías subcontratadas de acuerdo con INITIO. La resolución de los cálculos se realizó utilizando el software Engineering Equation Solver (EES), donde se programaron y resolvieron las ecuaciones.

En este contexto, el objetivo de este trabajo fue caracterizar el rendimiento térmico de un generador de vapor con la intención de reducir el desperdicio de combustible y los costos involucrados. Con los resultados de este trabajo, se obtuvo una mejora en la eficiencia energética y, en consecuencia, una reducción de los costos de combustible y una mayor conservación del medio ambiente.

2. Análisis Energético

2.1. Entalpia

La energía interna (u), presión (p) y volumen específico (v) son propiedades termodinámicas, por lo que son funciones de estado.

Se puede establecer una relación entre estas propiedades, de acuerdo con la ecuación (1) definida por (Çengel et al., 2006; Moran et al., 2018; Rolle, 1999), donde se llama la propiedad termodinámica entalpía (h).

$$h = u + p v \quad (1)$$

2.2. Principios de conservación de masa y energía para volumen de control

Al igual que la masa, la energía es una propiedad que se conserva. Se establece una relación entre estos principios, de acuerdo con la ecuación (2), definida por (Çengel et al., 2006 ; Moran et al., 2018; Rolle, 1999).

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum_e m \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_s m \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (2)$$

siendo \dot{Q}_{VC} e \dot{W}_{VC} la velocidad de transferencia de energía en forma de calor y trabajo, respectivamente, que atraviesan el volumen de control, $\frac{dE_{VC}}{dt}$ la variación de energía en el interior del volumen de control, $m \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)$ son flujos de energía que entran y salen a través de la superficie de control.

2.3. Generadores de vapor

El generador de vapor es un tipo específico de intercambiador de calor que almacena un fluido de trabajo presurizado. Este equipo utiliza una fuente de calor para convertir agua líquida en vapor. Este sistema se puede utilizar en industrias como: sistemas de energía geotérmica, sistemas de energía solar y plantas de energía nuclear, (Bahmanyar y Talebi, 2019). En general, las principales ventajas en el uso de vapor son: fácil de encontrar y a bajo costo, ampliamente disponible en el entorno industrial; el vapor es capaz de almacenar una gran cantidad de energía por unidad de masa (alto calor específico); La relación de temperatura y presión que se puede obtener con la tecnología actual permite su uso en un amplio rango de temperatura, desde agua calentada a 40 ° C hasta vapor sobrecalentado a más de 370 ° C, (Bazzo, 1995; Bizzo, 2003).

Las calderas con relación a la posición relativa entre el agua y los gases de combustión, se clasifican como: Piro-tubulares, los gases de combustión circulan dentro de tubos rodeados

por el agua que sera calentada. Acuotubulares, el agua a ser vaporizada circula dentro de tubos que son calentados por los gases de combustion en su exterior.

En este trabajo las calderas pirotubulares son objeto de estudio.

2.4. Calderas pirotubulares

Las calderas pirotubulares son mayoritariamente utilizadas donde se requiere vapor saturado y en operaciones de pequeño y medio porte. El uso más comum de este tipo de caldera es en operaciones que requieren capacidad de hasta 166,7 kg/s de vapor y presiones de hasta 1000 kpa, pudiendo llegar a 2000 kPa en equipos especiales, (Bazzo, 1995; Bizzo, 2003).

Las ventajas de las calderas pirotubulares están relacionadas con su bajo costo, su construcción simple y su pequeño espacio ocupado, siendo, además, posible usar calderas verticales para ahorrar aún más espacio (Bazzo, 1995; Centrais Elétricas Brasileiras, 2005; Senger, 2015).

Las calderas de pirotubulares tienen una eficiencia térmica en el rango de 75%, según (ASME, 2008), y es improbable que obtengan valores más altos, incluso en las mejores condiciones de operación y mantenimiento, (Centrais Elétricas Brasileiras, 2005).

2.5. Combustión

La forma común de obtener la energía necesaria para la generación de vapor en las calderas es quemando un combustible con aire atmosférico. Esta reacción química se llama combustión. Es importante estudiar la combustión por su influencia directa en el rendimiento térmico del equipo y la contaminación ambiental causada tanto por la emisión de gases y partículas durante la combustión como por la extracción de combustible en la naturaleza.

El proceso de combustión se caracteriza por una reacción química muy rápida entre el combustible y el oxidante acompañada por la liberación de calor (exotérmica), (Junior et al., 2018; Lagemann, 2016; Turns, 2013).

2.6. Cálculos de Combustión

Se considera que la mayoría de los combustibles utilizados en la industria están compuestos básicamente por carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno, (Lagemann, 2016).

En el proceso de combustión real, los elementos carbono, hidrógeno y azufre reaccionan oxígeno liberando energía, como se evidencia en la tabla 1, según (Bazzo, 1995; Centrais Elétricas Brasileiras, 2005; Bizzo, 2003; Lagemann, 2016).

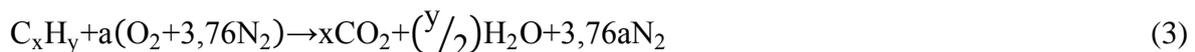
Tabla 1 - Reacciones de combustión de los elementos químicos más comunes en los combustibles.

Reactivos → Productos + Calor	
Reacciones	Combustión
$C+O_2 \rightarrow CO_2+33939 \text{ kJ/kg C}$	(Oxidación completa)
$C+\frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO+10056 \text{ kJ/kg C}$	(Oxidación incompleta)
$2H_2+O_2 \rightarrow 2H_2O_{(L)}+142879 \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}}$	(Oxidación completa)
$S+O_2 \rightarrow SO_2+9218 \text{ kJ/kg S}$	(Oxidación completa)

2.7. Estequiometria

La combustión requiere una cantidad específica de oxígeno, es decir, una cantidad mínima de aire para que se produzca la reacción química. La cantidad de aire depende del combustible utilizado y de las condiciones en que se produce la reacción. Dependiendo de la cantidad de aire disponible, la combustión puede ser completa o incompleta. En la combustión completa, todos los reactivos se combinan con oxígeno, creando productos químicamente estables. Cuando no hay suficiente oxígeno durante la reacción, la combustión se caracteriza por ser incompleta, produciendo productos menos estables y menos energía en forma de calor, (Junior et al., 2018; Lagemann, 2016; Turns, 2013).

Considerando un combustible de hidrocarburo dado por la ecuación 3, de acuerdo con Junior et al. (2018), la relación estequiométrica se puede expresar mediante:



Siendo $a = x + \frac{y}{4}$.

2.8. Análisis de la eficiencia energética en la caldera

La conservación de energía y la eficiencia energética son prioridades en el diseño y operación de la caldera. Determinar la eficiencia de la caldera es un desafío que solo se puede resolver con pruebas. Por lo tanto, es extremadamente difícil utilizar un procedimiento estandarizado para el control en tiempo real de la eficiencia de la caldera o se requiere una inversión considerable para equipar la caldera con instrumentos adicionales de medición y cálculo computacional, (Pyatalov et al., 2014).

El método utilizado en este trabajo para calcular la eficiencia global de la caldera en estudio se denomina método del balance inverso, de acuerdo con la ecuación (4).

$$\eta = 100 - q_1 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 - q_7 \quad (4)$$

Donde q_1 es la pérdida de calor por los gases de escape, q_2 es la pérdida de calor por la combustión de hidrógeno, %, q_3 es la pérdida de calor por la humedad del combustible, %, q_4 es la pérdida de calor de la humedad del aire, %, q_5 , pérdida de calor de la combustión química incompleta, %, q_6 , es la pérdida por transferencia de calor de la combustión por causas mecánicas, %, y q_7 es la pérdida por la temperatura de las cenizas.

Las pérdidas de calor analizadas por el método indirecto se calcularon de acuerdo con lo que permite el análisis por unidad de masa de combustible. Las ecuaciones necesarias para calcular el rendimiento térmico se programaron en el software Engineering Equation Solver (EES) utilizando las propiedades de la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de operación de la instalación.

Leña de eucalipto	
Presión externa de la caldera	101,3 [kPa]
Presión interna de la caldera	689,5 [kPa]
Temperatura del agua de alimentación	40° [C]
Temperatura de salida del vapor	169,9 ° [C]
Temperatura del condensado	169,9 ° [C]
Temperatura de referencia	25° [C]
Presión de referencia	101,3 [kPa]

Fuente: elaboración propia.

La pérdida de calor debida a los gases de combustión secos (q_1) es mayor, siendo la responsable de la disminución de la eficiencia de la caldera. Se calcula según la ecuación 5.

$$q_1 = \frac{m_{GS} \times c_{p,seco} \times (T_{Gases\ seco} - T_{ambiente})}{PCI} \quad (5)$$

La pérdida de calor por la combustión de hidrógeno (q_2) se determinó a partir de la ecuación (6).

$$q_2 = \frac{9 \times H_2 \times (584 + c_{p,vapor} \times (T_{Gases\ seco} - T_{ambiente}))}{PCI} \quad (6)$$

La pérdida de calor por humedad del combustible (q_3) se estimó de acuerdo con la ecuación 7.

$$q_3 = \frac{W_{comb} \times (584 + c_{p,vapor} \times (T_{Gases\ seco} - T_{ambiente}))}{PCI} \quad (7)$$

La pérdida de calor debida a la humedad del aire (q_4) se calculó de acuerdo con 8.

$$q_4 = \frac{100 \times m_{ar,real} \times W_{ar} \times c_{p,vapor} \times (T_{Gases\ seco} - T_{ambiente})}{PCI} \quad (8)$$

La pérdida de calor debida a la combustión incompleta del combustible (q_5) se estimó en la ecuación 9.

$$q_5 = \frac{5744 \times (\%CO) \times c}{(\%CO + \%CO_2) \times PCI} \quad (9)$$

La pérdida por transferencia de calor y purgas (q_6) no fue calculada debido a su complejidad. El cálculo se complica debido a que la simple aplicación de los fundamentos básicos en la transferencia de calor no es suficiente, debido a las configuraciones irregulares y únicas de cada generador y al alto número de variables involucradas en el proceso, (Bazzo, 1995). Por lo tanto, según las recomendaciones Saidur et al. (2010), especifica que las pérdidas por radiación y convección representan una pérdida máxima de calor del 2.00% y que las pérdidas de calor por purgas de condensado están en el rango de 1.00% a 2.00%, estos dos tipos de pérdidas para la caldera analizada se estimaron en 4.00%.

Las pérdidas por la temperatura de las cenizas (q_7) se calcularon de acuerdo con la ecuación (10).

$$q_7 = \frac{z \times 1170}{\text{PCI}} \quad (10)$$

Donde "z" corresponde al porcentaje de ceniza, según la tabla 3.

Las ecuaciones de la 5 a la 10 tienen en cuenta el valor del poder calorífico inferior, PCI, de la leña. El valor obtenido, según Centrais Elétricas Brasileiras (2005), es de 12.970,4 kJ/kg.

3. Metodología

La generación de vapor saturado en la empresa se realiza mediante una caldera pirotubular cilíndrica horizontal, con un horno externo de tipo acuatubular. La caldera es de marca ATA Combustion Technical S.A., tipo ATA 14, modelo H-3N. El calentamiento se realiza en tres pasos, el primero por horno y tubo principal, y el segundo y tercero por haces tubulares. El agua de alimentación es suministrada por dos bombas centrífugas que funcionan alternativamente y una inyectora de emergencia. Las bombas extraen el agua de un tanque donde se precalienta a 40 ° C. La extracción es mixta: naturalmente por una chimenea de 8000 mm de altura y forzada mediante la activación automática de un extractor controlado por un presostato. Este modelo tiene una Presión Máxima de Trabajo Permitida (PMTP) de 150 psi. La caldera funciona la mayor parte del tiempo por debajo de su capacidad máxima de 2000 kg/h de vapor.

El vapor de la empresa se utiliza en el calentamiento de agua para lavandería, teñido de tejidos, prensas de planchado y planchas de la línea de producción. La terminal de uso más cercana está aproximadamente a 100 m de la caldera y la más alejada a 250 m. El vapor generado se transporta a los terminales por medio de tubos con aislamiento no continuo, no estando aislada su mayor extensión. El conjunto horno-caldera se muestra en la figura 1.

Figura 1. Visión general de la caldera y su horno externo.



Fuente: elaboración propia.

La caracterización de la eficiencia térmica fue iniciada por la investigación en referencias bibliográficas (Quirino et al., 2004; Santos et al., 2012; Godoy, 2016), en relación con el combustible utilizado en la empresa, la madera de eucalipto.

De esta manera, se recopilaban datos sobre el análisis elemental, inmediato y del poder calorífico superior del combustible en estudio. Los datos se agruparon en la tabla 3.

Tabla 3. Características del combustible

Leña de eucalipto	
Parametro	Valor [Unidade]
Poder Calorífico Superior	19.225,48 [kJ/Kg]
Densidad ²	507 [kg/m ³]
Temperatura	25° [C]
Humidade	30 [%]
Carbono	50,2 [%]
Oxigeno	43,4 [%]
Hidrogeno	6,1 [%]
Nitrógeno	0,2 [%]
Cenizas	0,2 [%]
Carbono Fijo ³	17,27 [%]
Material Volátil ³	83,24 [%]

Fuente: elaboración propia.

Las medidas fueron tomadas durante el funcionamiento de la caldera. En el estudio de los registros de funcionamiento de la caldera, se obtuvieron los datos sobre la producción de vapor y la temperatura de los gases de escape.

Se usó un termómetro instalado y fijado en la salida de la chimenea para medir la temperatura de los gases de combustión. Se utilizó un termómetro infrarrojo digital para determinar la temperatura del agua de alimentación, por lo que fue posible calcular la entalpía del agua que entra en la caldera.

La presión dentro de la caldera fue determinada por los manómetros de monitoreo de caldera requeridos por el NR-13. Con estos datos, se determinaron la entalpía y la temperatura del vapor generado, produciendo la caldera solo vapor saturado.

La compañía proporcionó informes técnicos recientes con mediciones de la constitución de los gases de combustión, de esta manera fue posible conocer la constitución de los gases de combustión.

Las mediciones se realizaron con la caldera en funcionamiento y cuando estaba en condiciones estables y en régimen de funcionamiento permanente. Los datos se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Características de los gases de combustión.

Leña de eucalipto	
Temperatura de los gases de combustión en la base de la chimenea	190,0° [C]
Contenido de gas oxígeno (O ₂)	14,33 [%]
Contenido de gas dióxido de carbono (CO ₂)	5,87 [%]
Contenido de gas monóxido de carbono (CO)	0,01 [%]

Fuente: elaboración propia.

No fue posible determinar la cantidad gastada y los flujos de combustible de la caldera, ya que la empresa no tiene antecedentes de consumo o compra de combustible y la demanda de la caldera varía significativamente durante el año. Para estos casos, se recomienda el cálculo por unidad de masa de combustible, según (Bazzo, 1995). Por lo tanto, los cálculos de eficiencia térmica se realizarán en relación con cada unidad de combustible.

A partir de los datos obtenidos del análisis químico elemental del combustible, se calculó la cantidad estequiométrica de aire (m_{ar}^*) necesaria para realizar la combustión completa de la leña. Según Bazzo (1995), el aire teórico necesario para la cocción completa viene dado por la ecuación 11.

$$m_{ar}^* = 138,2 \times \left[\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right] \quad (11)$$

Siendo m_{ar}^* dado en $\text{kg}_{ar} / \text{kg}_{comb}$ y los valores de (C, H, S, O) se presentan en la tabla

2. Estos valores se refieren al contenido del elemento por kg de combustible en $\text{kg} / \text{kg}_{comb}$.

En la práctica es necesario proporcionar un volumen de aire, V_{ar} , mayor que el volumen de aire teórico, V_{ar}^* , necesario para lograr la combustión completa del combustible. Esto se debe a la dificultad de asegurar una mezcla perfecta de aire y combustible y al tiempo limitado para que permanezca en la cámara de combustión, (Cortez et al., 2014). En este contexto, el concepto de exceso de aire requerido para la combustión es fundamental para el correcto funcionamiento de la caldera. Según Bazzo (1995) para el combustible leña el exceso de aire estaría en el rango de 30 a 60% con quema en la parrilla.

Por lo tanto, el coeficiente de exceso de aire, α , es la relación entre la masa real de aire, m_{ar} , y la masa teórica de aire, m_{ar}^* , necesaria para la combustión, representada en la ecuación 12, según (Lagemann, 2016).

$$\alpha = \frac{m_{ar}}{m_{ar}^*} \quad (12)$$

El coeficiente de exceso de aire, α , puede expresarse en fracción o porcentaje, y se determina a la salida de la caldera o del horno.

Otra fórmula alternativa para el cálculo del coeficiente de exceso de aire, α , se presenta en (Cortez et al., 2014), donde se tuvieron en cuenta los informes de análisis químicos de la empresa y se obtuvieron los datos relativos al contenido de gas oxígeno (O_2) presente en los gases de chimenea, según la tabla 4. Esta fórmula se representa en la ecuación 13.

$$\alpha = \frac{21 - 0,02 \times (\%O_2)}{21 - (\%O_2)} \quad (13)$$

Segun ASME (2008), el coeficiente de exceso de aire, α , puede ser calculado con la ecuación 14.

$$\alpha = \frac{\%O_2}{21 - \%O_2} \quad (14)$$

Otra cantidad a considerar en el análisis de combustión se refiere a la masa de gases secos, m_{gs} . La masa de gas seco producida por la combustión de cada kilo de combustible se determina mediante el procedimiento siguiente, donde la suma de los productos de combustión del combustible (masa de CO_2 , O_2 y N_2 del combustible y N_2 del aire) es equivalente, según (ASME, 2008), representada en la ecuación 15.

$$m_{gs} = \frac{C*44}{12} + O + \frac{N}{100} + 0,77*m_{ar} + (m_{ar} - m_{ar}^*)*0,23 \quad (15)$$

Siendo, C, O, N los elementos químicos referidos al combustible en porcentaje.

4. Resultados y Discusión

La Tabla 5 representa los resultados obtenidos durante el análisis de la caldera en estudio, a partir de los cálculos de las ecuaciones 5 a 15.

Tabela 5. Resultados encontrados a través de la resolución de ecuaciones de balance de masa y energía.

Propiedad	Valor [Unidad]
Masa de aire teórico	$m_{ar,est} = 4,196$ [kg/kg de comb]
Coefficiente de exceso de aire, eq. (14)	$\alpha = 214,8$ [%]
Masa de aire real	$m_{ar,real} = 13,21$ [kg/kg de comb]
Masa de gas seco de combustión	$m_{GS} = 13,54$ [kg/kg de comb]
Pérdida por gases de combustión secos	$q_1 = 11,18$ [%]
Pérdida por gases de combustión húmedos	$q_2 = 5,50$ [%]
Pérdida debida a la humedad del combustible	$q_3 = 4,30$ [%]
Pérdida de humedad del aire de alimentación	$q_4 = 0,25$ [%]
Pérdida por combustión incompleta de combustible	$q_5 = 0,08$ [%]
Pérdidas por radiación y convección	$q_6 = 4,000$ [%]
Pérdida por cenizas no quemadas	$q_7 = 0,04$ [%]
Pérdidas totales	$q_{perdas} = 25,35$ [%]
Rendimiento térmico	$\eta_M = 74,65$ [%]

Fuente: elaboración propia

De la tabla 5 se evidencia que la caldera analizada presenta un alto coeficiente de exceso de aire, lo que perjudica la eficiencia térmica, ya que reduce la temperatura de la llama, introduce grandes cantidades de nitrógeno y humedad en la cámara de combustión, e incrementa el arrastre del combustible no quemado a través de la chimenea. Además, la concentración de oxígeno en los gases de combustión (~15%) es alta en comparación con los valores encontrados durante la investigación de la literatura que variaban entre 4% y 8%, lo que resulta en un alto exceso de aire. Un exceso de aire del 114,84% es superior al recomendado para los combustibles sólidos, según Bazzo (1995), pero se explica por las infiltraciones de aire y el

funcionamiento ininterrumpido del ventilador del sistema de escape forzado que está instalado en el generador de vapor.

La pérdida debida a los gases de combustión secos (q_1) es la mayor, 11,18%, por lo que es más decisiva para el rendimiento. También confirmado en trabajos de (Patel y Modi, 2016).

La combustión del hidrógeno provoca una pérdida de calor debido a la formación de agua. Entonces, el agua es evaporada desperdiciando energía en forma de calor latente. La pérdida de calor por combustión de hidrógeno (q_2) fue de 5,50%.

El combustible tiene humedad que añade agua a la combustión. Esta agua utiliza parte del calor generado en forma de calor sensible y latente para calentarse y evaporarse. El calor perdido por la humedad del combustible (q_3) fue estimada en 4,30%.

Así como el combustible húmedo añade una pérdida en el proceso debido a la presencia de agua, el aire húmedo añade agua que será evaporada por la combustión. La pérdida de calor de la humedad del aire (q_4) se calculó en un 0,25%.

Los productos formados por una combustión incompleta pueden reaccionar con el oxígeno y liberar una cantidad adicional de energía, sin embargo, cuando esto no ocurre, se produce una pérdida de calor. La pérdida de calor por combustión incompleta de combustible (q_5) se estimó en un 0,08%.

La pérdida por transferencia de calor y purgas (q_6) es difícil de calcular debido a su complejidad, por lo que se estimó que correspondía al 4,00%. La caldera tiene una baja frecuencia de purga y la temperatura del condensado purgado es relativamente baja, por lo que las pérdidas son insignificantes y pueden incluirse en las pérdidas por transmisión de calor, (Bazzo 1995).

Un porcentaje del carbono del combustible no puede reaccionar con el oxígeno y queda atrapado en las cenizas, por lo que no libera energía. Las pérdidas por temperatura de las cenizas (q_7) se calcularon en aproximadamente 0,04%. Esta pérdida es pequeña porque el combustible utilizado (leña) tiene una baja concentración de cenizas (0,2%).

Los resultados indican que la mayor pérdida del sistema se debe a los gases de combustión secos, con el 44% de las pérdidas totales, seguido de la pérdida de humedad en los gases de chimenea, con el 22% de la pérdida total. El menor desperdicio se debió a las cenizas no quemadas.

5. Conclusiones

De los argumentos presentados, de su discusión y de los antecedentes de la literatura expuestos a través del artículo, se pueden obtener las siguientes conclusiones principales:

- i. El generador de vapor presentó una eficiencia térmica del 74,65%;
- ii. Las mayores pérdidas de calor se encontraron en los gases de combustión que salen de la chimenea, con un 11,18% aproximadamente;
- iii. El exceso de aire por encima del mínimo necesario, 214,8%;
- iv. Pérdidas por radiación y convección 4,00 %;
- v. Pérdidas totales 25,35 %.

6. Sugerencia para Trabajos Futuros

- Diseñar un controlador eficiente para el suministro de aire de combustión, para optimizar el exceso de aire actual y evitar la reducción de la temperatura de las llamas;

- Estimar el rendimiento del sistema completo de generación de vapor, incluyendo no sólo las pérdidas ya calculadas de la caldera, sino también de las líneas de transmisión y las de los puntos de uso de vapor;

- Determinar el espesor económico del aislamiento térmico y los locales adecuados para la instalación de purgadores en las líneas de vapor de la empresa;

- Evaluar la inversión financiera de los cambios necesarios para elevar el rendimiento térmico de la caldera.

7. Agradecimientos

Los autores del trabajo agradecen a FAPEMIG - Foundation for Research Support of the State of Minas Gerais y al CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico y al departamento de Engenharia de Produção e Mecânica, Brazil.

Referencias

Alves, J. E. D. (2012). O crescimento da demanda de energia no mundo. EcoDebate. Recuperado de <https://www.ecodebate.com.br/2012/03/12/o-crescimento-da-demanda-de-energia-no-mundo-artigo-de-jose-eustaquio-diniz-alves/>. Acesso em: 27 out. 2017.

ASME. (2008). Fired steam generators: Performance test codes. ASME PTC 4-2008. Nova Iorque. Recuperado de <https://www.worldcat.org/title/fired-steam-generators-performance-test-codes-asme-ptc-4-2008-revision-of-asme-ptc-4-1998/oclc/808490437>. Acesso em: 12 nov. 2017.

Bahmanyar, M.E., & Talebi, S. (2019). A performance analysis of vertical steam generator using an entropy generation method. *Annals of Nuclear Energy* v. 125, pp. 212-221. doi: 10.1016/j.anucene.2018.10.055. Acesso em: 12 ago. 2019.

Bazzo, E. (1995). Geração de Vapor. 2ª Ed. Florianópolis, Santa Catarina: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, pp. 01-216.

Bizzo, W. A. (2003). Geração, distribuição e utilização de vapor. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, pp.01-128.

British Petroleum. (2017). BP statistical review of world energy. 66ª Ed. Londres. Recuperado de <http://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2017.

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2006). Termodinâmica. 5ª Ed. São Paulo: McGraw-Hill, pp. 01-800.

Centrais Elétricas Brasileiras. (2005). Eficiência energética no uso de vapor. Rio de Janeiro: Eletrobrás, pp. 01-196. Recuperado de <https://bucket-gw-cni-static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/LivroVapor.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2017.

Cortez, L. A. B., Lora, E. E. S., & Gómez, E. O. (2014). Biomassa para Energia. 3ª reimpressão. Campinas: Editora da Unicamp, pp. 11-733.

Empresa de Pesquisas Energéticas. (2014). Nota técnica DEA 13/14: Demanda de energia 2050. Estudos de Demanda de Energia. Rio de Janeiro. Recuperado de <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA%2013-14%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2017.

Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R., & Meyer, B. (2016). Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 57, pp. 1568–1579. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.192. Acesso em: 12 nov. 2017.

Godoy, J. DE F. A. (2016). Resíduos de Floresta Tropical para a Produção de Biomassa como Fonte de Energia (Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais). Universidade Federal de Mato Grosso, Mato Grosso, Brasil. Recuperado de <https://www1.ufmt.br/ufmt/unidade/userfiles/publicacoes>. Acesso em: 12 nov. 2017.

International Monetary Found. (2017). World economic outlook update. A firming recovery. World Economic Outlook (WEO). Washington, DC. Recuperado de <http://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2017/07/07/world-economic-outlook-update-july-2017>. Acesso em: 12 nov. 2017.

Junior, J. A. de C., Zevallos, A. A. M., Rodriguez, C. J. C., & Mcquay, M. Q. (2018). Combustão Aplicada. Florianópolis-SC: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, pp. 01-372.

Lagemann, V. (2016). Combustão em Caldeiras Industriais: óleos & gás combustível. 1ª. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, pp. 01-304.

Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). Princípios de Termodinâmica para Engenharia. 8ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, pp. 01-819.

Patel, D. T, Modi, K. V. (2016). Performance Evaluation of Industrial Boiler by Heat Loss Method. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(3). Recuperado de http://ijariie.com/AdminUploadPdf/Performance_evaluation_of_industrial_boiler_by_heat_loss_method_ijariie2348.pdf >. Acesso em: 12 nov. 2017.

Pyatalov, A. V., Malyshev, I. V., Shevtsov, S. A., & Yakovlev, N. G. (2014). Determining the Gross Efficiency of a Boiler in Real Time. *Power Technology and Engineering*, 48(1), 24-26. doi: 10.1007/s10749-014-0481-2. Acesso em: 12 ago. 2019.

Quirino, W. F., Vale, A. T., Andrade, A. P. A., Abreu, V. L. S., & Azevedo, A. C. S. (2004). Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. *Biomassa & Energia*, 1(2), 173-182. Recuperado de <https://scholar.google.com.br/citations?user=7pCq8r8AAAAJ&hl=pt-BR>. Acesso em: 12 nov. 2017.

Rolle, K.C. (1999). *Thermodynamics and Heat Power*. 5ª Ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, pp. 01-568.

Saidur, R., Ahamed, J.U., & Masjuki, H. H. (2010). Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers. *Energy Policy*, 38(5), 2188-2197. Acesso em: 12 ago. 2019.

Santos, L. C., Carvalho, A. M. L., Pereira, B. L. C., Oliveira, A. C., Carneiro, A. C. O., & Trugilho, P. F. (2012). Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. *Revista Árvore*, 36(5), 971-980. doi: 10.1590/S0100-67622012000500019. Acesso em: 12 ago. 2019.

Senger, R. (2015). *Análise do rendimento térmico de uma caldeira mista alimentada com lenha em toras (Trabalho de conclusão de curso)*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa. 63f.

Turns, S. R. (2013). *Introdução à Combustão: Conceitos e Aplicações*. 3ª Ed. Porto Alegre-RS: McGraw-Hill, pp. 01-393.

U.S. Department of Energy. (2008). *Waste heat recovery: Technology and opportunities in U.S. Industry*. Washington, DC. Elaborado por: BCS, Incorporated. Recuperado de https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf. Acesso em: 12 nov. 2017.

Porcentaje de contribución de cada autor al manuscrito:

Raoni Caetano Barbieri - 40%

Júlio Cesar Costa Campos - 30%

Rogério Fernandes Brito - 10%

Antônio Marcos Siqueira - 7%

Luciano José Minette - 8%

Edison Javier Acevedo - 5%