

Determinación de la eficiencia energética y emisión de gases contaminantes en calderas de vapor de la ciudad de Loja, año 2015
Determination of energy efficiency and emission of polluting gases in steam boilers in the city of Loja, 2015

Determinación de la eficiencia energética y emisión de gases contaminantes en calderas de vapor de la ciudad de Loja, año 2015

Determination of energy efficiency and emission of polluting gases in steam boilers in the city of Loja, 2015

Thuesman Montaña Peralta ¹
Milton León Tapia
José Ochoa Alfaro ²
Edwin Paccha Herrera
Thuesman Montaña Ramón
José Ochoa Ordóñez

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA, ECUADOR

Fecha de recepción: 28 de marzo de 2017.

Fecha de aprobación: 27 de febrero de 2018.

Resumen

El presente artículo trata acerca del cálculo de la eficiencia energética en las calderas de vapor y la estimación de las emisiones gaseosas de las industrias de producción y servicios existentes en la ciudad de Loja. Para el efecto, durante el periodo de enero a abril de 2015, se realizaron varias mediciones de los componentes de los gases en la chimenea de cada caldera usando un analizador de gases, además se midieron otros parámetros como temperatura, presión, velocidad en distintos puntos de interés. Aplicando el método indirecto, los resultados mostraron que la eficiencia energética de las calderas se encuentra en un rango admisible con un promedio en torno al 88%, a excepción de un caso que presentaba

¹ thuesmon@yahoo.es
² jose.ochoa@unl.edu.ec

una baja eficiencia debido a un defecto en el aislamiento de la caldera y que luego se corrigió. En cuanto a las emisiones, el parámetro más representativo fue el NO_x, que estaba fuera de los límites admisibles de la norma ecuatoriana de control ambiental.

Palabras clave

Calderas vapor, emisiones, eficiencia energética.

Abstract

This article is about the calculation of energy efficiency in steam boilers and the estimation of gaseous emissions from the production and service industries in the city of Loja. For this purpose, during the period from January to April 2015, several measurements were made of the gas components in the chimney of each boiler using a gas analyzer, and other parameters were measured such as temperature, pressure, and speed at different points of interest. Applying the indirect method, the results showed that the energy efficiency of the boilers is in an acceptable range with an average around 88%, except for a particular case that presented a low efficiency due to a defect in the insulation of the boiler, which was later corrected. Regarding emissions, the most representative parameter was NO_x, which was outside the permissible limits of the Ecuadorian standard of environmental control.

Keywords

Steam boilers, emissions, energy efficiency.

Introducción

En el Ecuador, no se están aplicando normas que exijan la continua evaluación de la eficiencia energética de los calderos de vapor ni sobre el control de las emisiones gaseosas, aunque el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) y el Ministerio de Ambiente, han implementado políticas para hacer uso eficiente de la energía y controlar los posibles daños ambientales. Por tal motivo, son las propias empresas, las encargadas de velar por el aprovechamiento energético de sus recursos a través de la contratación de auditorías o estudios técnicos.

La ciudad de Loja, con una población aproximada de 214000 habitantes, posee en funcionamiento seis empresas (incluyendo dos hospitales) que hacen uso de calderas destinadas a la producción de vapor para sus actividades diarias. Las fuentes de combustión son los principales causantes de la contaminación ambiental; y en este ámbito, el trabajo se enfoca en la eficiencia energética de las fuentes de combustión fijas (calderas). Uno de los parámetros más importantes para evaluar el funcionamiento de una caldera es su rendimiento, que se define como la relación entre el calor útil producido y la energía introducida con el combustible. (Aranda, et. al, 2010)

El presente estudio es un componente del proyecto “Evaluación de la contaminación atmosférica en la ciudad de Loja y su mitigación con energías renovables”, que se está ejecutando en la referida ciudad y a través del mismo, se pretende determinar cuál es el nivel de emisión

de gases contaminantes emanados por fuentes de combustión fijas y cuál es la eficiencia energética de los equipos que producen dichas emanaciones.

En el campo ambiental, esta investigación, constituye el punto de partida para estimar el nivel de concentración de los gases en un período de tiempo determinado y así determinar las inmisiones de contaminantes en la atmósfera, para lo cual, será necesario considerar las condiciones climatológicas del lugar de estudio.

En el ámbito de la eficiencia energética, este estudio aporta una alternativa a los métodos de cálculo de la eficiencia de las calderas y por ende, la aplicación de las respectivas medidas para reducir el consumo de combustible y emisiones gaseosas.

Metodología

Materiales

El proceso de medición se realizó en ocho calderas tipo piro-tubular, que se alimentan con combustible diesel (tipo Premium) con los siguientes equipos y materiales: analizador de gases (testo 350XL), cámara termográfica, tubo pitot, termómetro infrarrojo, barómetro, flexómetro.

Métodos

El cálculo de la eficiencia de las calderas η , se realizó aplicando el método indirecto, según la ecuación:

$$\eta = 100 - \sum q_p$$

Donde $\sum q_p$ es la sumatoria de las pérdidas térmicas en porcentaje (%).

Boroto& Rubio, (2007), establecieron un método abreviado para el cálculo de las pérdidas térmicas, representadas por la suma de: pérdidas de calor en los gases de escape (q_1), pérdidas de calor por combustión incompleta (q_2), pérdidas por combustible no quemado (q_3), pérdidas de calor por radiación y convección (q_4) y pérdidas por purga (q_5). Las ecuaciones para el cálculo de la eficiencia y las pérdidas térmicas, constan en la Tabla 1.

Tabla 1: Ecuaciones de cálculo de la eficiencia de las calderas

Ecuaciones de pérdida de calor [%]
$q_1 = \frac{K(T_{gases} - T_{ambiente})}{CO_2 + CO}$ <p>$K = 0.495 - 0.00693CO_2$, para gasóleo</p> <p>T_{gases} : Temperatura de los gases de escape (°C) CO_2, CO: Porcentaje en volumen de dióxido de carbono y monóxido de carbono contenido en los gases de escape</p>
$q_2 = \frac{V_{gs}(126CO + 108H_2 + 358CH_4)}{Q_d} \times 100$ $Q_d = PCI + Q_{fc} + Q_{pca} + Q_{vat}$ <p>Observaciones</p> <p>V_{gs} : Volumen de gases secos (m³N/kg) Q_d : Calor disponible (kJ/kg) H_2, CH_4: Porcentaje en volumen de hidrógeno y metano contenido en los gases de escape PCI : Poder calorífico bajo del combustible, (kJ/kg). Q_{fc} : Calor físico del combustible, (kJ/kg). Q_{pca} : Calor añadido en el pre calentador de aire, (kJ/kg). Q_{vat} : Calor suministrado con el vapor de atomización(kJ/kg).</p>

$$q_3 = \frac{32650A^c}{Q_d} \left[a_e \left(\frac{C_e}{100 - C_e} \right) + a_v \left(\frac{C_v}{100 - C_v} \right) \right]$$

$$a_e = \frac{G_e(100 - C_e)}{A^c \times G_c}$$

A^c: Porcentaje de cenizas (%)

G_c: Gasto de combustible (kg/h)

a_e, a_v : Fracciones de la ceniza del combustible que queda en los residuos del horno y que escapa del horno con los residuos volátiles, respectivamente. $a_e + a_v = 1$.

C_e, C_v : Contenido de combustible en los residuos del horno y volátiles (%).

$$q_4 = q_{4nom} \times \frac{\phi_n}{\phi_r}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{4nom} = \frac{QTrc \times 100\%}{Qsum} \\ QTrc = Q_{frontal} + Q_{posterior} + Q_{envolvente} \\ Qsum = PCI \times Gc \end{array} \right.$$

φ_n: Flujo nominal de vapor (kg/h)

φ_r: Flujo real de vapor (kg/h)

q_{4nom}: Pérdidas por convección y radiación a carga nominal (%)

QTrc : Pérdidas por convección y radiación

$$q_s = \frac{\phi_p (h_{ls} + h_{aa})}{G_c}$$

ϕ_p : Gasto de agua extraída (kg/h)

h_{ls} : Entalpía del agua de la caldera (kJ/kg)

h_{aa} : Entalpía del agua de alimentación (kJ/kg)

Fuente: Borrota, A & Rubio, A. (2007). Combustión y generación de vapor

Emisiones

Para medir la emisión de gases de las calderas examinadas, se utilizó el procedimiento establecido por la norma de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), en lo referente a la ubicación de la sonda del analizador de gases, así como al número de puntos de medición, en el interior de la chimenea

Para determinar la velocidad de salida de los gases, se utilizó un tubo pitot tipo "L" acoplado al analizador de gases. Las mediciones fueron realizadas cuando la respectiva caldera se encontraba funcionando con un porcentaje de carga superior al 50% de su capacidad nominal.

Para evaluar el caudal másico de las emisiones se aplicó la ecuación:

$$Q_g = C_c \times \pi \frac{D^2}{4} \times v \times \frac{1}{1000}$$

Donde:

- Q_g : Caudal másico del contaminante (g/s)
 C_c : Concentración corregida (mg/m³N)
 D : Diámetro de la chimenea, en caso de secciones rectangulares se debe adoptar el respectivo diámetro hidráulico (m)
 v : Velocidad de salida de los gases (m/s)

La Concentración corregida a condiciones normales C_c , se calculó por la ecuación establecida por MAE, (MAE, 2013). Las ppm (C_o) de los gases emitidos, obtenidas del analizador de gases, se debieron transformar a mg/m³.

$$C_c = \frac{C_o \times 760 \times (273 + T_{local})}{P_{bl} \times 298}$$

Donde:

- C_c : Concentración corregida a condiciones normales (mg/m³ N)
 C_o : Concentración medida (mg/m³)
 T_{local} : Temperatura local (°C)
 P_{bl} : Presión atmosférica local (mm Hg)

Resultados

En la Tabla 2, se aprecian las principales características técnicas y de operación de las calderas, así como las mediciones expresadas en porcentaje y partes por millón (ppm) de CO₂, O₂, SO₂, NO, CO, NO₂ y NO_x, obtenidos mediante el analizador de gases. Además, se presentan los valores de pérdidas de calor y la respectiva eficiencia de cada una de las calderas de vapor. Constan además la eficiencia de combustión, que se obtiene directamente del analizador de gases, y la eficiencia térmica, que es resultado de la aplicación del método indirecto (valor calculado).

Una de las calderas (Termicón) de la empresa Cafrilosa, presentó defectos en el ladrillo refractario del aislamiento posterior, corregido el mismo, se realizó una nueva medición.

Determinación de la eficiencia energética y emisión de gases contaminantes en calderas de vapor de la ciudad de Loja, año 2015
Determination of energy efficiency and emission of polluting gases in steam boilers in the city of Loja, 2015

Tabla 2: Eficiencia Térmica de las Calderas monitoreadas en la ciudad de Loja

PARÁ-METROS	EMPRESAS								
	ILE	INAPESA	CAFRILOSA			ECOLAC		IESS	ISIDRO AYORA
			DISTRAL	TERMICON FALLA	TERMICON CORREGIDA	YORK SHIPLEY	COLMA-QUINAS		
Capacidad	40 BHP	60 BHP	100 BHP	80 BHP	80 BHP	7.5 BHP	15 BHP	80 BHP	80 BHP
Presión (PSI)	60	100	110	110	110	90	100	100	100
Año	1981	1986	1977	2005	2005	1981	2003	2011	2011
Diámetro Chim.(m)	0.22	0.26	0.48	0.40	0.40	0.22	0.22	0.42	0.42
GASES									
CO2 %	10.95	12.25	11.55	11.75	7.93	8.34	9.43	11.77	8.09
O2 %	5.69	4.15	4.75	4.6	4.29	9.29	7.88	4.59	9.37
SO2 %	0.13	0.00	0.52	0.00	0.50	2.67	0.00	0.86	0.29
NO ppm	49.58	84.94	118.10	63.57	63.93	12.91	47.4	64.29	32.14
CO ppm	17.83	0.88	1.14	19.29	0.07	350.96	0.04	40.71	25.00
NO2 ppm	0.42	1.46	0.11	0.06	0.64	7.81	1.55	2.39	0.94
NOx ppm	49.80	86.43	118.10	64.43	63.50	20.58	49.0	66.57	32.43
T° gases de salida	172.1	169.41	274.50	580.83	223.67	252.36	239.	235.86	108.14
Efic. Comb	87.49	88.42	83.71	71.64	86.71	82.88	83.3	91.03	92.90
Vel.(m/s)	5.2	7.1	4.9	5	5	4.4	5.6	6.1	4.2
AGUA									
Temp. Alimentación (°C).	90°C	35°C	82°C	59°C	59°C	16 °C	16°C	53°C	25°C
Hierro (ppm)	2.5	2.0	0.8	0.8	0.8	2.5	2.5	2.5	1.5
PÉRDIDAS									
q ₁ (%)	5.79	4.93	9.01	19.61	6.91	11.95	9.59	7.49	4.60
q ₂ (%)	0.008	0.00023	0.00061	0.0083	0.00003	0.21	0.00002	0.017	0.015
q ₃ (%)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
q ₄ (%)	1.34	9.97	2.05	2.44	1.99	2.63	3.86	1.31	1.05
q ₅ (%)	13.7	18.37	1.83	1.10	1.33	8.91	0.18	8.19	5.12
Eficiencia térmica (%)	80.18	66.41	86.79	76.62	89.45	75.97	85.2	82.68	88.8

Fuente. Autores.

En las tablas 3 a 10, que se muestran en el ANEXO 1, se observan los resultados de los niveles de emisiones de gases en la chimenea, para cada una de las calderas:

Acorde a las mediciones realizadas en cada caldera, se obtiene la curva que caracteriza las emisiones del monóxido de carbono con respecto a la pérdida q_3 , la cual está inmersa en el cálculo de la eficiencia de la caldera, dichas curvas se muestran a continuación:

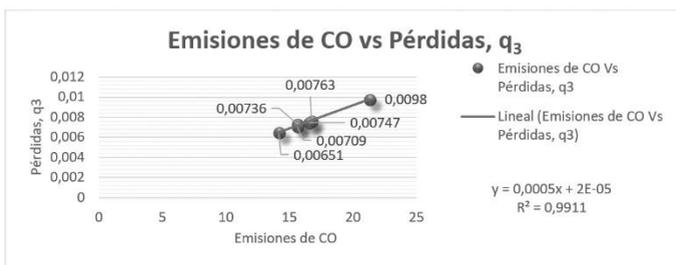


Fig. 1. Caldera York Shipley de empresa ILE

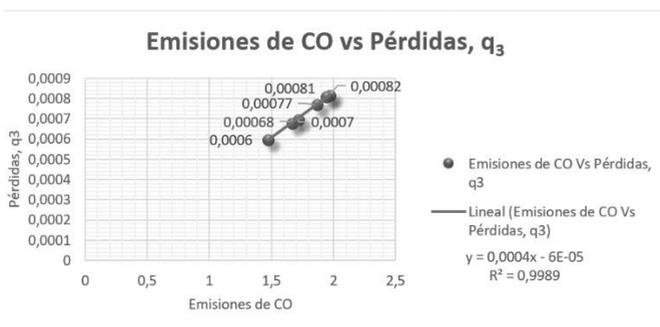


Fig.2. Caldera York Shipley 60 BHP empresa INAPESA

Determinación de la eficiencia energética y emisión de gases contaminantes en calderas de vapor de la ciudad de Loja, año 2015
Determination of energy efficiency and emission of polluting gases in steam boilers in the city of Loja, 2015

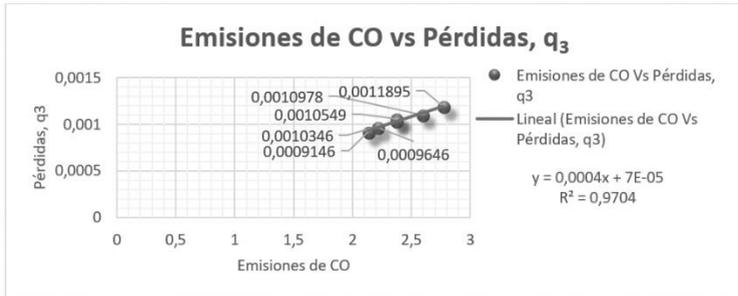


Fig.3. Caldera Distral 100 BHP empresa CAFRILOSA

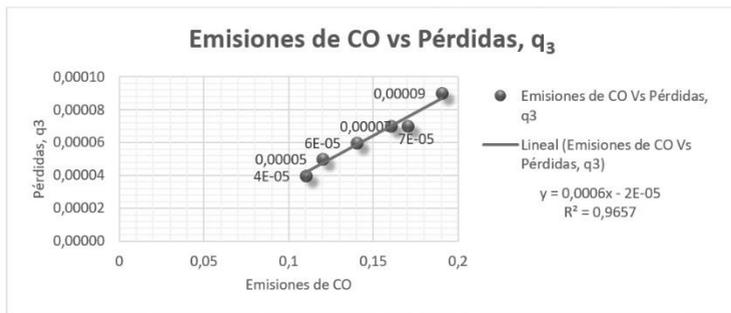


Fig.4. Caldera Termicon 80 BHP empresa CAFRILOSA

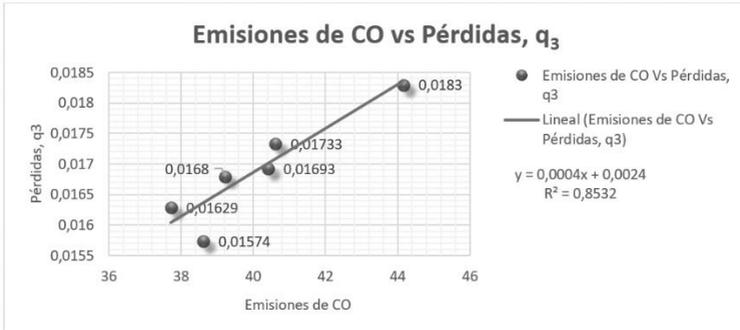


Fig.5. Caldera Superior 80 BHP empresa IESS

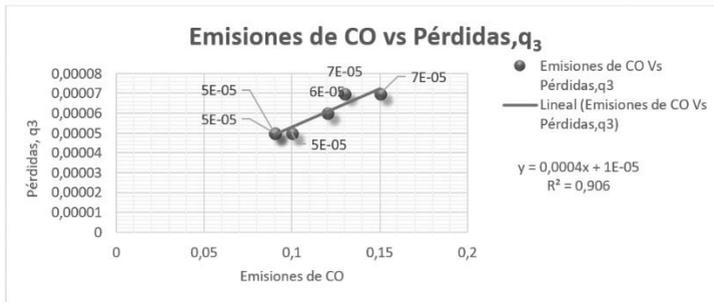


Fig.6. Caldera Colmáquinas 15 BHP empresa ECOLAC

Determinación de la eficiencia energética y emisión de gases contaminantes en calderas de vapor de la ciudad de Loja, año 2015
Determination of energy efficiency and emission of polluting gases in steam boilers in the city of Loja, 2015

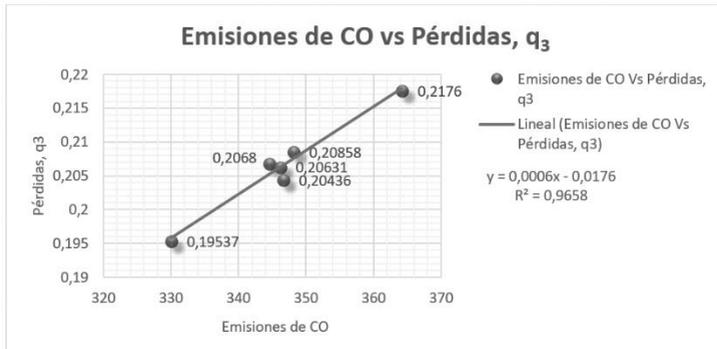


Fig.7. Caldera York Shipley 7.5 BHP empresa ECOLAC

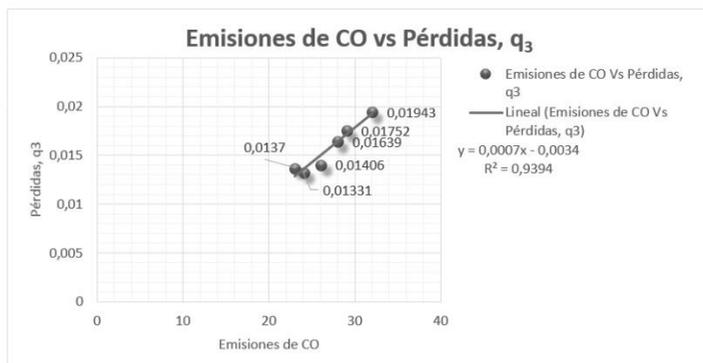


Fig.8. Caldera Fulton 100 BHP empresa I. AYORA

Para calcular y modelar la dispersión de gases contaminantes producidos por fuentes fijas (calderas), se usa la ecuación de Berlyand, mejorada por Álvarez O., (1991).

$$Cm = \frac{AMFmn}{H^2 \sqrt[3]{V \Delta T}}$$

Donde:

- Cm***: Concentración máxima de un contaminante expulsado a la atmósfera (mg/m³).
- A*** : Constante de estratificación térmica atmosférica que define las condiciones de difusión de los contaminantes del aire y es calculado para las condiciones normales de intercambio vertical y horizontal que depende de cada lugar.
- M*** : Flujo máximo de sustancia contaminante expulsada al aire (g. s-1)
- H*** : Altura de la chimenea sobre el nivel del suelo (m)
- ΔT***: Diferencia de temperatura entre el aire y la mezcla gaseosa
- V*** : Volumen de la mezcla gas - aire (m³/s)
- F*** : Coeficiente adimensional de precipitación de la sustancia contaminante, calculado para condiciones de salida de la mezcla gas - aire en el punto de emisión. Para expulsiones gaseosas y partículas con velocidad de precipitación menor o igual a 3 m/s, F=1.
- m*** : Coeficiente adimensional de condiciones de emisión a la atmósfera de las mezcla de gases y aire, que viene dado según la función del parámetro.
- n*** : Coeficiente adimensional de condiciones de emisión a la atmósfera de las mezcla de gases y aire que depende del parámetro Vm; siendo:

$$V_m = 0.65^3 \sqrt{V \Delta T / H}$$

El valor de n se determina de:

$$\begin{array}{ll} n = [3 - (V_m - 0.3) (4.36 - V_m)] & \text{si } 0.3 < V_m < 2 \\ n = 3 & \text{si } V_m < 0.3 \\ n = 1 & \text{si } V_m > 2 \end{array}$$

El valor de A se determina mediante: $A = 0.3 (\delta z / \delta y)$ (Montaño, T., 2015), para ello es necesario calcular el valor de la estabilidad atmosférica para la ciudad de Loja, cuyo valor resultó ser 2 (neutro) acorde a los datos meteorológicos (Montaño, T., 2015), con lo cual resulta que A tiene un valor de 80.

Dado que los valores de NO_x en las chimeneas de las diferentes calderas son altos con respecto a los otros gases (CO, SO_x), la modelación para la inmisión se realiza para este gas usando el software CONGAS, no habiendo sido posible utilizar los recomendados por la EPA, en vista que en la ciudad de Loja, no se dispone de estudios de aire superior. Los resultados de la modelación utilizando el CAD Surfer 7® SN WS-199999-JTK arrojan los resultados siguientes (Montaño, T. 2015), (Superior y Distral, para citar 2 ejemplos de aquellas que estarían fuera del rango permisible):

Como se puede apreciar, en color verde en las Figs. 9 y 10, los valores de NO_x sobrepasan el valor permisible en la norma ecuatoriana (0.10 mg/m³ para la concentración

a 20 minutos). Pero si se considera la velocidad peligrosa del viento (en función de los 16 rumbos) que proporciona el mismo software CONGAS, la mayoría de las fuentes emisoras (calderas), estarían en condiciones de riesgo, a excepción de las fuentes Fulton y York Shipley de las empresas I. Ayora y Ecolac, respectivamente. Como ilustración, la figura 11, muestra lo anterior, en función de la concentración máxima a 20 minutos y los rumbos:

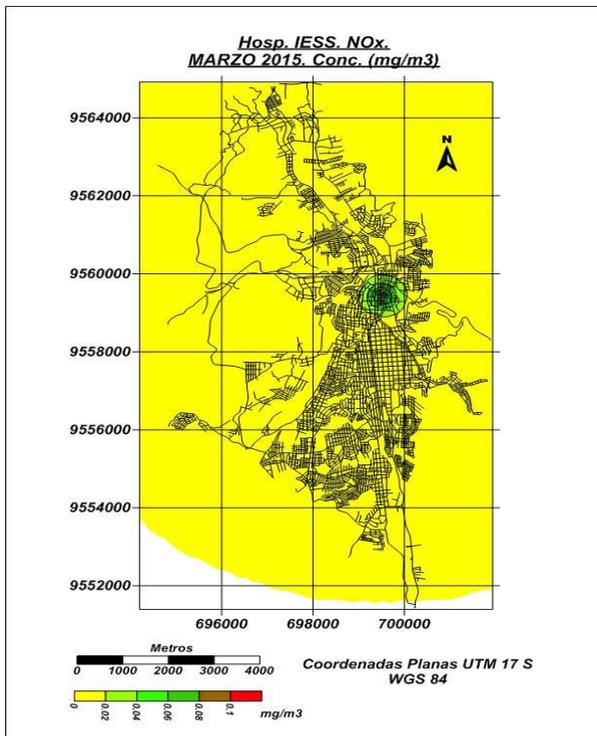


Fig. 9. Fuente Superior IESS

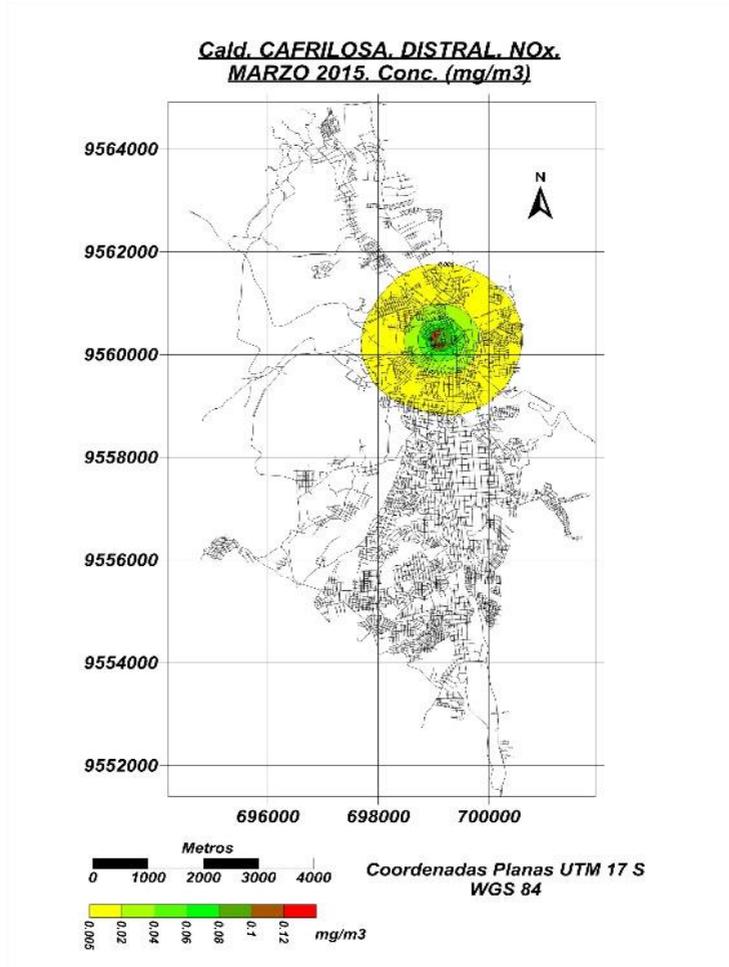


Fig.10. Fuente Distral CAFRILOSA

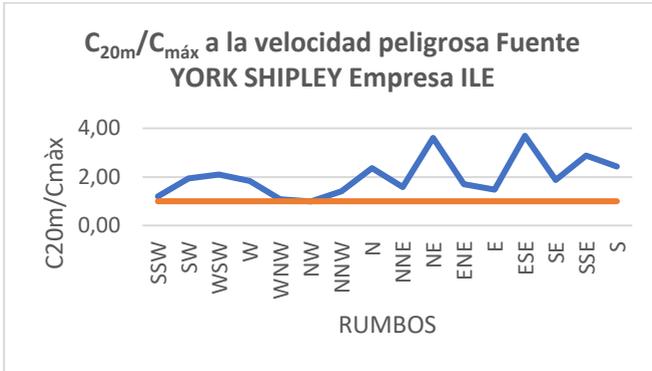


Fig.11. Fuente York Shipley empresa ILE. Concentración a 20 minutos con respecto a concentración máxima y rumbos de viento.

Discusión

El tiempo de vida útil de la caldera, mantenimiento y tipo de combustible son factores que contribuyen a determinar la eficiencia de la caldera. (Kreith, F y Goswami, 2007). Las calderas tienen una eficiencia que comúnmente oscila entre el 75 y 80% (Dotty y Turner, 2009), aunque en la práctica puede ser tan baja como entre el 55–60% o alta que puede alcanzar el 90% (Kreith, F y Goswami, 2007).

La caldera Termicón de la empresa Cafrilosa incrementó su eficiencia del 76.62% a 89.45% luego de reparar el ladrillo refractario de aislamiento de su parte posterior.

Para una caldera funcionando con diesel No.2 con una potencia de 100 HP operando a 125 PSI y porcentaje de carga desde el 25 al

100%, la eficiencia garantizada es del 84.8 al 85.5% y sube alrededor de un 1% cuando opera a 10 PSI. (Cleaver Brooks, 2010). Desde este punto de vista, dado que las características de las calderas estudiadas se asemejan a estas condiciones, si se incrementa el porcentaje de carga en un 75%, el incremento en la eficiencia sería mínimo. Una regla muy a menudo usada menciona que la eficiencia de la caldera puede incrementarse el 1% por cada reducción del 15% en el exceso de aire o por la reducción de cada 22.2°C en la temperatura de los gases de escape (US DOE, 2004).

En resumen la eficiencia de las calderas analizadas en el presente estudio, alcanzan valores que oscilan entre el 76 y 90 %, que técnicamente se consideran aceptables.

Con respecto a los niveles de contaminación, referida a los óxidos de nitrógeno (NO_x) en las calderas, se determinó que consisten básicamente en monóxido de nitrógeno (NO), el cual representa más del 90% del total, mientras que la pequeña fracción restante está formada por dióxido de nitrógeno (NO₂).

El rango típico de emisiones de NO₂ para diesel tipo premium, es de 50-250 ppm sin calentador de aire y de 100-300 ppm con calentador de aire (Boroto y Rubio, 2007). Así mismo, considerando que los porcentajes óptimos de O₂ y CO₂ de los gases de escape de una caldera son 4% y 12%, respectivamente (Muller et. al., 2001), las calderas se encuentran emitiendo un porcentaje de estos gases que se encuentra dentro de los límites aceptables.

La temperatura máxima de los gases de escape de la caldera debe estar en torno a los 230°C (Aranda et. al, 2010), por lo que los

resultados de la Tabla 2 muestran que casi todas las calderas están dentro del límite de operación que garantice su eficiencia adecuada.

El exceso de aire en la caldera se hace evidente a partir de la presencia de oxígeno en los gases de salida. Este oxígeno es referido comúnmente como O_2 en exceso, o también como oxígeno libre en gases. A medida que el exceso de aire aumenta, se incrementa el contenido de O_2 en los gases de salida (Boroto y Rubio, 2007), lo cual también evidencia que en las calderas se está desarrollando la combustión de forma aceptable.

En cuanto a las emisiones de dióxido de azufre, se observa que éstas son casi inexistentes, debido al bajo porcentaje de azufre en el combustible, el cual (en el Ecuador) para el caso del diesel premium, diesel N1 y diesel N°2, corresponde a 0.05, 0.3 y 0.7%, respectivamente (INEN, 2012).

Los límites máximos permisibles de emisiones de calderas alimentados por diesel para óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono en condiciones normales para fuentes existentes (MAE, 2015), son de 550, 750 y 180 mg/m³, por tal razón los resultados obtenidos en las calderas analizadas (a excepción de la caldera York Shipley de la empresa Ecolac) se mantienen dentro de dichos límites. (Tabla 2). Se podría añadir que las emisiones de CO resultan del oxígeno o temperatura insuficiente para completar la combustión (Kitto, J y Stultz, 2005) por lo que se debería analizar el estado de la caldera York Shipley de la empresa Ecolac.

De acuerdo a la legislación ecuatoriana, las emisiones de CO₂ no tienen un límite admisible.

Las emisiones de CO inciden en las pérdidas q₃, las mismas que también aportan a una disminución de la eficiencia térmica de la caldera.

Tanto las fuentes correspondientes a las calderas FULTON de la empresa ISIDRO AYORA, como la YORK SHIPLEY de las empresas ECOLAC, no presentan ningún tipo de riesgo, no así con las restantes que advierten situaciones peligrosas cuando la velocidad alcanza condiciones críticas, que pueden ocurrir en cualquier instante.

Conclusiones:

Eficiencia energética

- 1. Realizada la evaluación de la eficiencia energética de las calderas de la ciudad de Loja, se puede concluir que 7 de las 8 calderas examinadas, se encuentran en el rango de eficiencia considerado como aceptable (75 % - 80 %).*
- 2. Una caldera de tipo York Shipley, de 60 BHP de la Empresa INAPESA, tiene una eficiencia de 66,41 %, que es relativamente baja, ante lo cual se precisa intervenirla.*
- 3. La caldera tipo Termicón, de la Empresa Cafriposa, que presentó una baja eficiencia (76,62 %), debido a elevadas pérdidas térmicas por radiación y convección, originadas por desperfectos en el aislamiento refractario, elevó su eficiencia hasta un valor de 89,45 %, una vez que fue sometida al mantenimiento pertinente.*

Emisión e inmisión de contaminantes

4. *En lo referente a la emisión de contaminantes, para 7 de las 8 fuentes evaluadas, los valores de emisiones de gases se encuentran dentro de los límites exigidos por la regulación ambiental ecuatoriana.*
5. *Sin embargo, una caldera de la empresa Ecolac presenta alto índice de emisión de CO, por lo que se requiere tomar las medidas adecuadas para preservar la integridad de las personas, además de mejorar el proceso de combustión.*
6. *Cuando se modela la dispersión de contaminantes para evaluar la inmisión, si se considera la velocidad peligrosa, variable que depende exclusivamente de las condiciones atmosféricas del entorno, todas las fuentes emisoras están en riesgo de presentar problemas, lo que obligaría a las autoridades ambientales a tomar cartas en el asunto.*

Bibliografía

- Aranda, et. al. (2010). *Técnicas para la elaboración de auditorías energéticas en el sector industrial*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, 73-74.
- Bertyand, M.E. (1973). *Actual problems of development of air Pollution modelling and its influence on the environment*. KEYNOTE.
- <http://www.mssanz.org.au/MODSIM95/Vol%202/Bertyand.pdf>
- **Boroto, A & Rubio, A. (2007). *Combustión y generación de vapor. Cienfuegos: Editorial Universo Sur.***
- Cleaver Brooks. (2010). *Boiler Efficiency Guide*. Recuperado de <http://www.cleaver-brooks.com/reference-center/insights/boiler-efficiency-guide.aspx>.
- **Doty, S & Turner, W. (2009). *Energy Management Handbook (7ed). Georgia: The Fairmont Pres Inc., 128.***
- Gilman, J. (2005). *Boiler Control System Engineering*. North Carolina: The Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA), 99.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (2012). *Productos derivados del petróleo. Diesel. Requisitos. NTE 1489. Sexta revisión. Quito: INEN, 2-4.*
- Kitto, J & Stultz, S. (2005). *Steam, its generation and use*. Ohio: The Babcock & Wilcox Company, §10.
- Kreith, F & Goswami, D. (2007). *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*. New York : CRC Press, 667.
- Ministerio del Ambiente Ecuador MAE. (2015). *Texto Único de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA)*.

Recuperado de

<http://www.cip.org.ec/attachments/article/1604/ANEXO%20III%20DEL%20LIBRO%20VI%20DEL%20TULSMA.pdf>.

- Montaña, T. (2015). *Metodología para evaluar los gases contaminantes que emiten las fuentes puntuales que causan impactos ambientales en la ciudad de Loja ubicada al Sur del Ecuador. Tesis de doctorado en Ciencias Ambientales. Universidad Nacional de Piura. Perú.*
- Muller, M. et. al. (2001). *Modern Industrial Assessments. New Jersey: The State University of New Jersey RUTGERS, 138.*
- United States Environmental Protection Agency EPA. (2014). *Method 1: Sample and Velocity Traverses for Stationary Sources.*
Recuperado de:
<http://www.epa.gov/ttnemc01/promgate/m-01.pdf>.
- U.S. Department of energy (DOE). (2004). *Improving Steam System Performance. Washington: DOE, 70.*

Anexo 1.

Tablas de resultados de los niveles de emisiones de gases en la chimenea, para cada una de las calderas analizadas.

Tabla 3: Emisión correspondiente a la caldera IIe

GASES	PPM	Conversión (mg/m³)	Concentración corregida (mg/Nm³)	Emisión (g/s)
CO₂	109533.33	197115.2	249390.8810	49.0126
O₂	56966.66	74557.6	94330.5516	18.5387
SO₂	0.1267	0.33	0.4175	0.0001
NO	49.5867	60.84	76.9750	0.0151
CO	17.8367	20.43	25.8481	0.0051
NO₂	0.4200	0.79	0.9995	0.0002
NO_x	49.8067	93.71	118.5622	0.0233

Tabla 4: Emisión correspondiente a la caldera Inapesa

GASES	PPM	Conversión (mg/m³)	Concentración corregida (mg/Nm³)	Emisión (g/s)
CO ₂	122533.3333	220509.88	276768.6443	104.0370
O ₂	41466.6667	54271.3	68117.5561	25.6053
SO ₂	0.0000	0	0.0000	0.0000
NO	84.9367	104.22	130.8097	0.0492
CO	0.7667	0.88	1.1045	0.0004
NO ₂	1.4567	2.74	3.4391	0.0013
NO _x	86.4267	162.6	204.0842	0.0767

Tabla 5: Emisión correspondiente a la caldera Cafrilosa-Distral

GASES	PPM	Conversión (mg/m³)	Concentración corregida (mg/Nm³)	Emisión (g/s)
CO ₂	115461.9048	207784.2	266681.7271	236.4627
O ₂	47500.0000	62167.69	79789.4495	70.7481
SO ₂	0.5238	1.37	1.7583	0.0016
NO	118.0952	144.9	185.9727	0.1649
CO	1.7143	1.96	2.5156	0.0022
NO ₂	0.1643	0.31	0.3979	0.0004
NO _x	118.0952	222.18	285.1581	0.2528

Tabla 6: Emisión correspondiente a la caldera Cafrilosa –Termicón

GASES	PPM	Conversión (mg/m³)	Concentración corregida (mg/Nm³)	Emisión (g/s)
CO ₂	114335.7143	205757.5	264080.3057	165.9269
O ₂	49871.4286	65271.4	83772.8374	52.6361
SO ₂	0.1429	0.37	0.4749	0.0003
NO	57.1429	70.11	89.9830	0.0565
CO	1.0714	1.23	1.5786	0.0010
NO ₂	0.6429	1.21	1.5530	0.0010
NO _x	63.5000	119.47	153.3342	0.0963

Tabla 7: Emisión correspondiente a la caldera Ecolac –York Shipley

GASES	PPM	Conversión (mg/m³)	Concentración corregida (mg/Nm³)	Emisión (g/s)
CO ₂	83420.8333	150123.38	194039.7759	32.4549
O ₂	92933.3333	121630.54	157211.7729	26.2950
SO ₂	2.6667	6.98	9.0219	0.0015
NO	12.9583	15.9	20.5513	0.0034
CO	350.9583	401.92	519.4958	0.0869
NO ₂	7.8083	14.69	18.9873	0.0032
NO _x	20.5833	38.73	50.0599	0.0084

Tabla 8: Emisión correspondiente a la caldera Ecolac - Colemáquinas

GASES	PPM	Conversión (mg/m³)	Concentración corregida (mg/Nm³)	Emisión (g/s)
CO ₂	94275.0000	169656.44	220244.7179	46.6334
O ₂	78833.3333	103176.55	133941.8070	28.3601
SO ₂	0.0000	0	0.0000	0.0000
NO	47.4167	58.18	75.5282	0.0160
CO	0.0417	0.04775	0.0620	0.0000
NO ₂	1.5458	2.91	3.7777	0.0008
NO _x	48.9583	92.11	119.5754	0.0253

Tabla 9: Emisión correspondiente a la caldera del Hospital IESS

GASES	PPM	Conversión (mg/m³)	Concentración corregida (mg/Nm³)	Emisión (g/s)
CO ₂	117714.2857	211837.57	267264.8013	226.2416
O ₂	45857.1429	60017.53	75721.0972	64.0985
SO ₂	0.8571	2.24	2.8261	0.0024
NO	64.2857	78.88	99.5189	0.0842
CO	40.7143	46.63	58.8307	0.0498
NO ₂	2.3929	4.5	5.6774	0.0048
NO _x	66.5714	125.5	158.3370	0.1340

Tabla 10: Emisión correspondiente a la caldera del Hospital Isidro Ayora

GASES	PPM	Conversión (mg/m³)	Concentración corregida (mg/Nm³)	Emisión (g/s)
CO₂	80857.1429	145509.79	183527.7781	106.7925
O₂	93714.2857	122652.64	154698.6391	90.0172
SO₂	0.1429	0.37	0.4667	0.0003
NO	32.1429	39.44	49.7447	0.0289
CO	25.0000	28.63	36.1103	0.0210
NO₂	0.9429	1.77	2.2325	0.0013
NO_x	32.4286	61.01	76.9504	0.0448