



## Beneficios ambientales y económicos al optimizar el sistema de combustión de un generador de vapor

## Environmental and economic benefits of optimizing the combustion system of a steam generator

Martínez-Flores Marco Antonio

Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

División Energías Alternas

Correo: [mamf@ineel.mx](mailto:mamf@ineel.mx)

<https://orcid.org/0000-0001-5802-7570>

Celada-Murillo Ana Teresa

Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

División Energías Alternas

Correo: [atcelada@ineel.mx](mailto:atcelada@ineel.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-9809-3086>

Tamayo-Flores Gustavo Adolfo

Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

División Energías Alternas

Correo: [gatamayo@ineel.mx](mailto:gatamayo@ineel.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-5327-3526>

Méndez-Aranda Ángel Alberto

Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

División Sistemas Mecánicos

Correo: [aamendez@ineel.mx](mailto:aamendez@ineel.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-0376-1863>

Hernández-Flores Nicasio

Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

División Energías Alternas

Correo: [nicasio.hernandez@ineel.mx](mailto:nicasio.hernandez@ineel.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-8386-8520>

### Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar los beneficios económicos y ambientales de un generador de vapor de 158 megawatts (MW) que opera con combustóleo como combustible, derivados de realizar ajustes operativos al sistema de combustión y al diseño de sus atomizadores. Para lograr el objetivo, se diseñaron y construyeron diversos tipos de atomizadores, mismos que fueron probados en frío en un banco de atomización a escala real. El atomizador diseño INEEL de mejor desempeño fue comparado en operación contra el atomizador original. Los beneficios más importantes del atomizador diseño INEEL fueron una disminución en la emisión de partículas (PST) de 53 %, la reducción de 93 % del monóxido de carbono (CO) y un ahorro de combustible de 897 kilogramos por hora (kg/h), con lo cual se dejaron de emitir 651 toneladas por año (tpa) de CO, 19 tpa de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), 1,091 tpa de PST, 583 tpa de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y 23,614 tpa de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), alcanzando además un ahorro monetario de 170,352 pesos por día. Los resultados muestran que la aplicación de estudios científicos sobre los sistemas de combustión, es una alternativa viable para mejorar la eficiencia financiera y el desempeño ambiental de un complejo industrial.

**Descriptores:** Eficiencia, emisiones, PST, CO, ahorros económicos, generadores de vapor, atomizadores.

### Abstract

The objective of this work was to evaluate the economic and environmental benefits of a 158 megawatts (MW) steam generator that operates with fuel oil as fuel, derived from making operational adjustments to the combustion system and the design of its atomizers. To achieve the objective, various different types of atomizers were designed and built, which were cold tested in a real-scale atomization bank. The atomizer design INEEL of better performance, it was compared in operation against the original atomizer. The most important benefits of the INEEL design atomizer were a 53 % reduction in particle matter (PST) emission, a reduction of 93 % in carbon monoxide (CO) and a fuel saving of 897 kilograms per hour (kg/h), which will stop emitting 651 tons per year (tpa) of CO, 19 tpa of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), 1,091 tpa of PST, 583 tpa of sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) and 23,614 tpa of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), also reaching a monetary saving of 170,352 pesos per day. The results show that the application of scientific studies on combustion systems is a viable alternative to improve the financial efficiency and environmental performance of an industrial complex.

**Keywords:** Efficiency, emissions, PST, CO, economic savings, steam generators, atomizers.

## INTRODUCCIÓN

En México, durante las dos últimas décadas, la preocupación por incrementar el rendimiento energético de los sistemas de combustión y de disminuir la emisión de los productos contaminantes, se convirtió en una necesidad en toda planta de proceso. Con mayor énfasis, desde la última década, de acuerdo con las demandas de la sociedad acerca de disponer de un ambiente limpio, se re-emitió en noviembre de 2011 y se mantiene vigente, la Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMAR-NAT-2011, que regula la contaminación atmosférica en fuentes fijas, estableciendo los niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición (SEMARNAT, 2012; Bolado, 1985).

Para la operación de las unidades de generación comerciales, se requieren de grandes cantidades de combustibles fósiles (combustóleo, gas natural, carbón y diésel); CFE reporta que hasta el 2016, 59.3 % de la capacidad instalada para generar energía eléctrica en el país, utilizan estos combustibles. El combustóleo, diésel y gas natural representaron cerca de 72.5 % del total de los importes que se gastan. Un pequeño porcentaje de las plantas generadoras utilizan como combustible el diésel (CFE, 2016).

Es necesario, por lo tanto, disponer de los elementos necesarios que permitan a las plantas operar en la forma más apropiada, a fin de mantener su competitividad, cumplir con las reglamentaciones oficiales y sobre todo, lograr un ambiente limpio. Algunas acciones para solucionar dicha problemática son: utilizar combustibles de mejor calidad (como el gas natural), mejorar el funcionamiento del sistema de combustión y disponer de sistemas eficientes de limpieza de la caldera y de los gases emitidos. Una de las más viables en el corto plazo es mejorar el funcionamiento del sistema de combustión (mantener/mejorar su desempeño térmico), ya que tanto mejorar la calidad del combustible, como la limpieza de los gases emitidos, puede implicar grandes costos de inversión, por lo que para su aplicación es necesario un estudio profundo y detallado del problema.

Mejorar el funcionamiento del sistema de combustión (Espinoza *et al.*, 1993), implica en algunas ocasiones, el rediseño de algunas de las partes que lo conforman (como por ejemplo los atomizadores), con la finalidad de reducir las emisiones contaminantes por debajo de los límites que indica la NOM-085-SEMAR-NAT-2011, y sin descuidar el desempeño térmico del generador de vapor.

Existen diversas formas de aumentar la eficiencia de una planta generadora de energía, una de ellas, es la de

optimizar la transferencia de calor, mediante el mejoramiento del soplado del hollín (limpieza de la caldera y equipos auxiliares), del control de la escoria y de la operación del calentador de aire. Otra es la modificación de los quemadores, con la cual, se ha logrado un mejor control de la temperatura de la flama y de la liberación total de calor en el Hogar del generador de vapor. Normalmente, ambas mejoras oscilan entre 1 y 4 % de la eficiencia a partir de los valores de carga completa existentes. Las mejorías de eficiencia en esta área son algunas de las más fáciles de obtener en una planta de energía y generan ahorros directos en el costo del combustible (Rapún *et al.*, 2004).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño económico y medioambiental de un generador de vapor comercial de gran capacidad, con el uso de los atomizadores con los que opera normalmente y unos diseñados por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL).

## DESARROLLO

### CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL GENERADOR DE VAPOR EMPLEADO

El generador de vapor donde se realizó este trabajo experimental tiene una capacidad nominal de 158 MW, opera con una presión de 127 kg/cm<sup>2</sup> de vapor sobrecalentado y 38.8 kg/cm<sup>2</sup> de vapor recalentado, ambos a una temperatura de 540 °C. El sistema de combustión consta de 12 quemadores tangenciales basculantes distribuidos en tres niveles, mismos que se identifican de abajo hacia arriba como A, B y C en la Figura 1. El generador de vapor opera con combustóleo como combustible.

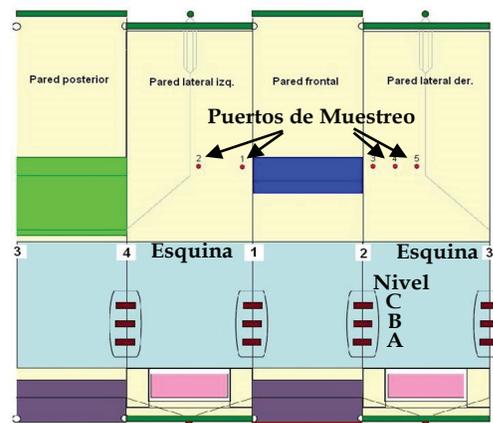


Figura 1. Ubicación de quemadores en el generador de vapor

Cada nivel tiene instalados cuatro quemadores uno en cada una de las esquinas del hogar, tal como se muestra en la Figura 2. La atomización del combustible se realiza con vapor sobrecalentado. El hogar es presurizado y el control de la temperatura de vapor es con inclinación de quemadores, recirculación de gases y atemperación. Los quemadores utilizan atomizadores tipo Y-jet, con sello por contacto entre piezas. Este tipo de atomizador utiliza una pieza intermedia para re-direccionar los flujos (combustible y vapor).

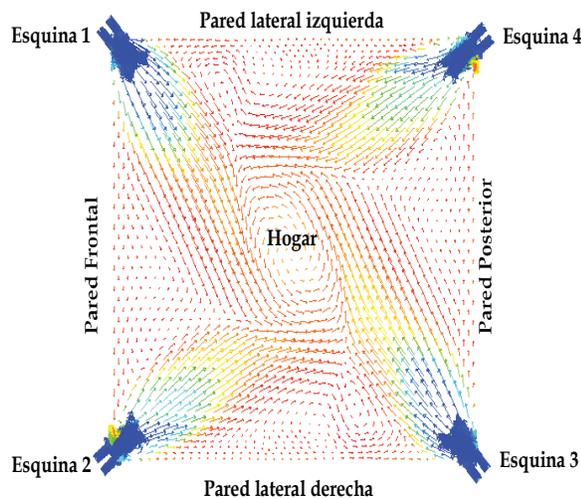


Figura 2. Vista superior Hogar-Quemadores tangenciales

#### EQUIPOS DE MEDICIÓN

En la Figura 3, se muestra el equipo experimental con el que se determinaron las concentraciones de los gases a la entrada de los Precalentadores de Aire Regenerativos (PAR's). Los gases que se midieron fueron: Exceso de oxígeno ( $O_2$ ), medido de acuerdo con lo establecido Método 3A de la Agencia de Protección del Ambiente (EPA por sus siglas en inglés) de Estados Unidos, principio de operación paramagnético (EPA, 2008), el equipo tiene una reproducibilidad de  $\pm 0.5\%$  de la escala total (Horiba, MPA-510). Monóxido de carbono (CO), se midió de acuerdo con lo establecido al Método 10 de la EPA, para ello, se utilizó un analizador con principio de operación infrarrojo no dispersivo (EPA, 2000), el equipo tiene una reproducibilidad de  $\pm 0.5\%$  de la escala total (Horiba VIA-510). Óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), se efectuó de acuerdo con lo establecido en el Método 7E de la EPA, principio de operación de luminiscencia química (EPA, 2009), el equipo tiene repetibilidad de  $\pm 0.5\%$  de la escala total (Horiba, CLA-510SS). La calibración y ajuste de estos equipos se realizó con gases grado patrón de calibración certificados (PRAXAIR).

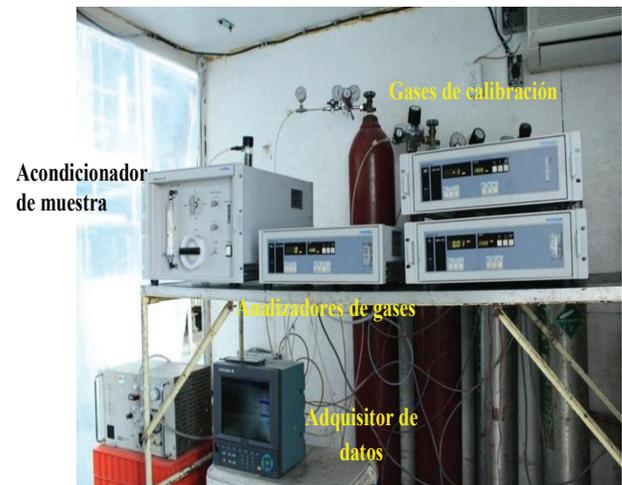


Figura 3. Equipo experimental utilizado para el análisis de gases a la entrada de los PAR's

La concentración de oxígeno ( $O_2$ ), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) en chimenea, se determinaron con un analizador cuyo principio de operación es el de celdas electroquímicas (Figura 4). El equipo tiene una precisión de  $\pm 1\%$  para el oxígeno y de  $\pm 4.0\%$  para los otros gases (LANCOM). Al momento de las mediciones, el equipo contaba con certificado de calibración (ASKCO DE MÉXICO).



Figura 4. Equipo utilizado para la medición de productos de combustión medidos en chimenea

La emisión de partículas suspendidas totales (PST), se midió en la chimenea de la Unidad de acuerdo con el procedimiento establecido del Método 5 de la EPA (2000). Pevio al inicio de las mediciones en chimenea se calculó el número de puntos de medición y la distancia entre los mismos, de acuerdo con el procedimiento establecido en el Método 1 de la EPA (2005). El equipo empleado fue un muestreador isocinético, cuyo principio de operación se basa en succionar una muestra de gases de combustión en forma isocinético, es decir, la

velocidad a la cual se colecta la muestra de gases debe ser igual a la velocidad de los gases en la chimenea. Al momento de las mediciones, el equipo contaba con los certificados de calibración del tubo de pitot tipo "S" emitido por la compañía ICEMA, S.A. de C.V.

#### ATOMIZADOR ORIGINAL Y REDISEÑADO

La función del atomizador es romper el combustible en pequeñas gotas y distribuir las con un patrón específico dentro del hogar de la caldera. Los quemadores del generador de vapor bajo prueba utilizan atomizadores tipo "Y-jet", los cuales constan de cuatro partes principales que son: la tuerca de sujeción, la cabeza del atomizador, el redireccionador de flujo y el conector (Figura 5). En este tipo de atomizadores las superficies de contacto deben estar completamente lisas para evitar fugas de combustóleo o vapor.



Figura 5. Fotografía del ensamblaje del atomizador original

El cañón del quemador original está formado por dos tubos concéntricos, con una parte rígida y la otra flexible. Hasta antes del redireccionador de flujo el combustóleo circula por el tubo interior y el vapor por el exterior. Pasando el redireccionador de flujo el combustóleo fluye por la parte exterior de la cabeza del atomizador y el vapor por la parte interior de la misma. El redireccionador de flujo tiene 6 orificios interiores y 6 exteriores. En este dispositivo el combustóleo entra por los orificios interiores y sale por los exteriores y el vapor entra por los orificios exteriores y sale por los interiores. Esta pieza tiene la peculiaridad de que cualquiera de sus caras puede colocarse hacia al conector o hacia la cabeza del atomizador sin que afecte su funcionamiento.

La cabeza del atomizador (Figura 6) en su cara frontal tiene 6 orificios de descarga, por los cuales circula la mezcla vapor/combustible y en ellos se produce la atomización del combustible en el horno de la caldera. La cara posterior cuenta con 6 orificios exteriores por donde

de circula el combustible y 6 interiores por donde fluye el vapor. Los orificios interiores están conectados directamente al conducto de mezcla por donde pasa el combustible. La característica principal de este atomizador es que su ángulo de aerosol es de 85 ° (Figura 7).

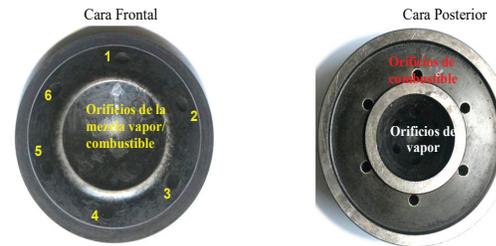


Figura 6: Fotografía de la cabeza del atomizador original



Figura 7. Ángulo del aerosol producido por el atomizador original

El procedimiento de re-diseño de los atomizadores se describe con mayor detalle en otros trabajos (Huerta *et al.*, 2004a; Huerta *et al.*, 2004b; Mani *et al.*, 2005; Diego *et al.*, 2009). Los parámetros principales de diseño están basados en criterios experimentales (Mullinger y Chigier 1974; Basu *et al.*, 2000), y otros, propiedad del INEEL, que consideran lo siguiente:

- a) Flujo de combustible por unidad de área del orificio de salida.
- b) Presión y temperatura del combustible.
- c) Presión y temperatura del vapor de atomización.
- d) Relación vapor/combustible.
- e) Relación-Área de vapor / Área de combustible.
- f) Relación de expansión-Área de salida / (Área de vapor + Área de combustible).
- g) Ángulo del aerosol formado.
- h) Distribución y tamaño de gota.
- i) Curva de comportamiento *Flujo de combustible v.s. Presión de combustible*.

En la Figura 8 se muestra la geometría del tipo de atomizador que se diseñó, se presenta un corte transversal, así como un modelo virtual del mismo. Una vez determinado el diseño de diversos prototipos, se procede a su construcción y se caracterizan en frío en el Laboratorio de Atomización del INEEL. Un atomizador de diseño original también se caracteriza en frío. La selección de los prototipos para ser evaluados en el generador de vapor, se hace mediante una base comparativa entre los resultados obtenidos con estos y los del atomizador original.

El atomizador diseñado en el INEEL también es del tipo “Y-jet”. Consta de 3 componentes principales (Figura 9), en lugar de los 4 que tenía el original: el conector, la cabeza del atomizador y la tuerca de sujeción, es decir, se eliminó el redireccionador de flujo. Otra particularidad del rediseño es que para disminuir las fugas

de combustóleo o vapor se decidió que fueran del tipo roscado. La cabeza del atomizador se rosca en el tubo interno, como se muestra en la Figura 10, y la tuerca de sujeción se aprieta en el conector externo del cañón. Al prescindir del redireccionador de flujo el sellado de los atomizadores prototipo se realiza con dos aros de aluminio o de cobre uno para el lado combustible y otro para el lado vapor.

Adicionalmente a las características señaladas, ver Figura 8, el atomizador rediseñado consta de 8 orificios de salida, con un ángulo geométrico de descarga,  $\varphi_d$ , de  $70^\circ$ . El ángulo de ataque de los conductos de combustible a los conductos de vapor,  $\varphi_{o/s}$ , es de  $60^\circ$ . El diámetro de los conductos de vapor, combustible y descarga es de  $2.30E-03\text{m}$ ,  $3.05E-03\text{m}$ , y  $3.50E-03\text{m}$ , respectivamente. El ángulo del aerosol que produce es de  $71^\circ$  (Figura 11).

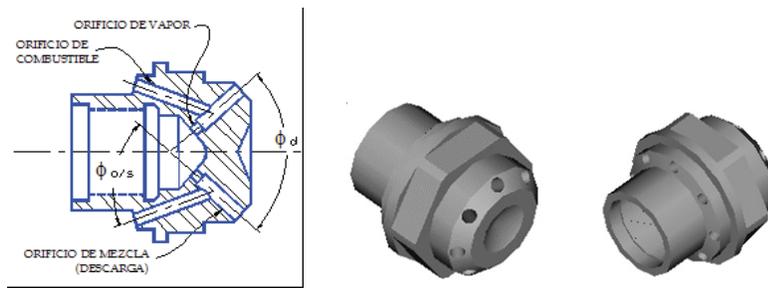


Figura 8. Atomizador tipo “Y” Jet: a) corte transversal y b) modelo virtual



Figura 9. Fotografía del ensamblaje de los atomizadores diseño INEEL

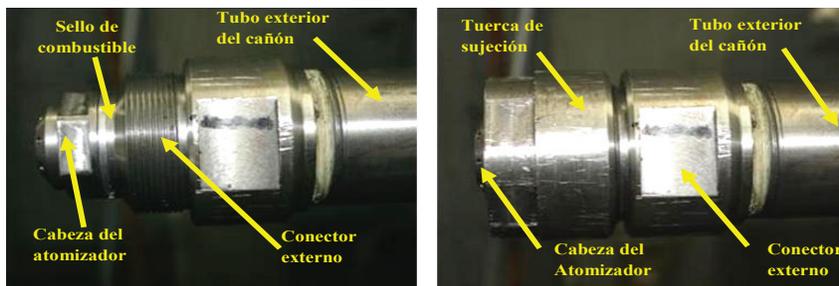


Figura 10. Fotografía de la instalación de los atomizadores prototipo

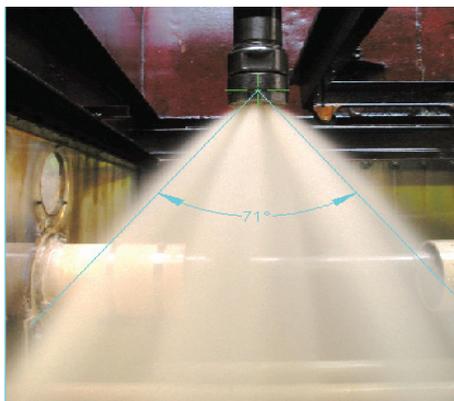


Figura 11. Ángulo del aerosol que produce el atomizador rediseñado

METODOLOGÍA DE LAS MEDICIONES

Las pruebas de campo se realizaron con el generador de vapor operando en condiciones de carga máxima, estable y con máquina amarrada, después de realizar limpieza de quemadores y de soplar los intercambiadores de calor (sobrecalentador, recalentador, economizador y PAR's). La determinación de productos de combustión a la entrada de los PAR's y en chimenea se realizó de forma simultánea con el objeto de asegurar que las pruebas se llevaran a cabo bajo condiciones similares de trabajo y con ello evitar cualquier sesgo en los resultados, de tal forma que se pudiera cuantificar de manera objetiva el desempeño de los atomizadores, tanto el de diseño original como el rediseñado.

**RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE EMISIONES EN CAMPO**

En la Tabla 1, se presentan los resultados de la medición de productos de combustión a la entrada de los PAR's. Como se observa, el O<sub>2</sub> medido a la entrada del PAR presentó valores muy similares para las cuatro corridas experimentales, lo que permite comparar de forma confiable el desempeño de los atomizadores. Dado que, la emisión de partículas, CO y NO<sub>x</sub> es dependiente de la

relación aire combustible, las dos primeras disminuyen al incrementarse el O<sub>2</sub> y la tercera aumenta.

Respecto a los NO<sub>x</sub>, estos fueron muy parecidos para las cuatro corridas experimentales, es decir, el atomizador diseño INEEL no tuvo efecto sobre la formación de este contaminante. Sin embargo, el CO, muestra un desbalance en los valores registrados, así como una mayor cantidad cuando se utilizaron los atomizadores originales. Lo anterior es un indicativo de que se mejoró el proceso de combustión con los atomizadores diseño INEEL.

Los resultados de las mediciones en chimenea de los productos de combustión se muestran en la Tabla 2. Los valores de O<sub>2</sub>, CO y NO<sub>x</sub> reportados son el producto de un mapeo realizado en tres puntos de medición. Por otro lado, para realizar la comparación de las emisiones contra los límites establecidos en la legislación vigente, se pusieron en una misma base comparativa de 5.0 % de exceso de oxígeno mediante la siguiente fórmula (SEMARNAT, 2011):

$$C_R = \frac{20.9 - O_R}{20.9 - O_M} * CM \tag{1}$$

Tabla 1. Concentración de O<sub>2</sub>, CO y NO<sub>x</sub> en base seca medidos a la entrada de los PAR's

Atomizadores	Corrida		Lado "A"			Lado "B"	
		O <sub>2</sub> (cmol/mol)	CO (μmol/mol)	NO <sub>x</sub> (μmol/mol)	O <sub>2</sub> (cmol/mol)	CO (μmol/mol)	NO <sub>x</sub> (μmol/mol)
Originales	1	1.99	20	307	1.93	149	301
	2	2.04	20	313	2.13	125	301
Diseño INEEL	1	2.11	8	304	2.04	8	305
	2	1.95	9	308	2.05	8	311

Tabla 2. Concentración de O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> y partículas en base seca medidos en la chimenea

Atomizadores	Prueba	Emisiones medidas en chimenea				Emisiones normalizadas a 5 cmol/mol de oxígeno		
		O <sub>2</sub> (cmol/mol)	CO (μmol/mol)	NO <sub>x</sub> (μmol/mol)	PST (mg/m <sup>3</sup> )	CO (μmol/mol)	NO <sub>x</sub> (μmol/mol)	PST (mg/m <sup>3</sup> )
Originales	1	4.12	244	271	688	231	257	652
	2	4.27	86	281	444	82	269	425
Diseño INEEL	1	4.26	16	271	261	15	259	249
	2	4.31	6	277	274	6	265	263

Donde:

C<sub>R</sub> = concentración calculada al valor de referencia de O<sub>2</sub>

C<sub>M</sub> = concentración medida (Partículas, CO, NO<sub>x</sub> o SO<sub>2</sub>)

O<sub>R</sub> = nivel de referencia para el O<sub>2</sub> (5 cmol/mol)

O<sub>M</sub> = valor medido para el O<sub>2</sub> (cmol/mol)

De la Tabla 2, se puede observar que con los atomizadores originales la emisión de partículas en ambas corridas rebasa el límite máximo permitido por la norma oficial mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011, el cual es de 350 mg/m<sup>3</sup> para las zonas denominadas Resto de la República, mientras que con los atomizadores diseño INEEL ambas pruebas estuvieron por debajo del límite referido en aproximadamente 32 %. Los límites de CO (500 μmol/mol) y NO<sub>x</sub> (375 μmol/mol) especificados en citada norma no se rebasaron con ninguno de los atomizadores.

Como se observa en la Tabla 2. El promedio aritmético de la emisión de partículas de las dos corridas experimentales realizadas utilizando los atomizadores originales fue de 539 mg/m<sup>3</sup>, mientras, que para los atomizadores de diseño INEEL fue de 256 mg/m<sup>3</sup>, por lo tanto, la reducción obtenida con el empleo de los nuevos atomizadores fue de 52.5 %.

En la Figura 12, se muestran los filtros con las partículas colectadas en chimenea, de ellos y de la Tabla 2, se desprende que los filtros usados con los atomizadores originales presentan una coloración negra intensa relacionada con una mayor cantidad de partículas, en cambio, los filtros que se obtuvieron con los atomizadores diseño INEEL muestran una coloración menos intensa

(relacionada con una menor cantidad de partículas) y puntos blancos con pocas partículas.

Por otro lado, el CO promedio disminuyó de 157 μmol/mol (atomizadores originales) a tan solo 11 μmol/mol (atomizadores diseño INEEL), esto representa una reducción de 93 %. Los NO<sub>x</sub> permanecieron prácticamente sin variación, pues, el promedio de las dos corridas con los atomizadores originales fue de 263 μmol/mol y de 262 μmol/mol con los de diseño INEEL. La disminución de la emisión de partículas y de monóxido de carbono confirma que con los atomizadores diseño INEEL se mejoró el proceso de combustión de la caldera.

#### GENERACIÓN BRUTA, CONSUMO DE COMBUSTIBLE, PODER CALORÍFICO Y DENSIDAD DEL COMBUSTIBLE

La generación bruta de electricidad (GB) y el consumo de combustible (CC), fueron registrados por personal de la central térmica donde se realizaron las pruebas, los cuales utilizaron sus propios métodos y equipos experimentales. El poder calorífico superior (PCS) y la densidad (ρ<sub>c</sub>) del combustible fueron determinados por el Laboratorio de Combustibles del INEEL, empleando los métodos ASTM D 240-09 (ASTM, 2009) y ASTM D 1298-99 (ASTM, 1999), respectivamente.

Para determinar el poder calorífico superior y la densidad del combustible se tomaron dos muestras, una durante las pruebas con los atomizadores originales y otra durante la realización de la experimentación con los atomizadores diseño INEEL. Dichas muestras fueron tomadas al mismo tiempo de la realización de las pruebas experimentales con el fin de asegurar que el

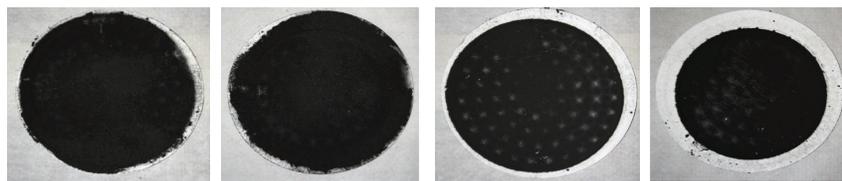


Figura 12. Fotografía de los filtros con las partículas colectadas en la chimenea durante la realización las pruebas experimentales

combustible utilizado en la experimentación fuera el mismo que con el que se efectuaron las mediciones.

En la Tabla 3, se muestran los resultados de los parámetros arriba mencionados, de ella se puede apreciar que tanto la generación bruta como el poder calorífico bruto y la densidad del combustible fueron muy similares en ambas pruebas, lo cual, nos indica que las mediciones se realizaron bajo las mismas condiciones de operación y con el mismo tipo combustible. Sin embargo, algo muy importante que se aprecia en esta información, es que el consumo de combustible fue menor en 897 kg/h cuando se emplearon los atomizadores diseño INEEL, esto ratifica que con los atomizadores diseño INEEL se mejoró el proceso de combustión.

### DESEMPEÑO ECONÓMICO

Un aspecto importante durante la evaluación del ajuste al sistema de combustión, es el comportamiento económico de la unidad generadora, es decir, ¿qué podría representar para la unidad, desde el punto de vista generación-consumo de combustible, operar con un atomizador diferente al comúnmente empleado? Para esto, se realizó la evaluación de la unidad generadora, mediante la determinación del régimen térmico bruto (RTB), para ello, se requirió de la medición horaria programada de la generación bruta (GB) y del consumo de combustible (CC). Se obtuvo una muestra del combustible utilizado durante cada día de prueba, para determinar su análisis elemental y poder calorífico (PCS). Las pruebas se realizaron empleando ambos diseños de atomizadores y los resultados se presentan en la Tabla 4.

El régimen térmico bruto (RTB), el cual representa los kJ utilizados por la unidad para generar un kW-h, el costo de generación por concepto de combustible (CGC) y el beneficio económico (BE) se calcularon con las relaciones 2, 3 y 4, respectivamente.

$$RTB = \frac{CC * PCS}{GB} \tag{2}$$

$$CGC = \frac{CFO * CC * 24}{\rho} \tag{3}$$

$$BE = CGC \text{ (atomizadores originales)} - CGC \text{ (atomizadores diseño INEEL)} \tag{4}$$

Como se observa en la Tabla 4, el régimen térmico bruto mejoró en 254 kJ/kW-h, lo cual representa 2.4 % menos de la energía empleada para generar un kW-h. Por otro lado, de la Tabla 3 se aprecia que prácticamente para la misma generación bruta, cuando la unidad operó con los atomizadores de diseño INEEL, se tuvo una disminución del consumo de combustible de 897 kg/h. Esta condición representa un ahorro importante por concepto de consumo de combustible, es decir, si el costo de combustible (PEMEX, 2018) durante el mes de septiembre de 2018 fue de 8,740.00 \$/m<sup>3</sup>, el beneficio económico por utilizar los nuevos atomizadores puede llegar a ser de 170,352.00 \$/día, siempre y cuando la unidad opere las 24 h a 151 MW.

Finalmente, considerando solo el ahorro por concepto de combustible bajo los supuestos del párrafo anterior, la inversión del estudio se recuperará en aproximadamente 25 días.

### DESEMPEÑO MEDIOAMBIENTAL

En esta sección se presenta la comparación del desempeño medioambiental de los atomizadores originales y los de diseño INEEL con base a las tasas de emisión de los contaminantes CO, NO<sub>x</sub>, PST, SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, mismas que fueron calculadas con diferentes técnicas. Cuando

Tabla 3. Generación bruta, consumo de combustible y poder calorífico del combustible

Atomizador	Tiempo de Medición	GB (kW)	CC (kg/h)	PCS (kJ/kg)	ρ <sub>c</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
Originales	De 9 – 14 h	151,141	38,014	41,830	1,014.2
Diseño INEEL	De 12 – 16 h	151,116	37,117	41,830	1,012.2

Tabla 4. Desempeño energético y económico

Atomizadores	Costo de combustible (\$/m <sup>3</sup> )	Régimen térmico bruto (kJ/kW-h)	Costo de generación por combustible (\$/día)	Beneficio económico (\$/día)
Originales	8,740.00	10,520.8	7,862,174	
Diseño INEEL	8,740.00	10,520.8	7,691,822	170,352

los contaminantes son medidos (Tabla 5), las tasas de emisión se calcularon de la forma siguiente:

Como las tasas de emisión se expresarán a las condiciones de presión ( $P_{gc}$ ), temperatura ( $T_{gc}$ ) y flujo volumétrico ( $Q_{gc}$ ) prevalecientes en el sitio de medición, entonces las emisiones medidas en base seca ( $O_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$  y PST) se transformarán a base húmeda con la relación siguiente (Gibss, 1998):

$$E_h = E_s \left( 1 - \frac{H_{gc}}{100} \right) \quad (5)$$

Donde:

$E_h$  = emisión en base húmeda,  $\mu\text{mol/mol}$ ,  $\text{cmol/mol}$ ,  $\text{kg/m}^3$

$E_s$  = emisión en base seca,  $\mu\text{mol/mol}$ ,  $\text{cmol/mol}$ ,  $\text{kg/m}^3$

$H_{gc}$  = humedad de los gases de combustión,  $\text{cmol/mol}$

Para el cálculo de las tasas de emisión, la emisión húmeda en volumen ( $\mu\text{mol/mol}$ ) debe convertirse a emisión húmeda en masa ( $\text{mg/m}^3$ ) con la siguiente ecuación (Gibss, 1998):

$$E_{hm} = E_h \left[ \frac{M}{V_m} \right] \quad (6)$$

Donde:

$E_{hm}$  = emisión húmeda en base masa ( $\text{mg/m}^3$ )

$E_h$  = emisión húmeda en volumen ( $\mu\text{mol/mol}$ )

$M$  = peso molecular ( $\text{kg/kmol}$ ) de la emisión  $E_h$

$V_m$  = volumen molar ( $\text{m}^3/\text{kmol}$ ) a las condiciones de medición de presión ( $P_{gc}$ ) y temperatura ( $T_{gc}$ ) del sitio de medición.

Cuando la emisión  $E_h$  se exprese en  $\text{cmol/mol}$  esta se debe multiplicar por 10,000 para convertirla a  $\mu\text{mol/mol}$ .

Tabla 5. Características del flujo de gases en chimenea

Atomizadores	Corrida	CO ( $\mu\text{mol/mol}$ )	$NO_x$ ( $\mu\text{mol/mol}$ )	PST ( $\text{mg/m}^3$ )	$H_{gc}$ ( $\text{cmol/mol}$ )	$T_{gc}$ (K)	$P_{gc}$ ( $\text{N/m}^2$ )	$Q_{gc}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
Originales	1	244	271	688	10.26	430.2	101,641	187.2
	2	86	281	444	10.72	432.1	101,640	190.5
Diseño INEEL	1	16	271	261	10.44	438.1	101,624	191.0
	2	6	277	274	10.46	439.3	101,640	190.2

La expresión para calcular el  $V_m$  se presenta a continuación (Gibss, 1998):

$$V_m = \frac{R_u * T_{gc}}{P_{gc}} \quad (7)$$

Donde  $R_u$  es la constante universal de los gases ideales 8,314.34 (Yunus, 2005).

La tasa de emisión ( $\dot{m}_i$ ) de los contaminantes en toneladas por año (tpa) será calculada con la fórmula siguiente (INEEL, 2019):

$$\dot{m}_i = 0.031536 * C_i * Q_{gc} \quad (8)$$

Donde:

$\dot{m}_i$  = tasa de emisión del componente i de los gases de escape a condiciones de medición, tpa

$C_i$  = concentración en masa del componente i de los gases de escape a condiciones de medición,  $\text{mg/m}^3$

$Q_{gc}$  = flujo volumétrico de los gases de escape húmedos,  $\text{m}^3/\text{s}$

0.031536 = Factor de conversión de  $\text{mg/s}$  a tpa

La emisión de partículas viene reportada en condiciones normales de temperatura y presión (298 K y 101,325  $\text{N/m}^2$ ), por lo que, su concentración se deberá transformar a las condiciones de presión y temperatura del sitio de medición ( $P_{gc}$  y  $T_{gc}$ ) con la relación siguiente (Gibss, 1998):

$$[E]_M = [E]_N * \left[ \frac{T_N}{T_M} \right] * \left[ \frac{P_M}{P_N} \right] \quad (9)$$

Donde:

$E_M$  = concentración en masa de las PST a condiciones de medición,  $\text{mg/m}^3$

$E_N$  = concentración en masa de las PST a condiciones normales,  $\text{mg/m}^3$

$T_N$  = temperatura normal, 298 K  
 $P_N$  = presión normal, 101,325 N/m<sup>2</sup>  
 $T_M = T_{gc}$  = temperatura del flujo gases de escape en el sitio de medición, K  
 $P_M = P_g$  = presión del flujo gases de escape en el sitio de medición, N/m<sup>2</sup>

Finalmente, la tasa de emisión de las PST se calcula con la ecuación 10 (INEEL, 2019):

$$\dot{m}_M = 0.03153 * E_M * Q_{gc} \quad (10)$$

Donde:

$\dot{m}_M$  = tasa de emisión de las PST a condiciones de medición, tpa  
 $E_M$  = concentración en masa de las PST a condiciones de medición, mg/m<sup>3</sup>  
 $Q_{gc}$  = flujo volumétrico de los gases de escape húmedos, m<sup>3</sup>/s  
 0.031536 = factor de conversión de mg/s a tpa

La tasa de emisión del bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) se calculará suponiendo que todo el azufre contenido en el combustible se transforma a SO<sub>2</sub> y para ello, se empleará la siguiente ecuación (INEEL, 2019):

$$\dot{m}_{SO_2} = 8.76 * W_C * X_S [M_{SO_2} / M_S] \quad (11)$$

Donde:

$\dot{m}_{SO_2}$  = tasa de emisión del SO<sub>2</sub> a condiciones de medición, tpa  
 $W_C$  = flujo de combustible, kg<sub>comb</sub>/h  
 $X_S$  = fracción de azufre en el combustible, 0.371 kg<sub>S</sub>//kg<sub>comb</sub>  
 $M_{SO_2}$  = peso molecular del SO<sub>2</sub>, 64.0588 kg/kmol  
 $M_S$  = peso molecular del S, 32.0600 kg/kmol  
 8.76 = pactor de conversión de kg/h a tpa

El análisis de los productos de combustión tiene la presencia de CO, lo que nos indica que una parte del carbono del combustible no se oxidó completamente para formar CO<sub>2</sub>, por lo tanto, esa fracción del carbono se le debe descontar a la cantidad total de carbono alimentado y el resto se supondrá que reacciona en su totalidad para formar CO<sub>2</sub>, para ello, se emplearán las siguientes ecuaciones (INEEL, 2019).

Carbono contenido en el CO:

$$\dot{m}_{C-CO} = \dot{m}_{CO} * [M_C / M_{CO}] \quad (12)$$

Donde:

$\dot{m}_{C-CO}$  = flujo de carbono de la tasa de emisión del CO, kg<sub>C</sub>/h  
 $\dot{m}_{CO}$  = tasa de emisión del CO, kg/h  
 $M_C$  = peso molecular del carbono, 12.0110 kg/kmol  
 $M_{CO}$  = peso molecular del monóxido de carbono, 28.0104 kg/kmol

Carbono alimentado con el combustible:

$$\dot{m}_{C-C} = W_C * X_C \quad (13)$$

Donde:

$W_C$  = flujo de combustible, kg<sub>comb</sub>/h  
 $X_C$  = fracción de carbono en el combustible, 0.8557 kg<sub>C</sub>//kg<sub>comb</sub>

Carbono disponible para la formación de CO<sub>2</sub>:

$$\dot{m}_{C-CO_2} = \dot{m}_{C-C} - \dot{m}_{C-CO} \quad (14)$$

Tasa de emisión del CO<sub>2</sub>:

$$\dot{m}_{CO_2} = 8.76 * \dot{m}_{C-CO_2} * [M_{CO_2} / M_C] \quad (15)$$

Donde:

$\dot{m}_{CO_2}$  = tasa de emisión del CO<sub>2</sub> a condiciones de medición, tpa  
 $\dot{m}_{C-CO_2}$  = carbono disponible para la formación del CO<sub>2</sub>, kg<sub>C</sub>/h  
 $M_{CO_2}$  = peso molecular del CO<sub>2</sub>, 44.0098 kg/kmol  
 $M_C$  = peso molecular del carbono, 12.0110 kg/kmol  
 8.76 = factor de conversión de kg/h a tpa

En la Tabla 6, se muestran las tasas de emisión promedio de las dos corridas experimentales, así como la diferencia entre la tasa de emisión con los atomizadores originales menos la tasa de emisión con los atomizadores diseño INEEL. Las tasas de emisión presentadas son suponiendo que la unidad generadora opera las 24 horas del día los 365 días del año a una carga de 151 MW, es decir, trabaja con un factor de planta de 1.0.

De la Tabla 6, se puede apreciar que el empleo de los atomizadores diseño INEEL, traerán consigo beneficios ambientales, pues, se dejarán de emitir 650.9 tpa de CO, 18.8 tpa de NO<sub>x</sub>, 1,109.2 tpa de PST, 582.5 tpa de SO<sub>2</sub> y 23,614.2 tpa de CO<sub>2</sub>.

Tabla 6. Desempeño medioambiental

Atomizadores	Tasas de emisión (tpa)				
	CO	NO <sub>x</sub>	PST	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Originales	697.2	1,251.8	2,090.1	24,685.2	1,042,998.1
Diseño INEEL	46.3	1,233.0	980.9	24,102.7	1,019,383.9
Diferencia	650.9	18.8	1,109.2	582.5	23,614.2

Los resultados de este trabajo de investigación ponen de manifiesto que no necesariamente se tienen que realizar grandes inversiones para mejorar el desempeño energético y medioambiental de las plantas generadoras.

### CONCLUSIONES

En este trabajo se ha puesto de manifiesto la importancia de evaluar en forma periódica la eficiencia de los sistemas de combustión, medir en forma continua las emisiones a la atmósfera, y realizar ajustes operativos y de diseño al sistema de combustión cuando este lo requiera.

Rediseñar algunas partes del sistema de combustión, como lo son los atomizadores de este trabajo, puede traer importantes beneficios: ahorro significativo en el consumo de combustible (897 kg/h), mismo que traducido en términos monetarios asciende a 170,352 \$/día, siempre y cuando la unidad generadora de electricidad trabaje las 24 horas del día a 151 MW.

La disminución del consumo de combustible traerá no solo un beneficio económico importante por este concepto, también hay que contabilizar el aporte de los atomizadores diseño INEEL a combatir el cambio climático y mejorar el medio ambiente, pues si la unidad trabaja con un factor de planta de 1.0, se dejarán de emitir 650.9 tpa de CO, 18.8 tpa de NO<sub>x</sub>, 1,109.2 tpa de PST, 582.5 tpa de SO<sub>2</sub> y 23,614.2 tpa de CO<sub>2</sub>.

Los resultados de este trabajo de investigación ponen de manifiesto que existen áreas de oportunidad que se pueden explotar, sin que se tengan que realizar grandes inversiones para mejorar el desempeño energético y medioambiental de las plantas generadoras.

También es conveniente señalar que se tendrán beneficios económicos por otros conceptos que no fueron cuantificados como la disminución de vapor para calentamiento de combustible, uso de menor potencia de ventiladores de tiro forzado, mejoramiento del proceso de transferencia de calor al disminuir la formación de partículas y por ende el ensuciamiento, entre otros, y por tanto se mejorará la disponibilidad de la unidad.

Es importante, en trabajos futuros implementar una metodología para identificar y evaluar todos los beneficios medioambientales y económicos que se pudieran presentar.

### REFERENCIAS

- American Society for Testing and Materials (1999). ASTM-D-1298-99 Standard test method for density, relative density, or API Gravity of crude petroleum and liquid petroleum products by hydrometer method.
- American Society for Testing and Materials (2009). ASTM D 240-09 Standard test method for heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter.
- ASKCODE DE MEXICO, S.A. Reporte de calibración IIE-1001, instrumento LANDCOM serie II, núm. de serie 9998469.
- Basu P., Kefa C. & Jestin L. (2000). *Boilers and burners: design and theory*. New York, USA: Springer-Verlag Inc.
- Gibbs B.M. (1998). *Gas composition calculations*, Chapter 2, Industrial Air Pollution Monitoring. Andrew G.C. Ed., UK: Chapman & Hall.
- Bolado E.R. (1985). Uso eficiente de los combustibles fósiles, Memoria del VI Seminario Nacional sobre el Uso Eficiente de la Energía, México.
- Code of Federal Regulation, Environmental Protection Agency (2008) Method 3A - Determination of oxygen and carbon dioxide concentrations in emissions from stationary sources (Instrumental Analyzer Procedure), 40, Part 60, App. A, USA.
- Code of Federal Regulation, Environmental Protection Agency (2000). Method 10 - Determination of carbon monoxide emissions from stationary sources, Vol. 40, Part 60, App. A, USA.
- Code of Federal Regulation, Environmental Protection Agency (2009). Method 7E-Determination of nitrogen oxides emissions from stationary sources (Instrumental Analyzer Procedure), Vol. 40, Part 60, App. A, USA.
- Code of Federal Regulation, Environmental Protection Agency (2000). Method 5 - Determination of particulate emissions from stationary sources, Vol. 40, Part 60, App. A, USA.
- Code of Federal Regulation, Environmental Protection Agency (2005). Method 1 - Sample and velocity traverses for stationary sources, Vol. 40, Part 60, App. A-1, USA.
- Comisión Federal de Electricidad, CFE. Informe de Anual 2016.
- Diego A. (2009). Improvement of the performance of a utility oil fired boiler by modifying the design of burners and atomizers. Proceedings of the ASME 2009 Power Conference. Albuquerque, México, USA. Julio 21-23, 2009. Recuperado de <https://doi.org/10.1115/POWER2009-81139>
- Espinoza J. *et al.* (1993). Teoría y pruebas de combustión en generadores de vapor, informe interno. INEEL/2521/I 30/P.
- Horiba Instruments Inc., Instruction Manual for MPA-510 Horiba General Purpose Gas Analysis Unit, Horiba Manual Núm.: 93132-1, Octubre 1991.

- Horiba Instruments Inc., Instruction Manual for VIA-510 General Purpose Gas Analyzer, 6th Ed., septiembre 1999, Código: I0041213000E.
- Horiba Instruments Inc., Instruction Manual for CLA-510SS General Purpose Gas Analyzer Unit, 7th Ed., abril 1998, Código: I041218600.
- Huerta M. *et al.* (2004a). Burner modifications for the control of particulate emission in thermoelectric power stations. International conference on efficiency, costs, optimization, simulation and environmental impact of energy and process systems-ECOS. México. 11.
- Huerta M. *et al.* (2004b). Design criteria of heavy fuel oil burners for high efficiency combustion and low particulate emissions. AFRC-JFRC 2004 Joint International Combustion Symposium. Hawaii, USA. 13 pp. 10/10/2004.
- INEEL (2019) Desarrollos realizados por personal del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.
- Ingeniería y calibraciones de equipos para monitoreo ambiental, ICEMA, S.A. de C.V. Certificado de calibración del tubo pitot, núm. de control: B-IIE-0273.
- Land Instruments International. LANCOM Series II Portable Flue Gas Analyser, OP. Instruction Part No. 770.030 Rev. 9, 29 de marzo 2000, pp. 1-129.
- Mani A.G. *et al.* (2005). Impacto en la eficiencia y reducción de emisiones de generadores de vapor mediante la innovación de sus quemadores. Latinamerican Congress of Heat and Mass Transfer. Venezuela, abril de 2005, 11 p.
- Mullinger P.J. & Chigier N.A. (1974). The design and performance of internal mixing multijet twin fluid atomizers. *Journal of the Institute of Fuel*. Vol 47. pp. 251-261.
- Petróleos Mexicanos, PEMEX (2018). Precios al público de los productos petrolíferos. Indicadores petroleros. Recuperado de [http://ri.pemex.com/files/dcpe/petro/epublico\\_esp.pdf](http://ri.pemex.com/files/dcpe/petro/epublico_esp.pdf)
- Praxair, Informe de ensayo, núm. de control M0916263, Oxígeno 16.03 cmol/mol, balance nitrógeno.
- Praxair, Informe de ensayo, núm. de control M1018036, Monóxido de carbono 804  $\mu\text{mol/mol}$ , balance nitrógeno.
- Praxair, Informe de ensayo, núm. de control M0916114, Óxido Nítrico 452.2  $\mu\text{mol/mol}$  balance nitrógeno.
- Rapún J.L. *et al.* (2004). Optimización integrada del rendimiento y las emisiones medioambientales en instalaciones de combustión. *Energía*, 30(178), 63-67.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011.
- Yunus A.C. (2005). *Transferencia de Calor, Tabla de Constantes Físicas*. México: Mc Graw Hill.