

Metodología de cálculo de NO_x en generadores de vapor que queman gas natural

Guillermo Jarquin-López¹
Georgiy Polupan²
Juan Antonio Jiménez-García³
Yevgen Pysmenny⁴

¹Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Culhuacán, Instituto Politécnico Nacional. Av. Santa Ana núm. 1000, CP 04430, México, DF. MEXICO.

²Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos', Col. Lindavista, CP 07738, México, DF. MEXICO.

³UAP Nezahualcóyotl, Universidad Autónoma del Estado de México. Av. Bordo de Xochiaca s/n, Col. Benito Juárez, CP 57000, Nezahualcóyotl, Estado de México. MEXICO.

⁴Universidad Técnica Nacional de Ucrania, Pr. Peremogy 37, CP 03256, Kiev. UCRANIA.

correo electrónico (email): gjarquin@ipn.mx
jjimenez@uaemex.mx
evgnik@com.ua

Recibido el 4 de marzo de 2010; aceptado el 8 de diciembre de 2010.

1. Resumen

Este trabajo presenta la metodología para el cálculo de emisiones de NO_x en un generador de vapor de 350 ton/h quemando gas natural y se investigan los métodos de control de NO_x durante la combustión. Hoy en día es uno de los principales problemas de las plantas termoeléctricas puesto que genera un alto nivel de emisiones de óxidos de nitrógeno a la atmósfera. Esta metodología consiste en la determinación de los cuatro parámetros fundamentales que intervienen en la formación de NO_x y son los siguientes: coeficiente de exceso de aire en la

zona de combustión activa (ZCA) α_{ZCA} , la temperatura promedio de la ZCA T_{ZCA} , el flujo de calor reflejado en ZCA q_{ZCA}^{refl} y el tiempo de residencia de los gases en ZCA τ_{ZCA} .

Para poder determinar estos parámetros se tiene que considerar la composición del gas natural, la transferencia de calor en el horno, las condiciones de funcionamiento y las dimensiones del generador de vapor, entre otros factores. Los cuatro parámetros principales se sustituyen en el polinomio experimental para el combustible en cuestión y, de esta forma, se puede determinar la emisión de NO_x para los métodos de combustión que se analizarán en el presente artículo: recirculación de gases, diferentes lugares de introducción de gases de recirculación, combustión a dos etapas e inyección de agua.

Palabras clave: combustión, emisiones de NO_x , generador de vapor, gas natural .

2. Abstract (Methodology for Calculating NO_x Emissions in Steam Generators at Burning Natural Gas)

This work presents the methodology of NO_x emissions in a steam generator of 350 ton/h burning natural gas and investigated the methods of control of NO_x during combustion. Nowadays, it is one of the main problems of the power stations since it generates pollution by nitrogen oxides emissions in the atmosphere. This methodology is based on four main parameters that causes the NO_x formation, and they are: coefficient of excess air in the Active Burning Zone (ABZ) α_{ZCA} , the average temperature of the ABZ T_{ZCA} , the reflected heat flux in ABZ q_{ZCA}^{refl} and the time of residence in ABZ τ_{ZCA} .

In order to determine these parameters it must be considered the chemical composition of natural gas, the heat transfer processes in the furnace, the operation conditions and the dimensions of the steam generator, among others factors. The four main parameters are introduced in the experimental polynomial equation for any fuel in order to determine the NO_x concentration. Furthermore, the NO_x emissions can be determined for different methods of NO_x control as follows: gas recirculation, different places from introduction of recirculation gases, two staged of combustion and water injection.

Key words: combustion, NO_x emissions, steam generator, natural gas.

3. Introducción

Los óxidos del nitrógeno (NO_x) que se forman en hornos de los generadores de vapor representan la suma de monóxido de nitrógeno (NO), del dióxido de nitrógeno (NO₂) y del óxido nitroso (N₂O). La combustión de cualquier combustible fósil genera NO_x debido a altas temperaturas y la disponibilidad de oxígeno y nitrógeno para ambos, aire y combustible [1].

Existen tres mecanismos de formación de NO_x durante la combustión: térmicos (Zeldovich), de combustible y rápidos (Fenimore) [2]. Los NO_x formados por la oxidación del nitrógeno del combustible se llaman "NO_x de combustible". Los NO_x formados por el nitrógeno del aire a altas temperaturas asociadas con la combustión se denominan "NO_x térmicos". Los NO_x que se forman en el frente de la flama se denominan NO_x rápidos.

El tipo de NO_x formado varía con el combustible. El gas natural produce sobre todo "NO_x térmicos" puesto que este combustible tiene bajo contenido de nitrógeno [3].

El proceso de los óxidos de nitrógeno ocurre en un campo de alta temperatura que excede 1 800 K, conocido como zona de combustión activa, Bartok [4].

La formación de NO_x termal llega a ser significativa a partir de los 2 700°F y aumenta exponencialmente con la temperatura desde ese punto. El NO_x termal es controlado con más eficacia reduciendo temperaturas en la zona de la combustión debajo de 2 700°F lo más rápidamente posible [3].

El proceso de la formación de NO_x se determina con los factores principales siguientes: temperatura en la zona de combustión activa, densidad de flujo de calor reflejado en ZCA, exceso de coeficiente de aire y tiempo de residencia de productos de combustión en ZCA, [4, 5]

Los métodos de reducción de NO_x, se dividen en los que involucran modificaciones de la combustión, que son lo que emplearemos para el desarrollo del artículo y los que involucran control durante la poscombustión [6].

En este artículo se investigan los métodos de control de NO_x durante la combustión y se contemplan los siguientes: bajo exceso de aire, combustión a dos etapas e inyección de agua, los cuales se describen a continuación.

Recirculación de gases

La introducción de gases de recirculación en el horno ocasiona un decremento de la temperatura de la flama. Una de

las características importantes en la aplicación de este método, es que el coeficiente de exceso de aire en los gases de recirculación α_{rec} , es mayor que en el horno, debido a las filtraciones de aire en el precalentador de aire. En consecuencia, cuando se aplica la recirculación de gases en los generadores de vapor, los excesos de aire se incrementan en la zona de combustión activa (ZCA).

Diferentes lugares de introducción de gases de recirculación

En este caso, se tiene la introducción de diversos lugares de la inyección de los gases de recirculación, dicho método consiste en la observación de la concentración del NO_x cuando los gases de recirculación se introducen en el conducto del combustible ($n = 2$), en el ducto de aire caliente ($n = 3$), o en canales separados ($n = 5$).

Combustión a dos etapas

Una de los métodos de control de la formación de NO_x durante la combustión es la combustión a dos etapas. Se llama combustión a dos etapas, al método no tradicional de quemado de combustibles, en donde el combustible junto con la cantidad insuficiente de aire ($\alpha < 1$) es insertado a través de los quemadores principales, a la cámara de combustión, y la parte restante del aire (necesaria para la combustión completa) es transmitida a lo largo de la flama por medio de los quemadores de los niveles superiores.

Inyección de agua

La introducción de agua en la zona de combustión activa de los generadores de vapor es un método de control de la formación de óxidos de nitrógeno durante la combustión del gas natural.

El generador de vapor analizado en esta investigación presenta los siguientes parámetros de operación, que serán útiles para la realización de la misma, dichos parámetros se muestran en la tabla 1.

4. Método de cálculo de NO_x

En los hornos de las calderas se forman todas las clases de óxidos de nitrógeno, como inicio del estudio se define la zona de combustión activa como el volumen del horno donde los gases tienen una temperatura superior a 1 800 K [4]. Esta zona es fundamental para determinar los cuatro parámetros que influyen a la formación de NO_x y en los trabajos referenciados se conoce como la zona de combustión activa de los generadores de vapor [6, 8, 9]. La formación de óxidos de nitrógeno en la zona de combustión activa (ZCA)

Tabla 1. Parámetros de cálculo del generador de vapor.

Característica	Descripción
Capacidad	350 t/h de vapor
Presión del horno	Presión forzada
Aplicación	Generación de energía eléctrica
Calderas	Tipo acuatubulares
Quemadores	24 con posición tangencial
Temperatura de gases de escape	160 °C
Temperatura del aire precalentado	260 °C
Exceso de aire quemador	1.10

depende totalmente de cuatro parámetros termofísicos: coeficiente de exceso de aire (α_{ZCA}), temperatura promedio en la zona de combustión activa (T_{ZCA}), densidad de flujo de calor reflejado en ZCA (q_{ZCA}^{refl}) y el tiempo de residencia de gases en ZCA (τ_{ZCA}).

El primer parámetro fundamental es la temperatura promedio de los productos de la combustión en la zona de combustión activa. Esta temperatura está definida por la siguiente ecuación [10]:

$$\bar{T}_{ZCA} = T'_{ad}(1 - \bar{\Psi}_{ZCA})^{0.25} (1 - r^{1+mr}) \quad (1)$$

Como se observa de la ecuación anterior, la temperatura promedio depende de la temperatura adiabática del horno. La temperatura adiabática del horno en dependencia de la combustión incompleta del combustible es determinada por la ecuación:

$$T'_{ad} = \frac{\beta_{comb} PCI + Q_{aire} + Q_{rec} + Q_{comb} + Q_{agua}}{\beta_{comb} v_{gas}^0 C_{gas} + 1.0161(\alpha_{quem} - \beta_{comb})v_{aire}^0 C_{aire} + 1.24gC_{agua}} + 273 \quad (2)$$

c_{gas} , c_{aire} y c_m son las capacidades caloríficas de los gases, el aire y de la humedad. Los valores se calcularon de las recomendaciones [10].

El coeficiente de la absortividad térmica promedio de las superficies de la zona de combustión activa se calcula con la ecuación:

$$\bar{\Psi}_{ZCA} = \frac{\sum \Psi_i A_i}{\sum A_i} \quad (3)$$

De acuerdo a la revisión de literatura, la temperatura proporciona la influencia más importante en la generación de óxidos de nitrógeno. Según la definición de la temperatura promedio integral en ZCA es:

$$\bar{T}_{ZCA} = \int_0^{\tau_{ZCA}} T d\tau / \tau_{ZCA} \quad (4)$$

Roslyakov [6] demuestra que el nivel de valores máximos para la concentración de óxidos de nitrógeno no depende de la temperatura promedio integral, sino de la temperatura máxima de los gases en ZCA. Sin embargo, no es posible calcular la temperatura máxima de ZCA.

Por lo tanto, en los artículos [6,8,9] otros investigadores ofrecen dos variables para sustituir la temperatura máxima. Estas variables son: la temperatura promedio y el flujo de calor reflejado. El flujo de calor reflejado en la zona de combustión activa es determinado por la ecuación:

$$q_{ZCA}^{refl} = q_{ZCA} (1 - \bar{\Psi}_{ZCA}) \quad (5)$$

Donde el flujo de calor en ZCA (q_{ZCA}) puede ser calculado por:

$$q_{ZCA} = \frac{B(\beta_{comb} PCI + Q_{comb} + Q_{aire} + Q_{rec} + Q_{agua})}{A_{ZCA}} \quad (6)$$

El siguiente parámetro importante es coeficiente de exceso de aire, que toma en cuenta el coeficiente de exceso de aire de quemadores y el aire introducido por los gases de la recirculación:

$$\alpha_{ZCA} = \alpha_{quem} + r(\alpha_{rec} - 1) \quad (7)$$

Las investigaciones realizadas en los trabajos [6, 9] han demostrado, que la dependencia de la formación de NO_x por el coeficiente de exceso de aire a una temperatura constante es muy relevante y la formación de los óxidos de nitrógeno térmicos con el exceso de aire tiene un carácter exponencial [5].

La suma de todas las clases de óxidos de nitrógeno (rápidos, de combustible y térmicos) caracterizará la concentración final de óxidos de nitrógeno. En el trabajo [6] fue publicado un polinomio experimental de cuarto grado para la descripción de la influencia del coeficiente de exceso de aire en la concentración de óxidos de nitrógeno.

El tiempo de residencia de los productos de combustión en ZCA es determinada empleando la siguiente ecuación [6,9]:

$$\tau_{ZCA} = \frac{\alpha \cdot b \cdot c_{ZCA}^{R,g} \cdot \xi}{B \cdot V_{gas}^{R,g} \cdot (\bar{T}_{ZCA}/273)} \quad (8)$$

Donde ξ es el coeficiente de llenado de gases de la ZCA y es un valor empírico extraído de [10] como 0.7 para los hornos con flujo directo usando los quemadores tangenciales situados en las esquinas del horno.

El volumen de productos de combustión en ZCA incluyendo los gases de recirculación y la inyección de agua es calculado por la ecuación:

$$v_{ZCA,rec,g} = \beta_{comb} v_{gh}^0 + 1.0161(\alpha_{quem} - \beta_{comb})v_{aire}^0 + 1.24g + r[v_{gh}^0 + 1.0161(\alpha_{rec} - 1)v_{aire}^0 + 1.24g] \quad (9)$$

Donde v_{gh}^0 es el volumen teórico de los gases húmedos.

La altura de ZCA depende de los tamaños geométricos de la zona de combustión activa y de la relación de los volúmenes de los productos de combustión en ZCA:

$$c_{ZCA}^{R,g} = c_{ZCA} \frac{V_{ZCA}^{R,g}}{V_{ZCA}} \quad (10)$$

El volumen de productos de combustión sin gases de la recirculación y agua inyectada en ZCA (V_{ABZ}):

$$v_{ZCA} = \beta_{comb} v_{gh}^0 + 1.0161(\alpha_{quem} - \beta_{comb})v_{aire}^0 \quad (11)$$

La ecuación para el cálculo de la concentración de óxidos de nitrógeno (en ppm) en productos de combustión propuesto por Roslyakov [8] es la siguiente:

Combustión de gas natural

$$C_{NO_x} = [26.0 \exp \left[0.26 \frac{T_{ZCA} - 1700}{100} \right] - 4.7] \times [26.0 \exp(q_{ZCA}^{refl}) - 1][13.0 + 9.6(\alpha_{ZCA} - 1.07) + 59.4(\alpha_{ZCA} - 1.07)^2 + 18.1(\alpha_{ZCA} - 1.07)^3 - 79.8(\alpha_{ZCA} - 1.07)^4] \tau_{ZCA}$$

5. Resultados Recirculación de gases

Para comenzar el análisis se inicia con el efecto presentado en la concentración de NOx cuando la recirculación de gases cambia en el generador de vapor. En la tabla 2 se muestran

Tabla 2. Formación de NOx con recirculación de gases.

GAS NATURAL						
Fracción de recirculación	%	T_{ZCA} (K)	q_{ZCA} (MW/m ²)	τ_{ZCA} (s)	α_{ZCA}	C_{NO_x} (ppm)
0	100	1881.54	0.361	0.58	1.100	125.33
	84	1881.54	0.303	0.69	1.100	121.54
	67	1881.54	0.241	0.87	1.100	117.71
	45	1881.54	0.162	1.29	1.100	112.97
0.05	100	1744.69	0.348	0.63	1.108	86.53
	84	1744.69	0.292	0.75	1.108	83.95
	67	1744.69	0.233	0.94	1.108	81.39
	45	1744.69	0.156	1.40	1.108	78.24
0.10	100	1643.76	0.336	0.67	1.116	64.39
	84	1643.76	0.282	0.79	1.116	62.58
	67	1643.76	0.225	0.99	1.116	60.75
	45	1643.76	0.151	1.48	1.116	58.47
0.15	100	1559.02	0.325	0.70	1.124	49.40
	84	1559.02	0.273	0.84	1.124	48.06
	67	1559.02	0.217	1.05	1.124	46.69
	45	1559.02	0.146	1.56	1.124	45.00

los cuatro parámetros principales (gas natural) que depende de la concentración de NOx, así como la concentración para diferentes cargas y porcentajes de gases de recirculación.

Es posible observar que si la cantidad de gases de recirculación aumenta, entonces la concentración de NOx disminuye.

En relación con el calor reflejado, es posible observar su reducción tan pronto como la cantidad de recirculación de gases aumenta. Esto sucede porque cuando baja la temperatura en los gases que entran en el horno, el fenómeno de transferencia de calor es afectado. También sucede eso, cuando hay una pequeña carga, el calor reflejado disminuye porque una cantidad de combustible más baja se quema. Por lo tanto, hay una cantidad de una energía más baja en la transmisión.

El tiempo de residencia es inversamente proporcional al consumo de combustible. Esto es porque cuando la carga aumenta el tiempo de residencia es bajo. Por una parte, para la misma carga y con un porcentaje creciente de los gases de la recirculación hay un aumento en el tiempo de residencia que es principalmente debido a una reducción en la temperatura media del horno.

En relación con la concentración de NOx, es posible ver que cuando hay una pequeña carga la concentración de NOx se

reduce debido a la poca cantidad del combustible que se quema. (tabla 2). Es también posible ver que cuando el porcentaje de recirculación de gases es elevado las concentraciones de NO_x van abajo principalmente porque la temperatura promedio del horno cae, el tiempo de residencia también se afecta al contrario.

Esto es, cuando el porcentaje de la recirculación de los gases es más alto, el tiempo de residencia es más alto también. Sin embargo, este aumento afecta menos, si se compara con el efecto que la temperatura promedio tenga con la concentración de NO_x.

En la tabla 1 es posible observar que las concentraciones del NO_x son más altas cuando no hay método de disminución aplicado. La mayor concentración de NO_x se produce a una recirculación de gases del 5%. Por una parte, al aumentar las cantidades de gases de la recirculación en el 5% cada vez, va la disminución de la formación del NO_x abajo también.

La reducción más grande de NO_x cuando la recirculación de los gases es aplicada es 60.5% para el gas natural.

Diversos lugares de introducción de gases de recirculación

El caso en el cual tenemos diversos lugares de la inyección de los gases de recirculación consiste en la observación de la concentración de NO_x cuando los gases de recirculación se introducen en el conducto del combustible ($n = 2$), en el ducto de aire caliente ($n = 3$), o en canales separados ($n = 5$). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.

Se observa que hay una concentración más alta del NO_x para ($n = 5$) porque hay ni una premezcla *fuel-air*, que afecta a la concentración del NO_x. En el caso de ($n = 2$) una concentra-

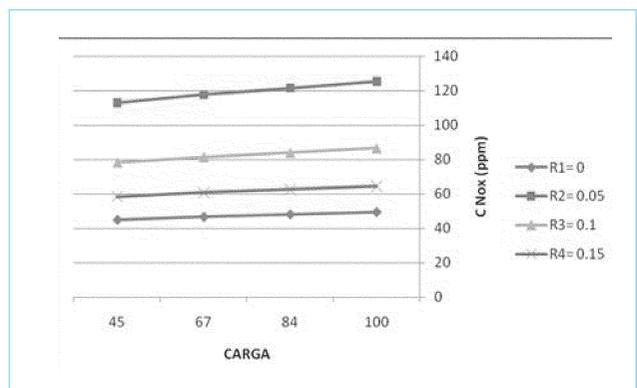


Fig. 1. Formación de NOx dependiendo de la carga en diversos porcentajes para la recirculación del gas natural.

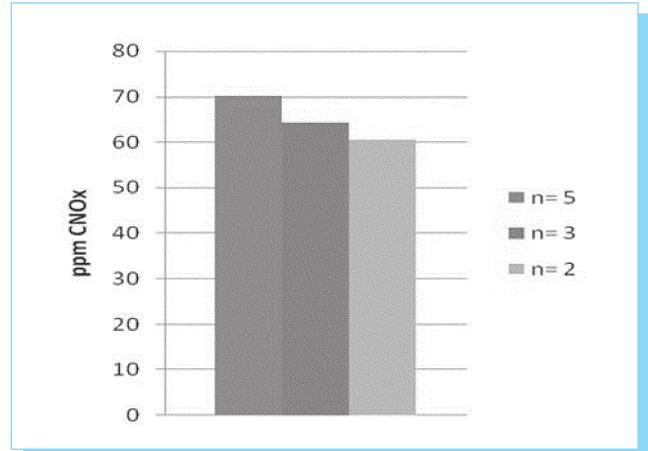


Fig. 2. Formación de NOx dependiendo del lugar de introducción de los gases de recirculación.

ción más baja del NO_x se obtiene debido a la reducción en la temperatura media del horno. En el caso ($n = 3$) una reducción de la temperatura media del horno también se obtiene. Sin embargo, no es igual que el que está conseguido para ese caso en el cual ($n = 2$).

La ventaja obtenida en la reducción de concentración de NO_x cuando es el cambio de lugar de la inyección de los gases es 13% para gas natural.

Combustión a dos etapas

Para dos etapas de combustión en el horno del generador de vapor se propone introducir el 100 % del combustible en los dos niveles inferiores del quemador y en los tres niveles introducir el 33.33% de aire requerido por unidad de combustible. Esto provoca la formación de dos zonas de combustión: una rica en combustible y otra rica en aire. Por otro lado la altura geométrica L_{ZCA} disminuye al aplicar dos etapas de combus-

Tabla 3. Resultados de la concentración NOx al cambiar el lugar de la introducción de los gases del escape.

CASO	GAS NATURAL				
	T_{ZCA} (K)	q_{ZCA}^{refl} (MW/m ²)	τ_{ZCA} (s)	α_{ZCA}	C_{NO_x} (ppm)
$n = 2$	1621.30	0.336	0.67	1.116	60.60
$n = 3$	1643.76	0.336	0.66	1.116	64.39
$n = 5$	1675.77	0.336	0.65	1.116	70.09

tión porque en el nivel superior se inyecta solamente aire, y por eso es la frontera de la zona de combustión activa, la siguiente ecuación muestra la ecuación de cálculo de la altura geométrica de la zona de combustión activa.

$$L_{GZCA} = 1.5 + 1_{quem} = 1.5 + 4.33 = 5.83 \text{ m}$$

Para dos etapas en el horno el coeficiente de exceso de aire es inferior al estequiométrico, como se observa a continuación:

Los volúmenes de gas teórico y de aire teórico para quemar 1 m³ de gas natural de combustible son respectivamente:

$$V_{gas}^0 = 11.38 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \quad V_{aire}^0 = 10.06 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$$

Por otro lado, el coeficiente de exceso de aire del quemador está definido por:

$$\alpha_{quem} = \frac{V_{aire}^{ZCA}}{V_{aire}^0}$$

de donde

$$V_{aire}^{ZCA} = 1.10 V_{aire}^0 = 11.18 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$$

En dos etapas la relación aire-combustible tiene la siguiente proporción:

$$66.6\% \text{ aire} \rightarrow 100\% \text{ combustible}$$

donde

$$V_{aire}^{ZCA} = 0.666 = 7.45 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \quad \text{y} \quad \alpha_{quem} = \frac{7.45}{10.16} = 0.733$$

En la primera sección el generador de vapor opera sin métodos de disminución. La segunda sección muestra cuando el generador de vapor opera con dos etapas de combustión, sin recirculación de gases de escape ni inyección de agua.

La tercera sección corresponde a los resultados cuando opera con condiciones reales de la planta; pero con dos etapas de combustión.

Se observa que cuando se tiene una combustión de dos etapas (tabla 4), la temperatura promedio del horno disminuye, debido a que el proceso de combustión es más lento obteniéndose menores temperaturas en el horno.

Inyección de agua en el horno del generador de vapor

A continuación se presentan los resultados al variar el porcentaje de agua inyectada en el horno para reducir la temperatura (tabla 5).

Para este método de disminución de NO_x se tiene un comportamiento similar al método de recirculación de los gases de

Tabla 4. Formación de NOx con combustión a dos etapas.

GAS NATURAL						
CASO	CARGA	T _{ZCA} (K)	q _{ZCA} ^{refl} (MW/m ²)	τ _{ZCA} (s)	α _{ZCA}	C _{NOx} (ppm)
r = 0 g = 0 α _{quem} = 1.10	100	1881.54	0.361	0.58	1.100	125.33
	84	1881.54	0.303	0.69	1.100	121.54
	67	1881.54	0.241	0.87	1.100	117.71
	45	1881.54	0.162	1.29	1.100	112.97
r = 0 g = 0 α _{quem} = 0.733	100	1734.74	0.277	0.75	0.733	85.08
	84	1734.74	0.232	0.90	0.733	83.13
	67	1734.74	0.185	1.13	0.733	81.12
	45	1734.74	0.124	1.68	0.733	78.63
r = 0.10 g = 0 α _{quem} = 0.733	100	1460.08	0.251	0.90	0.749	34.68
	84	1460.08	0.211	1.07	0.749	33.96
	67	1460.08	0.168	1.34	0.749	33.22
	45	1460.08	0.113	2.00	0.749	32.29

escape, sin embargo, los valores de NO_x son comparativamente menores con inyección de agua respecto de los gases de recirculación. En ambos casos el estudio se realizó para 0 a 5, 10 y 15 %.

Bajo las mismas condiciones anteriores, pero analizando el flujo de calor reflejado se observa que éste, prácticamente, se puede considerar constante lo mismo sucede con el tiempo de residencia y el exceso de aire del horno. Estas pequeñas variaciones en los parámetros se deben a que la inyección de agua tiene lugar en el horno y al bajo porcentaje de agua

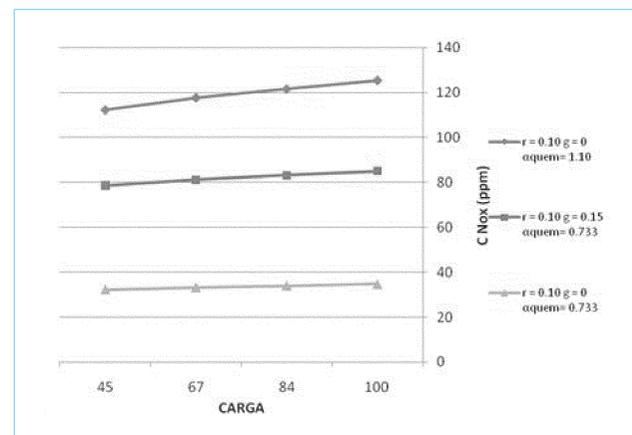


Fig. 3. Formación de NOx dependiendo de la carga en diversos porcentajes para la combustión a dos etapas.

Tabla 5. Formación de NOx dependiendo de la carga y del porcentaje de agua inyectada en el horno para gas natural.

CASO	CARGA	PARÁMETROS PRINCIPALES				CONCENTRACIÓN
		GAS NATURAL				
% de inyección de agua	%	T_{ZCA} (K)	q_{ZCA} (MW/m ²)	τ_{ZCA} (s)	α_{ZCA}	C_{NO_x} (ppm)
0	100	1881.54	0.361	0.58	1.100	125.33
	84	1881.54	0.303	0.69	1.100	121.54
	67	1881.54	0.241	0.87	1.100	117.71
	45	1881.54	0.162	1.29	1.100	112.97
5	100	1863.09	0.360	0.58	1.100	118.95
	84	1863.09	0.302	0.69	1.100	115.37
	67	1863.09	0.241	0.87	1.100	111.74
	45	1863.09	0.161	1.30	1.100	107.25
10	100	1844.96	0.359	0.58	1.100	112.97
	84	1844.96	0.301	0.70	1.100	109.57
	67	1844.96	0.240	0.88	1.100	106.13
	45	1844.96	0.161	1.31	1.100	101.88
15	100	1827.15	0.358	0.59	1.100	107.34
	84	1827.15	0.301	0.70	1.100	104.12
	67	1827.15	0.240	0.88	1.100	100.85
	45	1827.15	0.161	1.31	1.100	96.82

inyectada comparados con la cantidad de gases recirculados, lo que provoca que la temperatura promedio del horno no se reduzca en mayor medida y por lo tanto, no se disminuya en gran porcentaje la concentración de NOx.

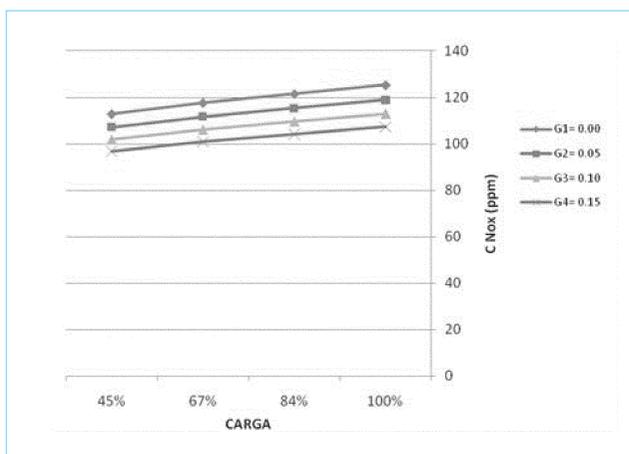


Fig. 4. Formación de NOx dependiendo de la carga en diversos porcentajes con inyección de agua en el horno del generador de vapor.

5. Conclusiones

El análisis de los métodos de disminución de NOx para este generador de vapor y con las condiciones reales de operación, se realiza para proponer alternativas de solución a la tendencia de bajar los límites permisibles de emisiones en México en los próximos años.

El porcentaje máximo de recirculación de los gases establecido para realizar el análisis en este trabajo es de 15% y el porcentaje máximo de inyección de agua es de 15%.

En la comparación de recirculación de los gases, se tiene la máxima disminución de NOx al aplicar la recirculación de los gases de 61 % para el combustible en cuestión.

Por otro lado, la concentración de NOx al variar el lugar de introducción de los gases de recirculación es de 13 % para gas natural, siendo un valor pequeño, sin embargo, este método representa una alternativa a considerar.

Para una misma carga por ejemplo 100 %, existe una disminución de 32.11 % en la concentración de NOx, cuando el generador de vapor opera con dos etapas de combustión y cuando opera sin métodos de disminución. Sin embargo la disminución máxima se obtiene cuando el generador de vapor opera con dos etapas de combustión y 10 % de recirculación de los gases y es de 72.33 % por lo que se observa que el efecto principal en la disminución de NOx es debido a la recirculación de los gases.

La disminución máxima de NOx es de 14 % al aplicar la inyección de agua comparada con el 61 % de disminución de NOx que se tiene con el método de recirculación de gases, con las mismas condiciones de operación.

Nomenclatura

T_{ad}	[K]	Temperatura adiabática de la llama para la combustión incompleta del combustible en ZCA.
R	$[m^3/m^3_{fuel}]$	Fracción de gases de recirculación.
N	[-]	Factor dependiente del lugar de entrada de los gases de recirculación.
Ψ_{ZCA}	[-]	Coefficiente promedio de absortividad térmica de las superficies de ZCA.
c_{gas}	[MJ/m ³]	Capacidad calorífica promedio de los gases de combustión.
c_{aire}	[MJ/m ³]	Capacidad calorífica promedio del aire.

c_m	[MJ/m ³]	Capacidad calorífica promedio del agua inyectada.
Q_L	[MJ/m ³]	Poder calorífico inferior del combustible.
Q_{comb}	[MJ/m ³]	Calor sensible del combustible precalentado en ZCA.
Q_{aire}	[MJ/m ³]	Calor introducido con aire precalentado en la ZCA.
Q_{rec}	[MJ/m ³]	Calor introducido en ZCA con los gases de recirculación.
Q_m	[MJ/m ³]	Calor suministrado en la ZCA por inyección de agua.
V_{gas}^0	[m _{cp} /m _{fuel}]	Volumen teórico de los productos de combustión.
V_{air}^0	[m _{air} /m _{fuel}]	Volumen teórico de aire para quemar una unidad de combustible.
β	[-]	Eficiencia de combustión.
α_{burn}	[-]	Coefficiente de exceso de aire en los quemadores.
τ_{ABZ}	[s]	Tiempo de residencia de los gases en la ZCA.
q_{ABZ}	[MW/m ²]	Densidad de flujo de calor reflejado en la ZCA.
C_{NO_x}	[ppm]	Concentración de óxidos nitrosos.
G	[m _{agua} /m _{fuel}]	Parte de humedad traída en ABZ.
A_i	[m ²]	Área de superficies en ZCA.
Ψ_i	[-]	Coefficiente de absorción de cada superficie.
q_{ABZ}	[MW/m ²]	Flujo de calor absorbido en ZCA.
A_{ZCA}	[m ²]	Área total de las superficies de ZCA.
a	[m]	Ancho del quemador.
b	[m]	Profundidad del quemador.
$C_{ABZ}^{R,g}$	[m]	Altura de ZCA.
B	[m _{fuel} /s]	Consumo de combustible.
$V_{ABZ}^{R,g}$	[m _{cp} /m _{fuel}]	Volumen de gases en ZCA.
\bar{T}_{ABZ}	[K]	Temperatura promedio de gases en ZCA.

ξ	[-]	Factor de relleno de ZCA con productos de combustión.
α_{gas}^{rec}	[-]	Coefficiente de exceso de recirculación de aire de los gases.
V_{ZCA}	[m _{cp} /m _{fuel}]	Volumen de productos de combustión recirculación de gases e inyección de agua dentro de ZCA.
L_{GZCA}	[m]	Longitud geométrica de la zona de combustión activa.
l_{quem}	[m]	Longitud del quemador.

6. Referencias

- [1] Herman-Babcock, G., y Wilcox, S., *Steam its Generation and use*, Mc Dermott co.,2005.
- [2] Warnatz, J., Maas U., y Dibble, R. W., *Combustion*, Springer,1991.
- [3] Booher, J. H., *NOx Formation and Control via Furnace Cleanliness Management, the Western Fuels Conference*. Kansas City, 1993.
- [4] Bartok, W., y Engleman, V. *Laboratory Studies and Mathematical Modeling of NOx Formation in Combustion Processes*. ESSO Research and Engineering Company. Final Report. Contract CPA 70-90. Linden, New Jersey.
- [5] Jarquin-López, G., *Nitrogen Oxides formation in power boilers at burning natural gas and fuel oil*, tesis PhD, México DF, 2006.
- [6] Roslyakov, P.V., y Egorova, L.E., “Method of calculation of nitrogen oxide formation in hot water and steam boilers”, *Thermal Engineering*, núm. 4, 1997, pp.67-74.
- [7] Stephen, R. T., *An introduction to combustion. concepts and applications*. United States of America. McGraw-Hill Higher Education 2000.
- [8] Roslyakov, P.V., y Egorova, L.E., “Influence of the Basic Characteristics of Active Burning Zone on Nitrogen Oxides Formation”. *Thermal Engineering*, núm. 9, 1996, pp.22-26.
- [9] Roslyakov, P.V. *et al.*, “Recommendations on decrease of nitrogen oxide formation in gas and fuel oil boilers”. *Power Plants*, núm. 9, 1991, pp. 9-17.
- [10] Bezgreshnov, A., Lipov-Yu, M., y Shleyfer, B. *Calculation of Steam Boilers*. Moscow, Energoatomizdat, 1991.