



## Metodología de cálculo de las emisiones de NOx para un generador de vapor de unidad 350 MW

**Guillermo Jarquin López**

[gjarquin@ipn.mx](mailto:gjarquin@ipn.mx)

<https://orcid.org/0000-0001-9006-868X>

Instituto Politécnico Nacional – ESIME Culhuacan  
CDMX – México

**Pedro Guevara López**

[pguevara@ipn.mx](mailto:pguevara@ipn.mx)

<https://orcid.org/0000-0001-5373-1403>

Instituto Politécnico Nacional – ESIME Culhuacan  
CDMX – México

**Georgiy Polupan**

[gpolupan@ipn.mx](mailto:gpolupan@ipn.mx)

<https://orcid.org/0000-0003-0459-0362>

Instituto Politécnico Nacional – ESIME Zacatenco  
CDMX – México

**Roselia Jarquin López**

[jarose\\_1@yahoo.vom.mx](mailto:jarose_1@yahoo.vom.mx)

<https://orcid.org/0000-0001-9633-4440>

Instituto Politécnico Nacional - CIIDIR  
Oaxaca – México

Correspondencia: [gjarquin@ipn.mx](mailto:gjarquin@ipn.mx)

Artículo recibido 16 octubre 2022 Aceptado para publicación: 16 noviembre 2022

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo

Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

Cómo citar López, G. J., Guevara López, P., Polupan, G., & López, R. J. (2022). Metodología de cálculo de las emisiones de NOx para un generador de vapor de unidad 350 MW. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 4687-4700. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v6i6.3774](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.3774)

## RESUMEN

Se presenta una metodología para determinar óxidos de nitrógeno (NOx) para un generador de vapor de 350 MW que quema gas natural. La metodología consiste en la determinación de cuatro parámetros que intervienen en la formación de NOx: 1) coeficiente de exceso de aire, 2) la temperatura promedio, 3) el flujo de calor reflejado y 4) el tiempo de residencia de los gases en la zona de alta temperatura. Para su determinación se considera la composición del combustible, la transferencia de calor en el horno, las condiciones de funcionamiento y las dimensiones del generador de vapor, entre otros factores. Estos parámetros se sustituyen en el polinomio para la quema de gas natural y se determinan las emisiones de NOx para diferentes métodos de reducción como: dos etapas de combustión, con bajo exceso de aire, con inyección de agua, con recirculación de los gases y la combinación de métodos de reducción. Los resultados muestran que con la operación de referencia con recirculación de gases de 15% a 100% de carga se forman 310 ppm. Se realiza un análisis con diferentes valores de recirculación de gases, R: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% para dos cargas parciales: MRC y 100%. A carga de 100% la máxima reducción de NOx por recirculación de gases fue de 63%. Finalmente, a la operación de referencia de la planta, se le aplica inyección de agua al horno del generador de vapor en 5%, 10%, 15%, 20% y 25% para reducir las emisiones de NOx. Para una carga de 100%, recirculación de gases R=15% y con la aplicación de 25% de agua se obtuvo una reducción máxima de la cantidad de NOx un 17%. Los resultados concuerdan con la información científica en cuanto a las reducciones obtenidas aplicando recirculación de gases e inyección de agua en el horno.

**Palabras clave:** calor; combustión; gas natural; generador de vapor; NOx.

## NO<sub>x</sub> Emission Calculation Methodology for a 350 MW Steam Generator

### ABSTRACT

A methodology is presented to determine nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) for a 350 MW steam generator burning natural gas. The methodology consists of the determination of four parameters involved in the formation of NO<sub>x</sub>: 1) excess air coefficient, 2) average temperature, 3) reflected heat flux and 4) residence time of the gases in the high-temperature zone. Fuel composition, heat transfer in the furnace, operating conditions and steam generator dimensions, among other factors, are considered for their determination. These parameters are substituted in the polynomial for natural gas combustion and NO<sub>x</sub> emissions are determined for different abatement methods such as: two stages of combustion, with low excess air, with water injection, with gas recirculation and the combination of abatement methods. The results show that with the reference operation with gas recirculation from 15% to 100% load, 310 ppm are formed. An analysis is performed with different values of gas recirculation,  $R$ : 0%, 5%, 10%, 15%, 15%, 20%, 25%, 30% for two partial loads: MRC and 100%. At 100% load the maximum NO<sub>x</sub> reduction by gas recirculation was 63%. Finally, at the reference operation of the plant, water injection is applied to the steam generator furnace at 5%, 10%, 15%, 15%, 20% and 25% to reduce NO<sub>x</sub> emissions. For a load of 100%, gas recirculation  $R=15%$  and with the application of 25% water, a maximum NO<sub>x</sub> reduction of 17% was obtained. The results are in agreement with scientific data regarding the reductions obtained by applying gas recirculation and water injection in the furnace.

**Keywords:** *heat; combustion; natural gas; steam generator; NO<sub>x</sub>.*

## INTRODUCCIÓN

La metodología presentada se compone por un conjunto de ecuaciones para calcular la absorptividad térmica de las paredes del horno de un generador de vapor de 350 MW (Annaratone, D. (2008)); esto es con la finalidad de disminuir la cantidad de emisiones de NOx (Anderson, D. F., & Szytel, T. (1984, April)). En este sentido, a continuación, se presentan las ecuaciones de los cuatro parámetros termofísicos de los que depende la formación de NOx (Blakeslee, C. E., & Burbach, H. E. (1973)) y al final de la metodología se presenta el polinomio experimental o modelo matemático para calcular la concentración de NOx en ppm. De acuerdo a (Roslyakov y Egorova, 1996) la evaluación de autenticidad del modelo matemático por la comparación directa de los resultados de cálculo con los datos experimentales permiten considerar como útil la metodología propuesta para llevar a cabo el cálculo de las concentraciones de NOx en los gases de escape de los generadores de vapor que queman gas natural (Richards, G. A., Casleton, K. H., Lewis, R. E., Rogers, W. A., Woike, M. R., & Brian, P. (2001)), tanto para los métodos de combustión tradicionales, como no tradicionales: combustión por etapas, no estequiométrica, introducción de gotas de agua, etc. En este trabajo se investigaron las emisiones de NOx para el generador de vapor quemando gas natural y operando a cargas parciales: MRC, 100%, 75% y 50%. Los métodos de reducción de las emisiones de NOx que se aplicaron son: recirculación de los gases y la inyección de agua en el horno del generador de vapor.

Actualmente, los generadores de vapor que queman gas natural usan recirculación de los gases como una medida de control de las emisiones de NOx (Eriksen, V. L. (Ed.). (2017). El efecto en la disminución de la formación de los óxidos de nitrógeno en el momento de introducción de los gases depende de: el lugar de donde se extraen los gases para su recirculación; el lugar de introducción de los mismos en el horno y la fracción de gases de recirculación, *R*.

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. La inyección de agua dentro del horno decrementa la formación de los óxidos de nitrógeno térmicos al disminuir la temperatura del horno de acuerdo a (Kadota, 2002). Entonces, la inyección de agua es un método de control de las emisiones de NOx para la quema de gas natural en los generadores de vapor. El efecto que produce al inyectar agua

en el horno es la disminución de la temperatura en la ZCA. Con el propósito de lograr un mayor efecto de la inyección de agua para disminuir la formación de NO<sub>x</sub>, es necesario emplear atomizadores dirigidos hacia el núcleo de la flama (Ganapathy, V. (2014)).

## METODOLOGÍA

En este apartado es necesario tener la caracterización del generador de vapor como se ve en Barnes, H. M., & Homolya, J. B. (1976), además de conocer su propio modelado como se muestra en Lazaroiu, G. (2007); por ello, se presentan las etapas de la metodología propuesta: Determinación de absorptividad térmica de las paredes del horno en la zona de combustión activa (ZCA), determinación del poder calorífico inferior (PCI), determinación del calor de los gases de recirculación, determinación del calor para evaporar el agua inyectada, determinación del calor disponible en el horno de vapor, determinación del flujo en la ZCA, determinación del coeficiente  $kt$ , determinación de las capacidades caloríficas, temperatura adiabática en la ZCA de combustión incompleta, determinación de la temperatura promedio de los gases en la ZCA, determinación del flujo de calor reflejado en la ZCA, determinación del tiempo de residencia de los gases en la ZCA, determinación del coeficiente de exceso de aire en la ZCA y determinación de la concentración de NO<sub>x</sub> (ppm).

### Determinación del coeficiente de absorptividad térmica de las paredes del horno

El coeficiente de absorptividad térmica de cada área se determina con la ecuación 1:

$$\psi = F\zeta \quad (1)$$

*Donde:*

$\psi$  = Coeficiente de absorptividad térmica.

$F$  = Factor de forma de las paredes de agua.

$\zeta$  = Coeficiente de contaminación de las paredes de agua.

### Coeficiente de absorptividad térmica promedio de la ZCA

En esta etapa de la metodología se han determinado todas las variables necesarias para determinar el coeficiente de absorptividad promedio. Este coeficiente está definido por la ecuación 2:

$$\bar{\psi}_{ZCA} = \frac{\sum \psi_i A_i}{\sum A_i} \quad (2)$$

*Donde:*

$\psi_i$  = Coeficiente de absorptividad térmica de la superficie  $i$ .

$A_i$  = Área de  $i$ -ésima superficie,  $m^2$ .

$\sum A_i$  = Área total de ZCA,  $m^2$ .

### Determinación del Poder Calorífico Inferior (PCI)

Para la determinación del PCI se utilizan las ecuaciones empíricas que se basan en la composición química del combustible; en este contexto, se presentan las ecuaciones de Mendeleev (Thermal design for power boilers (1998)) para determinar el PCI del gas natural:

$$PCI = 128CO + 107H_2 + 335CH_4 + 628\sum C_m H_n \quad (3)$$

Donde:

$C, H, O, S$  = Carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre, %.

$W$  = Contenido de agua en el combustible, %.

$m, n$  = Número de átomos de carbono e hidrógeno respectivamente.

### Determinación del calor del aire precalentado de combustión

El calor sensible del aire precalentado, se determina utilizando la ecuación 4.

$$Q_{aire} = \alpha_{quem} h_{aire} \quad (4)$$

Donde:

$h_{aire}$  = Entalpía del aire,  $kJ/kg$ ,  $kJ/m^3$ .

Con la temperatura del aire a la salida del pre calentador (parámetro obtenido de la planta), se puede determinar la entalpía del mismo.

### Determinación del calor de los gases de recirculación

Utilizando la ecuación 5 se determina la cantidad de calor que contienen los gases de recirculación.

$$Q_{rec} = r h_{rec} \quad (5)$$

Donde:

$h_{rec}$  = Entalpía de los gases de recirculación,  $kJ/kg$ ,  $kJ/m^3$ .

### Determinación del calor gastado para evaporar el agua inyectada

El calor empleado para evaporar el agua inyectada utilizando el calor latente de vaporización del agua a las condiciones de presión y temperatura del horno:

$$Q_{agua} = g(h_{agua} - h_v) \quad (6)$$

Donde:

$h_{agua}$  = Entalpía del agua de inyección (tabla (XXIV. Pág. 181) [2],  $kJ/kg$ .

$h_v$  = Calor latente de vaporización,  $kJ/kg$ .

### Determinación del calor disponible en el horno del generador de vapor

Este flujo de calor se empleará más adelante para determinar la temperatura adiabática del horno y se determina por la ecuación 7:

$$Q_{disp} = PCI + Q_{aire} + Q_{comb} + Q_{rec} + Q_{agua} \quad (7)$$

Donde:

$Q_{disp}$  = Calor disponible en el horno del generador de vapor,  $kJ/kg, kJ/m^3$ .

### Determinación del flujo de calor en la ZCA

El flujo de calor que atraviesa el volumen de la zona de combustión activa se calcula según la ecuación 8:

$$q_{ZCA} = \frac{B(\beta_{comb}PCI + Q_{comb} + Q_{aire} + Q_{rec} + Q_{agua})}{A_{ZCA}} \quad (8)$$

Donde:

$q_{ZCA}$  = Flujo de calor en la zona de combustión activa,  $kW/m^2$ .

$A_{ZCA}$  = Superficie total de la zona de combustión activa,  $m^2$ .

B = Flujo de combustible del generador de vapor,  $kg/s, m^3/s$ .

### Determinación del coeficiente $kt$

Para determinar el coeficiente  $kt$ , es necesario determinar previamente la temperatura adiabática del horno, (Bezgrshnov A.N., Lipov Yu. M. and Shleyfer B.M. (1991)). Esta se determina por la ecuación 9 para el caso del gas natural:

$$T_{ad,gas.nat} = \frac{1950}{\alpha_{quem}} (1 + 0.36 \times 10^{-5} Q_{disp}) \quad (9)$$

La temperatura adiabática se sustituye en la ecuación empírica 10, obteniéndose el coeficiente  $kt$ .

$$kt = \frac{T_{ad} - 1200}{1000} \quad (10)$$

Donde:

$T_{ad}$  = Temperatura adiabática para el gas natural,  $^{\circ}C$ .

### Determinación de las capacidades caloríficas

Con estas variables es posible determinar las capacidades caloríficas promedio de los gases de combustión, cuando se quemara gas natural se emplea la ecuación 11, como a continuación se presenta:

$$C_{c,gas.nat} = 1.57 + 0.134kt \quad (11)$$

Para el caso de la capacidad calorífica promedio del aire, se calcula con la ecuación 12:

$$C_{c,aire} = 1.46 + 0.092kt \quad (12)$$

*Donde:*

$C_c$  = Capacidad calorífica,  $MJ/m^3 C$

### Temperatura adiabática de combustión incompleta

Con los parámetros obtenidos en las secciones anteriores de esta metodología es posible determinar la temperatura adiabática que considera una combustión incompleta. La expresión matemática para esta temperatura es la ecuación 13:

$$T'_{ad} = \frac{\beta_{comb}PCI + Q_{aire} + Q_{rec} + Q_{comb} + Q_{agua}}{\beta_{comb}v_{gas}^0 C_{gas} + 1.0161(\alpha_{quem} - \beta_{comb})v_{aire}^0 C_{aire} + 1.24g C_{agua}} + 273 \quad (13)$$

*Donde:*

$T'_{ad}$  = Temperatura adiabática de combustión incompleta en la ZCA,  $K$

### Determinación de la temperatura promedio de los gases en la ZCA

La temperatura promedio en la zona de combustión activa (ZCA), uno de los cuatro principales parámetros que influyen en la formación de NOx en esta metodología se propone la ecuación de (Bezgrishnov A.N., Lipov Yu. M. and Shleyfer B.M. (1991)) porque además de considerar la temperatura adiabática de combustión incompleta y el coeficiente de absortividad térmica promedio de la ZCA propuesto en (Roslyakov P. V. y Egorova L. E. (1997)) [3,4,5]; En (Bezgrishnov A.N., Lipov Yu. M. and Shleyfer B.M. (1991)) considera adicionalmente la cantidad de gases de recirculación  $r$ , así como el lugar de suministro de los gases  $n$ , la ecuación es la 14:

$$\bar{T}_{ZCA} = T'_{ad}(1 - \bar{\psi}_{ZCA})^{0.25}(1 - r^{1+nr}) \quad (14)$$

*Donde:*

$n$  = Valor empírico que toma en cuenta el modo de introducción de los gases de recirculación al horno.

### Determinación del flujo de calor reflejado en la ZCA

Este es el segundo de los cuatro parámetros principales para la determinación de la concentración de NOx. Depende del flujo de calor en la ZCA y del coeficiente de absortividad promedio de las superficies de la ZCA, previamente calculados. Para su

cálculo se emplea la ecuación 15, en la que se considera que no hay transmisividad a través de las paredes.

$$q_{ZCA}^{refl} = q_{ZCA}(1 - \bar{\psi}_{ZCA}) \quad (15)$$

Donde:

$q_{ZCA}^{refl}$  = Flujo de calor reflejado en la ZCA,  $kW/m^2$ .

#### Determinación del tiempo de residencia de los gases en la ZCA

El tiempo de residencia de los productos de la combustión en la zona de combustión activa está determinado como la relación entre el volumen y el flujo volumétrico en la ZCA, esto se observa en la ecuación 16:

$$\tau_{ZCA} = \frac{abL_{ZCA,rec,g}273\xi}{Bv_{ZCA,rec,g}\bar{T}_{ZCA}} \quad (16)$$

Donde:

$a, b, L_{ZCA,rec,g}$  = Dimensiones geométricas del generador de vapor (ancho del horno, profundidad del horno y altura de la ZCA),  $m$ .

$B$  = Consumo de combustible del generador de vapor  $kg/s, m^3/s$

$\xi$  = Coeficiente de llenado de productos de la combustión en la ZCA para quemadores tangenciales tiene un valor de 0.70.

#### Determinación del coeficiente de exceso de aire en la ZCA

El coeficiente de exceso de aire es el cuarto parámetro principal que influye considerablemente en la formación de todos los óxidos de nitrógeno. Considerando tanto el exceso de aire suministrado a través del quemador  $\alpha_{quem}$  y del exceso de aire después del pre calentador, la ecuación 17 determina el coeficiente de exceso de aire en la ZCA.

$$\alpha_{ZCA} = \alpha_{quem} + r(\alpha_{rec} - 1) \quad (17)$$

#### Determinación de la concentración de NOx (ppm)

Esta es la última etapa de la metodología, consiste en sustituir los parámetros calculados anteriormente en el polinomio experimental para la quema de gas natural como se muestra en la ecuación 18:

$$C_{NO_x} = \left[ 26.0 \exp\left(0.26 \frac{\bar{T}_{ZCA} - 1700}{100}\right) - 4.7 \right] \left[ \exp(q^{ref}_{ZCA}) - 1 \right] \cdot [13.0 + 9.6(\alpha_{ZCA} - 1.07) + 59.4(\alpha_{ZCA} - 1.07)^2 + 18.1(\alpha_{ZCA} - 1.07)^3 + 79.8(\alpha_{ZCA} - 1.07)^4] \tau_{ZCA} \quad (18)$$

Donde:

$C_{NO_x}$  = Concentración de NOx, *ppm*.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presentan los resultados de los cálculos de las principales variables térmicas que se requieren para realizar posteriormente los cálculos de emisiones de NOx para los cuatro regímenes de carga del generador de vapor. Aquí se presentan los coeficientes de exceso de aire del horno, así como los consumos de combustible para las cargas parciales. Además, se presentan las cantidades de calor aportado por el aire precalentado y el calor que aportan los gases de recirculación. Otra variable importante son las fracciones de recirculación *R* para todas las cargas parciales.

Tabla 1.

Resultados principales de los parámetros térmicos a diferentes regímenes de carga.

Parámetro	Unidades	Régimen de carga			
		MRC	100%	75%	50%
Exceso de aire, $\alpha$	-	1.05	1.05	1.05	1.15
Temperatura de gases recirculados	°C	335	328	313	294
Fracción de gases de recirculación, <i>R</i>	-	0.15	0.15	0.32	0.43
Poder calorífico inferior, PCI	$\text{kJ}/\text{m}^3$	36864.10	36864.10	36864.10	36864.10
Calor aportado por el aire precalentado, $Q_{aire}$	$\text{kJ}/\text{m}^3$	4132.62	4076.42	3936.08	4080.31
Calor de los gases de recirculación, $Q_{rec}$	$\text{kJ}/\text{m}^3$	2835.93	2122.13	1045.17	1068.99
Consumo de combustible, $B_{calc}$	$\text{m}^3/\text{s}$	24.13	22.74	17.04	11.76

En la tabla 2 se presentan los resultados de los cuatro parámetros de los cuales depende la formación de NOx para cuatro cargas parciales. En todos los casos se respetó la fracción de recirculación de los gases para cada carga parcial y también el lugar de introducción de los gases de recirculación siempre fue por la parte inferior del horno. Las reducciones de NOx para las cargas 75% y 50% son muy grandes, por una parte, debido a la caída de temperatura en 191 K y 390 K respectivamente, y por otra parte, por el incremento de la cantidad de gases de recirculación  $R=0.32$  y  $R=0.43$  respectivamente.

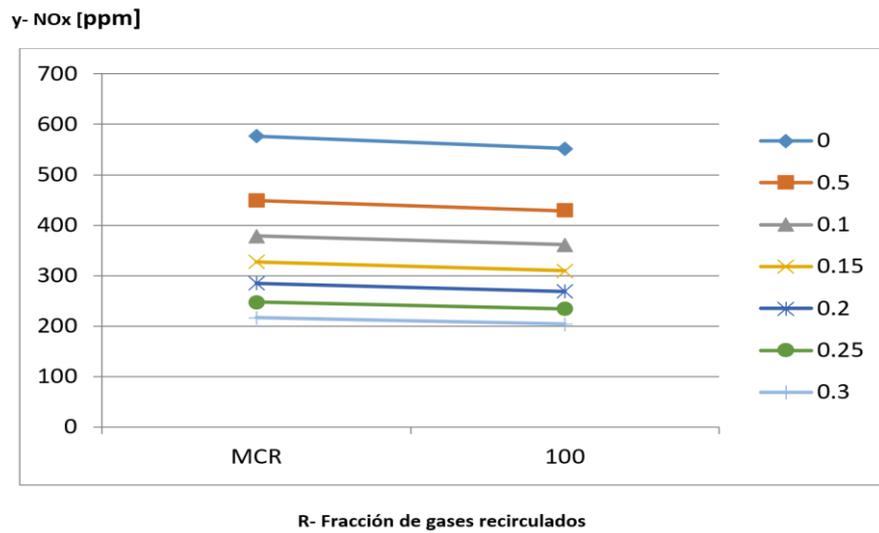
**Tabla 2.**

*Resultados de la concentración de NOx quemando gas natural.*

Parámetro	Unidad	Régimen de operación			
		MRC	100%	75%	50%
$\bar{T}_{ZCA}$	$K$	1666.46	1661.97	1470.30	1271.48
$q_{ZCA}^{refl}$	$MW/m^2$	1.0475	0.9842	0.7554	0.5463
$\alpha_{ZCA}$	-	1.0692	1.0693	1.0960	1.2673
$\tau_{ZCA}$	$s$	0.7108	0.7562	1.11	1.63
$C_{NO_x}^{gas\ natural}$	$ppm$	326.94	310.44	160.76	79.37

En la figura 1 se presentan los resultados de recirculación de los gases en el generador de vapor para solamente dos cargas: MRC Y 100%. La idea fue encontrar una justificación de usar la fracción de 0.15 de los gases de recirculación en la operación actual del generador de vapor. Al introducir los primeros  $R=0.05$  se obtuvo una reducción de NOx de 124.17 ppm y corresponde a una reducción de 22.46%, a continuación, con  $R=0.10$  se obtuvo 67.5 ppm de reducción de NOx y corresponde a 15.74% y finalmente con  $R=0.15$  se redujo 50.73 ppm de NOx que corresponde a un porcentaje de 14.04%. Para  $R=0.20$ ,  $R=0.25$  y  $R=0.30$  los porcentajes de reducción son: 13.33%, 13.01% y 13% respectivamente. Por lo tanto, se concluye que la reducción máxima de NOx es operando con  $R=0.15$  de recirculación de los gases.

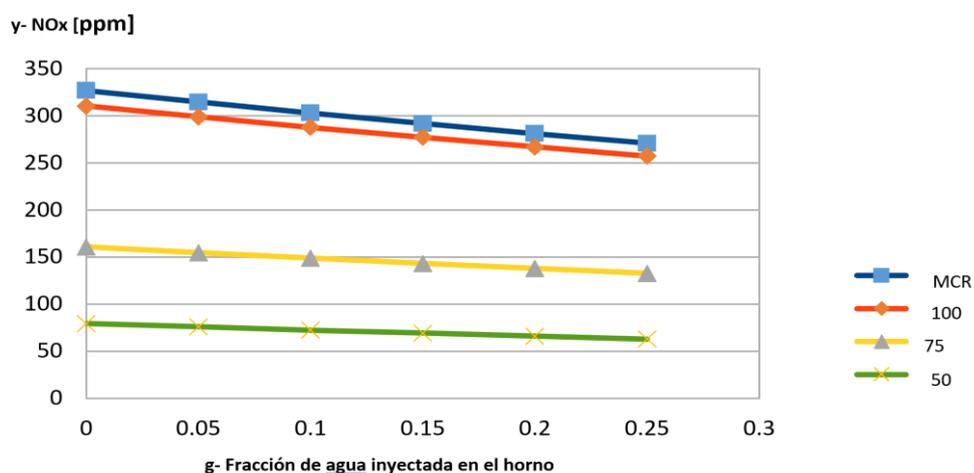
**Figura 1.** Dependencia de la recirculación de gases sobre la formación de NOx.



En la figura 2 se muestran los resultados de aplicar inyección de agua en las cuatro cargas parciales del generador de vapor. Se conserva el valor de  $R=0.15$  en MRC y 100% de carga, también para cargas 75% y 50% los valores de  $R=0.31$  y  $R=0.43$  son constantes y los gases de recirculación se introducen en fondo del horno. De los resultados, se observa que las reducciones de NOx son pequeñas aumentando las fracciones de agua. Por ejemplo, para una carga de 100% sin inyección de agua y con una fracción de 0.25 de agua la reducción es de 53.1 ppm, lo que representa una reducción máxima de 17%.

De acuerdo a lo anterior, con esta metodología es posible determinar la concentración de NOx para el quemado de gas natural, de forma más cercana a la realidad, ya que, considera el efecto que tiene la cantidad de gases de recirculación y el lugar de su introducción sobre la formación de NOx.

**Figura 2.** Dependencia de la inyección de agua sobre la formación NOx.



## CONCLUSIONES

Se ha presentado la metodología de cálculo de NOx para generadores de vapor de alta potencia. La formación de NOx depende de cuatro parámetros termo-físicos y son: temperatura promedio de la zona de combustión activa, flux de calor, coeficiente de exceso de aire de la zona de combustión activa y tiempo de residencia de los gases en la zona de alta temperatura. Las conclusiones para la reducción de NOx se pueden ordenar en dos partes: 1. Aplicando la recirculación de los gases y 2. Inyectando agua en el horno. Si bien es cierto que aplicando recirculación de los gases se obtiene una mayor reducción que inyectando agua, no por ello se ignora esta opción. Aplicando la recirculación de los gases como método universal de reducción de las emisiones de NOx en generadores de vapor y para una carga de 100% los resultados obtenidos con  $R=0.30$  en el generador de vapor de unidad 350 MW se obtuvo una reducción de 63% para la quema de gas natural. Al introducir los primeros  $R=0.05$  se obtuvo una reducción de NOx de 124.17 ppm y corresponde a una reducción de 22.46%, a continuación, con  $R=0.10$  se obtuvo 67.5 ppm de reducción de NOx y corresponde a 15.74% y finalmente con  $R=0.15$  se redujo 50.73 ppm de NOx que corresponde a un porcentaje de 14.04%. Para  $R=0.20$ ,  $R=0.25$  y  $R=0.30$  los porcentajes de reducción son: 13.33%, 13.01% y 13% respectivamente. Por lo tanto, se concluye que la reducción máxima de NOx es operando con  $R=0.15$  de recirculación de los gases. En cuanto a la inyección de agua al horno del generador de vapor se obtuvo una reducción al aplicar la fracción 0.25 de agua y para una carga de 100% quemando gas natural se obtuvo una reducción máxima de 17%.

## LISTA DE REFERENCIAS

- Anderson, D. F., & Szytel, T. (1984, April). NOx reduction methods for California steam generators by applied technology. In SPE California Regional Meeting. OnePetro.
- Annaratone, D. (2008). Steam generators: description and design. Springer Science & Business Media.
- Barnes, H. M., & Homolya, J. B. (1976). Data requirements for NOx emission monitoring from fossil-fuel fired steam generators. *Journal of Environmental Science & Health Part A*, 11(2), 107-119.
- Blakeslee, C. E., & Burbach, H. E. (1973). Controlling NOx emissions from steam generators. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 23(1), 37-42.

- Bezgrezhnov A.N., Lipov Yu. M. and Shleyfer B.M. (1991). Calculation of steam boilers. Moscow, Energoatomizdat. Traducción del idioma ruso.
- Eriksen, V. L. (Ed.). (2017). Heat recovery steam generator technology. Woodhead Publishing.
- Ganapathy, V. (2014). Steam generators and waste heat boilers: for process and plant engineers. CRC Press.
- Kadota and H. Yamasaki. Recent advances in the combustion of water fuel emulsion. Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Japan. Progress in Energy and combustion science. 2002.
- Lazaroiu, G. (2007). Modeling and simulating combustion and generation of NOx. Fuel Processing Technology, 88(8), 771-777.
- Richards, G. A., Casleton, K. H., Lewis, R. E., Rogers, W. A., Woike, M. R., & Brian, P. (2001). Advanced Steam Generators. National Energy Technology Lab., Pittsburgh, PA, and Morgantown, WV; NASA Glenn Research Center (US).
- Roslakov P. (1988). Mechanism of influence of additional water into the furnace on formation of thermal nitrogen oxides. Information of USSR Universities. Energetic, No. 7, p.59-64.
- Roslyakov P. V. y Egorova L. E. (1997). Método de cálculo de las emisiones de óxidos de nitrógeno en generadores de vapor quemando gas natural y combustóleo. Instituto de Termoenergética de Moscú. Traducción del idioma ruso.
- Roslyakov P.V. and Egorova L.E. (1996). Influencia de las características básicas de la zona de combustión activa sobre la formación de óxidos de nitrógeno. Thermal Engineering, No. 9, pp.22-26. Traducción del idioma ruso.
- Thermal design for power boilers (1998). Standard Method. Sankt-Petersburg, CKTI-VTI, Traducción del idioma ruso.