

SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO EN GENERADORES DE VAPOR

G. Jarquin López*, A. Paz Gutiérrez* C. L. Minor Cuenca*, J. G. Jarquin Salinas*,
G. Polupan**, G. Tolentino Eslava**

* Instituto Politécnico Nacional, Av. Santa Ana No. 1000. Col. San Francisco Culhuacan. ESIME Culhuacán.
México D.F. Tel. 57296000 ext. 73061. e-mail gjarquin@mexico.com

** Instituto Politécnico Nacional, Av. IPN s/n, Edif. 5, SEPI-ESIME Zacatenco, UPALM, México D. F., México,
Tel. 57296000 Ext. 54783, Fax. 57526000 Ext. 54754

Palabras clave: combustión, óxidos de nitrógeno, gas natural, combustoleo, generadores de vapor, software.

Resumen. *La formación de óxidos de nitrógeno ocurre cuando se queman combustibles líquidos y gaseosos. El presente software fue diseñado en Visual Basic y sirve para el análisis de los métodos de disminución de óxidos de nitrógeno en generadores de vapor de mediana y alta potencia. Para ejecutar el software es necesario conocer las dimensiones geométricas del generador de vapor, el arreglo de los quemadores y sus dimensiones, el combustible usado, los coeficientes de exceso de aire en el quemador y en los gases de recirculación, así como el consumo de combustible total del generador de vapor. Los combustibles que se pueden analizar con el software son: gas natural y combustoleo. Diferentes métodos fueron investigados por ejemplo: recirculación de gases de escape en quemadores, en el aire caliente y en el combustible, inyección de agua en la zona de combustión disminuyendo simultáneamente el coeficiente de exceso de aire del quemador, y la combustión a dos etapas. También combinaciones de estos métodos fueron investigados buscando obtener la máxima reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno en la zona de quemado. Los resultados obtenidos de disminución de emisiones de óxidos de nitrógeno fueron aplicados a un generador de vapor Babcock & Wilcox de 350 ton/h de la planta termoeléctrica Ing. Jorge Luque operando a cargas parciales. La mejor combinación de métodos para este generador de vapor es la combustión a dos etapas en combinación con la recirculación de gases, con esto se logra una disminución de 40% adicional a la lograda con el uso exclusivo de la recirculación.*

1 INTRODUCCIÓN

La formación de óxidos de nitrógeno ocurre debido a la oxidación de nitrógeno contenido en el aire y en el mismo combustible. Los óxidos de nitrógeno (NO_x) formados en los hornos de generadores de vapor, representan la suma de monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2) y óxido nitroso (N_2O). La cantidad de NO_2 y N_2O no excede en 2% [1] y consideraremos por lo tanto $\text{NO}_x = \text{NO}$. Hoy en día se conocen tres mecanismos de formación de NO_x : térmicos (NO_{term}), rápidos ($\text{NO}_{\text{rapidos}}$) y de combustible ($\text{NO}_{\text{combustible}}$). La formación de NO_{term} , y $\text{NO}_{\text{rapidos}}$ se deben al nitrógeno contenido en el aire, y el contenido en el combustible, propicia la formación de los $\text{NO}_{\text{combustible}}$.

La manera en que se forman NO_x térmicos ha sido expuesta por Zeldovich [2]. Posteriormente, se ha complementado con más investigaciones [3]. Las reacciones de la formación de NO_{term} están caracterizados por la alta energía de activación. Los NO_x se generan en el campo de altas temperaturas, excedentes a 1800 K [4]. La concentración de NO_{term} , crece intensamente a partir del inicio de la zona de combustión y alcanza su valor máximo detrás de la zona de temperatura máxima.

Lejos de la flama, la concentración de NO_x prácticamente no varía [5, 6]. La formación de NO está determinada principalmente por los siguientes factores: temperatura en la zona de combustión, flujo de calor reflejado en dicha zona, coeficiente de exceso de aire y el tiempo de residencia de los gases quemados en la zona de combustión [7].

La temperatura en la zona de combustión tiene mayor influencia en la formación de NO_{term} . Las investigaciones en modelos cinéticos [6] han mostrado que el aumento de la temperatura en dicha zona causa un aumento exponencial de la concentración de NO_{term} .

El tiempo en que se estabiliza la concentración de NO, en un rango de temperatura de 1800 a 1900 K es de 4 a 20 segundos aproximadamente. En el horno de las calderas, la residencia de los gases es menor [1]. La estabilidad de la concentración aun no ha sido localizada. Por lo tanto, que el incremento en el tiempo de residencia de productos de la combustión en la zona de quemado, incrementa proporcionalmente la formación de NO [7].

Muchos autores han investigado la influencia del exceso de aire para la formación de NO. En [7] se plantea que la dependencia $C_{\text{NO}_x} = f(\alpha)$ tiene valores extremos con los valores máximos, usando un rango de coeficiente de exceso de aire de $\alpha_{\text{cr}} = 1.10 \dots 1.25$, quemando gas natural y combustóleo.

Investigaciones en la quema de hidrocarburos [8], muestran que frente a la flama, en un corto periodo de tiempo, se produce NO_x , llamados rápidos por la alta velocidad con que forman en la base de la flama. Dicha formación se realiza entre los 1200 y 1600 K, cuando prácticamente no se producen NO_{term} . En los trabajos [7,8] se muestra que hay dos áreas de exceso de aire en la cual se presenta la formación de NO_x .



Figura 1. Esquema general del generador de vapor de 350 t/h de la planta termoeléctrica Ing. Jorge Luque.

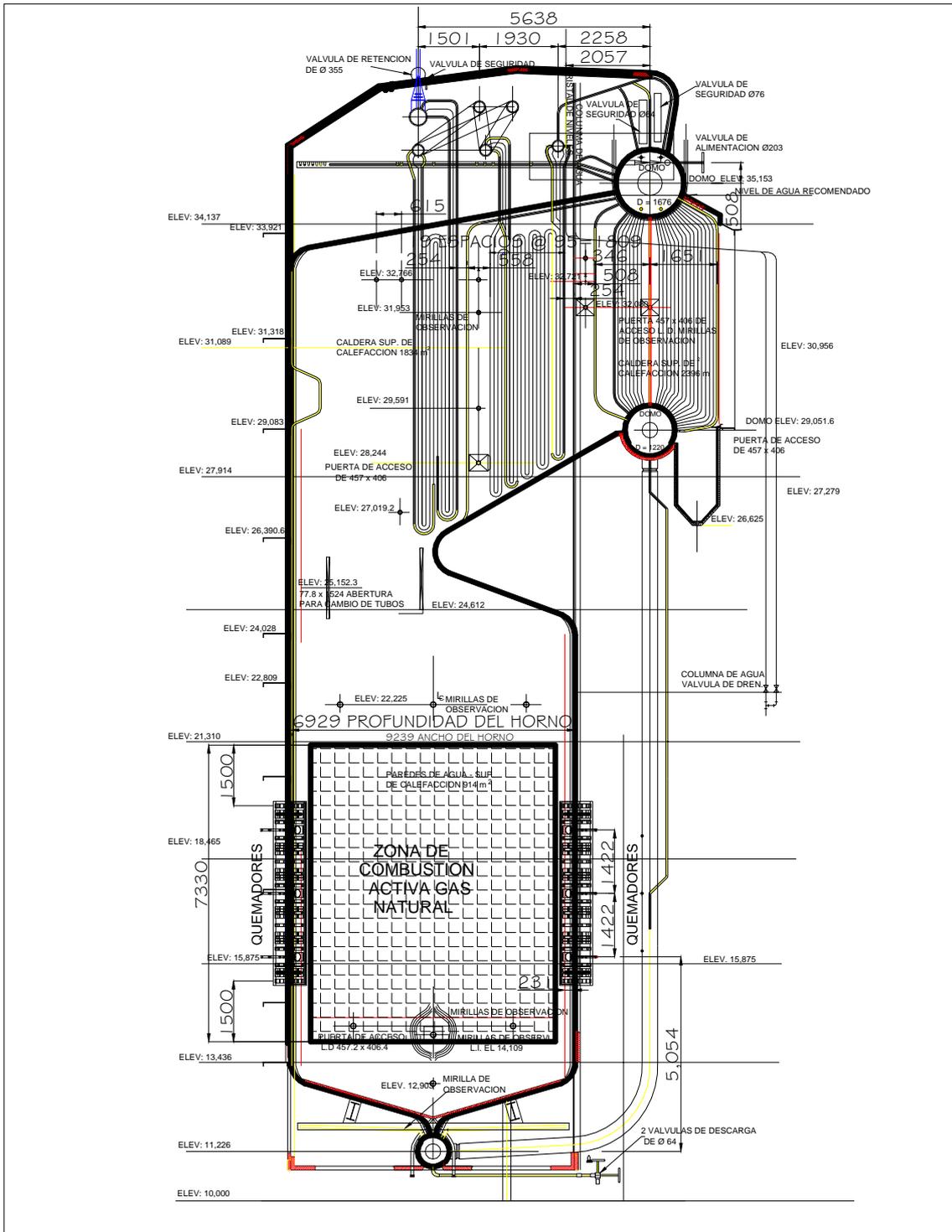


Figura 2. Dimensiones de la zona de combustión activa operando todos los niveles de quemadores.

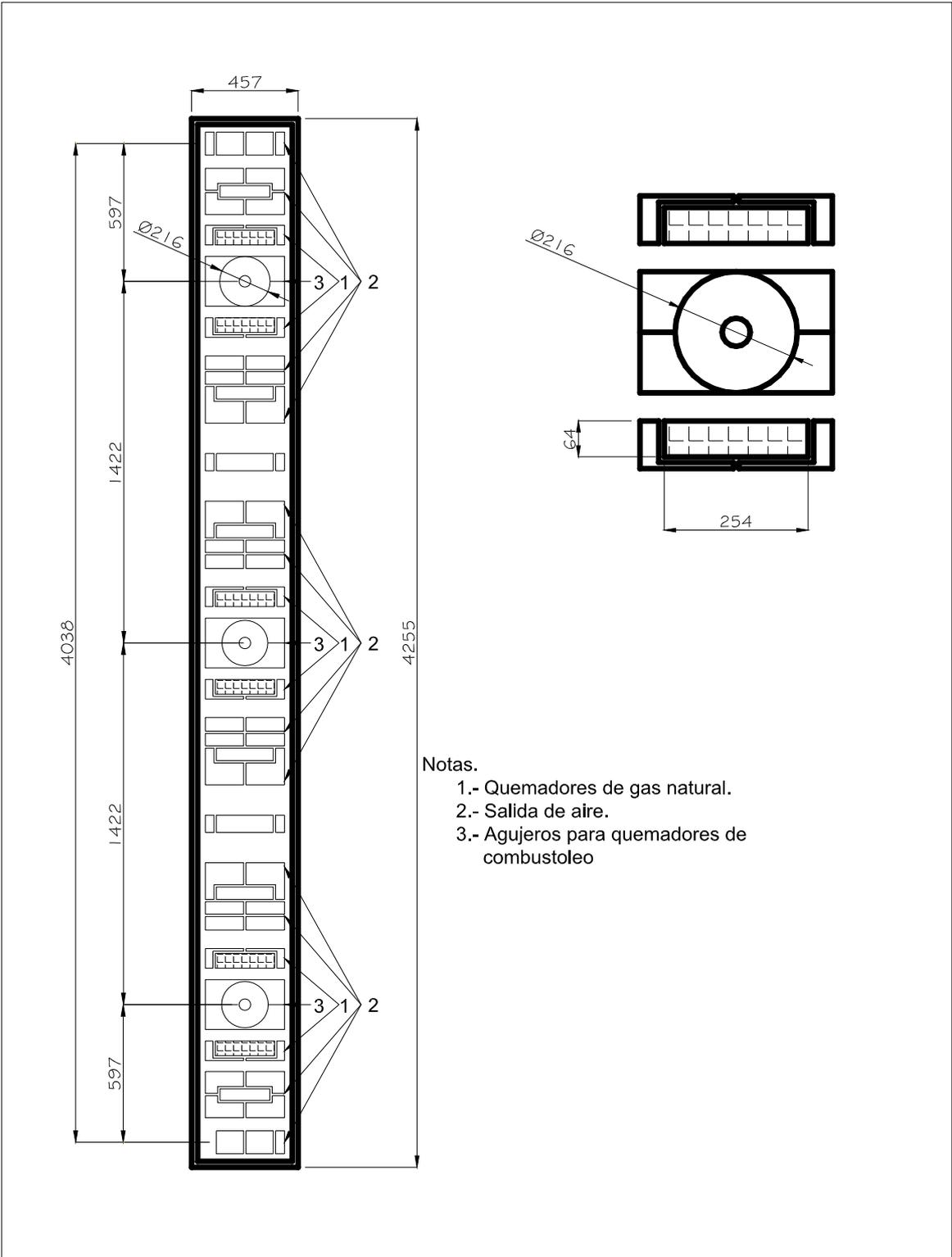


Fig. 4. Detalle de quemadores utilizados por el generador de vapor (cotas en mm)

2. OBJETO DE LA INVESTIGACION

Para la investigación se ha elegido un generador de vapor marca *Combustion Engineering*, instalado en la termoeléctrica “Ing. Jorge Luque” de la ciudad de México. Este generador esta diseñado para producir 350 t/h de vapor a una presión de 63 kg/cm² y una temperatura de 485 °C. El combustible es gas natural, quemado en un horno de cámara tangencial, donde se inyecta el combustible por medio de quemadores localizados en tres niveles (Figuras 2, 3 y 4).

El generador de vapor está equipado con sistema de recirculación de gases de escape, que los extrae después del precalentador de aire e inyectados en el aire caliente. El aire es calentado en un precalentador regenerativo rotativo de eje vertical, el exceso de aire, en dicho precalentador se tiene un exceso de aire de 6%. La caldera está diseñada con ductos rígidos, la presión en el horno es de 350 mm de columna de agua. El generador esta equipado con medición continua de emisiones.

3. TÉCNICA DE INVESTIGACIÓN

En los hornos de las calderas, ocurre la formación de todo tipo de óxidos de nitrógeno, en un lugar donde el combustible es poco y la temperatura mayor a 1800 K [2, 4], este lugar se encuentra en una zona denominada ZONA DE COMBUSTIÓN ACTIVA (ZCA) [7, 9, 10]. Las referencias [7, 9] muestran que la formación de NO_x en la ZCA depende de cuatro parámetros termo-físicos: coeficiente de exceso de aire (α_{ZCA}), temperatura promedio en la ZCA (\bar{T}_{ZCA}), densidad del flujo de calor reflejado en la ZCA (q_{ZCA}^{refl}) y el tiempo de residencia de los gases en la ZCA (τ_{ZCA}). La cantidad de nitrógeno en el combustible también influye.

La temperatura promedio de los productos de la combustión en la ZCA puede calcularse por la siguiente ecuación [7]:

$$\bar{T}_{ZCA} = T_{ad}^I \left(1 - \bar{\psi}_{ZCA}\right)^{0.25} \left(1 - R^{1+nR}\right) \quad (1)$$

Donde T_{ad}^I - temperatura adiabática en la combustión completa del combustible en la ZCA, en K; R - fracción de recirculación de gases; n - factor que depende del tipo de circulación de gases de escape [11]; $\bar{\psi}_{ZCA}$ - factor de eficiencia térmica de las superficie de la ZCA.

La temperatura adiabática en la combustión completa del combustible en la ZCA T_{ad}^I se determina con la Ec. (2):

$$\begin{aligned} X &= \beta \cdot Q_L + Q_{comb} + Q_{aire} + Q_{rec} + Q_{agua} & Y &= \beta V_{gas}^0 c_{gas} + 1.0161(\alpha_{quem} - \beta) V_{aire}^0 c_{aire} + 1.24 g c_{agua} \\ Z &= R \left[V_{gas}^0 c_{gas} + 1.0161(\alpha_{gas}^{rec} - 1) V_{air}^0 c_{air} + 1.24 g c_{agua} \right] \end{aligned}$$

$$T_{ad}^I = \frac{X}{Y + Z} + 273 \quad (2)$$

donde β - grado de combustión, adimensional; c_{gas} , c_{aire} y c_{agua} – respectivamente son: capacidad térmica de los productos de la combustión, aire y vapor el cual puede determinarse por las recomendaciones de [11], tienen unidades de MJ/m³; Q_L - poder de calor inferior del combustible, MJ/m³; Q_{comb} - calor físico del combustible inyectado en la ZCA, MJ/m³; Q_{aire} , Q_{rec} y Q_{agua} - calor introducido a la ZCA respectivamente por aire caliente, gases de recirculación y agua inyectada o vapor (en caso de someter humedad a la ZCA), MJ/m³; V_{gas}^0 y V_{air}^0 - volumen teórico de productos de combustión y de aire para quemar 1 m³ de combustible gaseoso, m³/m³; g – parte de humedad inyectada a la ZCA.

El factor de eficiencia térmica de superficie en ZCA se determina con:

$$\bar{\psi}_{ZCA} = \sum \psi_i A_i / \sum A_i \quad (3)$$

Siendo A_i y ψ_i - respectivamente: área de superficie en la ZCA y su eficiencia térmica.

Conociendo que la temperatura influye importantemente en la generación de NOx. De acuerdo con la definición de promedio integral, la temperatura en la ZCA esta dada por:

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

Sin embargo la temperatura promedio integral puede tomar varios valores de temperatura máxima y de tiempo de residencia en la ZCA. Al mismo tiempo se conoce que el nivel de concentración máxima de NOx no depende de la temperatura promedio integral, sino de las temperaturas máximas de los gases en la ZCA. De cualquier manera, hoy en día es posible calcular las máximas temperaturas ZCA.

Otra característica a obtener es el flujo de calor reflejado de la ZCA [7] que se puede calcular por medio de:

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

Donde q_{ZCA} –es el calor absorbido en la ZCA y se obtiene como sigue:

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

Donde A_{ZCA} - área total de la ZCA, m².

Otro factor característico en la ZCA es el coeficiente de exceso de aire, el cual es determinado por el coeficiente de los quemadores y contenido de gases de recirculación.

$$\alpha_{ABZ} = \alpha_{bur} + \Delta\alpha_{rec} = \alpha_{bur} + R(\alpha_{gas}^{rec} - 1) \quad (7)$$

Las investigaciones en [7, 9, 10] muestran que la dependencia de la formación de $\text{NO}_{\text{rápidos}}$ del coeficiente de exceso de aire contra la temperatura constante tiene mucha importancia [13], y la dependencia de la formación NO_{term} con respecto al exceso de aire es exponencial [7]. La suma de todos los tipos de óxidos de nitrógeno (rápidos, de combustible y térmicos) resulta la concentración final de NO_x . Para describir la influencia del coeficiente de exceso de aire sobre los NO_x medidos a la salida de la ZCA, en la referencia [7] se plantea un polinomio de cuarto grado.

El tiempo de residencia de los productos de la combustión de la ZCA, según [10] se determina:

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

Donde a , b , - son el ancho y alto del quemador, m; $c_{ZCA}^{R,g}$ -es la altura de la ZCA, en m; B – flujo de combustible, m^3/s ; $V_{ZCA}^{R,g}$ - volumen de los gases en la ZCA, m^3 ; \bar{T}_{ZCA} - temperatura promedio de los gases en la ZCA, K; ξ - factor de llenado de la ZCA con la corriente de gases de combustión que fluye hacia arriba, fue determinada en [11] con el valor de 0.7 para de horno de flujo directo usando quemadores tangenciales localizados en las esquinas.

El volumen de los productos de combustión en la ZCA incluyendo los gases de recirculación y el agua inyectada se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_{gas}^{R,g} = \beta \cdot V_{gas}^0 + 1.0161(\alpha_{\text{horno}} - \beta)V_{aire}^0 + 1.24 \cdot g + R[V_{gas}^0 + 1.0161(\alpha_{gas}^{rec} - 1)V_{aire}^0 + 1.24 \cdot g] \quad (9)$$

Donde α_{gas}^{rec} - coeficiente de exceso de aire de recirculación de los gases.

La altura de la ZCA depende de las medidas geométricas de la ZCA, dadas en el apéndice D y la relación del volumen de los productos de combustión:

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

Donde V_{ZCA} – es el volumen de los productos de combustión en la ZCA, sin gases de recirculación ni agua.

$$V_{ZCA} = \beta \cdot V_{gas}^0 + 1.0161(\alpha_{quem} - \beta)V_{aire}^0 \quad (11)$$

La ecuación para el cálculo de la concentración de NO_x (en ppm) en los productos de combustión de gas natural en la salida de la ZCA dada por [7] es:

$$C_{NO_x}^{gasnatural} = [26 \cdot \exp\left(0.26 \frac{\bar{T}_{ZCA} - 1700}{100}\right) - 4.7] \times [\exp(q_{ZCA}^{refl}) - 1] \times \\ \times [13.0 + 9.6(\alpha_{ZCA} - 1.07) + 59.4(\alpha_{ZCA} - 1.07)^2 + 18.1(\alpha_{ZCA} - 1.07)^3 - 79.8(\alpha_{ZCA} - 1.07)^4] \times \tau_{ZCA} \quad (12)$$

4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los cálculos de la concentración de óxidos de nitrógeno en los productos de la combustión de gas natural fueron realizados en las siguientes condiciones: combustible – gas natural con poder calorífico inferior 37.69 MJ/m^3 , y su composición en porcentaje de volumen es $\text{CH}_4 - 91.97\%$, $\text{C}_2\text{H}_6 - 7.12\%$, $\text{C}_3\text{H}_8 - 0.91\%$. Volumen teórico de aire y de productos de combustión son respectivamente: $10.16 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $11.38 \text{ m}^3/\text{m}^3$. El coeficiente de exceso de aire en los quemadores es $\alpha = 1.10$ fue considerado como referencia. El coeficiente de exceso de aire en el ducto de después del precalentador de aire en el lugar donde se toman los gases de recirculación es de $\alpha = 1.16$. También ha sido investigado el trabajo de la caldera con valores bajos de coeficiente de exceso de aire e inyección de agua en la zona de combustión para quemar los productos CO que surgen por la falta de aire. De esta manera el coeficiente de exceso de aire en quemadores y en la zona de toma de gases de recirculación fueron 1.08 y 1.16 respectivamente.

El presente software es el producto de una tesis de licenciatura, en ella los estudiantes de Ingeniería en Computación realizaron un software para calcular óxidos de nitrógeno en generadores de vapor que queman combustóleo y gas natural, (ver figura 1). La primera ventana es la portada de este software denominado NOX AD.

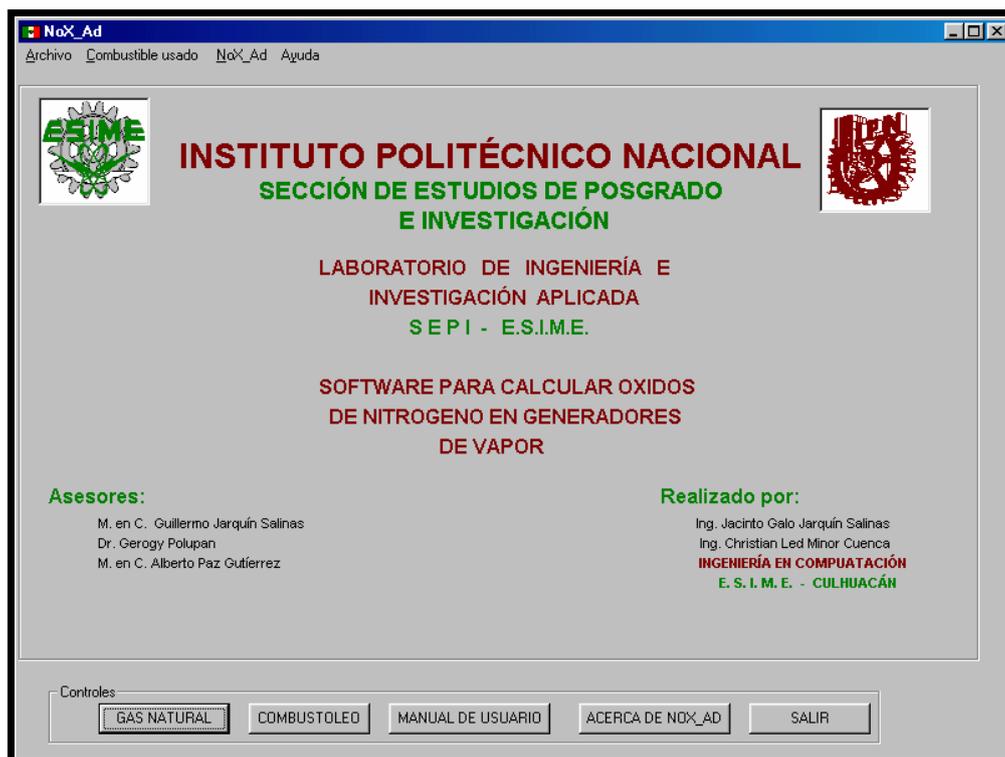


Figura 5. Portada del software de cálculo de óxidos de nitrógeno NOX AD.

A continuación, se presenta la lista de las Principales variables, así como también se proporciona información general referente al software (figuras 6 y 7) y que el usuario debe conocer antes de escribirlos en la ventana de entrada de datos. La captura de los datos de entrada se realiza de manera separada, es decir, una ventana de entrada de datos para cada combustible.



Figura 6. Información general del software NOX AD

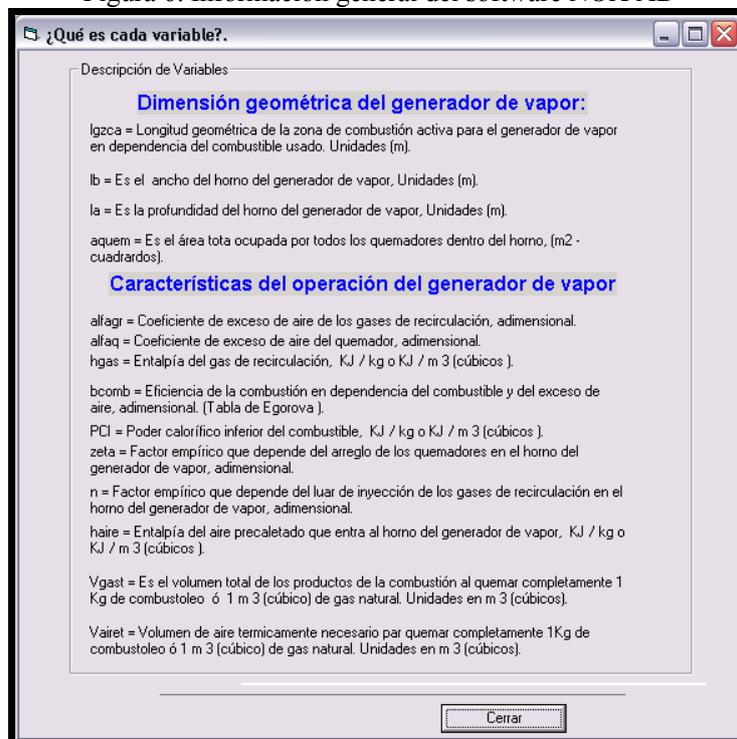


Figura 7. Lista de las principales variables que utiliza el software NOX AD.

Las cargas del generador de vapor fueron tomadas a 100%, 84%, 67% y 45%. Los porcentajes de gas de recirculación fueron desde 0 hasta 15%. Se investigaron los efectos de recirculación entrando en canales separados a los quemadores, en el aire caliente y en el combustible. También la combustión a dos etapas, esto es, el aire movido a cada uno de los tres niveles es de 33.3%, y el combustible entra en los dos niveles superiores 50% y 50%.

4.1. Recirculación de gases de escape en ducto de aire caliente

La mas comúnmente utilizada y efectiva forma de disminuir las emisiones de NOx es la recirculación de los gases de escape en el ducto de aire caliente. El efecto de la disminución de generación de NOx es una función propia de reducir la temperatura de la ZCA y de la reducción del oxígeno del aire. A carga nominal de un generador de vapor y sin aplicación de recirculación de gases, tiene sus cuatro parámetros básicos de la ZCA como sigue: $\bar{T}_{ZCA} = 1857.81$ K, $q_{ZCA}^{refl} = 0.361$ MW/m²s, $\tau_{ZCA} = 0.591$ s y $\alpha_{ZCA} = 1.10$. Con estas condiciones, la concentración de NOx es de 118.37 ppm. A la introducción de un 10% de gases recirculados en el ducto de aire caliente se obtienen los valores: $\bar{T}_{ZCA} = 1623.91$ K, $q_{ZCA}^{refl} = 0.336$ MW/m²s, $\tau_{ZCA} = 0.676$ s, $\alpha_{ZCA} = 1.116$ y $C_{NO_x}^{agua} = 61.05$ ppm (Fig. 8).

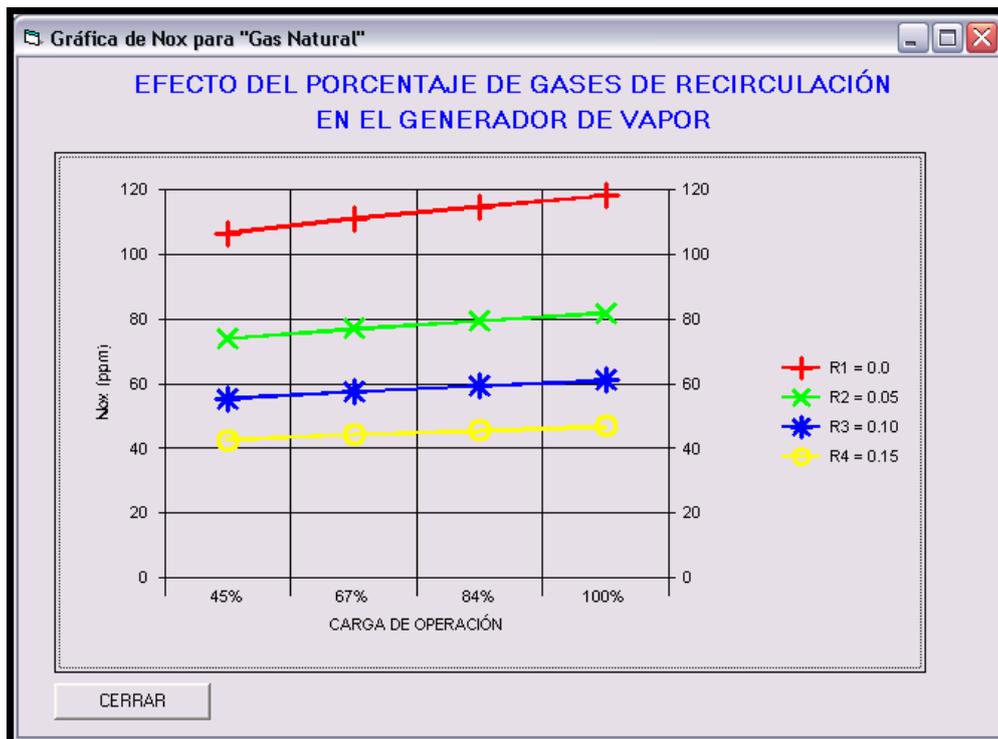


Figura 8. Concentración de NOx dependiendo de la carga a diferentes porcentajes de recirculación. $\alpha_{ZCA}=1.116$; R= fracción de recirculación de gas.

La disminución de generación de vapor de la caldera conduce a reducción de NOx pero es insignificante, ya que la temperatura promedio en la ZCA no cambia.

4.2. Recirculación de gases de escape en canales separados de quemadores y en combustible

Al variar la entrada de gases de recirculación en canales separados en los quemadores, en comparación con la modalidad de introducirlos en el aire caliente, no tiene ventajas, este método carece de efecto de reducción de oxidación comparando métodos de operación (con carga 100%, $R=0.1$, $g=0$, $\alpha=1.10$) los valores en la ZCA para $N=5$ son: $\bar{T}_{ZCA}=1655.53$ K, $q_{ZCA}^{refl}=0.336$ MW/m²s, $\tau_{ZCA}=0.663$ s, $\alpha_{ZCA}=1.116$ y $C_{NO_x}^{agua}=66.47$ ppm (Fig. 9).

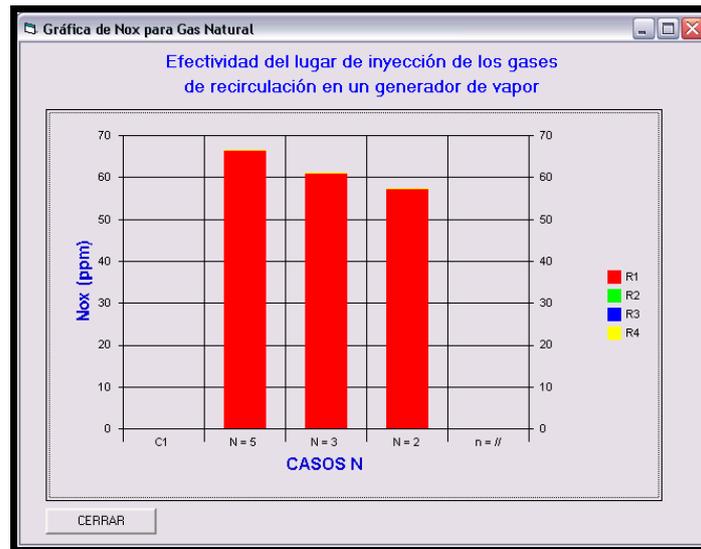


Fig.9. Dependencia de la concentración de NOx en tres casos de inyección de gases de recirculación. N=5. En el quemador por medio de un canal separado; N=3. En el aire caliente; N=2. En el ducto de combustible.

Al introducir los gases de recirculación en el canal de combustible ($N=2$), ocurren dos efectos; primero, la reducción de temperatura en la ZCA, y segundo, el significativo cambio de concentración de combustible por la influencia del volumen de gases inyectado. Los valores clave de la ZCA resultan: $\bar{T}_{ZCA}=1601.73$ K, $q_{ZCA}^{refl}=0.336$ MW/m²K, $\tau_{ZCA}=0.686$ s, $\alpha_{ZCA}=1.116$ y $C_{NO_x}^{agua}=57.451$ ppm (fig. 9).

4.3. Inyección de agua en la zona de combustión

Los efectos de disminución de NOx con inyección de agua en la ZCA, se debe a la disminución de temperatura, así que es mejor inyectar agua que vapor, por que baja la temperatura al emplear energía para la evaporación, por lo tanto la eficiencia térmica del generador de vapor baja. Introducir humedad conviene cuando se requiere quemar monóxido de carbono, formado por los bajos coeficientes de exceso de aire (figura 10). Los resultados del cálculo de la concentración de NOx para diferentes porcentajes de inyección de agua en el horno se presentan en la figura 11.

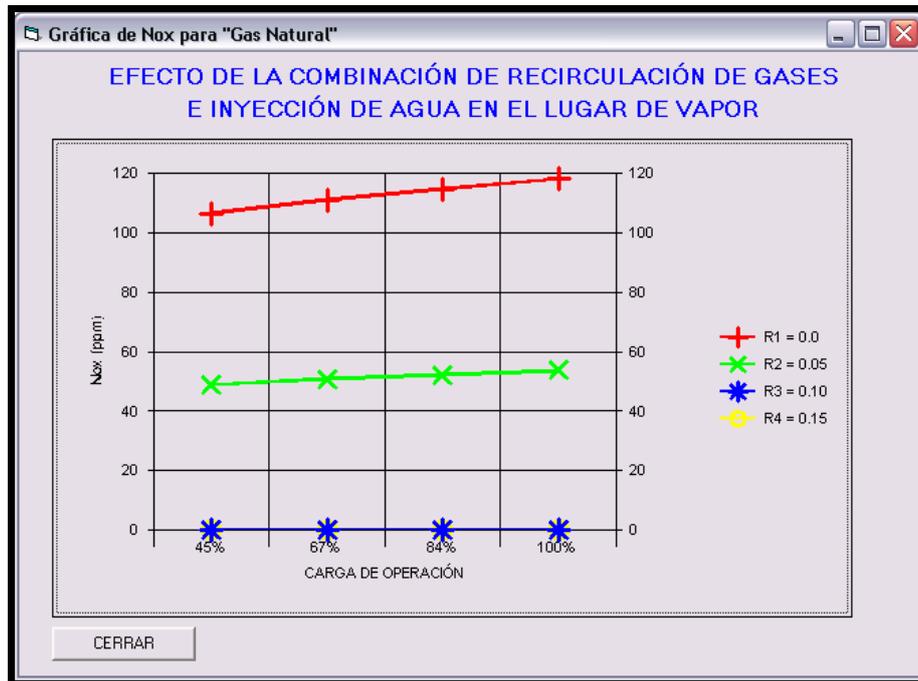


Figura 10. Dependencia de concentración de NOx con la carga, con recirculación de gases, e inyección de agua y variación de exceso de aire. Las curvas en orden descendente son:

- 1) R=0% g=0% alfaq=1.10
- 2) R=10% g=15% alfaq=1.08

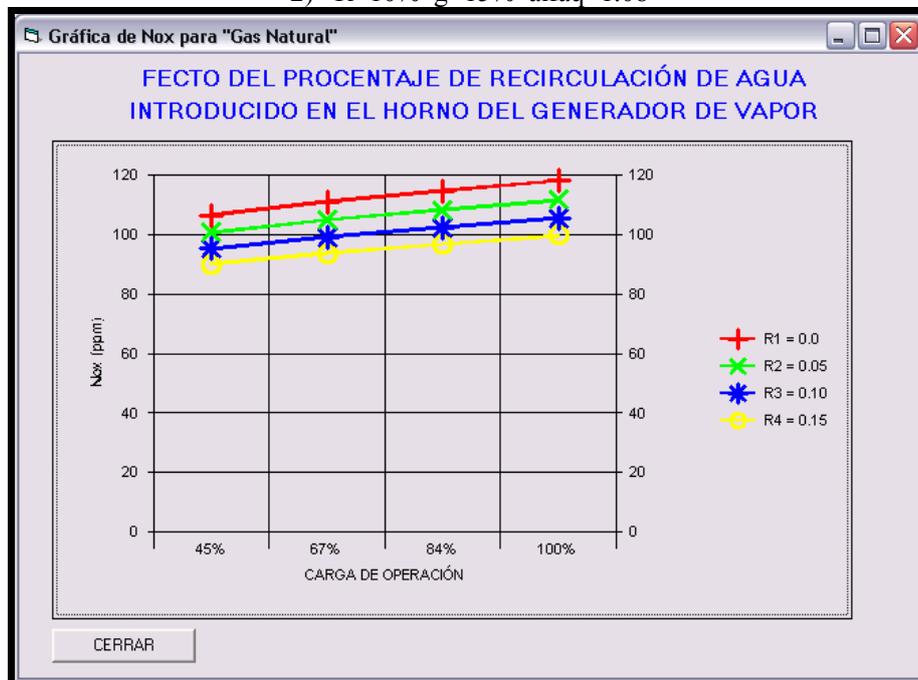


Figura 11. Dependencia de la concentración de NOx con la carga a diferentes valores de inyección de agua. g = fracción de agua inyectada. Las curvas en orden descendente son: 1). g=0% 2) g=5% 3) g=10% 4) g=15%

4.4. Combustión a dos etapas

La combustión a dos etapas es un método efectivo para reducir la generación de NOx al quemar gas natural en dos, tres o mas niveles de quemadores. De esta manera, algunas zonas del horno se organizan los diferentes excesos de aire, en la parte alta del horno se reduce exceso de aire, así, disminuye solamente una parte de la combustión, y las temperaturas en algunas zonas. La combustión se completa en otra parte del hogar, también a bajas temperaturas, no propiciando la generación de NOx

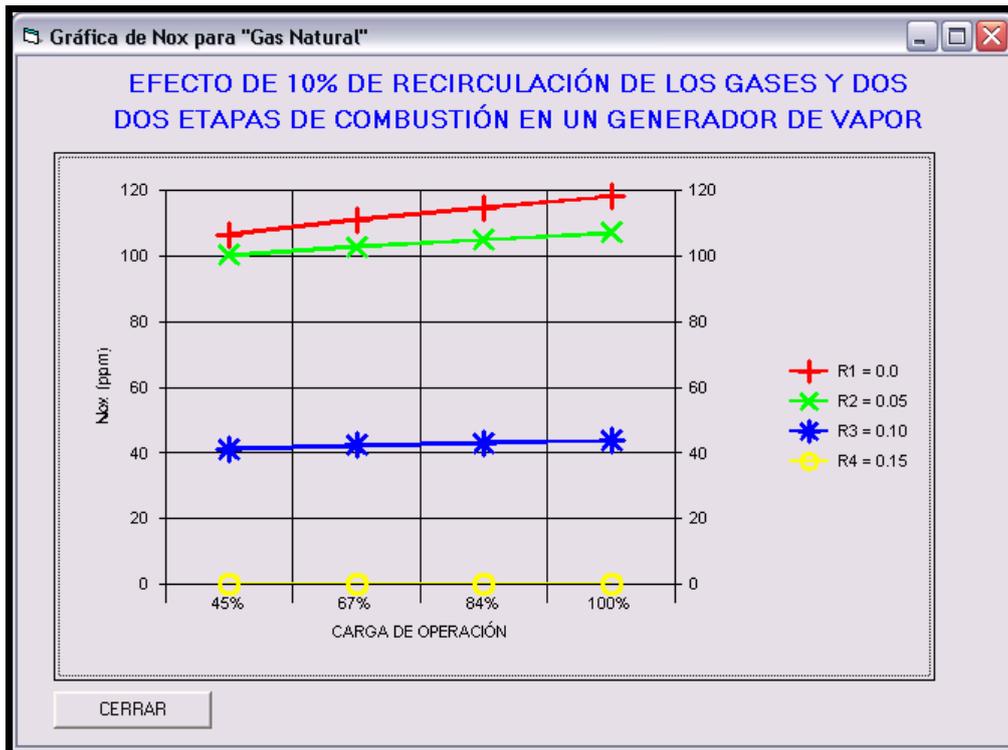


Figura 12. Emisión de NOx dependiendo de la carga, variando el exceso de aire y recirculación de gases Las curvas en orden descendente son: 1). R=0% g=0% alfa=1.10 2). R=0% g=0% alfa=0.733 3). R=10% g=0% alfa=0.733

Se investigó el caso de suministrar el combustible en los niveles inferiores (50% en cada nivel), sin recirculación de gases y el aire se inyecta en los tres niveles (33.3% en cada uno), a carga 100%. Como resultados se obtuvieron: $\bar{T}_{ZCA} = 1828.84 \text{ K}$, $q_{ZCA}^{refl} = 0.277 \text{ MW/m}^2\text{s}$, $\tau_{ZCA} = 0.719 \text{ s}$, $\alpha_{ZCA} = 0.733$ y $C_{NO_x}^{agua} = 107.50 \text{ ppm}$ (Figura 12).

4.5. Combustión a dos etapas y recirculación de gases en el aire caliente

Fue considerado que este caso de combustión a dos etapas, permite una disminución adicional de los NOx. La quema de combustible a dos etapas no requiere una modificación de la

caldera y se puede realizar por métodos de operación. Esto es de especial importancia, cuando se requiere disminuir considerablemente las emisiones de sustancias dañinas de manera económica. Aplicando este método a las siguientes condiciones de operación: carga 100 %, R=0.1, g=0, $\alpha_{quem}=1.10$; se obtuvo una concentración de NOx de 61.05 (ver figura 13). Lo que significa una reducción adicional de 46.45 ppm comparado con el método de combustión a dos etapas sin recirculación de gases (Figura 12).

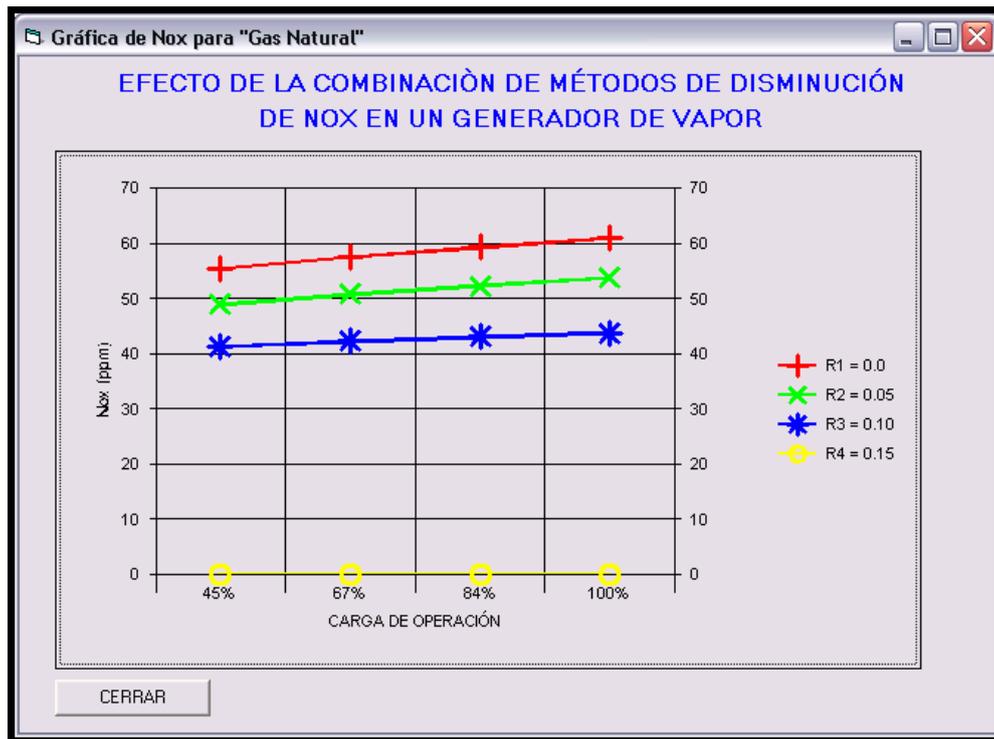


Figura 13. Comparación de métodos combustión con recirculación de gases, las curvas en orden descendente son:

- | | |
|---|---------------------------|
| 1.- Convencional | (R=10% g=0 %, alfaq=1.10) |
| 2.- Con inyección de agua y bajo exceso de aire | (R=10% g=15% alfaq=1.08) |
| 3. - Combustión a dos etapas | (R=10% g=0% alfaq=0.733) |

4.6. Caldera trabajando a bajo exceso de aire con inyección de agua y recirculación de gases.

El generador de vapor se estudio operando a 100 % y $\alpha_{bur}=1.08$, g=0.15, R=0.1. El efecto de la reducción de los NOx al salir de la ZCA se logró debido al decremento del exceso de aire total y la inyección de gases de escape en el ducto de aire caliente. El efecto adicional se logró a la inyección de agua en la ZCA. Además, el agua propició la quema del monóxido de carbono. A este régimen de operación, los parámetros de la caldera son:

$\bar{T}_{ZCA}=1601.68$ K, $q_{ZCA}^{refl}=0.335$ MW/m²s, $\tau_{ZCA}=0.687$ s, $\alpha_{ZCA}=1.096$ y $C_{NO_x}^{agua}=56.04$ ppm (ver figura 13).

5. CONCLUSIONES

Las investigaciones del generador de vapor, que opera en la planta termoeléctrica 'Ing. Jorge Luque permiten concluir lo siguiente:

1. El software desarrollado en Visual Basic permite calcular óxidos de nitrógeno rápida y eficientemente, así como también presentar los resultados mediante gráficas. En todos los casos las cargas de operación del generador de vapor fueron: 45%, 67%, 84% y 100%. Así mismo, en el software el usuario puede cambiar b, r g y alfaq simultáneamente, lo que genera una gran cantidad de combinación de métodos operacionales, con el fin de estudiar que combinación de métodos es la óptima para cada generador de vapor.
2. La recirculación de gases de escape que son tomados a 160 °C después del precalentador de aire, inyectados en el ducto de aire caliente es un método efectivo para la disminución de NOx. La recirculación de gases disminuye 15% los niveles de emisión de NOx permitidos en la ciudad de México.
3. En México existe la tendencia de bajar los límites permisibles de emisión de NOx, y cuando esto suceda la recirculación de los gases en generadores de vapor será insuficiente. Por lo consiguiente, en este trabajo se estudian combinación de métodos para lograr una máxima disminución de emisión de NOx. De los resultados obtenidos, se observa que la combustión a dos etapas en combinación con la recirculación de gases permite una disminución de 40% adicional a la lograda con el uso exclusivo de la recirculación. Esta decisión no origina altos costos, solo requiere la correspondiente distribución de aire y combustible en los quemadores.
4. La disminución del exceso de aire en el horno del generador de vapor con inyección simultánea de agua para quemar CO y reducir la temperatura en la ZCA, combinado con la recirculación de gases, también propicia una disminución adicional de NOx, en un 10%.

6. AGRADECIMIENTOS. Los autores agradecen el apoyo brindado por el CONACYT. También agradecemos el apoyo de la COMISIÓN DE OPERACIÓN Y FOMENTO DE LAS ACTIVIDADES ACADÉMICAS del Instituto Politécnico Nacional, México.

7. REFERENCIAS

1. Kotler V.R. Nitrogen oxides in boiler smock gases. Moscow, Energoatomizdat, 1987.(BOOK)
2. Zeldovich Ya., Sadovnikiv I. and Frank-Kameneckiy D. Nitrogen oxidation at burning. Leningrad, USSR AC, 1947. (BOOK)
3. Lavoie G.A. Combustion and Flame. 1970. #15, p.97. (JOURNAL ARTICLE)
4. Bartok W., 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, GRV.3GNOS.71. (CONFERENCE PROCEEDING)
5. Miller J.A., Bowman G.T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. Progress in Energy and Combustion Science. 1989. V.15, pp.287-338. (JOURNAL ARTICLE)

6. Roslyakov P.V. and Zakirov I.A. Nonstoichiometric burning of natural gas and boiler oil on Power Plants. Moscow, MEI, 2001. (BOOK)
7. Roslyakov P.V. and Egorova L.E. Influence of the basic characteristics of active burning zone on nitrogen oxides formation. Thermal Engineering, #9, 1996, pp.22-26. (JOURNAL ARTICLE)
8. Fenimore C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flame. Proc. of 13-th International Symposium on Combustion. 1971, p.373. (CONFERENCE PROCEEDINGS)
9. Roslyakov P.V. and Egorova L.E. Method of calculation of nitrogen oxide formation in hot water and steam boilers. Thermal Engineering, #4, 1997, pp.67-74. (JOURNAL ARTICLE)
10. Roslyakov P.V. and etc. Recommendations on decrease of nitrogen oxide formation in gas and black oil boilers. Power Plants, #9, 1991, pp.9-17. (JOURNAL ARTICLE)
11. Bezgreshnov A.N., Lipov Yu. M. and Shleyfer B.M. Calculation of steam boilers. Moscow, Energoatomizdat, 1991. (BOOK)
12. Roslyakov P.V. and Zinkina V.N. Influence of heat exchange in furnaces on formation of thermal nitrogen oxides. Thermal Engineering, #12, 1991, pp.60-62. (JOURNAL ARTICLE)
13. Roslyakov P.V. and Chgun Beyczin. Nature of fast nitrogen oxide emission at burning of organic fuels. Thermal Engineering, #1, 1994, pp.71-75. (JOURNAL ARTICLE)
14. Thermal design for power boilers. Standard Method. Sankt-Petersburg, CKTI-VTI, 1998. (BOOK)
15. Egorova L.E. Development of calculation method of nitrogen oxide formation in hot water and steam boilers. Tesis Ph.D., Moscow, MEI, 1995. TESIS Ph.D
16. Jarquin Salinas J. G. y Minor Cuenca C. L. Software para el estudio teórico de la combustión y análisis de métodos de disminución de NOx en generadores de vapor. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. México D. F., 2004.
17. Jarquin López G. Estudio de la formación de NOx en generadores de vapor que queman combustóleo y gas natural. Tesis de doctorado en Ingeniería Mecánica. Instituto Politécnico Nacional. México D. F. 2004.
18. Jarquin López G., Polupan G., Toledo Velázquez M., Sánchez Flores P. F. “Decrease of nitrogen oxides emissions in the power boiler”. Book of Abstracts of 7th International Conference on Energy for a Clean Environment, Clean Air 2003, p.184. Lisbon, Portugal, July 2003.
19. Jarquin López G., Polupan G., Toledo Velázquez M., Tolentino Eslava G. “Análisis de los métodos para la disminución de NOx en calderas que queman gas natural y combustóleo”. Memorias del III Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica, III COBIM, del 22 al 24 de Julio del 2003, Perú Lima.
20. Polupan G., Jarquin López G., Toledo Velázquez M., Sánchez Flores P.F. “Análisis de los métodos de control de óxidos de nitrógeno en una caldera de potencia”. Memorias del 7^o Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas SEPI-ESIME-IPN, 2003. México D. F.