

# TÉCNICAS PARA CONTROLAR LAS EMISIONES DE NO<sub>x</sub> EN TURBINAS DE GAS

## RESUMEN

A continuación el lector encontrará información acerca de las técnicas que se han venido desarrollando para controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) en las turbinas de gas, dichos contaminantes se producen en la combustión de todos los combustibles fósiles, y su tasa de formación es directamente proporcional a la temperatura de combustión, parámetro del que depende la eficiencia térmica de la turbina de gas.

**PALABRAS CLAVES:** Turbinas de gas, Óxidos de nitrógeno, eficiencia térmica, combustión.

## ABSTRACT

*This paper has information about the control techniques developed in order to control the oxides of nitrogen (NO<sub>x</sub>) emissions in gas turbines, this emissions are formed in the combustion of all fossil fuels and the rate of formation is strongly dependent upon the combustion temperature, parameter that defines gas turbine thermal efficiency.*

**Keywords:** Gas turbines, nitrogen oxides, thermal efficiency, combustion.

**JUAN ESTEBAN TIBAQUIRÁ G.**  
Profesor asistente, M.Sc., I.M.  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
U.T.P.  
E-mail: [juantiba@utp.edu.co](mailto:juantiba@utp.edu.co)

**JUAN CARLOS BURBANO J.**  
Profesor asistente, M.Sc., I.M.  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
U.T.P.  
E-mail: [jburbano@utp.edu.co](mailto:jburbano@utp.edu.co)

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante la combustión de un hidrocarburo se generan los siguientes productos: Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O), oxígeno (O<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>) y trazas de otros componentes como: Oxídos de nitrógeno (NO, NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de sulfuro (SO<sub>2</sub>), material particulado, hidrocarburos no quemados y hollín.

El nitrógeno es un elemento que se encuentra aproximadamente en un 78% por volumen en el aire atmosférico, ver tabla No. 1.

Gas constituyente	Contenido por % de volumen
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	78.0870
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	20.9476
Argón (Ar)	0.9340
Dióxido de carbono	0.0314

Tabla No.1 Principales componente del aire<sup>1</sup>

Los óxidos de nitrógeno pueden presentarse en diferentes formas:

- NO: Óxido nítrico
- NO<sub>2</sub>: Dióxido de nitrógeno
- N<sub>2</sub>O: Óxido nitroso
- NO<sub>3</sub>: Trióxido de nitrógeno
- N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: Anhídrido nítrico

De estos se oxidan artificialmente: NO, NO<sub>2</sub> y son llamados los NO<sub>x</sub>. El NO se forma en los procesos de combustión de los combustibles fósiles, la formación de estos depende de:

- La temperatura de combustión del proceso.

- Concentración de oxígeno durante el proceso de combustión o porcentaje de exceso de aire.
- Presión en el dispositivo de combustión.
- Tiempo durante el cual se realiza el proceso de combustión.

En la atmósfera el NO se oxida rápidamente formando NO<sub>2</sub>, este proceso se acelera debido a la presencia de los rayos solares, efecto fototérmico, y material orgánico presente en el aire.<sup>2</sup>

En muchos países las turbinas de gas (Ciclo Brayton) son la principal fuente de generación de energía eléctrica, allí se han implementado normas ambientales que hacen necesario el control de las emisiones de NO y NO<sub>2</sub>, conocidos como Noxes o NO<sub>x</sub>. Dichas regulaciones demandan emisiones máximas de 25 ppm<sup>3</sup> (partes por millón) de NO<sub>x</sub> para combustibles líquidos y de 10 ppm para gas natural.

Las emisiones de NO<sub>x</sub> tienen efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente, estas juegan un papel importante en:

- La lluvia ácida.
- Formación de niveles peligrosos de ozono (O<sub>3</sub>) en la superficie terrestre.
- Formación de smog en la atmósfera.

Las emisiones de NO<sub>2</sub> tienen un efecto mas adverso en la salud humana que el NO. El NO<sub>2</sub> captura el oxígeno que transporta la hemoglobina y también forma ácido en los pulmones de ahí que es mucho mas tóxico que el CO para la misma concentración.

La mayoría de las turbinas de gas queman gas natural (el cual puede modelarse, para cálculos previos, como CH<sub>4</sub>:

Fecha de Recibo: 21 abril de 2003

Fecha de Aceptación: 20 de mayo de 2003

metano) de allí que tienen un alto impacto en la contaminación ambiental por NOx, de tal manera los investigadores y productores de turbinas de gas han centrado parte de sus estudios en desarrollar técnicas que permitan reducir las emisiones de NOx en las turbinas de gas. Esta preocupación esta altamente relacionada con el aumento que se ha logrado en la temperatura de combustión, o temperatura de entrada a la turbina TET<sup>4</sup> (Ver Figura No. 1), con el propósito de mejorar la eficiencia térmica de la turbina, pero dicho aumento, como se anotó anteriormente, trae consigo un efecto indeseable, la formación de emisiones de NOx.

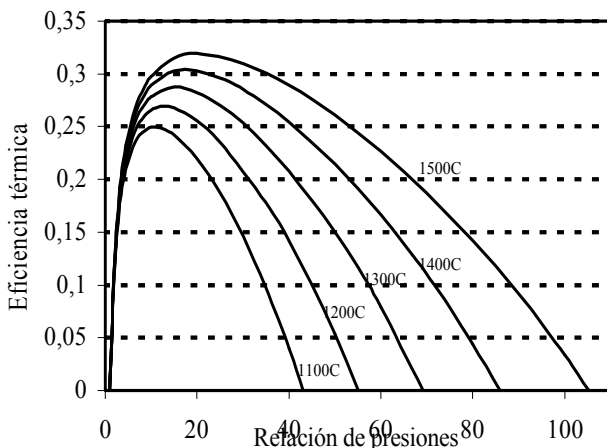


Figura No. 1 Variación de la eficiencia térmica de una turbina de gas con la temperatura de combustión

Entre los métodos que se han venido desarrollando para el control de emisiones de NOx están las tecnologías de control de combustión y post-combustión, entre las cuales se encuentran:

- Ciclos con inyección de agua o de vapor. (Control de combustión).
- Ciclos con humidificación en cascada. (Control de combustión).
- Combustores secos bajos en NOx. (Control de combustión).
- Combustores catalíticos. (Control de combustión).
- Ciclos con reducción catalítica selectiva. (Control de post-combustión).

Este trabajo pretende explicar los métodos anteriormente citados y generar las respectivas conclusiones.

**2. CICLOS CON INYECCIÓN DE AGUA O DE VAPOR.**

El objetivo inicial de una turbina de gas (Ciclo Brayton) con inyección de agua es aumentar la salida de potencia incrementando el flujo de masa que pasa a través de la

turbina sin modificar la potencia consumida por el compresor.

En la figura No. 2 está esquematizado un ciclo con inyección de agua.

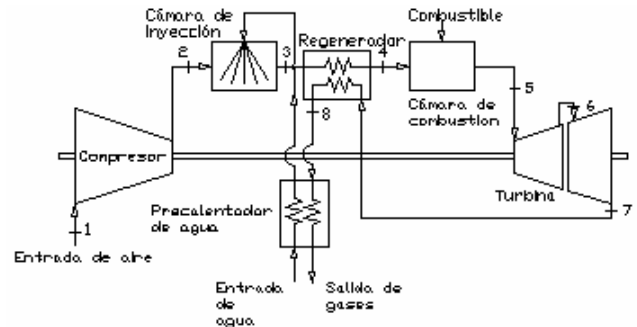


Figura No. 2 Turbina de gas de doble eje con inyección de agua

En este tipo de ciclo, agua desmineralizada es inyectada antes de la cámara de combustión para reducir las emisiones de NOx a por lo menos 25 ppm (Entre 25 y 42 ppm según referencia [5]). Este es un método simple y probado para reducir estas emisiones.

La cantidad de agua que se adiciona es tal que el aire a la salida del compresor se satura, así se logra un incremento en la potencia de la turbina sin incrementar la potencia del compresor. Un turbina de gas con inyección de agua también es conocida como un ciclo evaporativo-regenerativo.

Una variación a este método consiste en inyectar vapor de agua sobrecalentado en la cámara de combustión (Ver figura No. 3), el vapor se sobrecalienta usando los productos de combustión que salen de la turbina en un recuperador de calor. Este ciclo tiene una ventaja adicional, con una inversión de capital posterior puede ser convertido en un ciclo combinado.

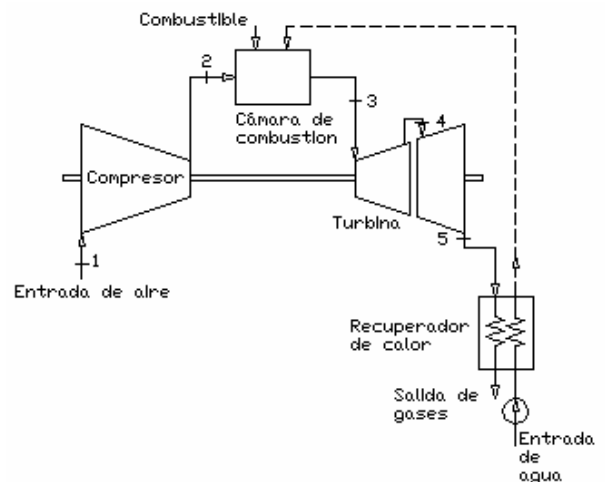


Figura No. 3 Turbina de gas de doble eje con inyección de vapor

**3. CICLOS CON HUMIDIFICACIÓN EN CASCADA.**

Algunas empresas del sector de generación de potencia eléctrica a partir de fuentes térmicas, han expresado su interés en una turbina de gas con humidificación en cascada, pero ninguna de ellas ha invertido en su construcción para una posterior operación comercial.

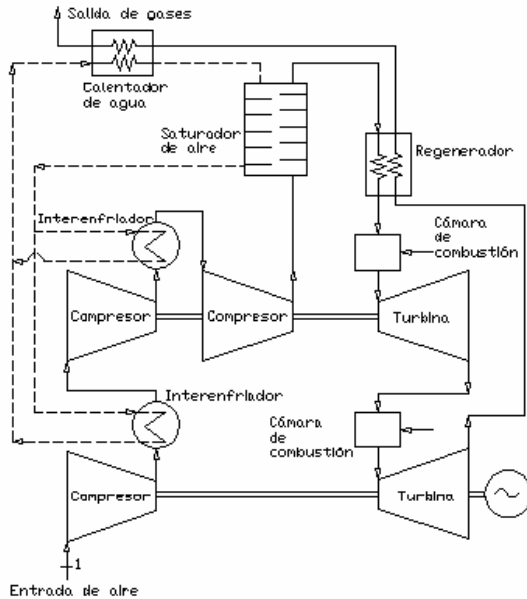


Figura No. 4 Turbina de gas con humidificación en cascada

Existe una unidad de demostración desarrollada por la compañía *Energy Storage and Power Consultants* (ESPC) de New Jersey. La planta genera 12.1 MW con una eficiencia térmica de 46.4% usando como combustible gas natural.<sup>6</sup>

El nivel de emisiones es de 9 ppm de NOx sin usar ni reducción catalítica selectiva ni combustión catalítica. Esta capacidad del ciclo ha sido evaluada teniendo en cuenta el efecto de la humidificación en el límite de emisiones de NOx, pruebas independientes fueron realizadas para el tipo y tamaño de combustor, en el modelo de demostración, utilizado (por *Aero Industrial Technology* en Inglaterra y *Lycoming* en USA).

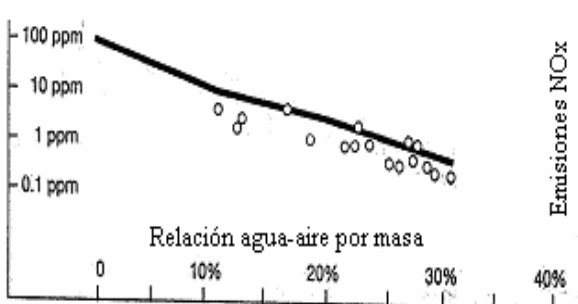


Figura No. 5 Emisiones de NOx vs. Relación agua aire por masa<sup>6</sup>

Los resultados obtenidos en ambas pruebas confirmaron que la humidificación (20 a 30 % de flujo de masa de agua) puede limitar las emisiones de NOx a niveles de un solo dígito como lo muestra la figura No. 5.

**4. COMBUSTORES SECOS BAJOS EN NOx**

Las siguientes son modificaciones en la combustión que disminuyen las emisiones de NOx sin inyección de agua: combustión pobre, reducción de tiempo de combustión, combustión premezclada pobre y combustión de dos etapas.

*Combustión pobre:* una relación equivalente  $\Phi$  (razón entre la relación aire combustible estequiométrica y la real) de uno ( $\Phi=1$ ) indica una relación estequiométrica de combustible-aire. Relaciones de equivalencia por debajo de uno indican condiciones de poco combustible en la combustión. Con combustión pobre, el exceso adicional de aire enfría la llamada, lo cual reduce la temperatura de llama pico y reduce la tasa de formación térmica de NOx.

*Reducción de tiempo de combustión:* en todos los diseños del combustor de la turbina de gas, los gases de combustión a alta temperatura son enfriados con dilución de aire a una temperatura aceptable antes de entrar a la turbina. Con la reducción del tiempo de combustión, la dilución de aire es llevada a cabo mas rápido que con los combustores estándar. Debido a que los gases de combustión están a una temperatura alta por un período de tiempo mas corto, la cantidad de formación térmica de NOx decrece.

*Combustores de premezclado pobre:* en un diseño de un combustor premezclado pobre, el aire y el combustible son premezclados en una muy pobre relación, anterior a la introducción dentro de la zona de combustión. El exceso de aire en la mezcla pobre logra temperaturas de combustión mas bajas, lo cual reduce altamente las tasas de formación de NOx. La combustión premezclada pobre no es tan efectiva en reducir los niveles de NOx si se queman combustibles con alto nitrógeno.

*Combustor de dos etapas:* Estos combustores queman combustible-rico en la zona primaria y combustible pobre en la zona secundaria. La combustión incompleta bajo condiciones de combustible-rico en la zona primaria produce una atmósfera con una alta concentración de CO y gas hidrógeno (H<sub>2</sub>). El CO y H<sub>2</sub> reemplaza algo del oxígeno para la formación de NOx y también actúa como un agente reductor para cualquier NOx formado en la zona primaria. Así, el nitrógeno del combustible es liberado con mínima conversión a NOx.

## 5. COMBUSTOR CATALÍTICO ULTRA-BAJO NO<sub>x</sub>

Los óxidos de nitrógeno que son emitidos por la mayoría de las plantas termoeléctricas han sido reducidos por la RCS, sin embargo el desarrollo de una tecnología para la reducción de NO<sub>x</sub> mas económica es deseable cuando el capital y los costos de operación y mantenimiento (O&M) de un sistema de RCS son considerables. Por esta razón en cooperación con *Kansai Electric Power Co.*, la *Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI)* condujo una investigación y desarrolló un Combustor Catalítico ultra-bajo en NO<sub>x</sub> para turbinas de gas. En 1995 un combustor catalítico se diseñó y mostró emisiones de NO<sub>x</sub> menores de 10 ppm para una temperatura de gases de salida de 1300°C. Si la reducción de NO<sub>x</sub> puede ser alcanzada solo modificando el combustor los costos de control de NO<sub>x</sub> y por ende los costos de generación pueden ser reducidos.

Un combustor catalítico esta compuesto de una sección de quemador y una sección de premezcla de combustión. Ver figura No. 5. La sección de quemador consiste de 6 segmentos de combustor catalítico y 6 boquillas de premezcla. Con el propósito de incrementar la distribución de aire a la sección del quemador, una pared cerámica fue aplicada a la sección de premezcla de combustión y la distribución de aire-combustible entre los segmentos del combustor catalítico y las boquillas de premezclado fue optimizada. Los catalizadores son precalentados a 400°C para mantener la reacción activa y la temperatura de reacción catalítica fue controlada alrededor de 800°C para permitir la degradación térmica.

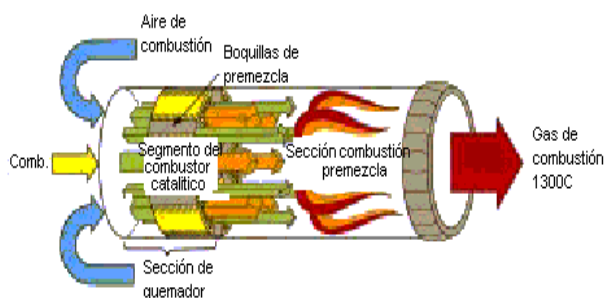


Figura No 6 Esquema de un combustor catalítico.

Adicionalmente la mezcla de aire combustible es inyectada desde las boquillas de premezcla al gas de combustión catalítica y la combustión estuvo por encima de 1300°C. Las emisiones de NO<sub>x</sub> en el combustor decrecieron con el incremento de la presión los cuales fueron menos de 5 ppm (convertidos a 16% de O<sub>2</sub>) a alrededor de 10 atm y 4 ppm (Convertidos a 16% de O<sub>2</sub>) a una condición de carga base de 13.5 atm y una temperatura de gases de salida del combustor de 1350°C.

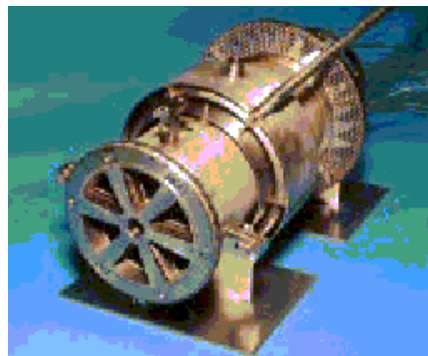


Figura No. 7 Combustor catalítico.

## 6. REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA

La Reducción Catalítica Selectiva (RCS) es considerado el mejor sistema de control disponible de NO<sub>x</sub>, capaz de reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> hasta 5 ppm. El sistema trabaja inyectando vapor de amoníaco (NH<sub>3</sub>) en los gases de combustión, los cuales después pasan por un material catalizador. La reacción química resultante reduce los NO<sub>x</sub> en agua y nitrógeno sustancias inofensivas.

Aunque según la *ONTARIO CLEAN AIR ALLIANCE*<sup>7</sup>, la instalación de unidades de RCS requiere el uso de anhídridos de amoníaco, una sustancia extremadamente peligrosa, el amoníaco es tóxico si es inhalado y puede irritar y quemar la piel, ojos, nariz o garganta. Los vapores de amoníaco pueden formar una mezcla explosiva cuando son mezclados con el aire. Además el amoníaco que no se combina con los NO<sub>x</sub> en los procesos de RCS genera la creación y liberación de material particulado muy fino y óxidos de nitrógeno.

Otra desventaja que tiene la RCS es que la reacción es dependiente de la temperatura de los gases de salida, por esta razón la reducción de NO<sub>x</sub> utilizando RCS es limitada en ciclos combinados.

## 7. LA EXPERIENCIA DE GE

Las turbinas de gas General Electric (GE) tecnología F (Frame 9FA) responden a la necesidad de alta eficiencia y alta confiabilidad, están equipadas con sistemas de combustión de bajas emisiones de NO<sub>x</sub>, las turbinas son amigables con el medio ambiente, con niveles de 25 ppm o menos de NO<sub>x</sub>. Mas de 255 turbinas de gas GE tecnología F operan en plantas termoeléctricas alrededor del mundo. Las turbinas de gas también están equipadas para quemar combustible destilado como respaldo para el gas natural, y están provistas con un sistema de inyección de agua para reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> mientras operan con el combustible de respaldo.

## 8. CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio de los diferentes métodos de control de las emisiones de NOx encontrándose que:

- Tanto la inyección de agua o de vapor como la humidificación en cascada son métodos ampliamente utilizados, baratos pero que no producen los resultados exigidos por las normas existentes de emisiones de NOx.
- Los combustores secos bajos en NOx según el estudio, han demostrado ser una buena alternativa desde el punto de vista económico ya que la inversión inicial no es muy grande.
- La reducción catalítica selectiva (RCS) disminuye considerablemente las emisiones de NOx, sin embargo por la inyección de vapor de amoníaco se presentan inconvenientes para la salud humana y el medio ambiente.
- Cabe anotar que el esfuerzo de los diferentes fabricantes de turbinas de gas está encaminado en desarrollar tecnologías que permitan llevar las emisiones de NOx a un dígito de partes por millón (ppm)

[7] ONTARIO CLEAN AIR ALLIANCE. Disponible en internet: [www.cleanairalliance.org](http://www.cleanairalliance.org)

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] BATHIE, William W. Fundamentals of gas turbines. Second edition. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [2] EL-WAKIL, M.M. Power Plant Technology. 1st edition. Singapore: McGraw Hill, 1984. Page 714.
- [3] UNIVERSITY OF LEEDS. Department of Fuel and Energy. Disponible en internet: <http://www.leeds.ac.uk/fuel/shortc/ultra.htm> (2002)
- [4] TIBAQUIRÁ, Juan y BURBANO, Juan. Evolución y desarrollo tecnológico de las turbinas de gas con base en la temperatura de entrada. SCIENTIA ET TECHNICA. Abril 2002 No. 18. Páginas 63 a 66.
- [5] ZINK, John C. Progress continues in gas turbine NOx control. Power Engineering. May 1996 v 100 n5. Pages 19 to 22.
- [6] DE BIASI, Victor. 12-MW demo plant proposed to prove out CHAT technology. Gas Turbine World. May-June 1999. Pages 22 to 25.