

AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN EN LA CALDERA DE  
LA COMPAÑÍA ELÉCTRICA DE SOCHAGOTA S.A. E.S.P. - TERMOPAIPA  
IV PARA BUSCAR UNA REDUCCIÓN EN LOS NIVELES DE NO<sub>x</sub>.

BRAYAN ALEXANDER OROZCO BARRERA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA  
DUITAMA  
2016

AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN EN LA CALDERA DE LA  
COMPAÑÍA ELÉCTRICA DE SOCHAGOTA S.A. E.S.P. - TERMOPAIPA IV PARA  
BUSCAR UNA REDUCCIÓN EN LOS NIVELES DE NO<sub>x</sub>.

BRAYAN ALEXANDER OROZCO BARRERA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electromecánico  
Proyecto presentado en la modalidad de práctica con proyección empresarial

Director:

Edgar Absalón Torres Barahona  
MSc. Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD PEGAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA  
DUITAMA  
2016

## NOTA DE ACEPTACION

Aprobado por el comité curricular en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia para optar al título de Ingeniero Electromecánico.

---

Ing. Edgar Absalón Torres B.  
Director

---

Ing. Oswaldo Enrique Echeverría S.  
Jurado

---

Ing. Orlando Díaz Parra.  
Jurado

Duitama, octubre de 2016

## DEDICATORIA

*A Dios, por darme la fuerza y guiarme en todo momento, a mi familia, por su apoyo incondicional y motivación a lo largo de este arduo camino y a todas las personas que de alguna manera hicieron su aporte para la realización de este trabajo, que representa la culminación de la primera etapa de mi formación como profesional.*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero que todo a mis padres, Omar y Patricia quienes siempre me han apoyado, económica y moralmente en la búsqueda de este logro que hoy se hace realidad, por inculcar en mí todos los valores que me han formado como un hombre correcto y por ser mi ejemplo de vida.

A mi hermanita Evelyn, por alentarme siempre, porque junto a mis padres son quienes me motivan cada día a seguir adelante en este difícil camino y quienes no me dejaron desfallecer en los momentos más difíciles.

El más sincero agradecimiento al ingeniero Mario Alfonso Cabra, jefe del departamento de caldera de la Compañía Eléctrica De Sochagota S.A. E.S.P. por darme la oportunidad de realizar mi proyecto de grado en tan importante empresa, por sus enseñanzas y consejos para crecer como persona y como profesional.

De igual forma al ingeniero Alexander Ruiz, jefe suplente del departamento, quien junto al ingeniero Mario orientó y supervisó el proyecto de principio a fin, por compartir conmigo sus conocimientos y experiencia.

Agradezco inmensamente a todo el personal de la Compañía Eléctrica De Sochagota S.A. E.S.P. por su colaboración en el desarrollo de este proyecto, en especial al grupo de mecánicos y auxiliares del departamento de caldera, quienes con su conocimiento y experiencia fueron parte fundamental en el desarrollo de este trabajo.

Al ingeniero Edgar Torres director de tesis, por su compromiso y dedicación, por sus orientaciones, y por compartir conmigo sus conocimientos, para la realización de este proyecto.

A todos los docentes de la escuela de ingeniería electromecánica, por transmitirme los conocimientos, que son la base para el desarrollo de este trabajo y por sus valiosos consejos que me han ayudado a crecer como persona y como profesional.

# CONTENIDO

	Pág.
<b>1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>12</b>
<b>2. ESTEQUIOMETRÍA BÁSICA DE LA COMBUSTIÓN.....</b>	<b>16</b>
2.1 <i>CONCEPTOS BÁSICOS.....</i>	<i>16</i>
2.2 <i>COMBUSTIBLE USADO EN TERMOPAIPA IV.....</i>	<i>17</i>
2.3 <i>TIPOS DE COMBUSTIÓN .....</i>	<i>18</i>
2.4 <i>FORMACIÓN DE LOS NO<sub>x</sub>.....</i>	<i>20</i>
<b>3. DISEÑO EXPERIMENTAL DE AJUSTES.....</b>	<b>23</b>
<b>4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>29</b>
4.1 <i>EQUIPO UTILIZADO.....</i>	<i>30</i>
4.2 <i>DIAGNOSTICO INICIAL.....</i>	<i>31</i>
4.3 <i>IMPLEMENTACION DE AJUSTES Y RESULTADOS .....</i>	<i>35</i>
4.3.1 <i>Ajuste de álabes externos.....</i>	<i>36</i>
4.3.2 <i>Ajuste de difusores.....</i>	<i>38</i>
4.3.3 <i>Ajuste de álabes internos.....</i>	<i>41</i>
4.3.4 <i>Ajuste de Sliding Dampers.....</i>	<i>43</i>
4.3.5 <i>Ajuste en los BIAS de carbón de los molinos.....</i>	<i>48</i>
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>53</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>62</b>
<b>7. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>64</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>64</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fragmento tabla de métodos avalados para monitoreo de emisiones.....	14
Figura 2. Tipos de combustión según el coeficiente de exceso de aire.....	19
Figura 3. Zonas de la llama producida por el quemador de carbón DRB-XCL®.....	22
Figura 4. Flujo de aire secundario hacia la llama.....	24
Figura 5. Efecto de turbulencia en la llama producido por el difusor.....	25
Figura 6. Forma aproximada de la llama sin el efecto del difusor.....	26
Figura 7. Flujo de aire secundario hacia la llama.....	27
Figura 8. Vista en sección del quemador DRB-XCL® instalado actualmente en la caldera de la Compañía Eléctrica De Sochagota S.A. E.S.P.....	29
Figura 9. Analizador de gases portátil Rosemount series 500 utilizado en el desarrollo del proyecto. ....	30
Figura 10. Mapeos iniciales realizados en el ducto de salida del ECO.....	33
Figura 11. Vistas de álabes internos y externos del quemador.....	35
Figura 12. Modificación hecha a los difusores del grupo 10.....	38
Figura 13. Mapeos obtenidos luego de retraer los difusores a 7”.....	39
Figura 14. Análisis por elementos finitos de los flujos dentro de la caldera.....	44
Figura 15. Gráfica de concentración de Oxígeno en el ducto de salida del ECO .....	45
Figura 16. Gráfica de concentración de Oxígeno en el ducto de salida del ECO .....	46
Figura 17. Gráfica de concentración de Oxígeno en el ducto de salida del ECO .....	47
Figura 18. Evolución de los quemadores desarrollados por B&W.....	48
Figura 19. Modelo caldera con sistema OFA para reducción de $NO_x$ .....	49
Figura 20. Curvas ajuste de BIAS a los molinos y emisiones de $NO_2$ (PROCONTROL)...	51
Figura 21. Tendencia de variación del oxígeno $O_2$ en función del ajuste implementado..	54
Figura 22. Tendencia de variación de $NO_x$ en función del ajuste implementado.....	56
Figura 23. Tendencia de variación de $NO_2$ en función del ajuste implementado.....	59

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Emisiones Óxidos de Nitrógeno Expresados como NO <sub>2</sub> año 2015.....	12
Tabla 2. Composición del combustible y comburente usados en la caldera de la compañía eléctrica de Sochagota (CES) S.A. E.S.P.....	17
Tabla 3. Resultados análisis de gases iniciales.....	31
Tabla 4. Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para centrales térmicas con capacidad instalada igual o superior a 20 MW.....	34
Tabla 5. Valores obtenidos con los ajustes en los álabes externos.....	36
Tabla 6. Valores obtenidos con los ajustes en la posición de los difusores.....	40
Tabla 7. Ajuste álabes internos de los quemadores.....	41
Tabla 8. Valores obtenidos con los ajustes en los álabes internos.....	42
Tabla 9. Identificación y descripción de ajustes implementados en quemadores.....	52
Tabla 10. Valores promedio de O <sub>2</sub> para cada análisis realizado.....	55
Tabla 11. Valores promedio de NO <sub>x</sub> para cada análisis realizado.....	57
Tabla 12. Valores promedio de NO <sub>2</sub> para cada análisis realizado.....	58



## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: Compilado de mapeos realizados en el ducto de salida del ECO.

ANEXO B: Protocolos de calibración del equipo analizador de gases PORTATIL  
*ROSEMOUNT SERIES 500.*

## RESUMEN

En este trabajo se presenta el proceso de diseño e implementación de ajustes en los quemadores de carbón **DRB-XCL®** B&W en la Compañía Eléctrica De Sochagota S.A. E.S.P. los cuales se programaron con el propósito de bajar los niveles de emisiones de  $NO_x$  a la atmosfera producto de la combustión de carbón pulverizado llevada a cabo en el interior de la caldera como parte del proceso de generación de vapor, realizando variaciones en el hardware de los equipos, pero sin reemplazar o cambiar ninguno de estos, lo cual implicaría una alta inversión de dinero por parte de la compañía al igual que una parada larga, lo que en el corto plazo no es viable.

Para lograr dicha disminución en los niveles de  $NO_x$  se realizaron varios ajustes en los quemadores de carbón los cuales incluyen: variar la posición actual de los alabes internos y externos que ajustan la longitud y amplitud de las llamas, inducir un cambio en la proporción de combustible suministrado a quemadores de niveles superiores y modificar posiciones de los difusores dentro de la garganta de los quemadores, según sugerencias dadas por el fabricante de los quemadores (Babcock & Wilcox Company).

Mediante análisis de gases para definición de una línea base y análisis de gases posteriores para cada tipo de ajuste programado, se realizó un detallado estudio de los valores de  $O_2$ ,  $NO_x$ ,  $CO$ , y exceso de aire registrados verificando la efectividad o no de cada uno de los ajustes.

Al finalizar la implementación de ajustes y comprobación de cada uno de estos, se pudo determinar la configuración más óptima de los equipos que controlan la combustión, con la que se obtienen los niveles más bajos de emisión por  $NO_x$  y la unidad funciona normalmente sin pérdidas de eficiencia en la combustión.

## INTRODUCCIÓN

En el proceso de quema de carbón pulverizado se obtienen productos en los gases de combustión que varían en función del tipo de carbón utilizado. Típicamente los productos de la combustión de carbón son: Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ), Agua ( $H_2O$ ) y cenizas. Debido a la naturaleza de la combustión y a la composición química del carbón, otros componentes como Dióxido de Azufre ( $SO_2$ ) y Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ) también se encuentran en los productos de dicho proceso. La combustión en procesos reales tiene un suministro de aire superior al estequiométrico, de ahí que, por usar bajo exceso de aire, en la corriente de gases siempre encontremos un porcentaje de Oxígeno ( $O_2$ ) y Monóxido de Carbono ( $CO$ ).

Para asegurar que dichos productos no afecten el entorno de las fuentes, ni al medio ambiente, las emisiones contaminantes a la atmosfera, tienen una normativa legal establecida mediante Resolución 909 de 2008 por la ANLA (Agencia Nacional De Licencias Ambientales) que regula las cantidades máximas de compuestos químicos y contaminantes que pueden ser liberados a la atmosfera según el tipo de proceso o actividad que los genera.

Los niveles de emisión por fuente fija de  $NO_x$  en la compañía ocasionalmente han estado muy cercanos al límite establecido por la norma, por tanto, se planearon e implementaron de manera experimental una serie de ajustes en los mecanismos y componentes de los quemadores de carbón pulverizado **DRB-XCL®** B&W de la caldera de la Compañía Eléctrica De Sochagota S.A E.S.P. tendientes a lograr sintonizarlos en su punto óptimo. Realizando In - Situ la comprobación de sus efectos mediante análisis de gases, con lo cual se logra determinar, si existe o no, una configuración en los mecanismos de ajuste en quemadores de carbón instalados actualmente en la caldera que dé el mejor rendimiento y logre una disminución en las emisiones de  $NO_x$  y así ampliar el margen entre la cantidad emitida por la planta y el máximo establecido.

Los ajustes realizados y los datos producto de las mediciones en campo, aportan a la compañía información importante sobre la viabilidad de aplicar o no de manera permanente dichos ajustes a los equipos, con el fin de operar con un mayor margen de seguridad que garantice el cumplimiento de la normatividad vigente en todo momento.

## 1. ANTECEDENTES

En los últimos estudios de calidad del aire titulados “EVALUACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS GENERADAS POR EL FUNCIONAMIENTO DE UNA CALDERA DE GENERACIÓN TÉRMICA, UBICADA EN LAS INSTALACIONES DE TERMOPAIPA IV DE LA COMPAÑÍA ELÉCTRICA DE SOCHAGOTA S.A. E.S.P.” realizados por Compañía De Consultoría Ambiental Ltda. CCA En el punto de descarga de la fuente de emisión fija (Caldera) de la Compañía Eléctrica De Sochagota S.A. E.S.P. Se observa que los valores promedio de emisiones por  $NO_x$  corregidos como  $NO_2$ , aunque cumplen con lo estipulado en la Resolución 909 de 2008 del MAVDT (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial), se encuentran muy cercanos al límite establecido en dicha norma.

Como se puede ver en la Tabla 1 la proporción del valor promedio de los tres muestreos realizados para el estudio del año 2015 con respecto a la norma es del 3.81% por debajo del valor máximo establecido, que es un margen muy estrecho para garantizar el cumplimiento de la norma en todo momento.

**Tabla 1.** Emisiones Óxidos de Nitrógeno Expresados como  $NO_2$  año 2015.

EMISIONES ÓXIDOS DE NITRÓGENO EXPRESADOS COMO $NO_2$							
FUENTE	MUESTREO	*CONCENTRACIÓN DE $NO_2$ A CONDICIONES DE REFERENCIA ( $mg/m^3$ )	FACTOR DE CORRECCIÓN	**CONCENTRACIÓN DE $NO_2$ CORREGIDO POR $O_2$ ( $mg/m^3$ )	***NORMA DE EMISIÓN ADMISIBLE	PROPORCIÓN RESPECTO A LA NORMA (%)	¿CUMPLE LA NORMA?
CALDERA DE GENERACIÓN TÉRMICA	04/03/2015	799,44	0,90	722,01	760	-3,81	SI
	04/03/2015	829,17	0,88	727,72			
	04/03/2015	846,33	0,88	743,49			
	PROMEDIO	824,98		731,07			

Fuente: Compañía De Consultoría Ambiental Ltda. CCA. Informe: “EVALUACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS GENERADAS POR EL FUNCIONAMIENTO DE UNA CALDERA DE GENERACIÓN TÉRMICA, UBICADA EN LAS INTALACIONES DE TERMOPAIPA IV” Año 2015. p.19

\* Concentración en condiciones de referencia (25 °C y 760 mm Hg)

\*\* Concentración en condiciones de referencia (25 °C y 760 mm Hg) y corregida con oxígeno de referencia del 6%

\*\*\* Estándares de emisión admisible (Capítulo IV, Artículo 9 tabla 6 de la Resolución 909 de 2008 del MAVDT)

Los valores promediados se mantienen estrechamente por debajo del valor máximo, sin embargo, algunos valores puntuales obtenidos en los análisis realizados in-situ lo superan por un amplio margen. Es por esto que se genera la necesidad de realizar algunos ajustes en los parámetros de la combustión en la caldera para buscar una reducción en estos valores de emisión por  $NO_x$ .

En los “estudios de evaluación de emisiones atmosféricas generadas por el funcionamiento de la unidad IV” realizados por la misma empresa, Compañía De Consultoría Ambiental CCA Ltda., antes del año 2015 se utilizó el método 7 (Method 7: DETERMINATION OF NITROGEN OXIDE EMISSIONS FROM STATIONARY SOURCES) establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (E.P.A.) para la determinación de las emisiones de óxidos de nitrógeno producto de la combustión del carbón en la caldera de CES.

Este método de evaluación según lo contemplado en la E.P.A. es aplicable para la medición de los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) emitidos por fuentes estacionarias (fijas).

El método establece que para la evaluación de emisiones por  $NO_x$  se debe extraer una muestra de los gases producto de la combustión en el punto de descarga para posteriormente ser analizados en un laboratorio y determinar las concentraciones de óxidos de nitrógeno en la muestra.

De manera resumida el método establece que el procedimiento para la toma de la muestra es: una muestra tomada al azar se recoge en un matraz evacuado que contiene un peróxido de hidrógeno en ácido sulfúrico diluido en solución absorbente, y los óxidos de nitrógeno, excepto el óxido nitroso, este se mide colorimétricamente utilizando el procedimiento de ácido fenolsulfónico (PDS).<sup>1</sup>

La E.P.A. menciona algunas interferencias que se pueden presentar con este método las cuales son: obtener resultados sesgados, los cuales se han observado cuando se toman muestras en condiciones de altas concentraciones de dióxido de azufre. Igual o superior a 2100 ppm de  $SO_2$ , utilizar cinco veces la concentración de  $H_2O_2$  de la solución absorbente del Método 7.

---

<sup>1</sup> OFFICE OF THE FEDERAL REGISTER NATIONAL ARCHIVES AND RECORDS ADMINISTRATION, Code Of Federal Regulations Part 60 (appendices), Vol 2, WASHINGTON: 2001 p.275-282

Debido a estas interferencias mencionadas y a lo complicado que resulta realizar la extracción y conservación de la muestra de acuerdo al procedimiento dado por E.P.A. y teniendo en cuenta que no se podía garantizar la seguridad en la cadena de custodia desde la extracción de la muestra en la fuente de emisión, pasando por todo el proceso de traslado y hasta su análisis en laboratorio, lo cual es vital para mantener la pureza de la muestra y así poder obtener resultados precisos y confiables, se concluyó que la aplicación de este método en las mediciones no brindaba la confiabilidad necesaria para obtener resultados representativos que muestren la situación real de las emisiones de la unidad.

Teniendo en cuenta las falencias e interferencias detectadas en la aplicación de este método expuestas en los párrafos anteriores y buscando obtener unos resultados más confiables y precisos en la evaluación de las emisiones de NO<sub>x</sub> generadas por CES, se tomó la determinación de cambiar el método de evaluación a partir del año 2015 y en adelante usar el método **7E** (Determination Of Nitrogen Oxides Emissions From Stationary Sources (Instrumental Analyzer Procedure) establecido por la E.P.A. y avalado como método alternativo para el monitoreo de emisiones en plantas termoeléctricas en el “PROTOCOLO PARA EL CONTROL Y VIGILANCIA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GENERADA POR FUENTES FIJAS” expedido por el MMAVDT (ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial de Colombia). Ver Figura 1.

**Figura 1** Fragmento tabla de métodos avalados para monitoreo de emisiones.

ACTIVIDAD	CONTAMINANTE	MÉTODO DE MONITOREO	TIEMPO MINIMO, VOLUMEN MINIMO Y OTRAS CONSIDERACIONES PARA LA TOMA DE MUESTRA*
			Enfriador Clinker: 60 minutos y 1,15 dscm (40,6 dscf)
fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla	MP, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , HCl, HF	Referencia: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 13A y 26 Alternativos: 3, 3B, 13B, 26A y 17	Tiempo de medición: 60 minutos
Termoeléctricas	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	Referencia: 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 Alternativos: 3A, 3B, 6C, 7A, 7C, 7D, 7E y 17	Tiempo de medición: 60 minutos Volumen de muestra: 0,85 dscm (30 dscf) Caudal: Método 7C - entre 0,014 y 0,018 cfm

Fuente: Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas. MMADT 2010

Según lo dispuesto en la E.P.A. el método 7E es un procedimiento para la medición de los óxidos de nitrógeno (NOx) en las emisiones de fuentes fijas utilizando un analizador instrumental continuo.

De manera resumida, en este método, una muestra de gas efluente se muestrea continuamente y se transporta al analizador instrumental continuo para medir la concentración de NOx. Es posible medir el NO y NO2 por separado o simultáneamente juntos, pero, para los efectos de este método, NOx es la suma de NO y NO2.<sup>2</sup>

Es decir, la medición se hace de forma directa en el punto de descarga (Chimenea) de CES, utilizando un equipo analizador de gases portátil que va leyendo en tiempo real las concentraciones de óxidos de nitrógeno en los gases que fluyen dentro del ducto, esta medición debe cumplir con ciertas condiciones establecidas en el protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas y que también se muestran en la figura 1.

La implementación de este método 7E permite obtener valores mucho más precisos en comparación con el método anterior (7), lo que hace que los resultados sean confiables para dar un reporte real de las cantidades de emisión de óxidos de nitrógeno a la atmosfera. Basados en este método se realizaron todos los análisis de gases tanto en chimenea como en el ducto de salida del economizador efectuados durante el desarrollo del proyecto.

---

<sup>2</sup> OFFICE OF THE FEDERAL REGISTER NATIONAL ARCHIVES AND RECORDS ADMINISTRATION, op. cit, p.294-296

## 2. ESTEQUIOMETRÍA BÁSICA DE LA COMBUSTIÓN

### 2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Para entender de una manera fácil y clara los principios básicos del proceso de combustión que se desarrolla dentro de la caldera de CES, a continuación, se presenta la teoría de este proceso, iniciando con algunas definiciones importantes para comprender los principios de dicho proceso.

Para empezar la **combustión** por definición es una reacción química que se produce entre el oxígeno (comburente) y un material oxidable (combustible), que va acompañada de desprendimiento de energía y habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama. Es la conversión de energía química primaria contenida en combustibles tales como carbón, petróleo o madera en calor (energía secundaria) a través de un proceso de oxidación.

Por tanto, la combustión es el término técnico para la reacción química del oxígeno con los componentes combustibles de los combustibles incluyendo la emisión de energía. Los procesos de combustión se realizan a temperaturas elevadas (hasta 1000°C o superior).

El oxígeno necesario para la combustión se suministra como parte del aire de combustión suministrado para el proceso, junto al volumen considerado de gases de salida (gases de combustión), dependiendo del tipo de combustible, se produce una cierta cantidad de residuos (ceniza, escombros).

**Energía:** Se define como la capacidad que tiene un material o un sistema para realizar un trabajo

Los “portadores de energía” naturales (carbón, gas natural, petróleo, radiación solar, energía del agua etc.) se describen como energías primarias, mientras que el término energías secundarias se utiliza para lo que se recibe de las conversiones de energía (electricidad, calor, etc.).

**Oxidación:** Término usado para todas las reacciones químicas con oxígeno y otras sustancias. Los procesos de oxidación liberan energía y son de una



gran importancia en muchas áreas, tanto técnicas (combustión) como biológicas (respiración).<sup>3</sup>

## 2.2 COMBUSTIBLE USADO EN TERMOPAIPA IV

Para el desarrollo de la combustión como ya se mencionó intervienen un combustible y un comburente, para el caso específico del proceso de combustión que se da dentro de la caldera de CES el combustible es el Carbón (del tipo bituminoso) y el aire (atmosférico). La composición de cada uno de ellos se muestra a continuación en la tabla 2.

**Tabla 2.** Composición del combustible y comburente usados en la caldera de la compañía eléctrica de Sochagota (CES) S.A. E.S.P.

Carbón		Aire	
Elemento	Cantidad (En Peso)	Elemento	Cantidad (En Volumen)
Azufre (S)	1,2 - 2,4 %	Oxígeno (O2)	21%
Hidrogeno (H2)	3,70%		
Carbono (C)	65%	Nitrógeno (N2)	79%
Humedad (H2O)	4 - 12 %		
Nitrógeno (N2)	1,09%		
Oxígeno (O2)	5,80%		
Cenizas	9 - 22 %		

Fuente: Curso básico de operación Compañía Eléctrica De Sochagota S.A. E.S.P. p.9

El carbón utilizado por Termopaipa IV para alimentar la caldera proviene de muchas minas de la región, lo que hace que la calidad y composición de este

<sup>3</sup> TESTO, Análisis de gases de combustión en la industria, en línea, disponible en: [http://www.testo.com.ar/es/home/productos/gases\\_de\\_combustion/gases\\_de\\_combustion\\_1/analizadores\\_de\\_gases\\_de\\_combustion.jsp](http://www.testo.com.ar/es/home/productos/gases_de_combustion/gases_de_combustion_1/analizadores_de_gases_de_combustion.jsp)

no sea homogénea, esto se mejora mediante el proceso de mezclado que se le realiza a todo el mineral recibido en el patio de carbones, donde se apila por capas de máximo 20 cm para lograr una homogenización del mismo y así mantener las condiciones que requiere la caldera para su óptimo funcionamiento, como resultado de este proceso de homogenización se obtienen en promedio los valores mostrados en la tabla 2.

### 2.3 TIPOS DE COMBUSTIÓN

La combustión al ser una reacción química presenta un modelo teórico que permite su análisis, pero los resultados obtenidos mediante estos modelos teóricos distan de los reales, por tanto, la combustión se clasifica en dos tipos: *Ideal* y *Real*.

En la combustión ***ideal o estequiométrica*** la cantidad de aire que se suministra, es la calculada en el modelo teórico y es exactamente la necesaria para consumir la totalidad del combustible.

En la realidad no es posible cumplir con esta condición debido a que los componentes que intervienen en la combustión (combustible y comburente) no son completamente puros y además las condiciones en las que se da la combustión no son ideales y hacen que se presenten pérdidas durante la reacción, por tanto, es necesario proporcionar al proceso una cantidad de aire diferente a la ideal, a esta combustión se le denomina combustión ***real***.

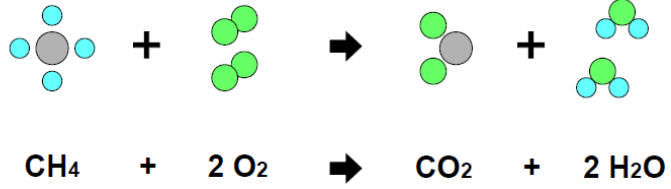
Dentro de la combustión real se pueden presentar 2 posibles situaciones, que la combustión se dé con un exceso de aire (lo que permite que se consuma la totalidad del combustible), a lo que se denomina “combustión completa”, o al contrario, que éste no sea suficiente para la cantidad de combustible y se tenga un defecto de aire, lo que se conoce como “combustión incompleta”.

En la Figura 2 se ilustra cómo es la reacción química para cada tipo de combustión en términos de la cantidad de aire (Oxígeno) suministrado, también se muestra cuáles son los productos esperados (ideales) y cómo estos cambian según el exceso de aire usado en cada uno de los tipos de combustión descritos.

Para el caso de la caldera en Termopaipa IV los niveles de exceso de aire que se manejan están en promedio en 10% o si hablamos de oxígeno el promedio es del 2% medido en el ducto de salida de la caldera, que son valores muy bajos en comparación a otras unidades de similares características, lo que hace que la combustión sea muy eficiente.

Figura 2. Tipos de combustión según el coeficiente de exceso de aire.

Combustión estequiométrica (ideal)

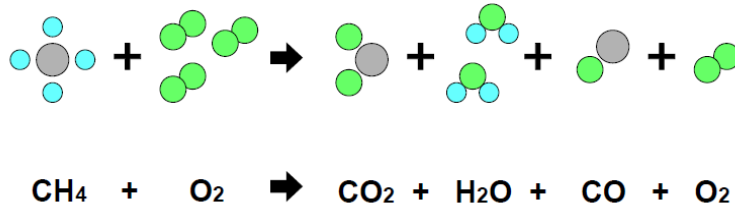


$$\lambda = 1$$

La cantidad de aire es la necesaria para consumir todo el combustible

El exceso de aire nos indica la cantidad de aire presente en la reacción.  
 $\lambda = 1$  para la cantidad exacta,  $\lambda = 1.5$  para un 50 % más de la cantidad necesaria

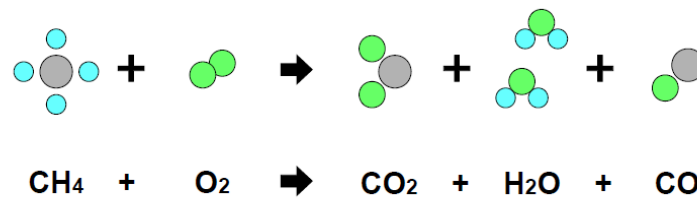
Combustión real con exceso de aire



$$\lambda > 1$$

La cantidad de aire es mayor a la necesaria para consumir todo el combustible. Nos sobraré  $\text{O}_2$  y seguiremos teniendo  $\text{CO}$

Combustión incompleta con defecto de aire



$$\lambda < 1$$

La cantidad de aire es insuficiente para consumir todo el combustible. Nos aparece un nuevo componente, el  $\text{CO}$

Fuente: <http://www.academiatesto.com.ar/cms/gases-de-combustion-1>

En algunos casos la combustión se puede ver afectado por valores de exceso de aire demasiado altos, lo que genera pérdidas en los gases de combustión y en ocasiones combustión incompleta, pero este caso no aplica para la caldera de CES.

## 2.4 FORMACIÓN DE LOS NO<sub>x</sub>

Para buscar una reducción en la formación de los óxidos de nitrógeno es necesario primero hacer una revisión a la teoría fundamental de los mecanismos de formación de NO<sub>x</sub>, para entender la manera en la que estos se forman durante el proceso de combustión del carbón y así poder determinar que parámetros de la combustión se pueden modificar esperando que den como resultado una disminución en las emisiones de dichos óxidos.

A continuación, se presenta una breve teoría sobre los mecanismos de formación de los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) con el fin de contextualizar la base teórica sobre la cual se planearon los ajustes en los parámetros de combustión en la caldera de la compañía.

Los óxidos de Nitrógeno que se producen debido a la quema de combustibles fósiles como el carbón, se forman mediante tres mecanismos principalmente.

- El primero de ellos “**por la oxidación del nitrógeno contenido en el combustible**” o “NO<sub>x</sub> combustible” se genera mediante un complejo proceso y es formado por la oxidación directa del nitrógeno contenido en el combustible. Representa una parte significativa de NO<sub>x</sub> formado en la combustión de carbón y aceite residual.<sup>4</sup>

Este proceso es sensible a los principios de la estequiometría del proceso de combustión, pero no se ve afectado por la temperatura local durante el proceso. Es decir, es una reacción química natural del proceso de combustión la cual no se modifica por la temperatura y depende netamente de la cantidad de nitrógeno contenido en el combustible, en este caso en el carbón.

Este parámetro no puede ser modificado ya que la concentración de este elemento es propia de la naturaleza del mineral.

- El segundo mecanismo de formación es “**por la reacción del nitrógeno atmosférico con fragmentos de hidrocarburos**” también

conocido como “NO<sub>x</sub> Rápido” Es el producto de la combustión completa del combustible con el comburente es decir de la combinación del carbón con el nitrógeno propio del aire.<sup>4</sup>

- El tercer y último mecanismo de formación de NO<sub>x</sub> es “**por oxidación térmica del nitrógeno atmosférico**” también conocido como “NO<sub>x</sub> Térmico” es decir por reacción con el nitrógeno disponible en el aire de combustión que es tomado de la atmosfera, la cual se produce por una reacción dependiente de la temperatura descrita por el mecanismo de Zeldovich.<sup>4</sup>

La formación de este tipo de NO<sub>x</sub> depende de dos factores principales:

- ✓ La temperatura del proceso de combustión.
- ✓ Concentración de oxígeno disponible.

Este último mecanismo de formación de NO<sub>x</sub> es el más importante para el desarrollo del proyecto. ya que como se mencionó depende principalmente de la temperatura y el oxígeno disponible en la mezcla aire-carbón, los cuales son parámetros que se pueden ajustar mediante los diferentes mecanismos que controlan la combustión como los quemadores de carbón.

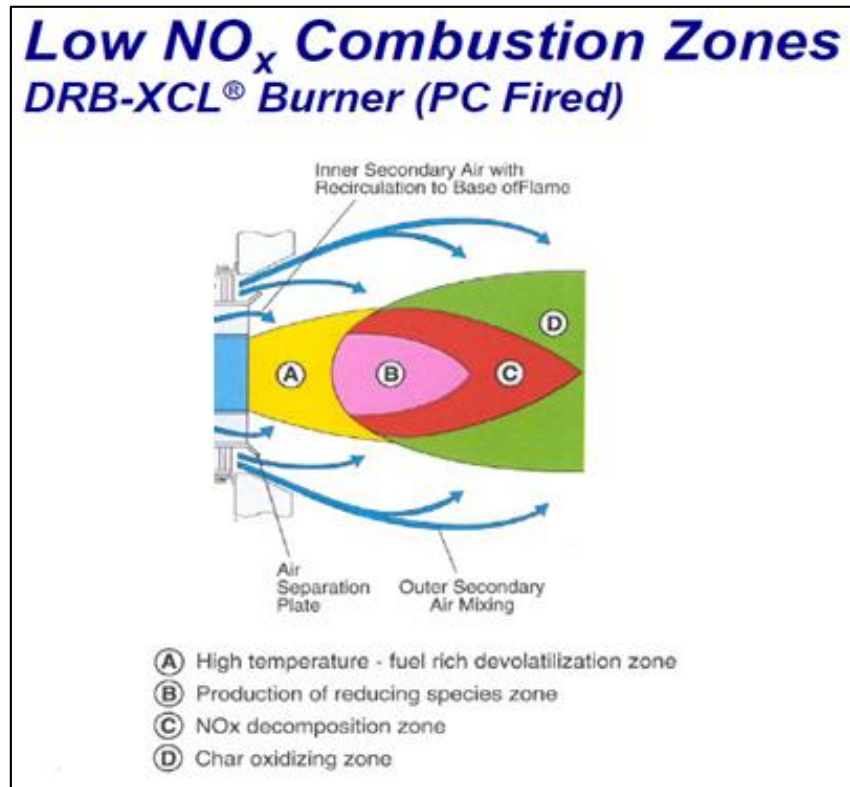
Una vez entendido esto se propone la realización de un plan de trabajo basado en un diseño experimental para la implementación de varios tipos de ajuste en diferentes elementos de los quemadores llevados a cabo en varias etapas, encaminados a lograr una reducción de la zona de alta temperatura (B) y de formación de NO<sub>x</sub> (B) de la llama, las cuales se pueden identificar claramente en la Figura 3. Estas zonas son las que generan las condiciones más propicias para la formación del “NO<sub>x</sub> Térmico” que como se mencionó es el único que podemos regular.

Dicho esto, los ajustes diseñados y planeados, así como los sugeridos por el fabricante se implementaron encaminados a lograr una reducción directa de la formación de estos óxidos, ya que el efecto de los ajustes en los quemadores se refleja directamente en la llama al variar las condiciones de la combustión del carbón dentro de la caldera.

---

<sup>4</sup> BABCOCK & WILCOX COMPANY, Presentación: Ultra Low NO<sub>x</sub> Combustion Solutions For Wall-Fired Boilers, (Termopaipa IV abril, 2016).

Figura 3. Zonas de la llama producida por el quemador de carbón DRB-XCL®



Fuente: Babcock & Wilcox Company.

### 3. DISEÑO EXPERIMENTAL DE AJUSTES

Teniendo como referencia la información proporcionada por el fabricante de la caldera y los quemadores (Babcock & Wilcox Company), sobre la forma aproximada y las diferentes zonas que componen la llama producida por cada uno de los 16 quemadores del modelo **DRB-XCL®** con los que cuenta actualmente la caldera de la compañía, se inicia la planeación de ajustes a probar, teniendo como objetivo inicial la reducción de las zonas de alta temperatura y formación de  $\text{NO}_x$  que se ilustran en la figura 3, sin afectar la eficiencia de la unidad, ni modificar las condiciones óptimas de combustión, que garantizan la producción de vapor requerida por la turbina según la carga con la que opere la unidad.

La combustión en la caldera se controla con base en los niveles de Oxígeno ( $\text{O}_2$ ) en la corriente de gases a la salida de la caldera (Exceso de aire), medidos por analizadores en línea que son los que generan la demanda del aire necesario para la combustión según la cantidad de carbón que se esté suministrando a la caldera en ese instante, este es un dato calculado y variado constantemente debido al cambio en la calidad del carbón, por lo que los valores mostrados por los analizadores en línea solo indican de una manera aproximada que tan “buena” o “mala” es la combustión en ese momento.

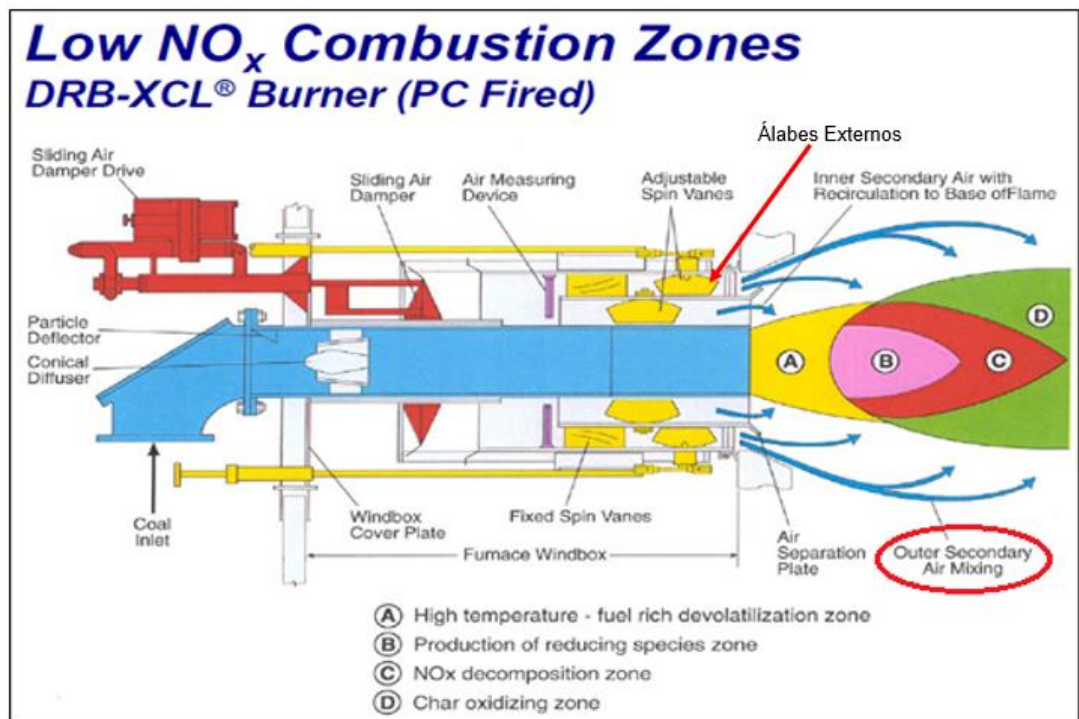
Los análisis de gases de combustión se realizan esporádicamente y de manera programada (no en línea), por esto se puede decir que no se cuenta con una medida de la eficiencia de la combustión propiamente dicha todo el tiempo. Así que, una forma de estimar la eficiencia de la combustión, es mediante el análisis de laboratorio que se les realiza a las muestras de ceniza tomadas todos los días, donde se determina la cantidad (en porcentaje) de inquemados presentes en estos productos, así se tiene un control y una referencia de la calidad de la combustión, ya que el inquemado no es más que el combustible sin quemar presente en los residuos de la combustión, estos porcentajes de inquemado se relacionan directamente con el concepto anteriormente explicado de combustión completa o incompleta, por esto se toman como referencia para determinar la eficiencia de la combustión y son representativos ya que como se mencionó las muestras se toman durante las 24 horas del día, todos los días.

Al realizar un detallado estudio del comportamiento aproximado de la llama según gráficos y planos proporcionados por el fabricante de los quemadores, así como observaciones realizadas a las llamas dentro de la caldera con la unidad en operación normal, se determina que el primer ajuste está relacionado con la variación en la posición de los álabes externos de los quemadores, que

direccionan el aire secundario de la llama, es decir el aire que se suministra por la parte externa de la llama como se puede observar en la figura 4.

Este ajuste se plantea basado en el concepto de que, al disminuir el ángulo de los álabes externos, se disminuye también la rotación del aire que fluye a través de ellos y así probablemente saldrá de una forma tangencial hacia la parte externa de la llama, lo que limitaría la amplitud de ésta y por ende de las zonas que se busca reducir (A, B, y C).

**Figura 4.** Flujo de aire secundario hacia la llama (Ajuste álabes externos)



Fuente: Babcock & Wilcox Company.

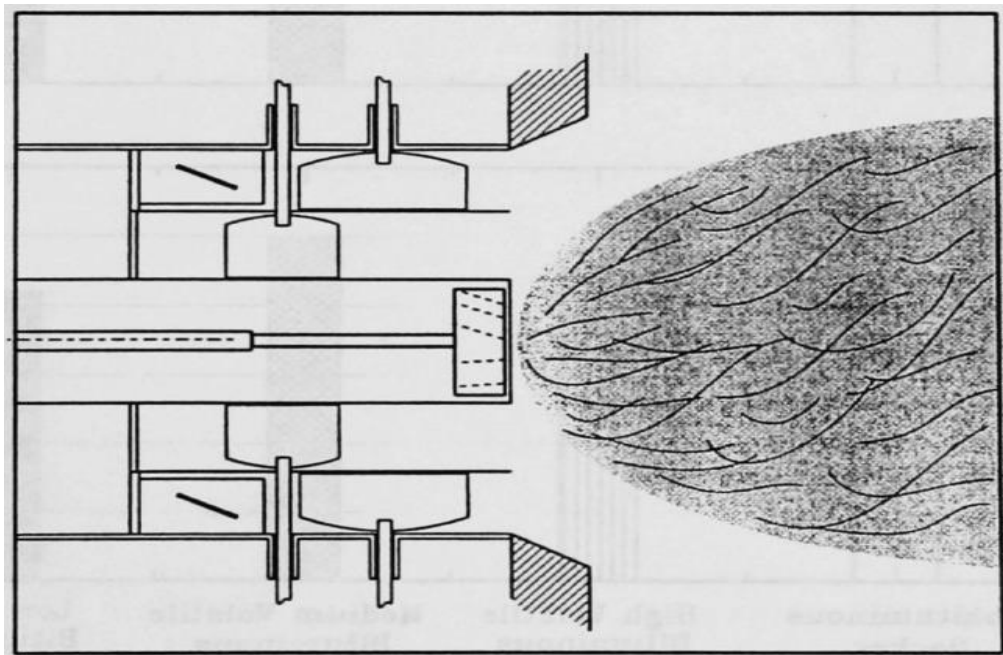
Como se puede ver en la figura 4 el aire secundario que fluye a través de los álabes externos del quemador (encerrado en rojo) puede, en teoría, determinar la amplitud de la llama, haciendo que ésta sea más ancha al salir con una gran rotación, que le da un efecto similar al de un tornado, o más larga y angosta, si sale con menos rotación, este flujo de aire influye directamente según la gráfica, en las zonas C y D de la llama, lo que obligaría a que las dos zonas internas, A y B, también se vean modificadas en la misma medida.



Seguido a este ajuste de álabes externos y analizando el efecto sobre la llama de cada uno de los mecanismos que posee el quemador, se determinó que el difusor de paletas (Impeller) que se encuentra posicionado dentro de la garganta del quemador, justo en el borde de la boca, como se ve en las figuras 5 y 7, genera el mayor efecto de rotación y turbulencia en la llama como se observa en la figura 5. Esto con el fin de generar una excelente mezcla de aire combustible, para así tener niveles de inquemados supremamente bajos, como los que se obtienen en este momento. Vale la pena resaltar que esta era la prioridad de la compañía cuando adquirió estos equipos, debido a la normativa vigente de la época (año 1997).

La buena mezcla que se presenta entre combustible y aire, apenas éstos salen del quemador para iniciar su ignición, se produce debido a que el ángulo que posee el difusor o impeller le da un sentido de rotación a la mezcla contrario al que le dan los álabes externos e internos al aire secundario que ingresa por su alrededor. En la figura 5 se muestra el impeller que va a lo largo de la garganta y que tiene en la punta unas aletas que generan la rotación y turbulencia, así como los álabes internos y externos que direccionan el aire que sale por el rededor de la garganta.

**Figura 5.** Efecto de turbulencia en la llama producido por el difusor (Impeller)



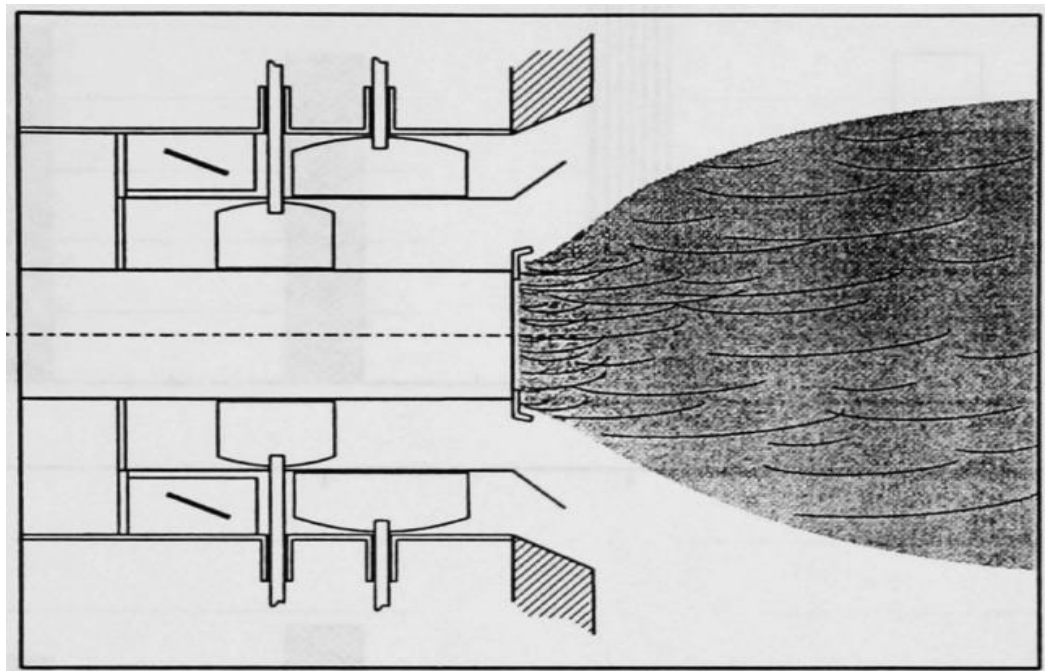
Fuente: Babcock & Wilcox Company.

De acuerdo a este concepto se propone el siguiente ajuste, que consiste en cambiar la posición de los difusores dentro de la garganta del quemador, retrayéndolos hacia adentro de la misma, de manera gradual en varias etapas, para monitorear el comportamiento de la unidad y poder detectar cualquier efecto negativo que se pueda producir por la implementación de este cambio.

Este ajuste se implementa con el fin de obtener una disminución en la turbulencia de la mezcla y así tener un flujo más laminar que dé como resultado una llama mucho más angosta y larga, lo que debería disminuir las zonas de formación de NOx mostradas en la figura 3. Se debe monitorear de manera especial los niveles de inquemado presentes en la ceniza, ya que, este impeller está diseñado para mantener dichos niveles lo más bajos posible.

El efecto que se espera obtener sobre la llama al retraer los difusores se muestra en la figura 6, la cual muestra una forma muy aproximada de cómo sería la llama si no se tuviese el impeller dentro de la garganta del quemador, podemos observar que el flujo de la mezcla aire-carbón tiende a ser casi laminar, disminuyendo notoriamente de manera considerable la turbulencia en la llama.

**Figura 6.** Forma aproximada de la llama sin el efecto del difusor (Impeller)



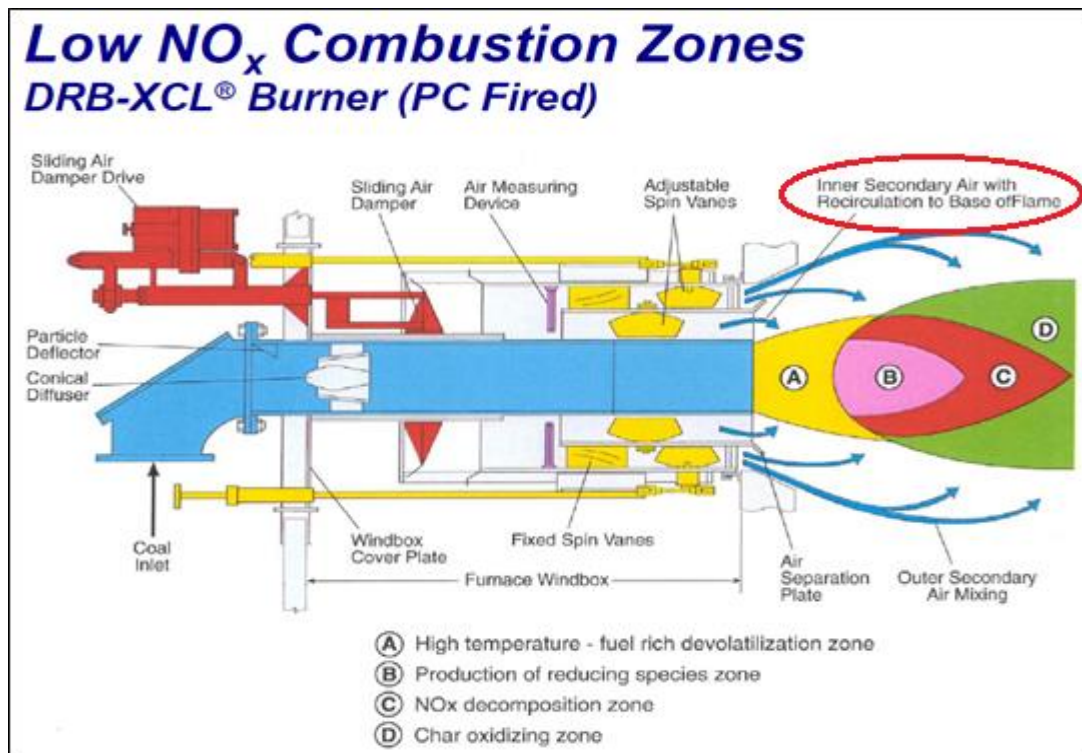
Fuente: Babcock & Wilcox Company.

Manteniendo la tendencia de buscar una reducción en las zonas de formación de  $\text{NO}_x$  las cuales están relacionadas directamente con la amplitud de la llama, se plantea un ajuste más, esta vez en la posición de los álabes internos, que direccionan el aire secundario que sale alrededor de la boca del quemador por el primer canal, esto se propone en base al mismo principio de los anteriores ajustes, hacer que el flujo de aire que sale por allí tenga menos rotación y modifique la forma de la llama, haciéndola más angosta.

Este flujo de aire puede tener un mayor efecto sobre la llama, debido a la cercanía que hay entre la salida de aire y la de la mezcla de aire-carbón, aunque según los catálogos de los quemadores estos álabes internos ajustables, están encaminados a ajustar la separación entre la llama y la boca del quemador (pared de la caldera).

En la figura 7 se muestran los álabes internos que controlan el flujo de aire secundario (encerrado en rojo) y se puede hacer una interpretación de la influencia que este puede tener sobre la estructura de la llama.

**Figura 7.** Flujo de aire secundario hacia la llama (Ajuste álabes internos)



Fuente: Babcock & Wilcox Company.

A lo largo del proceso de diseño experimental de los ajustes llevado a cabo en el desarrollo de este proyecto, se tuvo siempre como referencia los desarrollos realizados por los fabricantes de quemadores, que han implementado nuevas tecnologías durante los últimos años en las varias generaciones de quemadores que han lanzado posteriores a los que hoy posee la compañía.

Uno de los últimos avances que se presentó por parte del fabricante Babcock & Wilcox, diseñado para lograr una mayor reducción en la formación de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) en sus calderas consiste en un sistema denominado OFA (Over Fire Air) o “aire de sobre-fuego” (Ver figura 19), que consiste en puertos de solo aire en la parte superior del hogar, es decir, encima de los quemadores, que regula la temperatura en esta zona y evita formación del  $\text{NO}_x$  térmico.<sup>5</sup>

Basado en este innovador sistema se propone variar realizar un ajuste en la cantidad de carbón quemado por cada grupo de quemadores (por cada molino), es decir, cambiar la proporción de combustible quemado por cada nivel de quemadores en la caldera, reduciendo la cantidad de carbón suministrado a los dos grupos superiores y aumentándole esa misma cantidad a los dos grupos inferiores, para así seguir cumpliendo con la demanda necesaria de carbón que suministre la energía térmica que requiera la unidad.

El objetivo es lograr un efecto muy similar al del sistema OFA, reduciendo la temperatura de la parte superior del hogar, al quemar menos carbón en los dos grupos de quemadores ubicados en la parte de arriba, y así limitar la producción de  $\text{NO}_x$  térmico, luego de implementar el ajuste, se espera observar una disminución en los niveles de óxidos de nitrógeno presentes en la corriente de gases de salida de la caldera.

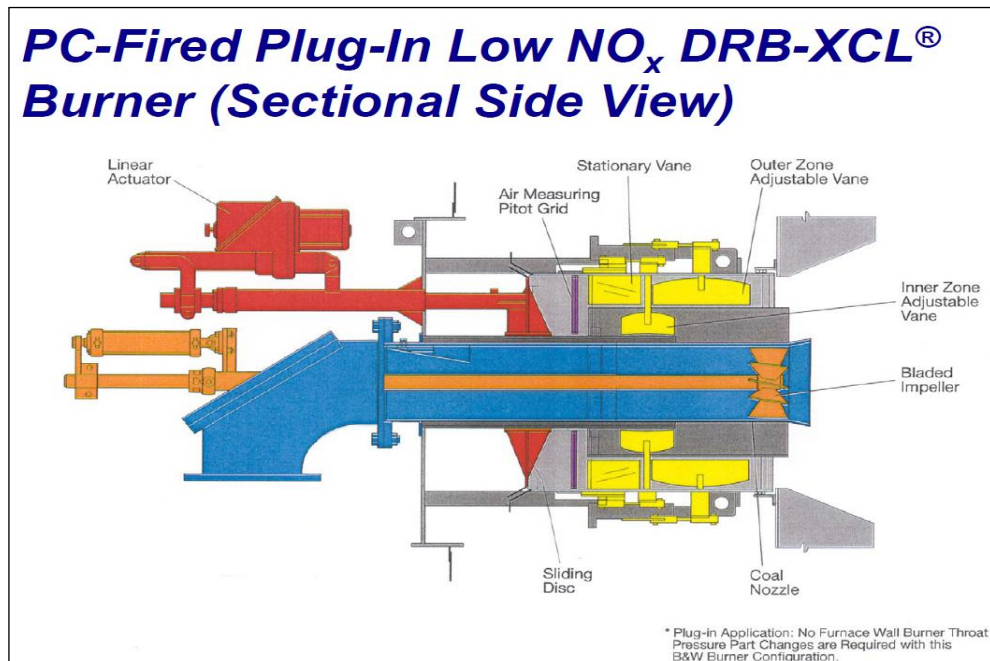
---

<sup>5</sup>BABCOCK & WILCOX COMPANY: op. cit. (Termopaipa IV abril, 2016)

## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Una vez definidos los pasos a seguir para realizar los ajustes planteados y su comprobación, se inicia con la lectura y revisión de varios artículos y estudios sobre la reducción de  $NO_x$  generados por la combustión de carbón pulverizado en calderas utilizadas para la generación de energía eléctrica, los cuales en su mayoría corresponden a desarrollos hechos por el fabricante de la caldera *Babcock & Wilcox Española*, para conocer en qué posición se encuentra la planta TERMPOPAIPA IV frente a otras empresas de su mismo tipo y a las nuevas tecnologías implementadas en los últimos años, encaminadas a la reducción en las emisiones de  $NO_x$  y así también poder fijar un valor objetivo de reducción lo más alto posible, teniendo en cuenta los niveles más óptimos de emisión que se pueden alcanzar con la tecnología de quemadores que posee actualmente la planta y que corresponden al modelo DRB-XCL®. El cual se muestra en detalle en la Figura 8, donde también se pueden identificar sus partes principales, así como los mecanismos de control y ajuste que son manipulados en el desarrollo del proyecto.

**Figura 8.** Vista en sección del quemador DRB-XCL® instalado actualmente en la caldera de la Compañía Eléctrica De Sochagota S.A. E.S.P. (Termopaipa IV)



Fuente: Babcock & Wilcox Company.

#### 4.1 EQUIPO UTILIZADO

Para la realización de todos los análisis de gases que se hacen necesarios durante la ejecución del proyecto, tanto en el ducto de salida del economizador como en la chimenea, se utiliza el analizador de gases portátil Rosemount Series 500 propiedad de la Compañía Eléctrica De Sochagota S.A. E.S.P que se muestra en la Figura 9. El cual fue calibrado y puesto a punto en el laboratorio de instrumentación y control I&C de la compañía antes de iniciar con los análisis. Los protocolos de calibración del equipo se pueden ver en el ANEXO B.

**Figura 9.** Analizador de gases portátil Rosemount series 500 utilizado para el desarrollo del proyecto.



Fuente: Autor del documento.

## **4.2 DIAGNOSTICO INICIAL**

Para tener un valor inicial de referencia y como punto de partida una vez realizada la calibración y puesta a punto del equipo analizador de gases portátil, se realizaron dos análisis de gases en el ducto de la salida del economizador los días 20 y 26 de abril de 2016 respectivamente y uno en la chimenea el día 27 de abril de 2016. Los datos obtenidos en estos análisis fueron promediados y en la Tabla 3 se muestran los valores de los principales parámetros medidos en estos tres análisis.

Todos los datos puntuales de los análisis se encuentran consignados en los protocolos establecidos por CES para análisis de gases en el ducto de salida del economizador y en chimenea, así mismo las gráficas de distribución de los gases el ducto de salida del ECO (mapeos) se pueden ver en el Anexo A “Compilado de mapeos ducto salida ECO”.

**Tabla 3.** Resultados análisis de gases iniciales.

Fecha del análisis	Punto de medición	Parámetro	Unidad	Valor promedio
<b>20-abr-16</b>	Ducto de salida del ECO	Oxígeno (O <sub>2</sub> )	%	2,305
		Exceso de aire	%	11,6
		Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	ppm	518,7
		Óxidos de Nitrógeno Expresados Como NO <sub>2</sub>	**mg/m <sup>3</sup>	<b>782,4</b>
		Monóxido de carbono (CO)	ppm	86,3
<b>26-abr-16</b>	Ducto de salida del ECO	Oxígeno (O <sub>2</sub> )	%	2,175
		Exceso de aire	%	10,8
		Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	ppm	492
		Óxidos de Nitrógeno Expresados Como NO <sub>2</sub>	**mg/m <sup>3</sup>	<b>737</b>
		Monóxido de carbono (CO)	ppm	186,3
<b>27-abr-16</b>	Chimenea	Oxígeno (O <sub>2</sub> )	%	3,72
		Exceso de aire	%	20,5
		Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	ppm	474,8
		Óxidos de Nitrógeno Expresados Como NO <sub>2</sub>	**mg/m <sup>3</sup>	<b>774,8</b>
		Monóxido de carbono (CO)	ppm	124,7

\*\*Concentración a condiciones de referencia (25 °C y 760 mm de Hg) y corregida por oxígeno de referencia del 6%. Establecidas por la Resolución 909 de 2008 del MAVDT.

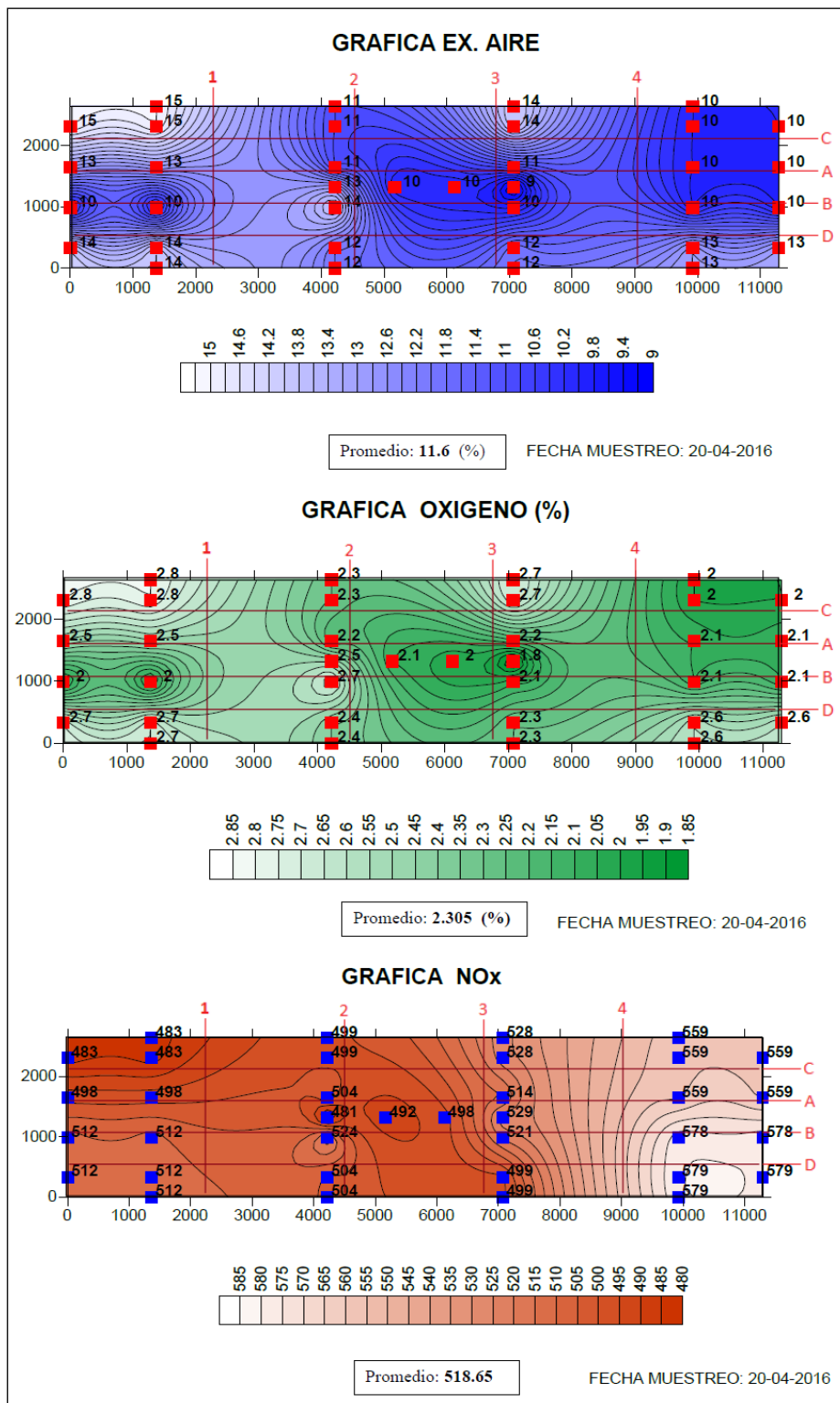
En las gráficas de mapeos mostradas a lo largo del documento, se ven los valores medidos en cada punto establecido en el protocolo para análisis de gases en el ducto de salida del economizador, del cual se representa la sección transversal por medio del rectángulo que delimita el mapeo, cada punto de muestreo se ve representado por un cuadro o estrella rojos, con el valor leído del equipo junto a él, con estas gráficas se puede obtener una representación muy aproximada de la concentración y la distribución de los gases que fluyen a través del ducto.



Se puede observar que las zonas con color más tenue o claro (tendiente a blanco), son las de mayor concentración, es decir donde se registran los valores más altos y las zonas con color más saturado (oscuras) registran los valores más bajos, así haciendo una revisión visual de cada mapeo, se tiene una idea de cómo es la distribución que presentan los gases en el ducto de salida cuando se realizó el respectivo análisis. Las gráficas de distribución (mapeos) se realizan por separado para cada uno de los componentes analizados, además de los valores puntuales en cada mapeo elaborado se incluye el valor promedio y la fecha en la que se efectuó el correspondiente análisis de gases.

En la Figura 10 se muestra el mapeo de los principales gases a analizar y sus valores promedio obtenidos en el primer análisis realizado, el cual aporta los valores promedio para determinar un punto base o de referencia sobre el cual se fija el objetivo a lograr, en la imagen se presentan los mapeos de los principales gases analizados, Oxígeno ( $O_2$ ) y Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ), así como el exceso de aire calculado por el equipo mismo a partir del oxígeno medido.

Figura 10. Mapeos iniciales realizados en el ducto de salida del ECO.



Fuente: Autor del documento.

Comparando los datos de óxidos de Nitrógeno expresados como NO<sub>2</sub> obtenidos en los análisis de gases iniciales y que se muestran en la Tabla 3 con los máximos establecidos en la Resolución 909 de 2008 del MAVDT los cuales se muestran en la Tabla 4, se observa que estos superan los valores límite que establece dicha resolución, especialmente los medidos en la chimenea.

**Tabla 4.** Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para centrales térmicas con capacidad instalada igual o superior a 20 MW

COMPAÑÍA ELÉCTRICA DE SOCHAGOTA S.A. E.S.P.						
FUENTE EVALUADA	ACTIVIDAD INDUSTRIAL	NORMA	COMBUSTIBLE	CONTAMINANTES	ESTÁNDAR DE EMISIÓN ADMISIBLE (mg/m <sup>3</sup> )	OXÍGENO DE REFERENCIA (%)
UNIDAD IV (CALDERA DE GENERACIÓN TÉRMICA)	Central térmica con capacidad instalada igual o superior a 20 MW	Capítulo IV, Artículo 9, Tabla 6 de la Resolución 909 de 2008 expedida por el MAVDT	CARBÓN MINERAL	Material Particulado (MP)	100	6
				Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	2800	
				Óxidos de Nitrógeno exoresados como NO <sub>2</sub>	760	

Fuente: Resolución 909 de 2008 del MAVDT

#### 4.3 IMPLEMENTACION DE AJUSTES Y RESULTADOS

La aplicación de ajustes en los mecanismos de los quemadores de carbón los cuales controlan parámetros fundamentales de la combustión, se implementan con base en la necesidad de reducir los niveles de emisión de NO<sub>x</sub> que como se observa en el diagnóstico inicial están sobre el margen de los valores máximos que establece la norma colombiana y obedeciendo a la teoría anteriormente presentada sobre los mecanismos de formación de los NO<sub>x</sub> durante el proceso de la quema de carbón pulverizado.

El principio fundamental con el que se realizan los ajustes es como se ya se mencionó, buscar una reducción en la formación de NO<sub>x</sub> térmico. Estos ajustes en los mecanismos de los quemadores se ejecutan de manera gradual y controladamente para garantizar el óptimo funcionamiento de la unidad y evitar cualquier contingencia o falla de cualquier sistema o equipo relacionado.

A continuación, se describen los ajustes realizados a los mecanismos de los 16 quemadores de carbón **DRB-XCL®** que se encuentran instalados en la caldera de la compañía.

### 4.3.1 Ajuste de álabes externos

El primer ajuste que se efectúa en los quemadores es modificar la posición de los álabes externos de los quemadores, que se pueden ver claramente en la Figura 11. Los cuales controlan la amplitud de la llama direccionando el flujo de aire secundario que sale por la zona exterior de la campana del quemador.

La primera variación en éstos, consiste en aumentar  $5^\circ$  a la posición que tienen al momento del inicio de las pruebas. Posteriormente se realiza análisis de gases en el ducto de la salida del economizador para comprobar el efecto de este movimiento en la producción de  $\text{NO}_x$ . El resultado del análisis de gases muestra que el promedio de  $\text{NO}_x$  aumentó ligeramente con respecto al valor de referencia.

En busca de obtener un resultado positivo se realiza el segundo ajuste en dichos álabes modificando su posición en sentido contrario  $15^\circ$ , pasando de  $55^\circ$  a  $70^\circ$ . La implementación de este segundo ajuste tampoco muestra un efecto positivo en las emisiones, al contrario, con este movimiento el valor de las emisiones aumentó considerablemente por encima del valor de referencia.

**Figura 11.** Vistas de álabes internos y externos del quemador.



Fuente: Autor del documento.

Por último, se prueba moviéndolos nuevamente en el sentido inicial hasta dejarlos con un ángulo de  $50^\circ$ , este ajuste arrojó los valores más altos de toda la serie de ajustes de álabes externos, como se puede corroborar en la Tabla 5, que muestra los valores obtenidos en los

análisis de gases hechos después de implementar cada ajuste a la posición de los álabes externos y más adelante en las gráficas de variaciones mostradas en las Figuras 22 y 23, que muestran la tendencia de los promedios en función de cada ajuste implementado, además de no ser eficaz en la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno, este ajuste genera algunos inconvenientes con las señales de detección de llama de algunos ignitores y quemadores por la posición de las fotoceldas como se ve en la Figura 11.

Por lo anterior se decide retornarlos a su posición inicial de 60° que es la más óptima al no generar ningún inconveniente con los equipos de detección de llama y mantener los valores de emisión de óxidos de nitrógeno sin grandes variaciones en un rango pequeño.

**Tabla 5.** Valores obtenidos con los ajustes en los álabes externos.

Fecha del análisis	Posición álabes externos	Punto de medición	Parámetro	Unidad	Valor promedio
04-may-16	55°	Ducto de salida del ECO	Oxígeno (O <sub>2</sub> )	%	2,22
			Exceso de aire	%	11,515
			Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	ppm	484,5
			Óxidos de Nitrógeno Expresados Como NO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	<b>727,52</b>
10-may-16	70°	Ducto de salida del ECO	Oxígeno (O <sub>2</sub> )	%	2,53
			Exceso de aire	%	12,95
			Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	ppm	493,5
			Óxidos de Nitrógeno Expresados Como NO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	<b>753,48</b>
19-may-16	50°	Ducto de salida del ECO	Oxígeno (O <sub>2</sub> )	%	2,86
			Exceso de aire	%	15
			Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	ppm	526,8
			Óxidos de Nitrógeno Expresados Como NO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	<b>819,27</b>

### 4.3.2 Ajuste de difusores

El siguiente ajuste a implementar, consiste en retraer los difusores hacia el interior de la garganta del quemador, para atenuar la turbulencia en la llama generada por el efecto de rotación que le da el impeller a la mezcla de aire-carbón por medio de las aletas que se esté posee en su extremo ubicadas normalmente al filo de la garganta del quemador, inicialmente los difusores se mueven una distancia de 7" para no provocar un cambio brusco en la combustión.

Este ajuste se realiza primero en los quemadores de los grupos 20, 30 y 40 solamente. Seguidamente se realiza el correspondiente análisis de gases en la salida del economizador y se evidencia en los resultados una notable disminución en el valor promedio de emisiones de óxidos de nitrógeno expresados como  $\text{NO}_2$ . En consecuencia, se procede a retraer también los difusores en los quemadores del grupo 10 con lo que se espera lograr una mayor reducción. En la Figura 13 se muestra el mapeo elaborado luego de realizar el análisis de gases, donde se observa la gran disminución en los valores de óxidos de nitrógeno producto de este ajuste, en comparación con los que se obtuvieron en el mapeo inicial (Figura 10).

El posterior análisis de gases muestra un resultado favorable, ya que el valor promedio de las emisiones disminuye aún más, logrando un amplio margen por debajo del valor límite que establece la norma como se muestra en la Tabla 6.

Una vez comprobado el efecto positivo de este ajuste sobre las emisiones mediante el análisis de los datos y graficas elaboradas, se verifica el buen comportamiento de todos los parámetros de la combustión para proceder a retraer los difusores 8" más, hasta dejarlos en una posición final de 15" retraídos dentro de la garganta de cada quemador.

Para esto es necesario hacer una modificación en la estructura de los difusores del grupo de quemadores 10, ya que este grupo posee quemadores de ACPM los cuales se alojan dentro del vástago de cada difusor para permanecer protegidos mientras no están en operación. Al retraer los difusores más de 7" la punta del quemador de ACPM queda expuesta y sin protección alguna, por lo que se le realiza una adaptación a cada difusor de este grupo de quemadores, desplazando el cabezal de las aletas difusoras sobre el propio vástago, para que éste siga

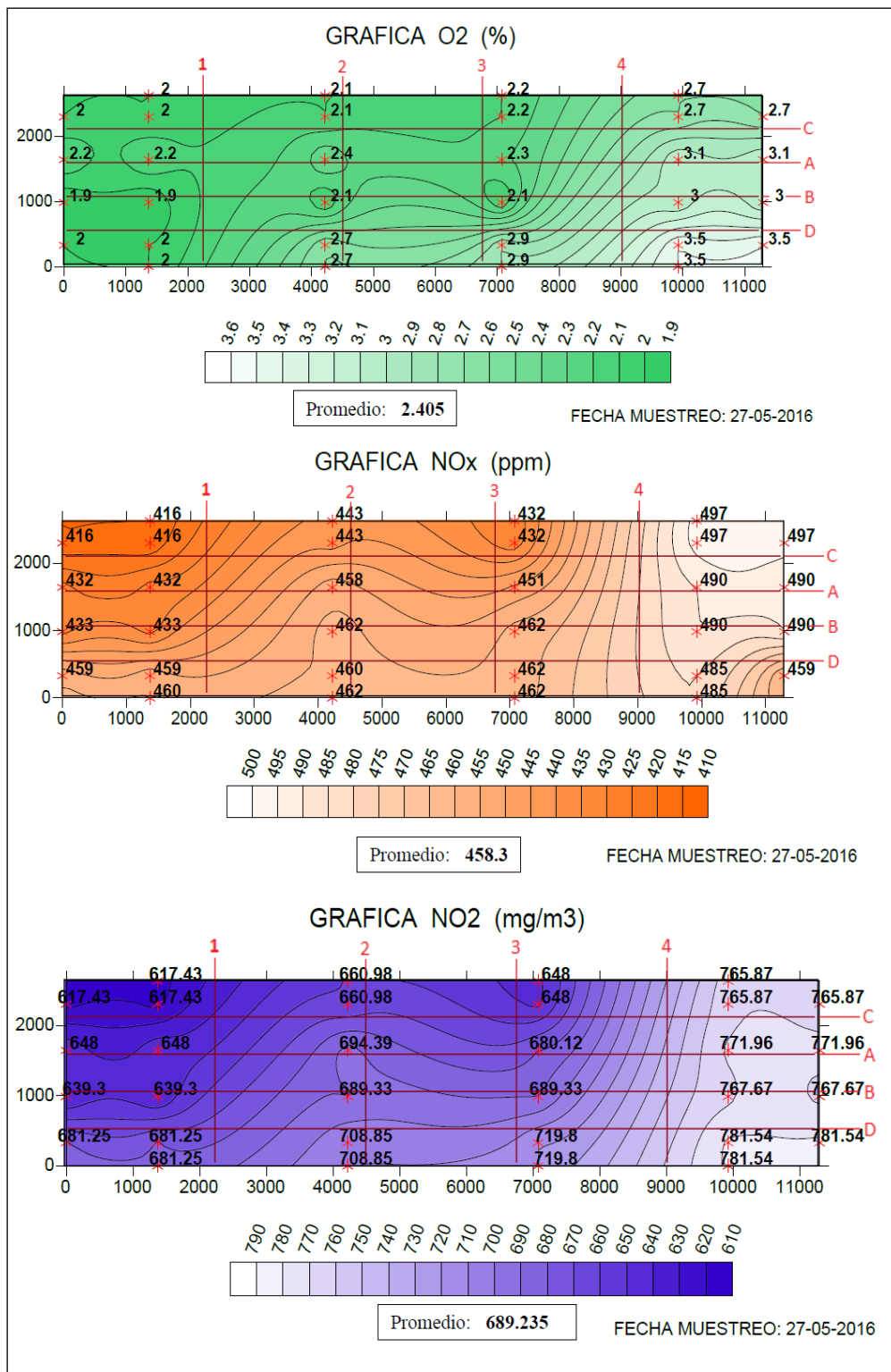
protegiendo las lanzas de los quemadores de ACPM. La modificación hecha a los difusores (impeller) se muestra en la Figura 12.

**Figura 12.** Modificación hecha a los difusores del grupo 10



Fuente: Autor del documento.

Figura 13. Mapeos obtenidos luego de retraer los difusores a 7”



Fuente. Autor del documento



Nuevamente se realizan análisis de gases en la salida del economizador (ECO) y en los resultados se evidencia la estabilidad que este ajuste brinda al comportamiento de las emisiones de NO<sub>2</sub>. obteniendo los valores más bajos de todas las pruebas efectuadas, como se puede ver en el resumen de análisis de gases mostrado en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Valores obtenidos con los ajustes en la posición de los difusores.

Fecha del análisis	Posición de los difusores	Punto de medición	Parámetro	Unidad	Valor promedio
23-may-16	<b>7" Grupos (20/30/40)</b>	Ducto de salida del ECO	Oxígeno (O <sub>2</sub> )	%	2,415
			Exceso de aire	%	12,2
			Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	ppm	455,4
			Óxidos de Nitrógeno Expresados Como NO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	<b>721,203</b>
27-may-16	<b>7" Grupos (10/20/30/40)</b>	Ducto de salida del ECO	Oxígeno (O <sub>2</sub> )	%	2,405
			Exceso de aire	%	12,1
			Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	ppm	453,9
			Óxidos de Nitrógeno Expresados Como NO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	<b>689,235</b>
16-jun-16	<b>15" Grupos (10/20/30/40)</b>	Ducto de salida del ECO	Oxígeno (O <sub>2</sub> )	%	2,485
			Exceso de aire	%	
			Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	ppm	456,5
			Óxidos de Nitrógeno Expresados Como NO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	<b>695,728</b>

#### 4.3.3 Ajuste de álabes internos

Para compensar el efecto de reducción en la amplitud de la llama y garantizar la estabilidad y control de temperatura dentro de la caldera,

se hace un ajuste a los álabes internos de todos los quemadores, cuya función es ajustar la longitud de la llama mediante la orientación del flujo de aire que sale justo por el rededor de la garganta del quemador y regular a su vez la amplitud de la misma. (Ver Figuras 8 y 11).

El ajuste consiste en abrir los álabes 5° con respecto a la posición que cada uno tiene, las cuales son específicas para cada quemador. Las posiciones iniciales y finales de los álabes internos de cada uno de los quemadores se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Ajuste álabes internos de los quemadores.

FECHA	QUEMADOR	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
20/05/2016	Ángulo álabes int.	50°	45°	45°	45°	55°	50°	45°	45°
	QUEMADOR	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4
	Ángulo álabes int.	40°	35°	45°	45°	45°	50°	40°	45°
FECHA	QUEMADOR	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
16/06/2016	Ángulo álabes int.	55°	50°	50°	50°	60°	55°	50°	50°
	QUEMADOR	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4
	Ángulo álabes int.	45°	40°	50°	50°	50°	55°	45°	50°

Al efectuar este ajuste se produce una reducción adicional en la emisión de óxidos de nitrógeno, esto debido a que el aire direccionado de una forma más longitudinal contribuye a dar una forma un poco más angosta y alargada de la llama, que es lo esperado según lo que se plantea en

el diseño experimental de ajustes, este cambio en la forma de la llama, que hace que se reduzca la formación de NO<sub>x</sub> en la zona de alta temperatura de la misma. Los valores obtenidos en el análisis de gases hecho después de ajustar estos álabes internos se muestran la Tabla 8 y en la gráfica de tendencia de la Figura 22.

Cabe destacar que, con el ajuste de álabes internos, en la medición del día 28 de junio se obtiene el valor promedio más bajo aplicando ajustes únicamente en los mecanismos de los quemadores, es decir, sin modificar ningún parámetro como cantidades de aire o combustible suministradas a la caldera.

**Tabla 8.** Valores obtenidos con los ajustes en los álabes internos.

Fecha del análisis	Posición de los difusores	Punto de medición	Parámetro	Unidad	Valor promedio
17-jun-16	<b>15" Grupos (20/30/40)</b>	Ducto de salida del ECO	Oxígeno (O <sub>2</sub> )	%	2,32
			Exceso de aire	%	11,7
			Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	ppm	451,8
			Óxidos de Nitrógeno Expresados Como NO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	<b>682,641</b>
20-jun-16	<b>15" Grupos (20/30/40)</b>	Ducto de salida del ECO	Oxígeno (O <sub>2</sub> )	%	2,243
			Exceso de aire	%	11,16
			Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	ppm	452,4
			Óxidos de Nitrógeno Expresados Como NO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	<b>680,5</b>

#### 4.3.4 Ajuste de Sliding Dampers

Otro parámetro fundamental en la combustión, es el nivel de oxígeno o exceso de aire que resulta después de la quema del carbón pulverizado en la caldera, ya que este es un indicador de la eficiencia de la combustión como ya se mencionó, luego de lograr una amplia reducción

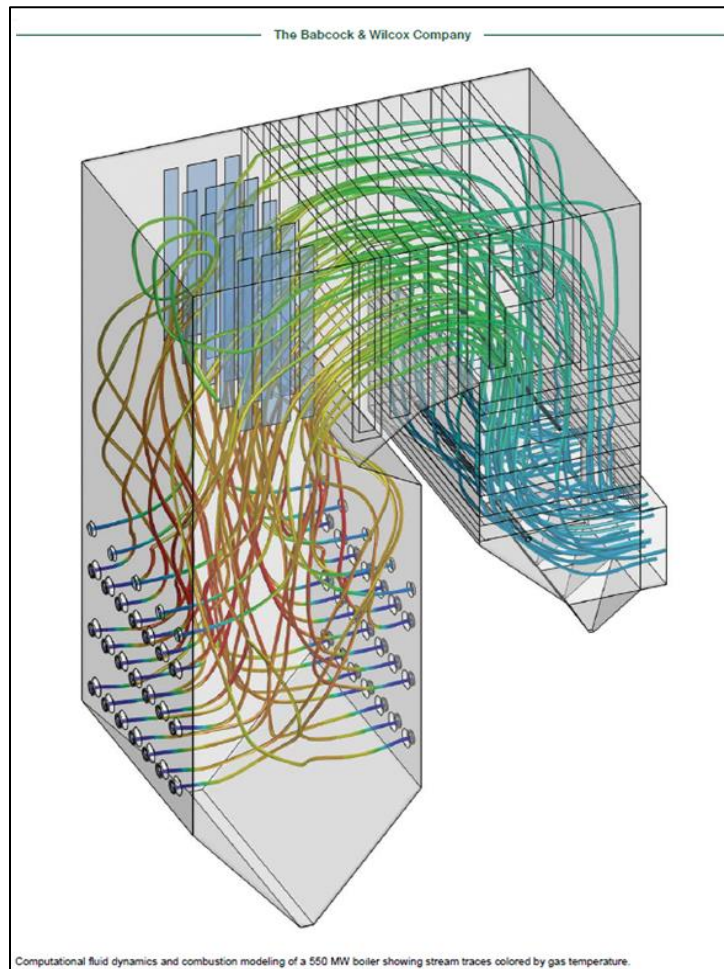
en las emisiones de  $\text{NO}_x$  y de mantener estos valores estables, se hace un análisis de gases más completo tomando todos los puntos (44) de muestreo que se encuentran dispuestos para ello en el ducto de salida del economizador, con el fin de tener una malla más representativa del flujo de gases.

Una vez efectuado el análisis se genera el correspondiente mapeo, para hacer un estudio más preciso de la concentración de gases en la corriente de salida a través del ducto.

Al analizar las gráficas y los datos en ellas, se determina que el flujo de aire tiene un desbalance, ya que muestra una marcada concentración de oxígeno en varias zonas del ducto. El mapeo realizado se muestra en la Figura 15.

Mediante la creación de una grilla para sobreponer a las gráficas de los mapeos, se logra identificar la zona de influencia de cada quemador en la corriente de gases, esto es posible al aplicar el concepto del “flujo preferencial” de la mezcla aire-gases que sale de cada quemador y pasa a través de la caldera y los ductos. Este concepto se extrae de estudios realizados por el fabricante de la caldera (Babcock & Wilcox Company) en calderas similares a la de Termopaipa IV, en los cuales, mediante gráficas obtenidas de un análisis por elementos finitos del flujo dentro de la caldera, muestra que los gases producto de la combustión de un quemador, a pesar de las turbulencias y cambios de dirección que enfrenta, mantiene claramente su posición con respecto a las corrientes de los demás quemadores adyacentes. La gráfica producto de un análisis de flujo por elementos finitos usada como referencia para aplicar esta teoría en la caldera de Termopaipa IV, se muestra en la Figura 14.

**Figura 14.** Análisis por elementos finitos de los flujos dentro de la caldera

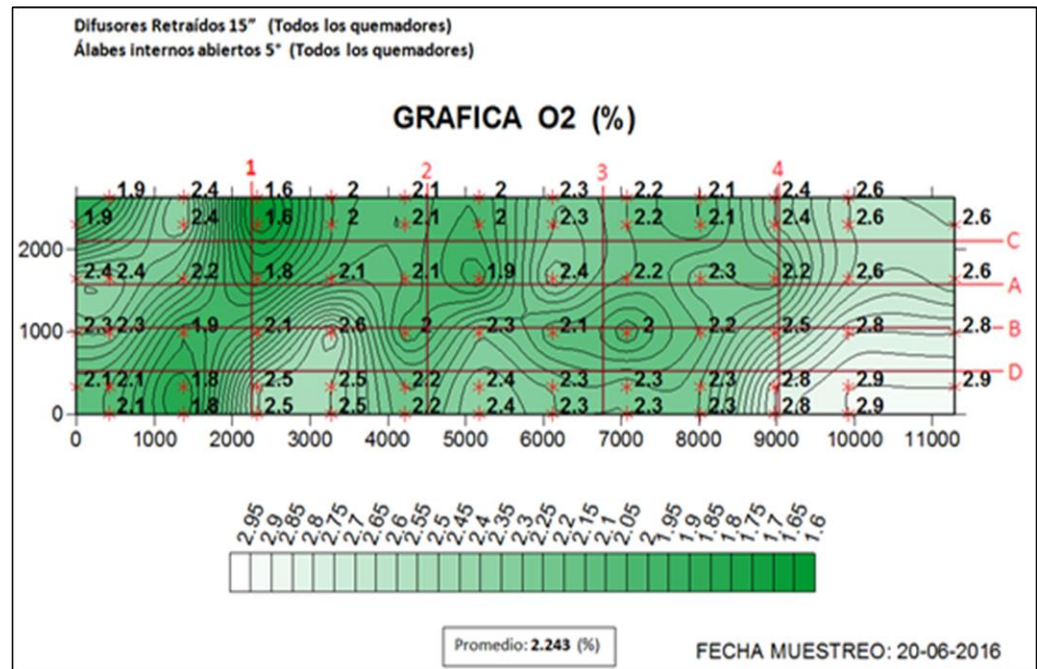


Fuente: STEAM, Babcock & Wilcox Company

Dicho esto, se crea la grilla que se sobrepone a cada mapeo, donde se identifican los 4 grupos de quemadores con letras y a su vez se enumeran los quemadores de cada grupo, esto permite hacer una fácil y rápida identificación puntual, de cuál de los 16 quemadores es el que tiene mayor influencia en la zona de interés que se analice.

Con la superposición de esta grilla a los mapeos, se puede determinar que Sliding Dampers deben ser ajustados para reducir el valor de oxígeno y por ende el de exceso de aire y así tener un flujo de gases balanceado en el ducto de salida.

**Figura 15.** Gráfica de concentración de Oxígeno en el ducto de salida del ECO (11 puntos.)



Fuente: Autor del documento.

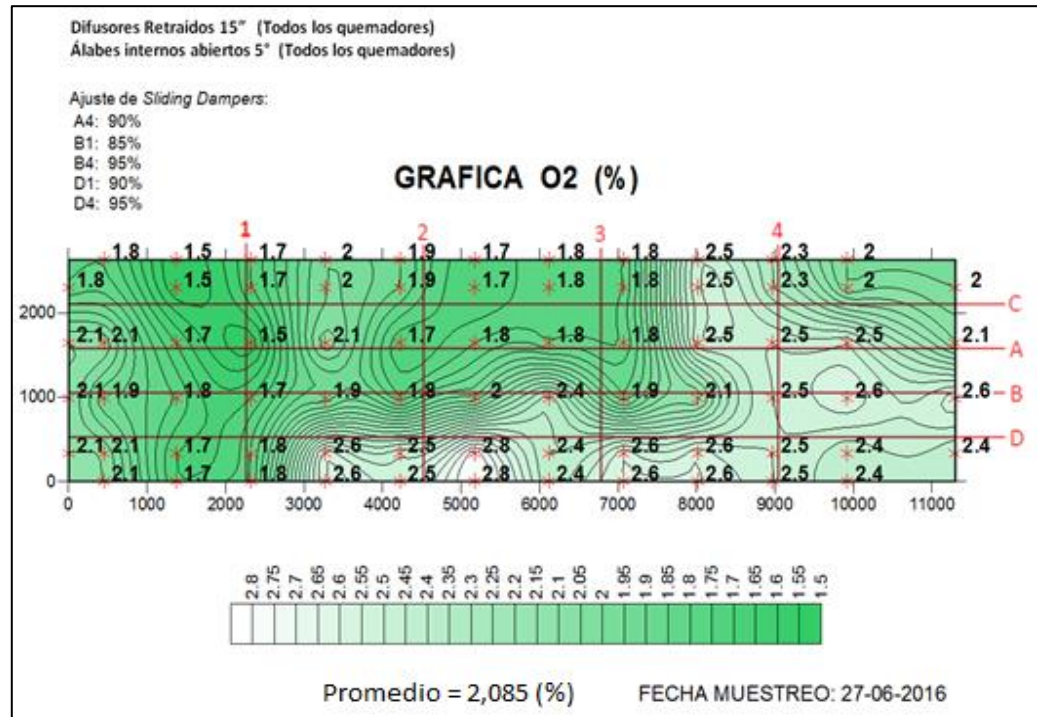
La grilla sobrepuesta al mapeo mostrado en la Figura 15 permite identificar claramente que los quemadores que requieren un ajuste en sus Sliding Dampers son B1, D1, A4, B4 Y D4. Ya que en sus zonas de influencia es donde se presentan los valores más elevados.

Una vez identificados los quemadores que generan el desbalanceo, se solicita a sala de control el ajuste en los Sliding Damper de dichos quemadores a las posiciones que se indican en la Figura 16.

Luego de verificar el ajuste de los Sliding Dampers en los quemadores solicitados, se realiza un nuevo análisis de gases tomando los 44 puntos de medición y seguidamente se genera el mapeo correspondiente, el cual se muestra en la Figura 16, donde se evidencia que aún existe un desbalance en la concentración de oxígeno, mucho menor que el que se tenía antes del ajuste de Sliding Dampers, a pesar de esto, producto de la reducción de oxígeno disponible en la mezcla, se obtiene un valor más

bajo en la emisión de NOx corregido como NO<sub>2</sub>. Como se puede constatar en la Tabla 12, así como en la Figura 23.

**Figura 16.** Gráfica de concentración de Oxígeno en el ducto de salida del ECO (11 puntos.)



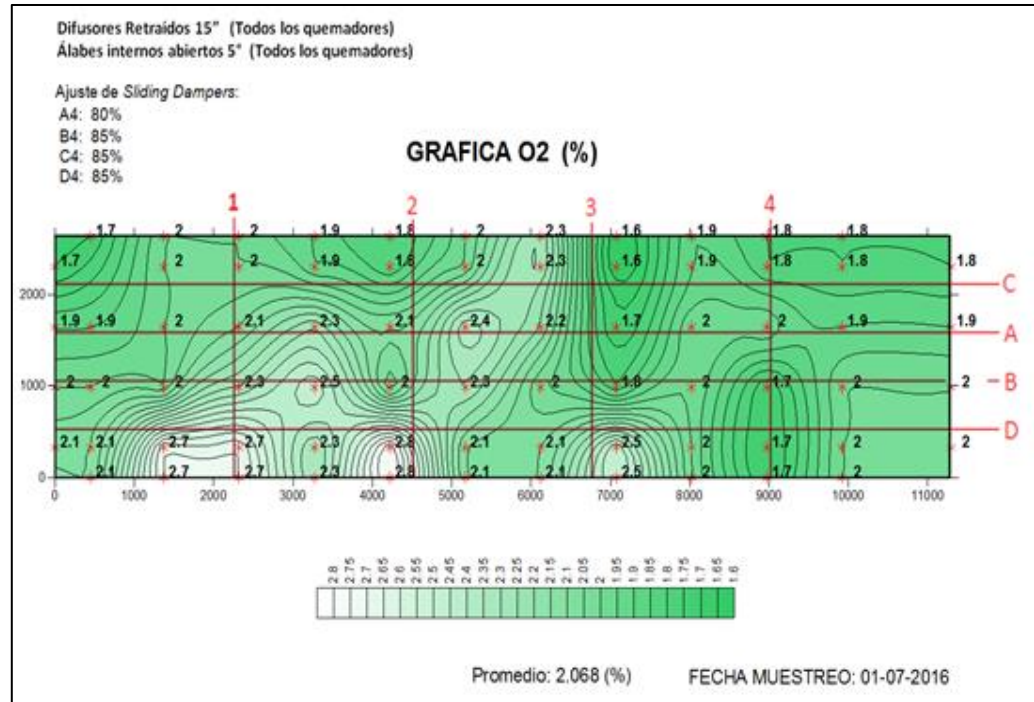
Fuente: Autor del documento

Para lograr un mejor balance de aire, se solicita un ajuste más en los Sliding Dampers de los quemadores A4, B4, C4, Y D4, que como se ve en la Figura 16 son los que aportan los valores más altos de oxígeno en la corriente de gases.

Este nuevo ajuste de Sliding Dampers, da como resultado un flujo de gases mejor balanceado y con un promedio de oxígeno y por consiguiente de exceso de aire muy bajo, que se puede ver claramente en el mapeo mostrado en la Figura 17 el cual se elabora con los datos recolectados en el análisis de gases que se realiza luego de confirmar el ajuste en la posición de los Sliding Dampers.

Los mapeos completos del resto de gases analizados se pueden ver en el Anexo A "Compilado de mapeos ducto salida ECO".

**Figura 17.** Gráfica de concentración de Oxígeno en el ducto de salida del ECO (11 puntos.)



Fuente: Autor del documento

#### 4.3.5 Ajuste en los BIAS de carbón de los molinos

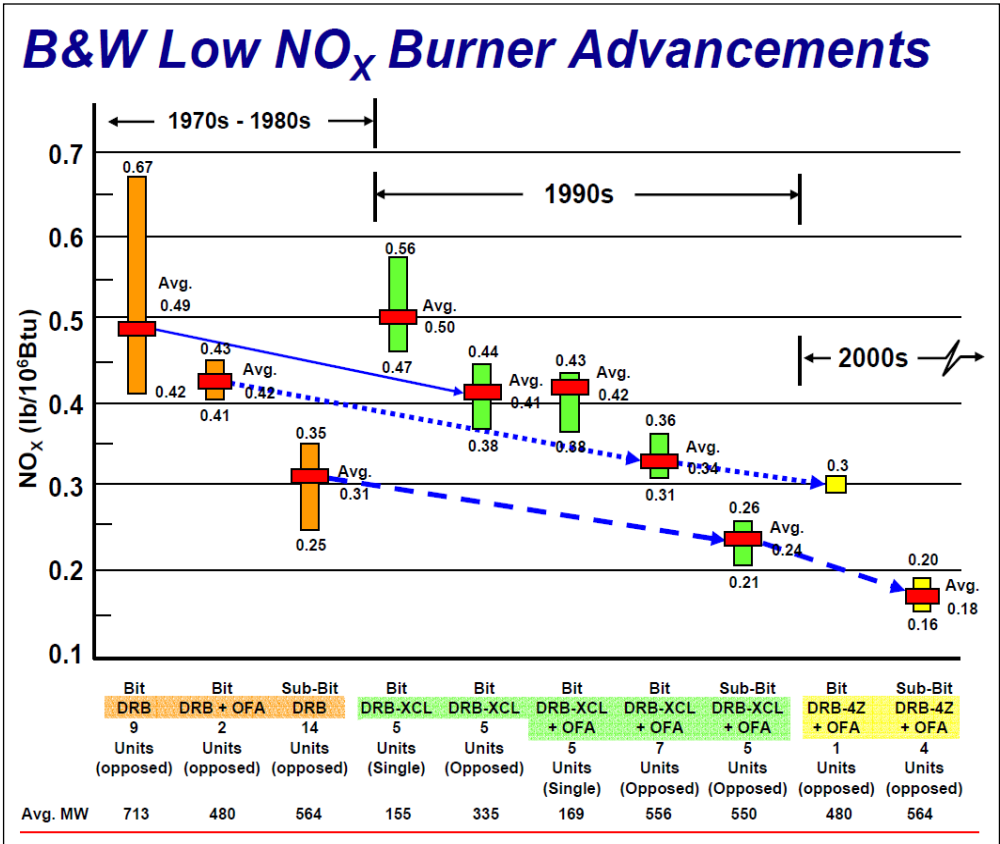
En la búsqueda de nuevas y más eficaces soluciones para llevar las emisiones de NO<sub>x</sub> producto de la combustión de carbón pulverizado en las calderas cada día más abajo, las empresas fabricantes de quemadores han invertido mucho tiempo y esfuerzo durante las últimas décadas en la investigación sobre métodos para reducir las emisiones de estos nocivos óxidos al medio ambiente.

Producto de todas estas investigaciones se han desarrollado nuevas tecnologías las cuales se han venido implementando en las generaciones de quemadores posteriores a los DRB-XCL® con los que cuenta actualmente la planta, dichas mejoras y nuevos sistemas han mostrado ser muy efectivos, ya que como se puede observar en la



Figura 18 estos cambios han logrado una enorme disminución en las emisiones desde que se iniciaron a implementar y han ido mejorando con cada nueva generación de quemadores desarrollada por el fabricante Babcock & Wilcox Company.

Figura 18. Evolución de los quemadores desarrollados por B&W.



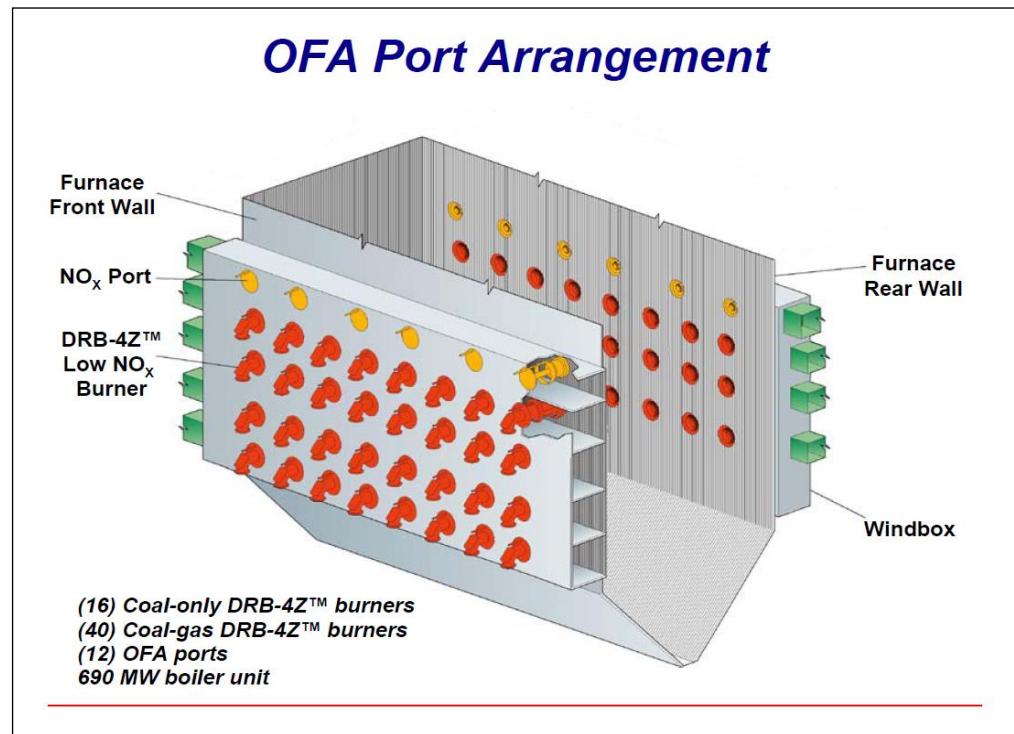
Fuente: Babcock & Wilcox Company.

Uno de los desarrollos con mejor resultado obtenido es un sistema que el fabricante ha denominado como "OFA" el cual consiste en adicionar un aire de sobre fuego al hogar de la caldera como su nombre lo sugiere sobre las llamas es decir en un nivel superior a los quemadores de carbón, esto con el fin de regular la alta temperatura que se presenta en esta zona de la caldera y que propicia la alta formación del NO<sub>x</sub> térmico.

En los más recientes montajes de calderas efectuados en los últimos años, este sistema se ha implementado mediante la instalación de unas

tomas de aire en la parte superior del hogar, así como se ilustra en la Figura 19. Estos puertos o tomas tienen una configuración muy similar a la de los quemadores de carbón.

**Figura 19.** Modelo caldera con sistema OFA para reducción de NO<sub>x</sub>.



Fuente: Babcock & Wilcox Company.

En la ilustración anterior se muestra como es la implementación del llamado sistema OFA mediante la distribución de lo que el fabricante denomina “puertos de NO<sub>x</sub>” que permiten la entrada de solo aire en un nivel superior al de los grupos de quemadores de carbón. En esta imagen se pone como ejemplo una caldera de 690 MW con un arreglo de 56 quemadores de la generación DRB-4Z® con ubicación opuesta que se muestran en color rojo y 12 puertos OFA en la parte superior, que se pueden identificar por su color amarillo.

Con el propósito de generar un efecto de regulación de temperatura en la parte superior del hogar de la caldera similar al que se obtiene con la implementación del sistema OFA se propuso el ajuste en los BIAS (o ajuste fino) de los molinos, esto quiere decir, realizar un ajuste de forma

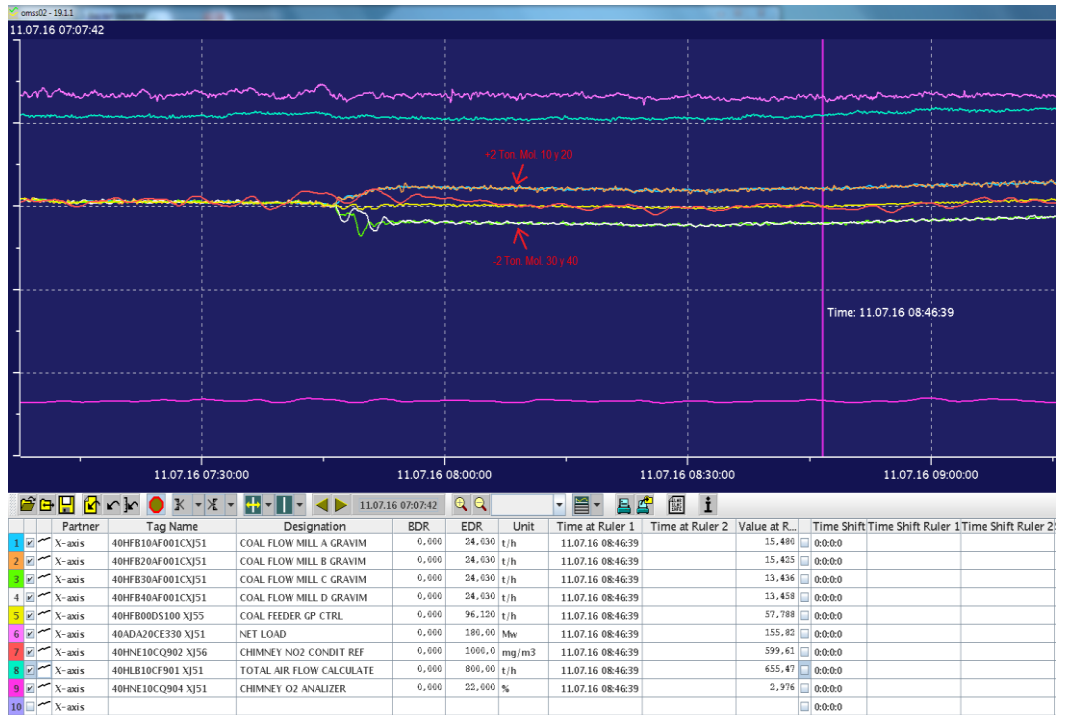
manual desde la sala de control a los flujos de carbón que salen de cada uno de los cuatro molinos (uno por cada grupo de quemadores) hacia los quemadores.

El ajuste consiste en modificar el control de suministro de carbón a cada molino para quemar 2 ton/hora menos en el nivel superior de quemadores y de igual forma adicionarle 2 ton/hora a los quemadores del nivel inferior para mantener la cantidad total de combustible demandado por la unidad. Estas dos toneladas que se restaron y agregaron corresponden a una tonelada (1Ton) por cada molino, es decir, a los molinos 10 y 20 (inferiores) se les aumento 1 Ton/h a cada uno y a los molinos 30 y 40 (superiores) se les disminuyó la cantidad de carbón triturado en 1 Ton/h a cada uno.

En la Figura 20 se muestran las curvas obtenidas de PROCONTROL (programa de monitoreo y control de toda la unidad en tiempo real), donde se ven los flujos de carbón de cada molino, así como la carga neta de la unidad (En color rosado) la cual fue constante de 154 MW durante toda la prueba al igual que en los demás ajustes probados, también se puede ver la curva de las emisiones de  $NO_x$  expresadas como  $NO_2$  a condiciones de referencia medidas en línea por el equipo instalado en la chimenea (En color rojo).

La variación se efectuó a partir de las 07:46 del día 11 de Julio de 2016 y como se puede ver en la gráfica, la tendencia de  $NO_2$  no presenta ninguna variación respecto al comportamiento con el que venía, los valores que se pueden leer en la Figura 20, corresponden a los medidos a las 08:46 del mismo día, una hora después de efectuado el ajuste, tiempo suficiente para la estabilización de la unidad, luego del cual no se identifica algún tipo de cambio en los niveles de emisión de  $NO_2$  registrados por el equipo instalado en la chimenea.

**Figura 20.** Curvas ajuste de BIAS a los molinos y emisiones de NO<sub>2</sub> (PROCONTROL)



Fuente: Compañía Eléctrica De Sochagota. S.A. E.S.P. (Dpto. Caldera)

Luego de supervisar detalladamente los principales parámetros de combustión y emisiones durante aproximadamente 5 horas de operación a plena carga, contadas a partir del cambio realizado en los flujos de carbón a molinos desde sala de control (Ver Figura 19) no se detecta alguna variación en las emisiones de óxidos de nitrógeno mostradas por los medidores en línea, por consiguiente se toma la decisión de restablecer los valores de BIAS a su condición normal de operación, que para el caso de operación a plena carga con 4 molinos en servicio es de cero (0.0) en cada uno de los molinos, es decir, el flujo total de carbón hacia la caldera es igualmente distribuido en los 4 grupos de quemadores.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la implementación de los ajustes diseñados experimentalmente y ejecutados en su mayoría, con la planta en operación a plena carga (150 MW). Estos resultados se presentan en una serie de gráficas, donde se puede ver la tendencia de variación de los diferentes parámetros analizados en este trabajo, en función de cada uno de los ajustes implementados, los cuales se enumeran y describen en la Tabla 9, la cual contiene la fecha de ejecución de cada análisis de gases bajo las condiciones descritas en la casilla de “descripción del ajuste”, igualmente los números correspondientes a cada ajuste se encuentran en el eje horizontal de cada una de las gráficas de tendencia, mostradas más adelante en este capítulo, lo que facilita relacionar el valor promedio obtenido en el análisis de gases hecho en la fecha indicada, con las condiciones específicas dadas por el ajuste implementado en ese momento. Para el diagnóstico inicial se realizaron 2 análisis de gases, sin efectuar ningún ajuste, estos análisis se identifican en la Tabla 9 como “C.I.”

Esto permite hacer un análisis en el tiempo, del comportamiento de los parámetros estudiados conforme se ejecutó cada uno de los ajustes y determinar así, cuales ajustes son los que logran los mejores resultados en las emisiones de óxidos de nitrógeno, para realizar una evaluación de la viabilidad para implementarlos de manera permanente, comprobando que no afectan de manera negativa ningún otro parámetro de la combustión, ni se presentan pérdidas de eficiencia.

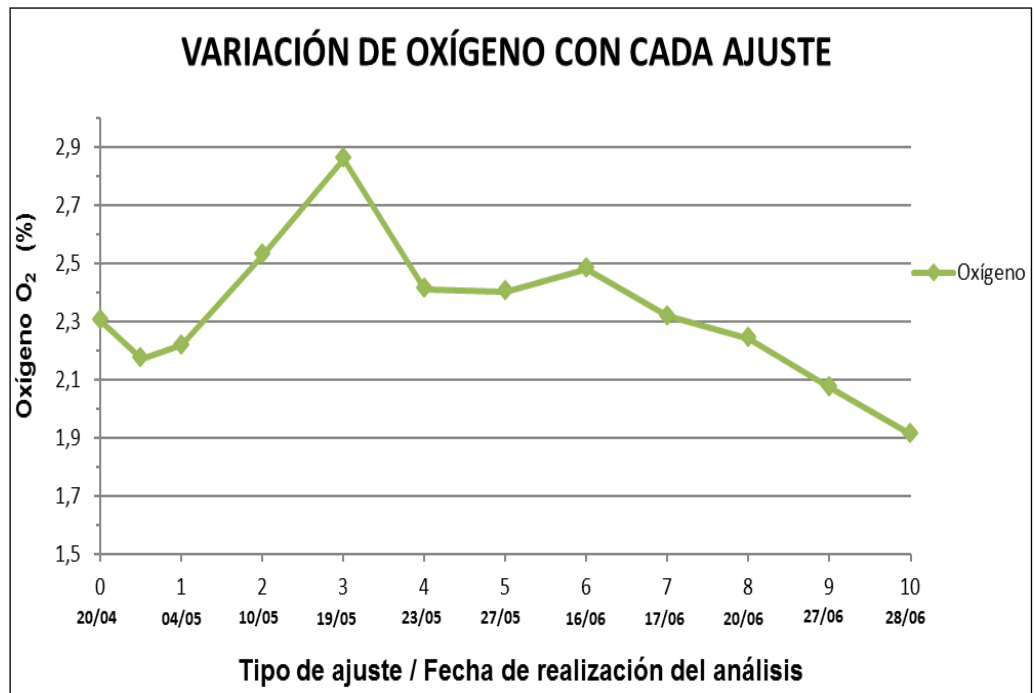
**Tabla 9.** Identificación y descripción de ajustes implementados en quemadores DRB-XCL®

Fecha	Ajuste	Descripción del ajuste	
20-abr	C.I. = 0	Config. Inicial: Álabes Externos a 60°	
26-abr	C.I.= 0,5	Config. Inicial: Álabes Externos a 60°	
04-may	1	Álabes Externos a 55°	
10-may	2	Álabes Externos a 70°	
19-may	3	Álabes Externos a 50°	
23-may	4	Difusores Retraídos 7" (Grup. 20/30/40) Todos los Álabes Externos a 60°	
27-may	5	Difusores Retraídos 7" (Grup.10/20/30/40) Todos los Álabes Externos a 60°	
16-jun	6	Álabes Internos Abiertos 5° (Grup.10/20/30/40) Difusores Retraídos 15" (Grup. 20/30/40)	
17-jun	7	Álabes Internos Abiertos 5° (Grup.10/20/30/40) Difusores Retraídos 15" (Grup. 10/20/30/40)	
20-jun	8	Álabes Internos Abiertos 5° (Grup.10/20/30/40) Difusores Retraídos 15" (Grup. 10/20/30/40)	
27-jun	9	Ajuste De Sliding Dampers: A4: 90% B1: 85% B4: 95% D1: 90% D4: 95%	Difusores Retraídos 15" (Todos los quemadores)  Álabes internos abiertos 5° (Todos los quemadores)
28-jun	10	Ajuste De Sliding Dampers: A4: 80% B4: 85% C4: 85% D4: 85%	Difusores Retraídos 15" (Todos los quemadores)  Álabes internos abiertos 5° (Todos los quemadores)

En la Figura 21. Se muestra el comportamiento del oxígeno medido en la salida del economizador mediante análisis de gases con equipo portátil (*Rosemount series 500*), en función de los ajustes hechos y con la fecha de la realización de cada análisis de gases, en ella se ve la marcada disminución de O<sub>2</sub> a lo largo del proceso, en especial luego de

realizar el ajuste 4 y sobre el final en los ajustes 8 y 9 que son los ajustes de Sliding Dampers. Se observa que esta tendencia de disminución es coherente con lo evidenciado en los mapeos de las Figuras 15, 16 y 17, donde se ve como con cada ajuste de Sliding Dampers el promedio de oxígeno se reduce, debido a que los ajustes en los quemadores identificados son para reducir la cantidad de aire secundario que entra por cada uno de ellos. También se evidencia el efecto contrario al realizar los ajustes de álabes externos (1, 2 y 3) que propiciaron que una mayor cantidad de aire quedara sin hacer reacción con el combustible quedando en la corriente de gases.

**Figura 21.** Tendencia de variación del oxígeno  $O_2$  en función del ajuste implementado.



Fuente: Autor del documento.

A continuación de esta gráfica se encuentra la Tabla 10 que contiene los valores promedio de oxígeno ( $O_2$ ) en porcentaje (%) que se obtuvieron en cada uno de los análisis de gases tomados en el ducto de salida del economizador, con los que se puede complementar la interpretación de la gráfica de tendencia mostrada en la Figura 21 y hacer una mejor comparación entre los resultados puntuales de cada ajuste, así mismo se puede hacer una inferencia de lo que se espera observar en el

comportamiento de los óxidos de nitrógeno, que se espera tengan un comportamiento muy similar al del oxígeno ya que como se menciona en el capítulo 2 de este trabajo uno de los factores que influyen en la formación de estos compuestos es el oxígeno disponible durante la combustión y al reducirse la cantidad suministrada seguramente también lo harán los  $NO_x$ .

**Tabla 10.** Valores promedio de  $O_2$  para cada análisis realizado

	Ajuste	Fecha	Oxígeno (%)
C.I.	0	20-abr	2,305
C.I.	0,5	26-abr	2,175
	1	04-may	2,22
	2	10-may	2,53
	3	19-may	2,86
	4	23-may	2,415
	5	27-may	2,405
	6	16-jun	2,485
	7	17-jun	2,32
	8	20-jun	2,243
	9	27-jun	2,076
	10	28-jun	1,915

Aunque no se presentan en este documento, los valores de exceso de aire en la combustión son directamente proporcionales a los de oxígeno ya que se trata de la misma variable y se hace referencia al mismo concepto, así que se puede afirmar que el exceso de aire también se disminuyó considerablemente, lo que entre otras cosas hace que la combustión sea más eficiente y según lo expresado por los ingenieros jefes del departamento de caldera de la compañía, este es el nivel más

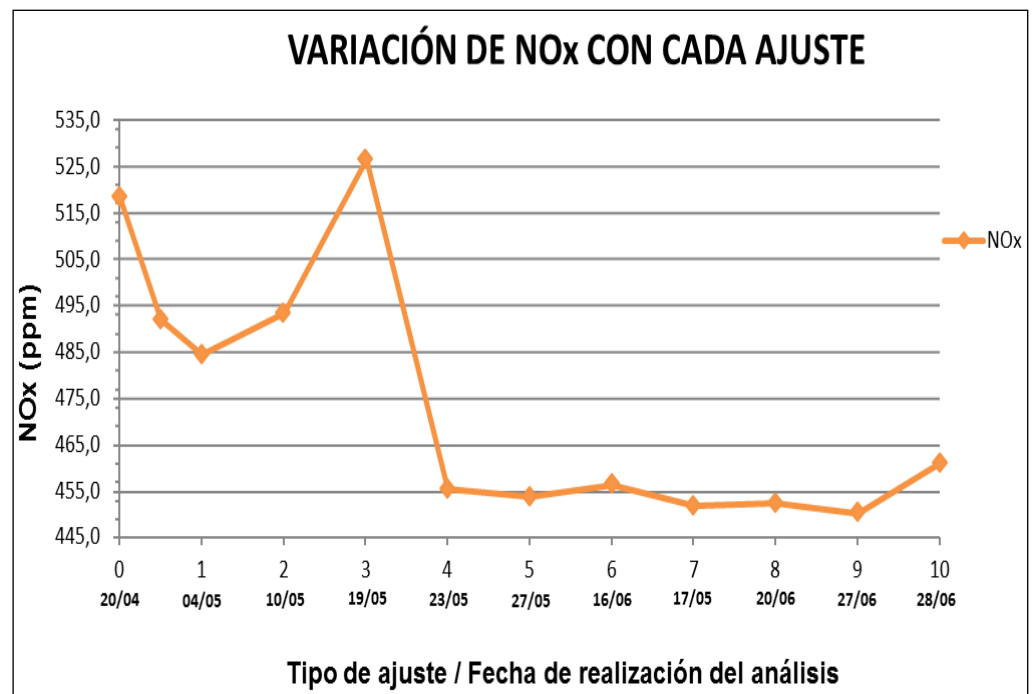


bajo de exceso de aire (Oxígeno) con el que se ha logrado trabajar, manteniendo la unidad operando normalmente a plena carga.

En la Figura 22 se observa la variación registrada del valor bruto de  $\text{NO}_x$  medido con el equipo analizador de gases portátil Rosemount series 500. Acompañada de la Tabla 11. En la que se encuentran los valores promedio de cada medición de gases expresadas en partes por millón (ppm) acompañados de la correspondiente fecha en la que se hizo el análisis.

En esta gráfica se hace muy evidente la reducción en las emisiones que se presenta producto de la implementación del ajuste 4, que corresponde al cambio en la posición de los difusores, inicialmente solo en los grupos de quemadores 20/30/40, los cuales se retrajeron una distancia de 7" hacia adentro de la garganta del quemador. En el ajuste 5 se realiza lo mismo con los difusores de los quemadores del grupo 10, lo que genera un aumento en la reducción de  $\text{NO}_x$ , como se puede constatar en la Tabla 11.

**Figura 22.** Tendencia de variación de  $\text{NO}_x$  en función del ajuste implementado.



Fuente: Autor del documento.

En la Figura 22 también se ve como los ajustes de Sliding Dampers, dan como resultado paralelo a la reducción de oxígeno, una reducción en la formación de  $NO_x$ . En la Tabla 11 se muestran los valores puntuales obtenidos con cada condición (7, 8 y 9), que permiten identificar claramente la reducción en las emisiones.

**Tabla 11.** Valores promedio de  $NO_x$  para cada análisis realizado

	Ajuste	Fecha	$NO_x$ (ppm)
C.I.	0	20-abr	518,7
C.I.	0,5	26-abr	492,0
	1	04-may	484,5
	2	10-may	493,5
	3	19-may	526,8
	4	23-may	455,4
	5	27-may	453,9
	6	16-jun	456,5
	7	17-jun	451,8
	8	20-jun	452,4
	9	27-jun	450,4
	10	28-jun	461,0

En la Figura 23 se muestra la tendencia registrada en los valores de óxidos de nitrógeno expresados como  $NO_2$ , tal como exige la norma que sean expresados, en la gráfica también puede observarse una línea de referencia que marca el valor máximo de emisiones de  $NO_x$  (corregido como  $NO_2$ ),  $760 \text{ mg/m}^3$  para el caso de plantas termoeléctricas con capacidad instalad superior a 20 MW, establecido en la resolución 909 de 2008 del MAVDT lo que permite observar cómo se encontraban las emisiones al inicio del proyecto y hasta donde se lograron disminuir con la implementación de los ajustes propuestos en los quemadores.

También se puede observar cómo se logró estabilizar los valores promedio de emisiones de  $NO_2$  creando un margen suficientemente amplio entre las emisiones promedio y la línea límite, lo que garantiza el cumplimiento de la norma en todo momento.

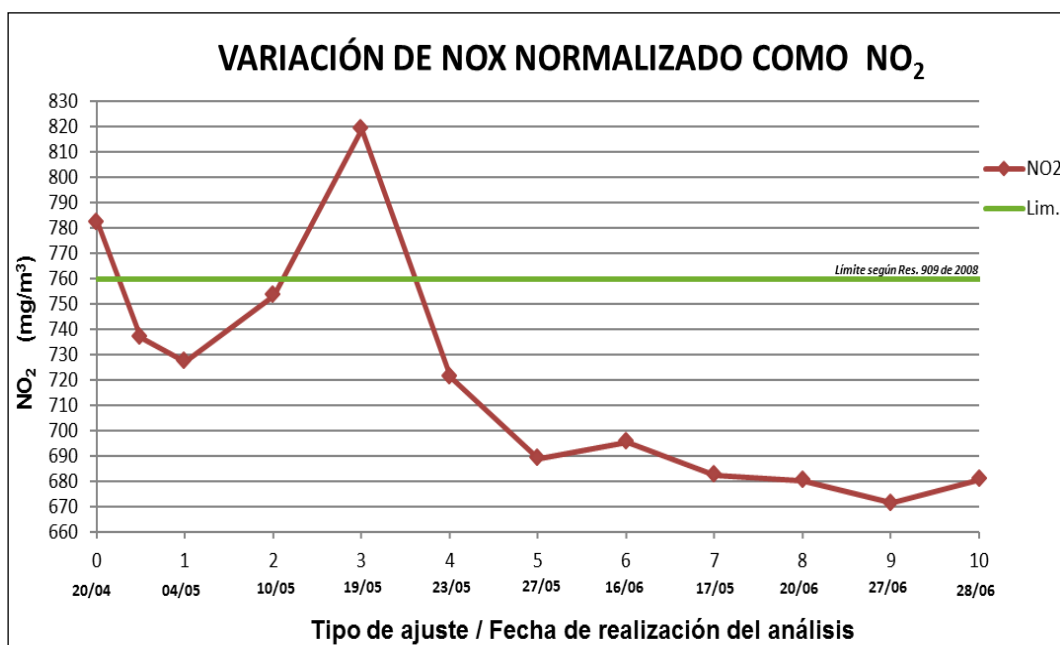
En la resolución 909 de 2008 del MAVDT se establece que los valores medidos de las emisiones de óxidos de nitrógeno se deben expresar corregidos como  $NO_2$  en  $mg/m^3$  a condiciones de referencia temperatura ambiente de 25 °C y Presión atmosférica de 760 mm Hg con un oxígeno de referencia del 6%, así que todos los datos presentados en la Tabla 12 cumplen con estas correcciones, por lo tanto, estos valores son representativos y válidos para ser comparados con los establecidos en la normatividad.

En la Tabla 12 aparecen los valores promedio de óxidos de nitrógeno obtenidos en cada medición, expresados como dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y corregidos según las condiciones de referencia establecidas en la norma.

**Tabla 12.** Valores promedio de  $NO_2$  para cada análisis realizado

	Ajuste	Fecha	$NO_2$ ( $mg/m^3$ )
C.I.	0	20-abr	<b>782,4</b>
C.I.	0,5	26-abr	<b>737,0</b>
	1	04-may	<b>727,52</b>
	2	10-may	<b>753,48</b>
	3	19-may	<b>819,26</b>
	4	23-may	<b>721,203</b>
	5	27-may	<b>689,235</b>
	6	16-jun	<b>695,728</b>
	7	17-jun	<b>682,641</b>
	8	20-jun	<b>680,49</b>
	9	27-jun	<b>671,5</b>
	10	28-jun	<b>681,0</b>

**Figura 23.** Tendencia de variación de  $NO_2$  en función del ajuste implementado.



Fuente: Autor del documento.

Como se ve en la gráfica de tendencia presentada en la Figura 23, luego de la implementación de los ajustes 4 y 5, los valores promedio de emisiones de óxidos de nitrógeno corregidos como dióxido de nitrógeno  $NO_2$ , bajaron vertiginosamente, hasta alcanzar un valor mucho menor que el establecido por la normatividad colombiana vigente, los ajustes que siguen 7, 8 y 9 producen un descenso más en estos niveles hasta estabilizarse en un valor alrededor de **680 mg/m<sup>3</sup>**, lo que corresponde a **80 mg/m<sup>3</sup>** menos que lo establecido en la resolución 909 de 2008.

También se aprecia la reducción que se presentó con respecto a los niveles de emisiones que se registraron bajo las condiciones iniciales, es decir, sin aplicar ningún ajuste, lo que refleja el estrecho margen que mantenían estos niveles durante la operación normal de la planta y que como se ve en la primera medición en coacciones superaban el límite.

Haciendo un detallado análisis tanto de los análisis de gases realizados (incluyendo los mapeos respectivos de cada análisis), como de la gráfica de tendencia de  $NO_2$  (Ver Figura 23), en la que se visualizan dichos resultados en función de los ajustes implementados experimentalmente

a manera de prueba, se concluye que si existe una mejor configuración en los sistemas de ajuste en quemadores que da como resultado una disminución en el valor promedio de emisiones de Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ) producto de la combustión de carbón pulverizado al interior de la caldera.

Se determinó que la configuración más óptima en los sistemas de control mecánicos de los quemadores de carbón DRB-XCL®, se produce con la implementación de los ajustes 4, 5, 6, 7, 8 y 9. Estos ajustes descritos en detalle en la sección 4. de este documento, dan como resultado los valores más bajos de emisión por  $NO_x$ , sin alterar ninguno de los demás parámetros de combustión y lo más importante, sin producir ninguna pérdida de eficiencia en la unidad.

La determinación de la viabilidad para implementar cada uno de los ajustes propuestos de manera permanente, se hizo simultáneamente a la aplicación de cada uno de ellos, supervisando en conjunto con el departamento de operación, el funcionamiento de la planta en tiempo real, para detectar cualquier posible problema que causara la implementación de estas pruebas.

Para el caso específico de los ajustes implementados, que dieron como resultado una disminución muy significativa en las emisiones de óxidos de nitrógeno, se determinó que ninguno de estos, genera problema alguno con otro equipo de la caldera y no afectan ningún parámetro de funcionamiento de la unidad, por lo tanto, se pueden implementar de manera permanente sin ningún riesgo ni contraindicación.

## 6. CONCLUSIONES

- Con la realización del diagnóstico inicial de los niveles de emisiones de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), se encontró que ocasionalmente la planta TERMOPAIPA IV propiedad de la Compañía Eléctrica De Sochagota S.A. E.S.P. excedía los niveles máximos de emisión de dichos óxidos establecidos por la normatividad colombiana vigente.
- Basados en la teoría del flujo preferencial de gases a través de la caldera, demostrada mediante análisis por elementos finitos realizados por el fabricante de la caldera *Babcock & Wilcox Company*, en unidades con características muy similares a las de TERMOPAIPA IV, se creó una rejilla para sobreponer en la graficas de distribución de gases en la salida del economizador (mapeos), lo que permitió de manera acertada identificar las zonas de influencia de cada uno de los 16 quemadores en la corriente de gases que sale de la caldera, para así, poder ajustar únicamente los quemadores que generaban valores muy altos que de óxidos de nitrógeno  $NO_x$  y/o Oxígeno  $O_2$ , lo que aumentaba significativamente el valor promedio de las emisiones de  $NO_2$ .
- Los resultados obtenidos luego de la implementación de los ajustes propuestos en el diseño experimental, comprobaron las teorías propuestas sobre el comportamiento esperado de las llamas luego de la implementación de cada uno de los ajustes.
- Los ajustes hechos a los álabes externos de los quemadores, no aportaron positivamente en la reducción de emisiones de  $NO_x$ , por el contrario, al variar su posición habitual, los niveles de emisiones de óxidos de nitrógeno aumentaron inmediatamente en gran medida, por tanto, este ajuste fue descartado y los álabes, se dejaron de nuevo en su posición habitual de manera permanente.

- Con la implementación del ajuste en la posición de los difusores (Impeller) de los quemadores, se logró la mayor reducción en los niveles de emisión por óxidos de nitrógeno *NOx*.
- Al final de la implementación de ajustes, se logró determinar que si existe una configuración más óptima en los diferentes mecanismos de los quemadores de la Compañía Eléctrica De Sochagota S.A. E.S.P. con la que se logra una importante reducción en las emisiones de Óxidos de Nitrógeno, de alrededor del 10%, sin necesidad de cambiar ninguno de los equipos que actualmente se encuentran instalados en la caldera de la compañía.
- Los ajustes que se probaron para obtener la mejor configuración en los quemadores de TERMOPAIPA IV, se pueden implementar de manera definitiva y permanente, ya que como parte del trabajo se determinó la viabilidad de aplicación permanente de cada uno.

## 7. RECOMENDACIONES

- Realizar un monitoreo permanente del comportamiento de los gases, para mantener controlada la emisión de  $NO_x$  y validar el método empleado con el transcurso del tiempo.
- Reducir el ángulo que actualmente tienen las aletas de los difusores en  $5^\circ$ , para disminuir aún más el efecto de turbulencia en la llama, comprobar el efecto del ajuste mediante análisis de gases instrumental y elaboración de mapeos.
- Realizar una prueba retrayendo más los difusores dentro de la garganta del quemador, ya que con la implementación de este ajuste se obtuvo la mayor reducción en las emisiones de  $NO_2$ .
- Supervisar los niveles de inquemados de manera detallada, tras la ejecución de cualquier ajuste adicional a los ya establecidos.
- Gestionar un convenio entre la escuela de ingeniería electromecánica y la Compañía Eléctrica de Sochagota S.A. E.S.P. para realizar un trabajo coordinado y permanente con los estudiantes de últimos semestres, que apoye el proceso de formación de nuevos profesionales.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] MEJÍA, Carlos. Manual básico de operación. Paipa: octubre de 2007. p.25-30.
- [2] COMPAÑÍA DE CONSULTORÍA AMBIENTAL LTDA., “Evaluación de emisiones atmosféricas generadas por el funcionamiento de la unidad IV ubicada en las instalaciones de la compañía eléctrica de Sochagota”. Paipa: Quintero Diana, 2014. 199 p.
- [3] ESTADOS UNIDOS, OFFICE OF THE FEDERAL REGISTER NATIONAL ARCHIVES AND RECORDS ADMINISTRATION, Code Of Federal Regulations Part 60 (appendices), Vol 2, WASHINGTON: 2001 723 p.
- [4] TESTO, Análisis de gases de combustión en la industria, en línea, disponible en: [http://www.testo.com.ar/es/home/productos/gases\\_de\\_combustion/gases\\_de\\_combustion\\_1/analizadores\\_de\\_gases\\_de\\_combustion.jsp](http://www.testo.com.ar/es/home/productos/gases_de_combustion/gases_de_combustion_1/analizadores_de_gases_de_combustion.jsp)
- [5] BABCOCK & WILCOX COMPANY, Presentación: “Ultra Low NO<sub>x</sub> Combustion Solutions For Wall-Fired Boilers”, (Termopaipa IV abril, 2016).
- [6] SARV, Hamid y LARUE, Albert, Full- Size Characterizacion of Low-NO<sub>x</sub> Burner Coal Nozzle Mixing Devices in a 100MBtu/hr Research Facility, Monterey, CA, 1995, 15 p.
- [7] NIKITENKO, G y LARUE, Albert, LowerNO<sub>x</sub>/Higher Efficiency Combustion Systems, Chicago, Illinois, USA. Agosto 2001, 8 p.