



**ENDESA CHILE S.A.**

**INFORME DE RESULTADOS  
ENSAYOS DE VALIDACIÓN ANUAL DEL SISTEMA DE MONITOREO  
CONTINUO DE EMISIONES (CEMS)  
CENTRAL TERMOELÉCTRICA BOCAMINA, UNIDAD 1  
2016**

**IREV-048-2016**




**PREPARADO POR:**

**JHG SERVICIOS AMBIENTALES LTDA.**



**JUNIO 2016**

## ESTADO DE REVISIONES

TÍTULO			INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE VALIDACIÓN ANUAL DEL SISTEMA DE MONITOREO CONTINUO DE EMISIONES (CEMS) CENTRAL TERMOELÉCTRICA BOCAMINA, UNIDAD 1 2016		
REVISIÓN			JHG SERVICIOS AMBIENTALES LTDA.		
REV	DESCRIPCIÓN		Por	Revisó	Aprobó
A	EMITIDO PARA APROBACIÓN	NOMBRE	Daniel Giraldo	Jarold Montes	Andrés Aguayo V.
		FIRMA			
		FECHA	02/06/16	02/06/16	03/06/2016
		NOMBRE			
		FIRMA			
		FECHA			
		NOMBRE			
		FIRMA			
		FECHA			
		NOMBRE			
		FIRMA			
		FECHA			

## INDICE

<b>1.</b>	<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE LA FUENTE .....</b>	<b>8</b>
<b>3.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS CEMS Y PRINCIPIOS DE OPERACIÓN .....</b>	<b>10</b>
3.1.	Configuración General.....	10
3.2.	Descripción de los componentes del CEMS.....	11
<b>4.</b>	<b>CÁLCULOS Y RESULTADOS DE ENSAYO DE EXACTITUD RELATIVA (ER)...</b>	<b>12</b>
4.1.	Consideraciones .....	12
4.2.	Cálculos y resultados.....	13
4.3.	Gráficos de cada parámetro evaluado. ....	19
<b>5.</b>	<b>AUDITORÍA DE RESPUESTA RELATIVA (ARR) .....</b>	<b>23</b>
5.1.	Consideraciones .....	23
5.2.	Resultados.....	25
<b>6.</b>	<b>CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA FUENTE.....</b>	<b>28</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>29</b>

## ÍNDICE DE ANEXOS

### **ANEXO 1**

Carta de Aviso de Ejecución de Ensayos de Validación

### **ANEXO 2**

Condiciones de Operación de la Fuente

### **ANEXO 3**

Informe de Medición de la Entidad de Inspección y Análisis JHG Servicios Ambientales.

### **ANEXO 4**

Informe de Medición del CEMS.

### **ANEXO 5**

Registros Procesados y Planillas de Cálculo.

## INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

<i>Tabla 1: Resumen de fechas de ejecución de ensayos.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 2: Resumen de resultados ensayo ER para gases.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 3: Resumen de Condiciones Aprobación ARR.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 4: Características básicas de la Unidad generadora.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 5: Características básicas de la unidad generadora.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 6: Tiempo de Respuesta Entidad de Inspección y CEMS.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 7: Resultados de ER del Método de Referencia v/s CEMS para NO<sub>x</sub>. ....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 8: Resultados de ER del Método de Referencia v/s CEMS para SO<sub>2</sub>.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 9: Resultados de ER del Método de Referencia v/s CEMS para CO<sub>2</sub>.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 10: Resultados de ER del Método de Referencia v/s CEMS para O<sub>2</sub>. ....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 11: Resultados de ER del Método de Referencia v/s CEMS para Flujo. ....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 12: Concentraciones de NO<sub>x</sub> medidas durante ER.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 13: Concentraciones de SO<sub>2</sub> medidas durante ER.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 14: Concentraciones de CO<sub>2</sub> medidas durante ER.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 15: Concentraciones de O<sub>2</sub> medidas durante ER.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 16: Flujo medido durante ER.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 17:: Valores utilizados para el desarrollo de la curva de correlación en marzo de 2014 .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 18: Resultados obtenidos durante ARR.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 19 Criterios Aprobación ARR.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 20: Generación durante Ensayo de ER y ARR.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 21: Resumen de cumplimiento de los ensayos de gases y flujo. ....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 22: Resumen Criterios Aprobación ARR .....</i>	<i>29</i>

## 1. RESUMEN EJECUTIVO

El presente informe contiene los resultados de las prueba de Exactitud Relativa (ER) aplicada al CEMS de gases y flujo, y la Auditoría de Respuesta Relativa (ARR) en el CEMS-MP, instalado de la unidad 1 de la Central Termoeléctrica Bocamina de Endesa S.A. De acuerdo a lo indicado en el D.S. N° 13 de 2011 del Ministerio del Medio Ambiente, Endesa instaló y validó un CEMS en la unidad 1 de la central Bocamina, el cual fue certificado por la SMA mediante Resolución Exenta número 77 del 27 de enero de 2016.

El Ministerio del Medio Ambiente, mediante Resolución Exenta N° 583 del 3 de octubre de 2014, aprobó el Anexo 3 al Protocolo de Validación de CEMS: “ASEGURAMIENTO DE CALIDAD, REPORTE DE DATOS, SUSTITUCIÓN DE DATOS PERDIDOS Y ANÓMALOS, AUDITORÍAS Y REVALIDACIONES” DEL PROTOCOLO PARA VALIDACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO CONTINUO DE EMISIONES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS”.

Este documento, dentro del marco de los Requisitos de Pruebas de Aseguramiento de Calidad (AC), establece que, para los CEMS de gases y flujo, se debe realizar anualmente la Prueba de Exactitud Relativa y para el CEMS-MP, una Auditoría de Respuesta Relativa, las que deben ser realizadas por una Entidad de Inspección.

La Unidad I está constituida por una caldera de carbón pulverizado de potencia bruta de 128 MW. La potencia máxima de despacho autorizada por el CDEC-SIC corresponde a 128 MW. En base a este último valor se determinó el porcentaje de carga para los ensayos de validación realizados. De acuerdo a esto, el combustible utilizado durante todos los ensayos de validación fue Carbón.

Esta Unidad cuenta con sistemas de filtros de mangas para el abatimiento de Material Particulado, desulfurizador para al abatimiento de SO<sub>2</sub> y quemadores de baja emisión de NO<sub>x</sub>.

El CEMS a validar está compuesto por analizadores, marca ABB, de tipo extractivo que miden NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, y CO, utilizando como principio de medición Infrarrojo No Dispersivo, excluyendo la unidad de análisis de O<sub>2</sub> que utiliza como principio de medición el comportamiento paramagnético. Los CEMS de Material Particulado (MP) y flujo, ambos de marca Durag, son del tipo “in situ” utilizando como principio de medición Transmisión de Luz y Ultrasonido respectivamente. La humedad se obtiene a partir de un cálculo basado en las mediciones de oxígeno seco y oxígeno húmedo. Endesa S.A. ha solicitado a la Entidad de Inspección JHG Servicios Ambientales Ltda., la ejecución de la Prueba de ER para gases y la ARR, además de la confección del presente informe.

Los ensayos fueron realizados en las fechas que se indican a continuación:

Tabla 1: Resumen de fechas de ejecución de ensayos.

Ensayo Ejecutado	Fecha de ejecución de los ensayos
Exactitud Relativa (ER) de NO <sub>x</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> y flujo	3, 4 y 5 de Mayo de 2016
Auditoría de Respuesta Relativa (ARR)	4 de Mayo de 2016

A continuación se presenta un resumen con los resultados obtenidos en los ensayos efectuados:

La Tabla 2 muestra los resultados del ensayo de ER para gases. El detalle con los resultados se presentan en el capítulo 4

Tabla 2: Resumen de resultados ensayo ER para gases

Ensayo	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Flujo	Resultado
Exactitud Relativa (ER) <sup>(3)</sup>	1,6%	2,4%	0,29%	0,09%	11,7%	Aprueba

<sup>(3)</sup>En ER, los criterios de límites aceptables son: (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y Flujo) ≤20%, (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) ≤ 1%

Para el caso de la Auditoría de Respuesta Relativa (ARR), se realizaron 3 corridas del Método de Referencia CH-5 en la condición de operación normal de la unidad, al comparar los resultados con la curva de correlación obtenida en la validación inicial del CEMS-MP, se constata el cumplimiento de las 3 condiciones para la aprobación del Ensayo de ARR:

Tabla 3: Resumen de Condiciones Aprobación ARR

Condición Para Aprobar	Resultado
Para los tres puntos de datos, el valor de la respuesta del CEMS-MP debe ser menor que el valor de respuesta más alto usado para desarrollar la curva de correlación.	Cumple
Para al menos dos de los tres puntos de datos, el valor de la respuesta de CEMS-MP debe estar dentro del rango de salida del CEMS-MP usado para desarrollar la curva de correlación.	Cumple
Al menos dos de las tres series de mediciones del CEMS-MP y método de referencia, deben caer dentro de un área especificada en un gráfico de la recta de regresión de correlación, definida por dos rectas paralelas a la curva dada por la correlación, separadas a una distancia de ± 25% del valor numérico posible de emitir, con respecto a la curva de correlación.	Cumple

## 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE LA FUENTE

La Unidad 1 de la Central Termoeléctrica Bocamina se emplaza en el sector Lo Rojas, comuna de Coronel, provincia de Concepción, región del Biobío. Las coordenadas aproximadas UTM de localización de las instalaciones como las principales características de la unidad se indican a continuación:

*Tabla 4: Características básicas de la Unidad generadora*

Descripción	Unidad 1
Tipo de Fuente	Caldera
Tipo Caldera	Caldera Acuotubular de paredes radiante
Año puesta en servicio	1970
Potencia Bruta (MW)	128
Fabricante Caldera	Franco Tossi
Nº Registro autorización Caldera	SSCONC-09
Combustible	Carbón pulverizado bituminoso
Autorización Ambiental	No posee
Condiciones de Operación	Continua
Tecnología de Abatimiento	Filtro de Mangas, Desulfurizador, Quemador NO <sub>x</sub>
Altura de la chimenea (m)	65
Diámetro Interno de la chimenea (m)	4,1
Velocidad de los gases (m/s)	10,9
Temperatura de los gases (°C)	134,9
Configuración de la chimenea	Una sola chimenea
Sistema de evacuación de gases	Ducto Chimenea

El tipo de fuente fija en la cual se encuentra instalado el equipo CEMS a validar, corresponde a una unidad de generación a carbón cuya potencia máxima de despacho es 128 MW.

La Unidad 1 de la Central Termoeléctrica Bocamina genera energía eléctrica a partir de la combustión del carbón en una caldera en la cual se produce vapor de agua. El vapor producido es conducido a través de tubos desde la caldera hacia la turbina de vapor en la cual impactan en los álabes de la turbina transfiriendo su energía como movimiento de rotación. Los álabes están unidos a un eje rotor que gira de forma conjunta con el generador, produciendo energía eléctrica.

El vapor al entregar su energía a la turbina pierde presión y se enfría. Posteriormente, el vapor es nuevamente enfriado en el condensador y convertido en agua, la cual es enviada nuevamente a la caldera para reiniciar el ciclo de funcionamiento.



Las emisiones atmosféricas que están asociadas a la combustión del carbón necesario para la generación de calor en la caldera, son principalmente  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  y MP.

La Unidad 1 de la Central Termoeléctrica Bocamina cuenta con los siguientes sistemas de abatimiento de contaminantes atmosféricos:

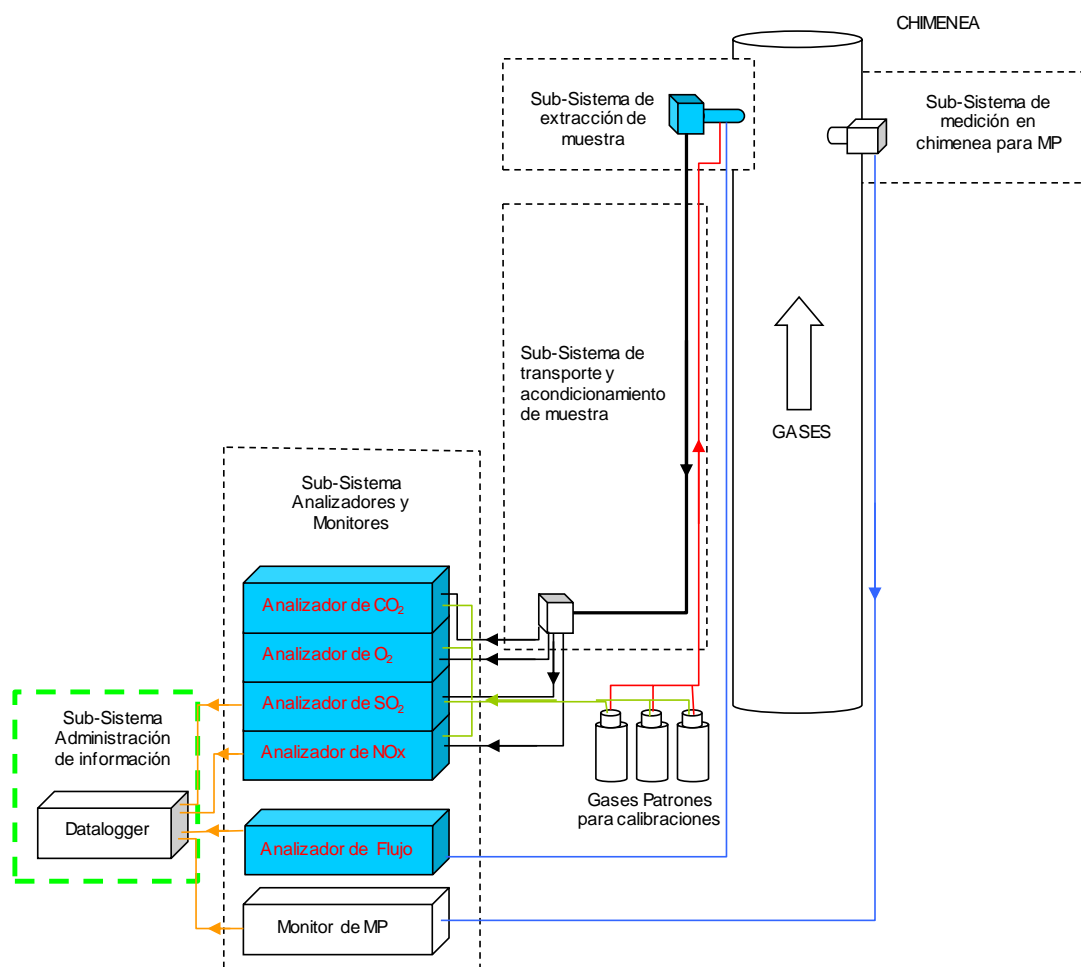
- Para el Material Particulado, la Unidad 1 incorpora un filtro de mangas. Este sistema permite abatir por sobre el 99% del material particulado generado.
- Para el abatimiento de  $\text{SO}_2$ , incorpora un desulfurizador el cual permite cumplir con los límites de  $\text{SO}_2$  exigidos para fuentes existentes en la Norma de Emisiones para Centrales Termoeléctricas.
- Para el abatimiento de  $\text{NO}_x$ , incorpora principalmente quemadores de baja producción de  $\text{NO}_x$

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS CEMS Y PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

#### 3.1. Configuración General.

El Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones (CEMS) instalado en la chimenea de la Unidad 1 de la Central Termoeléctrica Bocamina, consta de una serie de sensores para realizar el seguimiento de las emisiones de material particulado y gases, además de los parámetros requeridos para realizar la normalización de los resultados.

Figura 1: Diagrama del Sistema CEMS Instalado.



### 3.2. Descripción de los componentes del CEMS.

A continuación se presenta una descripción general de los sensores y equipamiento que conforman el CEMS de la Unidad 1 de la Central Termoeléctrica Bocamina.

*Tabla 5: Características básicas de la unidad generadora*

Componente	Marca	Modelo		Principio	N° de Serie	Rango
Sonda de Muestra	ABB	PF 2		Calefaccionada con filtro de salida	23078-0-0282221	-
Línea Calefaccionada	Raco	-		-	401400037	-
Acondicionador de Muestra	ABB	SCC-K		-	23212-01-130210	-
Convertidor NO <sub>2</sub> /NO	ABB	AO2020		-	23093-4-0801974	-
Analizador de Gases	ABB	NO <sub>x</sub>	AO2000	NDIR	3.358161.4	0-1.000 mg/m <sup>3</sup> N
		CO <sub>2</sub>				0-20 %
		SO <sub>2</sub>				0-800 mg/m <sup>3</sup> N
		O <sub>2</sub>	AO2020	Paramagnético	3. 358160.4	0-21 %
Analizador de Flujo	Durag	D-FL200		Ultrasónico	116728	0-1.300 km <sup>3</sup> /h
Analizador de MP	Durag	DR-820F		Transmisión / Adsorción de luz	1220755	0-200 mg/m <sup>3</sup>
DAHS	ABB	-		-	-	-

## 4. CÁLCULOS Y RESULTADOS DE ENSAYO DE EXACTITUD RELATIVA (ER)

### 4.1. Consideraciones

El ensayo de Exactitud Relativa (ER) consiste en la comparación de los valores registrados por el CEMS instalado en la chimenea de la unidad 1 de la Central Bocamina, contra los valores obtenidos por la Entidad de Inspección JHG Servicios Ambientales, aplicando los métodos de medición de referencia aprobados por la autoridad.

Para este efecto se realizaron 12 corridas de muestreo de 21 minutos de duración cada una, de las cuales se eliminaron tres corridas. De la Tabla 7 a la Tabla 10 se entrega la información de todas las corridas ejecutadas, indicando cuales de estas fueron descartadas. El criterio de su eliminación fue las diferencias cuadráticas mayores entre pares de corridas para el  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y Flujo, excepto para la corrida 6 de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$  las cuales no cumplieron con los requisitos para el aseguramiento de calidad establecidos en el método de referencia, y fueron eliminadas ante nada.

La determinación de gases  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$ , se realizó mediante monitoreo continuo a través de los analizadores de gases instalados en el laboratorio móvil de la Entidad de Inspección JHG Servicios Ambientales, acreditado por la autoridad sanitaria, con resolución N°006342 del 12 de Marzo del 2002.

Los Analizadores de gases de JHG Servicios Ambientales, fueron calibrados con gases patrones EPA ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ) y nacionales ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{N}_2$ ). Se calibraron de acuerdo a métodos de referencia y se verificaron en cada una de las corridas, en cero, rango medio y alto. El informe de la medición y los certificados de estos gases patrones se adjuntan en el Anexo 3.1.

Dado que el estándar de emisión para el  $\text{NO}_x$  reportado en el D.S N°13 de 2011 viene dado en ( $\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$ ), los reportes de la Entidad de Inspección, obtenidos originalmente en (ppm), fueron convertidos a ( $\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$ ) utilizando un factor de 1,88, corregidos con un oxígeno de referencia de 6%, utilizando la *Ecuación 65* del protocolo, de la misma forma se trataron los datos para  $\text{SO}_2$  en este caso utilizando un factor de 2,617. Para el caso del CEMS se utilizó la columna que ya viene dada en estas unidades. Los cálculos realizados se presentan en el Anexo 5.1.

Los resultados del Ensayo de Exactitud Relativa se calcularon según las *Ecuaciones 5 y 7* del Protocolo, los cuales deben cumplir con los límites de Exactitud Relativa indicados en la *Tabla N°4* del Protocolo. Según dicha tabla, se utilizaron los siguientes criterios de límites aceptables:

- Para el  $\text{NO}_x$  se considera como criterio el cumplimiento de la *Ecuación 5* del Protocolo, con un máximo de 20% de error cuando las concentraciones del Método de Referencia son mayores al 50% del estándar de emisión, mediante el Método de Referencia CH-7E. En este caso, las mediciones promedio

corresponden a 435,3 (mg/m<sup>3</sup>N) corregido al 6% de oxígeno, por lo tanto, este valor es superior a 250 (mg/m<sup>3</sup>N) corregidos al 6% de oxígeno, que corresponde al 50% del estándar de emisión para una fuente emisora existente que utiliza combustible sólido. Dada esta condición, en el denominador de la *Ecuación 5* se utilizó el promedio del Método de Referencia.

- Para el SO<sub>2</sub> se considera como criterio el cumplimiento de la *Ecuación 5* del Protocolo, con un máximo de 20% de error cuando las concentraciones del Método de Referencia son mayores al 50% del estándar de emisión, mediante el Método de Referencia CH-6C. En este caso las mediciones promedio corresponden a 316,3 (mg/m<sup>3</sup>N) corregido al 6% de oxígeno, por lo tanto este valor es superior a 200 (mg/m<sup>3</sup>N) corregido al 6% de oxígeno, que corresponde al 50% del estándar de emisiones para una fuente existente que utiliza combustible sólido.
- Para el CO<sub>2</sub> se considera como criterio el cumplimiento de la *Ecuación 5 o 7* del Protocolo, con un máximo de 10% y 1%, respectivamente. El Método de Referencia correspondiente es el CH-3A.
- Para el O<sub>2</sub> se considera como criterio el cumplimiento de la *Ecuación 5 o 7* del Protocolo, con un máximo de 10% y 1%, respectivamente. El Método de Referencia correspondiente es el CH-3A.
- Para flujo se considera como criterio el cumplimiento de la *Ecuación 5* del Protocolo, con un máximo de 20% de error, utilizando el promedio del Método de Referencia CH-2.

Para el CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, se presentan los resultados con ambos criterios y se indica con cual(es) cumple(n).

#### 4.2. Cálculos y resultados.

En la siguiente tabla, se presentan los valores máximos de Tiempo de Respuesta (TR), en minutos, para cada analizador tanto para la Entidad de Inspección como para el CEMS. Considerando esto, se calculó el desfase para cada parámetro, permitiendo contrastar de forma sincronizada ambos registros.

Tabla 6: Tiempo de Respuesta Entidad de Inspección y CEMS

Parámetro	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Flujo
Tiempo de Respuesta máximo del CEMS (min)	2	4	2	2	2
Tiempo de Respuesta máximo de Método de Referencia en ER (min)	1	2	3	1	0
<b>Desfase Tiempo de Respuesta (TR) (min)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>-1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>

Para el CEMS, se utilizaron los tiempos de respuesta oficiales que se obtuvieron durante los ensayos de validación, y que fueron certificados por la autoridad en el año 2014.

Los tiempos de desfase obtenidos en la tabla anterior fueron utilizados para el cálculo de los valores promedios comparativos del CEMS. Se utilizó como referencia el tiempo de la Entidad de Inspección, y se desplazaron los registros del CEMS para hacerlos comparables minuto a minuto (sincronizados). Estos cálculos pueden ser verificados en el archivo Excel en formato digital que se encuentra en el Anexo 5.1 del CD adjunto.

- Registros CEMS ER Gases y Flujo BMA 1 2016

En este archivo están señalados los registros correspondientes al horario en que se llevó a cabo la medición, y destacado en colores se muestran los que se utilizaron para el cálculo de la Exactitud Relativa (ER) aplicando el Tiempo de Respuesta (TR). Además, se agregó una hoja adicional donde se calculan los promedios por corrida de los parámetros evaluados. En el Anexo 5.1 también se encuentran los registros de la Entidad de Inspección, donde se señalan las corridas realizadas y los promedios en cada una de ellas, para cada parámetro:

- Registro MR ER Gases BMA U1 2016

En este archivo se señalan las corridas realizadas y los promedios en cada una de ellas para los parámetros de interés. Adicionalmente, se hicieron las correcciones de las concentraciones medidas de cada parámetro, en base a las respuestas de las verificaciones iniciales y finales que estipulan los Métodos de Referencia (MR). Para  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$  las concentraciones se convirtieron de ppm a  $\text{mg/m}^3\text{N}$  corregidos con un oxígeno de referencia de 6%, para tener los resultados coherentes con las unidades del estándar de emisión.

A continuación se presentan los cálculos y resultados obtenidos del ensayo de Exactitud Relativa, para la unidad 1 de la Central Bocamina. La memoria de cálculo se encuentra en el Anexo 5.2:

- ER Gases BMA U1 2016

Para el caso del  $\text{NO}_x$ , el tiempo máximo de respuesta del CEMS fue de 2 (min) y para el caso de la Entidad de Inspección fue de 1 (min), resultando un desfase de  $2-1=1$  (min), por lo tanto, para la comparación de los registros en una misma ventana de tiempo, se tomaron los registros del CEMS un minuto después del tiempo indicado en la ejecución del Método de Referencia.

Tabla 7: Resultados de ER del Método de Referencia v/s CEMS para NO<sub>x</sub>.

Medición Nº	Fecha	Hora Inicio MR	Hora Término MR	Hora Inicio CEMS	Hora Término CEMS	NO <sub>x</sub>			
						Método Referencia MR <sub>i</sub>	CEMS RCEM <sub>i</sub>	Diferencia d <sub>i</sub>	Diferencia <sup>2</sup> (d <sub>i</sub> ) <sup>2</sup>
	(dd/mm/aaaa)	(hh:mm)	(hh:mm)	(hh:mm)	(hh:mm)	(mg/m <sup>3</sup> N)	(mg/m <sup>3</sup> N)	(mg/m <sup>3</sup> N)	(mg/m <sup>3</sup> N) <sup>2</sup>
1	03-05-2016	16:42	17:02	16:43	17:03	420,2	418,6	1,6	2,7
2	03-05-2016	17:42	18:02	17:43	18:03	435,5	440,0	-4,5	20,6
3	03-05-2016	18:39	18:59	18:40	19:00	421,6	429,9	-8,3	68,1
4	04-05-2016	9:55	10:15	9:56	10:16	430,3	435,7	-5,4	29,1
5*	04-05-2016	11:05	11:25	11:06	11:26	431,0	443,4	-12,4	154,8
6*	04-05-2016	12:26	12:46	12:27	12:47	--	463,8	--	--
7	04-05-2016	13:36	13:56	13:37	13:57	477,0	469,7	7,3	53,6
8*	04-05-2016	14:40	15:00	14:41	15:01	479,8	461,8	18,0	324,2
9	04-05-2016	16:21	16:41	16:22	16:42	451,0	453,2	-2,2	4,6
10	05-05-2016	10:36	10:56	10:37	10:57	396,0	401,8	-5,8	33,6
11	05-05-2016	11:47	12:07	11:48	12:08	427,0	430,1	-3,1	9,5
12	05-05-2016	12:50	13:10	12:51	13:11	399,1	392,8	6,3	39,5
						sumas =			
								2,4	582,8
						MR promedio=	435,3	dif promedio=	0,3
								Sd =	8,53
								CC=	6,6
								ER (%) =	1,6
						Ecuación 5			

Nota : " \* " son los valores excluidos según PS 2

Se verifica cumplimiento de límite aceptable de ER para NO<sub>x</sub> de acuerdo al criterio cumplimiento de la Ecuación 5 del Protocolo (**resultado 1,6% ≤ 20%**).

Para el caso del SO<sub>2</sub>, el tiempo máximo de respuesta del CEMS fue de 4 (min) y para el caso de la Entidad de Inspección fue de 2 (min), resultando un desfase de 4-2=2 (min), por lo tanto, para la comparación de los registros en una misma ventana de tiempo, se tomaron los registros del CEMS 2 minutos después del tiempo indicado en la ejecución del Método de Referencia.

Tabla 8: Resultados de ER del Método de Referencia v/s CEMS para SO<sub>2</sub>.

Medición Nº	Fecha	Hora Inicio MR	Hora Término MR	Hora Inicio CEMS	Hora Término CEMS	SO <sub>2</sub>			
						Método Referencia MR <sub>i</sub>	CEMS RCEM <sub>i</sub>	Diferencia d <sub>i</sub>	Diferencia <sup>2</sup> (d <sub>i</sub> ) <sup>2</sup>
	(dd/mm/aaaa)	(hh:mm)	(hh:mm)	(hh:mm)	(hh:mm)	(mg/m <sup>3</sup> N)	(mg/m <sup>3</sup> N)	(mg/m <sup>3</sup> N)	(mg/m <sup>3</sup> N) <sup>2</sup>
1	03-05-2016	16:42	17:02	16:44	17:04	319,0	319,0	0,0	0,0
2	03-05-2016	17:42	18:02	17:44	18:04	321,5	331,5	-10,0	100,6
3*	03-05-2016	18:39	18:59	18:41	19:01	323,1	334,9	-11,8	139,1
4	04-05-2016	9:55	10:15	9:57	10:17	289,4	296,9	-7,5	55,6
5	04-05-2016	11:05	11:25	11:07	11:27	281,9	290,4	-8,5	72,7
6*	04-05-2016	12:26	12:46	12:28	12:48	--	276,5	--	--
7	04-05-2016	13:36	13:56	13:38	13:58	302,1	302,2	-0,1	0,0
8*	04-05-2016	14:40	15:00	14:42	15:02	332,3	313,4	18,9	357,9
9	04-05-2016	16:21	16:41	16:23	16:43	374,9	371,2	3,7	13,3
10	05-05-2016	10:36	10:56	10:38	10:58	297,2	299,2	-2,0	3,8
11	05-05-2016	11:47	12:07	11:49	12:09	293,5	290,5	3,0	9,0
12	05-05-2016	12:50	13:10	12:52	13:12	312,7	305,7	7,0	49,3
						sumas =	1,2	728,8	
						MR promedio=	316,3	dif promedio=	0,1
								Sd =	9,54
								CC=	7,3
								ER (%) =	2,4
						Ecuación 5			

Nota : " \* " son los valores excluidos según PS 2

Se verifica cumplimiento de límite aceptable de ER para SO<sub>2</sub> de acuerdo al criterio cumplimiento de la Ecuación 5 del Protocolo (**resultado 2,4% ≤ 20%**).

Para el caso del CO<sub>2</sub>, el tiempo máximo de respuesta del CEMS fue de 2 (min) y para el caso de la Entidad de Inspección fue de 3 (min), resultando un desfase de 2-3=-1 (min), por lo tanto, para la comparación de los registros en una misma ventana de tiempo, se tomaron los registros del CEMS desde 1 minuto antes del horario indicado en la ejecución del Método de Referencia.



Tabla 9: Resultados de ER del Método de Referencia v/s CEMS para CO<sub>2</sub>.

Medición N°	Fecha	Hora Inicio MR	Hora Término MR	Hora Inicio CEMS	Hora Término CEMS	CO <sub>2</sub>			
						Método Referencia MR <sub>i</sub>	CEMS RCEM <sub>i</sub>	Diferencia d <sub>i</sub>	Diferencia <sup>2</sup> (d <sub>i</sub> ) <sup>2</sup>
						(%)	(%)	(%)	(%) <sup>2</sup>
1	03-05-2016	16:42	17:02	16:41	17:01	11,62	11,39	0,23	0,05
2	03-05-2016	17:42	18:02	17:41	18:01	11,38	11,11	0,27	0,07
3	03-05-2016	18:39	18:59	18:38	18:58	11,38	11,18	0,20	0,04
4	04-05-2016	9:55	10:15	9:54	10:14	11,82	11,60	0,22	0,05
5	04-05-2016	11:05	11:25	11:04	11:24	11,88	11,55	0,33	0,11
6	04-05-2016	12:26	12:46	12:25	12:45	11,43	11,16	0,27	0,07
7*	04-05-2016	13:36	13:56	13:35	13:55	11,96	11,27	0,69	0,48
8	04-05-2016	14:40	15:00	14:39	14:59	11,53	11,29	0,24	0,06
9*	04-05-2016	16:21	16:41	16:20	16:40	11,88	11,47	0,41	0,17
10*	05-05-2016	10:36	10:56	10:35	10:55	11,94	11,51	0,43	0,18
11	05-05-2016	11:47	12:07	11:46	12:06	11,44	11,15	0,29	0,08
12	05-05-2016	12:50	13:10	12:49	13:09	11,51	11,57	-0,06	0,00
						sumas =	2,6	1,1	
						MR promedio=	11,63	dif promedio=	0,29
								Sd =	0,20
								CC=	0,15
								ER (%) =	3,8
								ER (%) =	0,29

Nota : " \* " son los valores excluidos según PS 3

Se verifica cumplimiento de límite aceptable de ER para CO<sub>2</sub> tanto con la *Ecuación 5* (**resultado 3,8% ≤ 10%**), como con la *Ecuación 7* del Protocolo (**resultado 0,29% ≤ 1,0%**).

Para el caso del O<sub>2</sub>, el tiempo máximo de respuesta del CEMS fue de 2 (min) y para el caso de la Entidad de Inspección fue de 1 (min), resultando un desfase de 2-1=1 (min), por lo tanto, para la comparación de los registros en una misma ventana de tiempo, se tomaron los registros del CEMS desde 1 minuto después del horario indicado en la ejecución del Método de Referencia.

Tabla 10: Resultados de ER del Método de Referencia v/s CEMS para O<sub>2</sub>.

Medición Nº	Fecha	Hora Inicio MR	Hora Término MR	Hora Inicio CEMS	Hora Término CEMS	O <sub>2</sub>			
						Método Referencia MR <sub>i</sub>	CEMS RCEM <sub>i</sub>	Diferencia d <sub>i</sub>	Diferencia <sup>2</sup> (d <sub>i</sub> ) <sup>2</sup>
						(%)	(%)	(%)	(%) <sup>2</sup>
1	03-05-2016	16:42	17:02	16:43	17:03	7,80	7,85	-0,05	0,00
2	03-05-2016	17:42	18:02	17:43	18:03	8,10	8,28	-0,18	0,03
3	03-05-2016	18:39	18:59	18:40	19:00	8,07	8,30	-0,23	0,05
4	04-05-2016	9:55	10:15	9:56	10:16	7,52	7,85	-0,33	0,11
5*	04-05-2016	11:05	11:25	11:06	11:26	7,52	7,92	-0,40	0,16
6	04-05-2016	12:26	12:46	12:27	12:47	8,12	8,34	-0,22	0,05
7	04-05-2016	13:36	13:56	13:37	13:57	8,21	8,22	-0,01	0,00
8*	04-05-2016	14:40	15:00	14:41	15:01	8,90	8,21	0,69	0,48
9*	04-05-2016	16:21	16:41	16:22	16:42	8,86	7,82	1,04	1,08
10	05-05-2016	10:36	10:56	10:37	10:57	7,44	7,98	-0,54	0,29
11	05-05-2016	11:47	12:07	11:48	12:08	8,00	8,39	-0,39	0,15
12	05-05-2016	12:50	13:10	12:51	13:11	7,95	7,70	0,25	0,06
						sumas =	-0,8	1,9	
						MR promedio=	7,9	dif promedio=	-0,09
								Sd =	0,48
								CC=	0,37
								ER (%) =	5,8
								ER (%) =	0,09

Nota : " \* " son los valores excluidos según PS 3

Se verifica cumplimiento de límite aceptable de ER para O<sub>2</sub> tanto con la *Ecuación 5* (**resultado 5,8% ≤ 10%**), como con la *Ecuación 7* del Protocolo (**resultado 0,09% ≤ 1,0%**).

Para el caso del Flujo, el tiempo máximo de respuesta del CEMS fue de 2 (min) y para el caso de la Entidad de Inspección es instantáneo por tratarse de un método extractivo (min), resultando un desfase de 2-0=2 (min), por lo tanto, para la comparación de los registros en una misma ventana de tiempo, se tomaron los registros del CEMS desde 2 minutos después del horario indicado en la ejecución del Método de Referencia.

Tabla 11: Resultados de ER del Método de Referencia v/s CEMS para Flujo.

Medición Nº	Fecha	Hora Inicio MR	Hora Término MR	Hora Inicio CEMS	Hora Término CEMS	Flujo Volumétrico			
						Método Referencia MR <sub>i</sub>	CEMS RCM <sub>i</sub>	Diferencia d <sub>i</sub>	Diferencia <sup>2</sup> (d <sub>i</sub> ) <sup>2</sup>
						1000*(m <sup>3</sup> /h)	1000*(m <sup>3</sup> /h)	1000*(m <sup>3</sup> /h)	(1000*(m <sup>3</sup> /h)) <sup>2</sup>
1	03-05-2016	11:14	11:32	11:16	11:34	737	683	-54	2.962
2	03-05-2016	17:47	18:08	17:49	18:10	811	729	-82	6.775
3	03-05-2016	18:10	18:28	18:12	18:30	821	732	-89	7.845
4*	04-05-2016	10:25	10:45	10:27	10:47	782	663	-119	14.221
5	04-05-2016	10:50	11:11	10:52	11:13	794	709	-85	7.280
6	04-05-2016	11:38	11:56	11:40	11:58	806	730	-75	5.690
7	04-05-2016	12:00	12:16	12:02	12:18	810	733	-77	5.966
8*	04-05-2016	12:20	12:41	12:22	12:43	843	735	-107	11.544
9*	04-05-2016	13:17	13:35	13:19	13:37	823	721	-102	10.366
10	04-05-2016	14:54	15:12	14:56	15:14	799	712	-87	7.612
11	04-05-2016	15:17	15:35	15:19	15:37	746	723	-23	535
12	04-05-2016	15:39	15:58	15:41	16:00	787	718	-70	4.862
						sumas =			
						MR promedio= 792		-670	54.204
								dif promedio= -74,42	<b>Ecuación 5</b>
								Sd = 23,34	
								CC= 17,94	
								ER (%) = 11,7	

Nota : " \* " son los valores excluidos según PS 3

Se verifica cumplimiento de límite aceptable de ER para Flujo **Ecuación 5 (resultado 11,7% ≤ 20%)**,

### 4.3. Gráficos de cada parámetro evaluado.

A continuación se muestran los gráficos obtenidos a partir de los resultados presentados en el punto anterior. En ellos, se puede identificar para cada parámetro evaluado los resultados para cada corrida tanto del CEMS como del método de referencia.

Tabla 12: Concentraciones de  $\text{NO}_x$  medidas durante ER

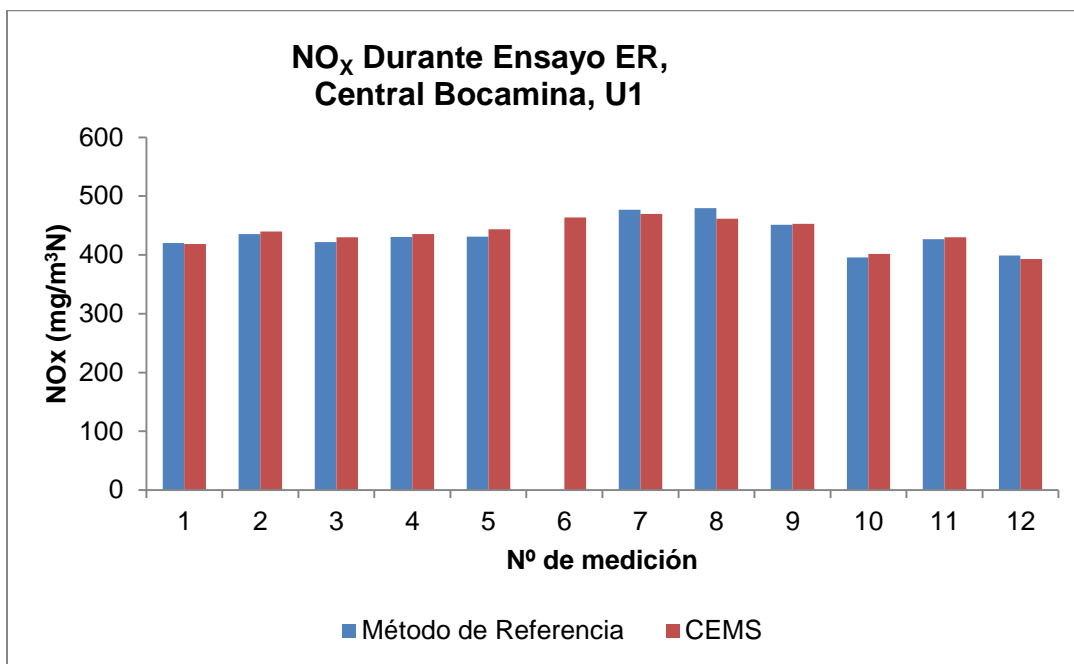


Tabla 13: Concentraciones de  $\text{SO}_2$  medidas durante ER

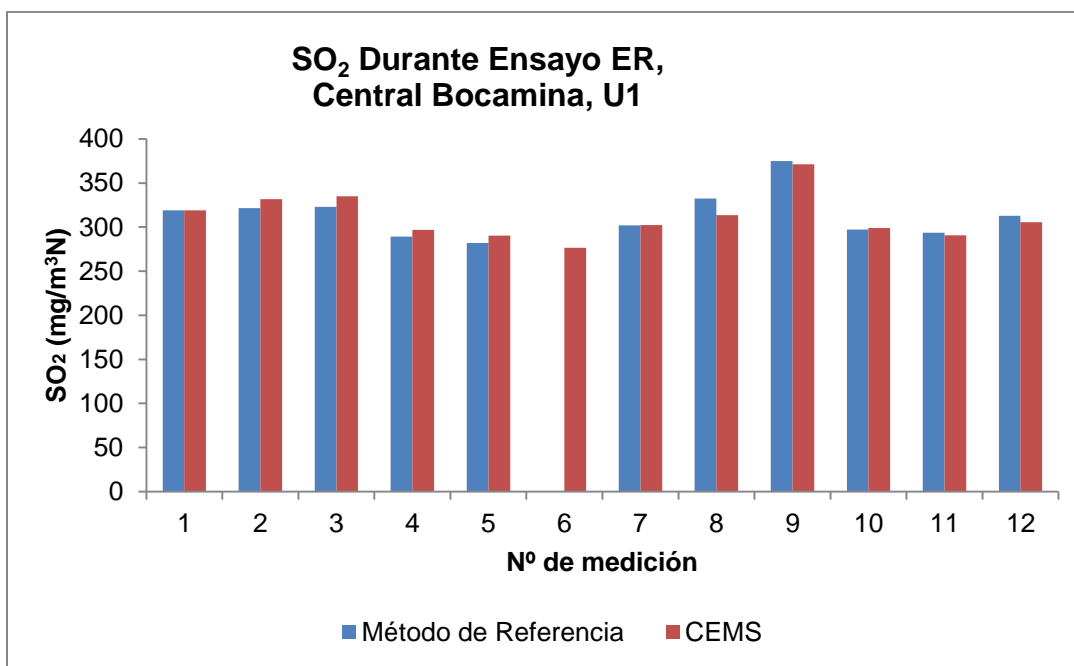


Tabla 14: Concentraciones de CO<sub>2</sub> medidas durante ER

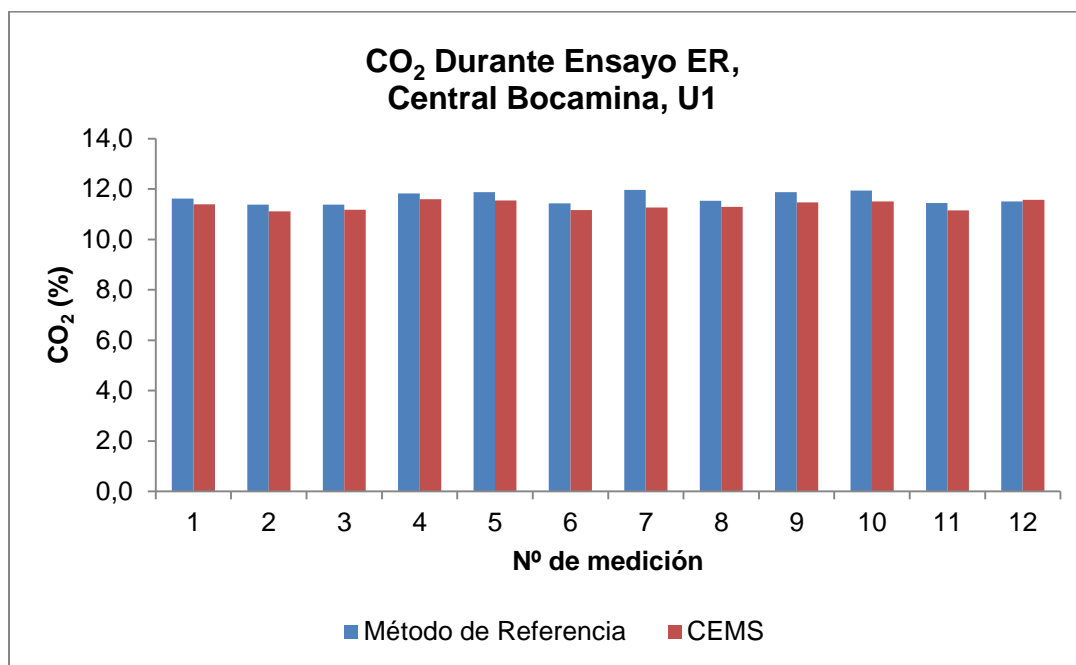


Tabla 15: Concentraciones de O<sub>2</sub> medidas durante ER

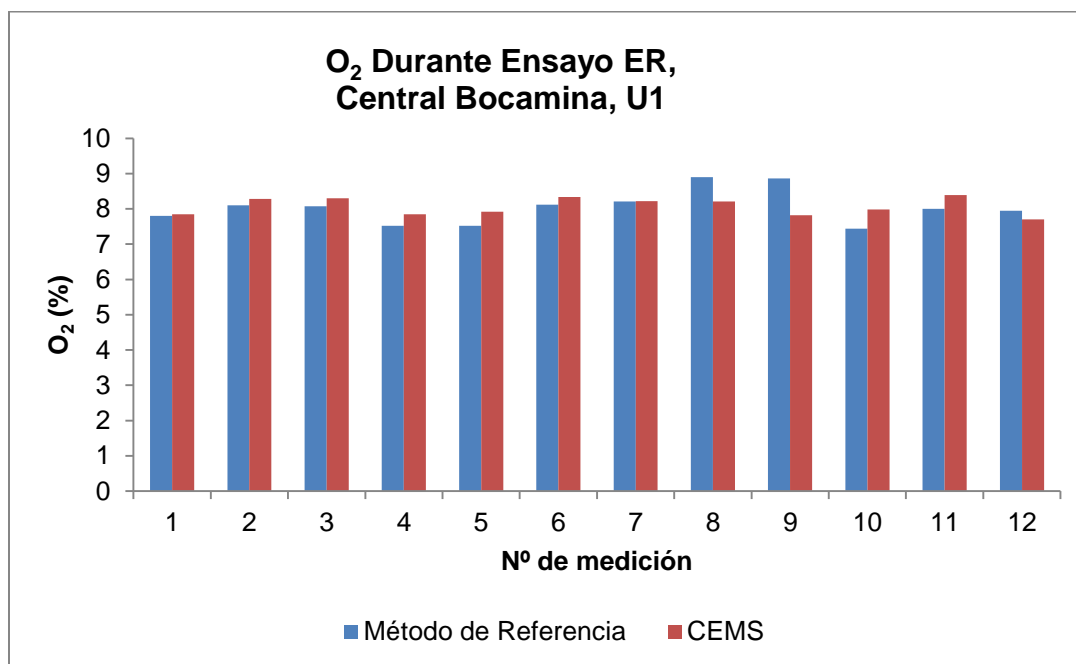
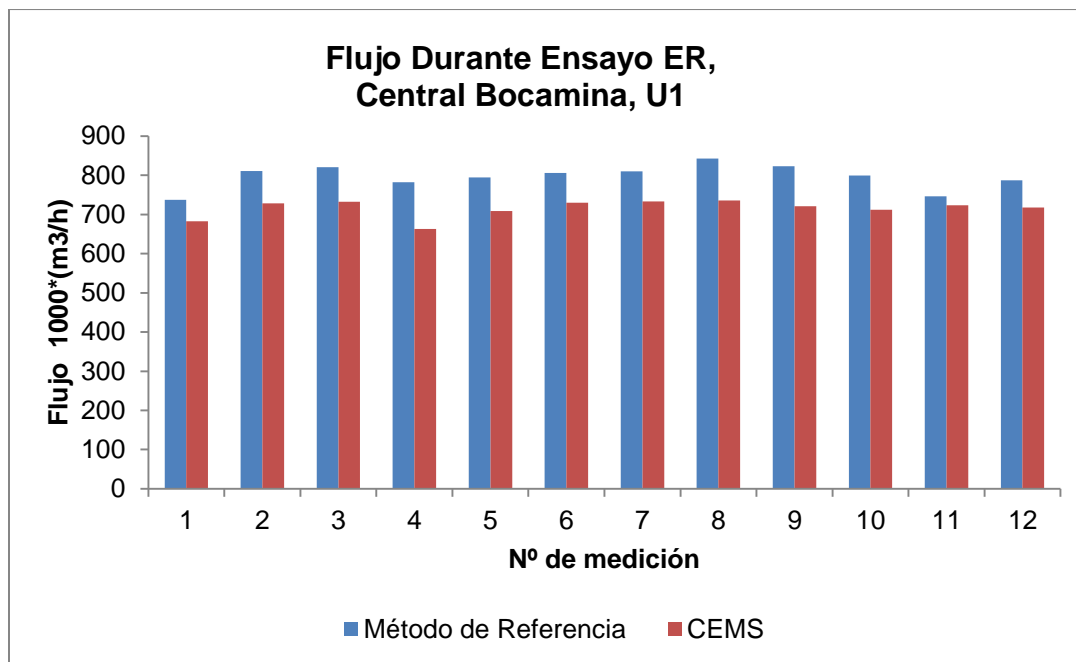


Tabla 16: Flujo medido durante ER



## 5. AUDITORÍA DE RESPUESTA RELATIVA (ARR)

### 5.1. Consideraciones

La sección 5.4.3 del Anexo III especifica tres criterios para que la Auditoría de Respuesta Relativa al CEMS-MP no sea aceptada y caiga en un periodo de fuera de Control:

- Si para alguno de los tres puntos de datos, el valor de la respuesta del CEMS-MP es mayor que el valor de respuesta más alto usado para desarrollar la curva de correlación.
- Si para dos de los tres puntos de datos, el valor de la respuesta de CEMS-MP está fuera del rango de salida del CEMS-MP usado para desarrollar la curva de correlación.
- Si para dos de las tres series de mediciones del CEMS-MP y método de referencia, caen fuera de la misma área especificada, de un gráfico de la recta de regresión de correlación, según lo requerido por la ACR (área especificada en un gráfico de la recta de regresión de correlación, definida por dos rectas paralelas a la curva dada por la correlación, separadas a una distancia de  $\pm 25\%$  del valor numérico posible de emitir, con respecto a la curva de correlación).

Para verificar lo anterior, se realizaron 3 corridas del método de referencia (CH-5) con la unidad operando en condición normal.

Los resultados obtenidos por el método de referencia, y los registros del CEMS para el periodo en que se llevaron a cabo las corridas, se compararon con los registros utilizados en la elaboración de la curva de correlación y así definir el cumplimiento de los criterios establecidos para la aceptación de la ARR. En el Anexo 3.2 se muestra el informe del método de referencia, y en el Anexo 5.1 del CD adjunto, los registros del CEMS-MP (aplicando TR de 1 minuto obtenido durante la validación).

Para la elaboración de la curva de correlación durante Marzo de 2014, se utilizaron los siguientes registros:

Tabla 17:: Valores utilizados para el desarrollo de la curva de correlación en marzo de 2014

	PM CEMS	PM concentration
	response	mg/m3
Run	x	y
1		
2	13,0	15,21510621
3	12,5	14,56002772
4	12,7	15,81928814
5	12,4	13,46652226
6		
7	12,6	13,81422095
8	12,6	13,52109388
9	13,6	14,88696711
10	15,7	17,23759407
11		
12		
13	15,1	17,44605812
14	16,5	17,59492644
15		
16	16,2	20,45249469
17	16,5	17,59367926
18	16,0	18,79750532
19	16,0	16,79078823
20	16,5	21,04171654
21	0,0	0,0

En esa oportunidad se utilizaron los registros del CEMS y del método de referencia dados en  $\text{mg/m}^3$ , en condiciones reales (temperatura, presión y humedad de chimenea), y se obtuvo la siguiente correlación potencial como el mejor modelo:

$$y = 1,1043x^{1,0108}$$

El valor más alto de respuesta del CEMS-MP para el desarrollo de la curva de correlación fue de  $16,5 \text{ mg/m}^3$ , y el rango de salida del CEMS-MP está entre  $0,001$  y  $16,5 \text{ mg/m}^3$ .

El área especificada en el tercer criterio para la aceptación de la ARR está dada por la siguiente inecuación:

$$1,1043x^{1,0108} - 0,25LE \leq y_{ARR} \leq 1,1043x^{1,0108} + 0,25LE$$

Donde:



$y_{ARR}$ : Concentración de MP medida por el Método de Referencia durante el ensayo de ARR

LE: Límite de emisión, que para el caso de la unidad 1 de la Central Bocamina corresponde a 32,7 mg/m<sup>3</sup> en condiciones reales (50 mg/m<sup>3</sup>N en condiciones normalizadas y a un 6% de O<sub>2</sub>).

Así se tiene que:

$$1,1043x^{1,0108} - 8,18 \leq y_{ARR} \leq 1,1043x^{1,0108} + 8,18$$

## 5.2. Resultados

A continuación se presentan los resultados del ensayo de ARR.

Tabla 18: Resultados obtenidos durante ARR

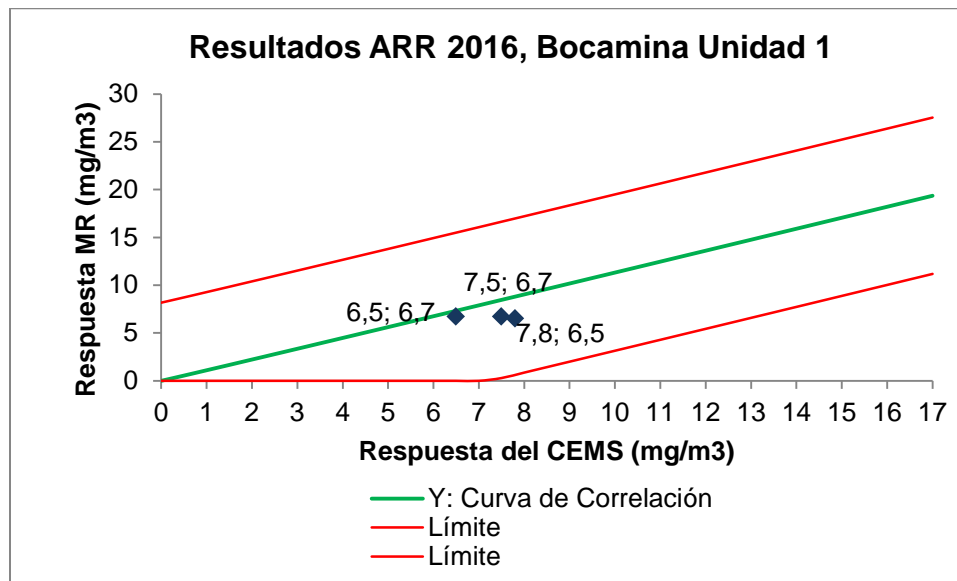
Corrida	Registros CEMS mg/m <sup>3</sup> N @ 6% O <sub>2</sub> x	Resultados MR mg/m <sup>3</sup> N @ 6% O <sub>2</sub> y <sub>ARR</sub>
1	7,8	6,5
2	7,5	6,7
3	6,5	6,7

De la Tabla 18 y los antecedentes entregados en la sección 5.1 se evidencia lo siguiente:

- Ninguno de los valores de respuesta del CEMS-MP está por encima de la respuesta del valor más alto de respuesta del CEMS-MP utilizado para el desarrollo de la curva de correlación en Marzo de 2014.
- Ninguno de los valores de repuesta del CEMS-MP está por fuera del rango de salida del CEMS-MP usado para desarrollar la curva de correlación.

En el Gráfico 1, se muestra el área para la verificación del tercer criterio de la ARR:

Gráfico 1: Resultado ARR



En el Gráfico 1 la línea verde corresponde a la curva de correlación, y las líneas rojas son el límite superior e inferior del área establecida en el Anexo 3. Dado que parte del límite inferior correspondía a valores negativos (físicamente imposibles de lograr), no aparece en este gráfico y se reemplazó por la recta  $y=0$ . Para mayores detalles ver el Archivo en Excel del Anexo 5.2:

- ARR Bocamina U1

De lo anterior se concluye que todos los puntos que se obtuvieron durante la ARR caen dentro del área dada por la curva de correlación  $\pm 25\%$  del límite aplicable, con lo que se puede concluir que la unidad 1 de la Central Bocamina cumple con todos los requisitos establecidos para aprobar la ARR. En la Tabla 187 se muestra un resumen con los criterios:

Tabla 19: Criterios Aprobación ARR

Condición Para Aprobar	Resultado
Para los tres puntos de datos, el valor de la respuesta del CEMS-MP debe ser menor que el valor de respuesta más alto usado para desarrollar la curva de correlación.	Cumple
Para al menos dos de los tres puntos de datos, el valor de la respuesta de CEMS-MP debe estar dentro del rango de salida del CEMS-MP usado para desarrollar la curva de correlación.	Cumple
Al menos dos de las tres series de mediciones del CEMS-MP y método de referencia, deben caer dentro de un área especificada en un gráfico de la recta de regresión de correlación, definida por dos rectas paralelas a la curva dada por la correlación, separadas a una distancia de $\pm 25\%$ del valor numérico posible de emitir, con respecto a la curva de correlación.	Cumple

## 6. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA FUENTE

Durante la ejecución de las auditorías para la validación anual del CEMS instalado en la chimenea de la unidad 1 de la Central Bocamina, se garantizó que la carga de operación fuese superior al 50% de la capacidad máxima de la unidad, tal como puede ser verificado en detalle en el anexo 2.

- Registros CEMS Promedio de Carga Bocamina U1 2016

En la Tabla 20 se resumen las condiciones promedio de carga durante el tiempo de ejecución de los ensayos de ER y ARR:

*Tabla 20: Generación durante Ensayo de ER y ARR*

Generación Unidad 1 Central Bocamina		
Día	Potencia (MW)	% de carga
03-05-2016	111,42	87,04
04-05-2016	119,89	93,66
05-05-2016	116,35	90,89

## 7. CONCLUSIONES

Sobre la base de los resultados obtenidos de la ejecución y análisis de los ensayos para gases en la unidad 1 de la Central Bocamina, se concluye lo siguiente:

Para los analizadores de gases ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ), Flujo y MP se verifica el cumplimiento de los límites aceptables establecidos en el Protocolo para los ensayos de Exactitud Relativa y Auditoría de Respuesta Relativa, respectivamente.

*Tabla 21: Resumen de cumplimiento de los ensayos de gases y flujo.*

Ensayo	$\text{NO}_x$	$\text{SO}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$	Flujo	Resultado
Exactitud Relativa (ER) <sup>(1)</sup>	1,6%	2,4%	0,29%	0,09%	11,7%	Aprueban

<sup>(1)</sup> En ER, los criterios de límites aceptables son: ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  y Flujo)  $\leq 20\%$ , ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ )  $\leq 1\%$

*Tabla 22: Resumen Criterios Aprobación ARR*

Condición Para Aprobar	Resultado
Para los tres puntos de datos, el valor de la respuesta del CEMS-MP debe ser menor que el valor de respuesta más alto usado para desarrollar la curva de correlación.	Cumple
Para al menos dos de los tres puntos de datos, el valor de la respuesta de CEMS-MP debe estar dentro del rango de salida del CEMS-MP usado para desarrollar la curva de correlación.	Cumple
Al menos dos de las tres series de mediciones del CEMS-MP y método de referencia, deben caer dentro de un área especificada en un gráfico de la recta de regresión de correlación, definida por dos rectas paralelas a la curva dada por la correlación, separadas a una distancia de $\pm 25\%$ del valor numérico posible de emitir, con respecto a la curva de correlación.	Cumple