



Mediciones

## INFORME OFICIAL



Laboratorio

## Informe de Resultados de los Ensayos de Validación (IREV)



Ingeniería

## Unidad 4

Guacolda Energía S.A.  
Huasco



Diagnóstico



Asesoría

03 de enero de 2017  
IREV02.E3.M-16-055



## **INFORME OFICIAL**

IREV02E3.M-16-055

Proyecto : **Informe de Resultados de los  
Ensayos de Validación (IREV)**

Fuente : Unidad 4

Empresa : Guacolda Energía S.A.

Jefe de Proyecto : Fernando Castillo Seguel

Fecha ensayos : De 28 de abril a 02 de diciembre de 2016

Fecha entrega  
Informe : 03 de enero de 2016

## ÍNDICE

1.	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE LA FUENTE .....	13
2.	CÁLCULOS Y RESULTADOS DE DESVIACIÓN DE CALIBRACIÓN.....	14
2.1.	Valores de Referencia .....	14
2.2.	Registro de Datos Durante el Ensayo de Desviación de Calibración .....	15
2.3.	Resumen de Registro de Mediciones .....	17
2.4.	Resumen de Resultados .....	18
2.5.	Gráficos de resultados.....	20
2.6.	Tiempos de Respuesta.....	23
2.6.1.	Procedimientos y resultados.....	23
2.6.2.	Respuestas gráficas de los Analizadores CEMS.....	24
3.	CÁLCULOS Y RESULTADOS DE DETERMINACIÓN DE “EL” .....	26
3.1.	Valores de Referencia .....	26
3.2.	Registro de Datos Durante el Ensayo de Error de Linealidad .....	26
3.3.	Resumen de Registro de Mediciones .....	28
3.4.	Resumen de Resultados .....	29
3.5.	Gráficos de resultados.....	30
4.	CÁLCULOS Y RESULTADOS DE VERIFICACIÓN DE “ER” .....	31
4.1.	Valores de Referencia .....	31
4.2.	Resumen de Registro de Mediciones .....	32
4.3.	Resumen de Resultados .....	34
4.4.	Gráficos de resultados.....	36
5.	CÁLCULOS Y RESULTADOS DE ENSAYO MARGEN DE ERROR .....	39
5.1.	Valores de Referencia .....	39
5.2.	Resumen de Registro de Mediciones .....	39
5.3.	Resumen de Resultados .....	40
5.4.	Gráficos de resultados.....	41
6.	CÁLCULOS Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORRELACIÓN .....	42



6.1.	Valores de Referencia .....	42
6.2.	Resumen de Registro de Mediciones .....	43
6.3.	Resumen de Resultados .....	44
6.4.	Gráfico de Resultados .....	45
7.	COEF DE CORRELACIÓN, INT. DE CONFIANZA Y TOLERANCIA .....	46
8.	CÁLC. Y RESUL. ENSAYOS PARA SISTEMAS OPACÍMETROS (COMS) ....	48
8.1.	Prueba de funcionamiento y auditoria de campo.....	48
8.1.1.	Evaluación de Alineación Óptica .....	48
8.1.2.	Chequeo de Error de Calibración .....	48
8.1.3.	Chequeo de Tiempo de respuesta del sistema .....	51
8.1.4.	Cálculo de período de promedio y chequeo de registros.....	52
8.2.	Período de prueba operacional.....	53
9.	CONDICIONES DE OP. Y PLANOS DE UBICACIÓN DE LOS CEMS .....	55
9.1.	Condiciones operaciones .....	55
9.2.	Ubicaciones de Caseta CEMS.....	55
9.3.	Ubicación de los puntos de muestreo.....	56
10.	CONCLUSIONES .....	57

## **ANEXOS**

Anexo 1: Planillas Terreno MRT - FLUJO

Anexo 2: Calibración Gases Continuos

Anexo 3: Planillas Terreno CEMS

Anexo 4: Análisis Resultados Método de Referencia MPT - FLUJO

Anexo 5: Certificados de gases patrones y valores de referencia

Anexo 6: Certificados de calibración de equipos e instrumentos

Anexo 7: Registro de Datos CEMS

Anexo 8: Certificación Proterm S.A.

Anexo 9: Fecha Ejecución Ensayos

Anexo 10: Respuesta SMA

Anexo 11: Declaraciones Juradas

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico de desviación diaria de NO <sub>x</sub> .	20
Figura 2: Gráfico de desviación diaria de SO <sub>2</sub> .	20
Figura 3: Gráfico de desviación diaria de CO <sub>2</sub> .	21
Figura 4: Gráfico de desviación diaria de O <sub>2</sub> .	21
Figura 5: Gráfico de desviación diaria de Flujo.	22
Figura 6: Tiempos de respuesta de NO <sub>x</sub> .	24
Figura 7: Tiempos de respuesta de SO <sub>2</sub> .	25
Figura 8: Tiempos de respuesta de CO <sub>2</sub> .	25
Figura 9: Tiempos de respuesta de O <sub>2</sub> .	25
Figura 10: Gráfico Error de Linealidad NO <sub>x</sub> y SO <sub>2</sub> .	30
Figura 11: Gráfico Error de Linealidad CO <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> .	30
Figura 12: Corridas de Exactitud Relativa de NO <sub>x</sub> .	36
Figura 13: Corridas de Exactitud Relativa de SO <sub>2</sub> .	37
Figura 14: Corridas de Exactitud Relativa de CO <sub>2</sub> .	37
Figura 15: Corridas de Exactitud Relativa de O <sub>2</sub> .	38
Figura 16: Corridas de Exactitud Relativa de Flujo.	38
Figura 17: Gráfico de desviación diaria de CEMS-MP.	41
Figura 18: Gráfico de resultados de corridas para correlación.	45
Figura 19: Gráfico de curva de regresión.	47
Figura 20: Alineación de COMS.	48
Figura 21: Gráfico de Error de Calibración de COMS.	49
Figura 22: Ubicación de caseta CEMS en planta.	55

Figura 23: Esquema de chimenea y puertos de muestreo.....	56
---	----

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resultados de Ensayos de Validación del CEMS.....	9
Tabla 2. Equipos CEMS actualmente en operación.....	11
Tabla 3. Antecedentes ETFA e Inspector Ambiental.....	12
Tabla 4: Valores de Referencia para Desviación de Calibración. ....	14
Tabla 5: Registros de la inyección de Gas SO <sub>2</sub> - NO <sub>x</sub> .....	15
Tabla 6: Registros de la inyección de gas mezcla CO <sub>2</sub> - O <sub>2</sub> .....	15
Tabla 7: Registros de señales de Flujo. ....	16
Tabla 8: Resumen de mediciones del ensayo de DC Gases. ....	17
Tabla 9: Resumen de mediciones del ensayo de DC Flujo.....	17
Tabla 10: Resumen de resultados del ensayo de DC Gases.....	18
Tabla 11: Resumen de resultados del ensayo de DC Flujo. ....	19
Tabla 12: Límites de Aprobación de Desviación de la Calibración.....	19
Tabla 13: Tiempos de Respuesta de Analizadores CEMS.....	23
Tabla 14: Valores de referencia ensayo de Error de Linealidad.....	26
Tabla 15: Registros de Error de Linealidad de NO <sub>x</sub> . ....	26
Tabla 16: Registros de Error de Linealidad de SO <sub>2</sub> .....	27
Tabla 17: Registros de Error de Linealidad de CO <sub>2</sub> . ....	27
Tabla 18: Registros de Error de Linealidad de O <sub>2</sub> . ....	28
Tabla 19: Resumen de Mediciones del ensayo de Error de Linealidad. ....	28
Tabla 20: Resultados ensayo de Error de Linealidad.....	29



Tabla 21: Límites aceptables de Error de Linealidad. ....	29
Tabla 22: Analizadores Continuos Proterm S.A. ....	31
Tabla 23: Resumen de Mediciones de Exactitud Relativa de Gases. ....	32
Tabla 24: Resumen de Mediciones de Exactitud Relativa de Flujo.....	33
Tabla 25: Resumen de Resultados de Exactitud Relativa.....	34
Tabla 26: Límites de Aprobación de Exactitud Relativa. ....	35
Tabla 27: Valores de referencia Margen de Error. ....	39
Tabla 28: Resumen de mediciones de Margen de Error. ....	39
Tabla 29: Resumen de Resultados de Margen de Error. ....	40
Tabla 30: Resumen de mediciones del Ensayo de Correlación.....	43
Tabla 31: Corridas seleccionadas para Ensayo de Correlación.....	44
Tabla 32: Valores de evaluación de las correlaciones. ....	46
Tabla 33: Valores de referencia para COMS (atenuadores). ....	48
Tabla 34: Resumen de mediciones de Error de Calibración de COMS.....	49
Tabla 35: Resumen de mediciones de Error de Calibración de COMS.....	50
Tabla 36: Tiempos de respuesta de COMS. ....	51
Tabla 37: Lectura promedio de atenuadores.....	52
Tabla 38: Valores de referencia de Período de Prueba Operacional. ....	53
Tabla 39: Resumen de registros de Período operacional. ....	53
Tabla 40: Resultados de Error de Desviación de Calibración. ....	54
Tabla 41: Punto de Muestreo. ....	56





## **RESUMEN EJECUTIVO**

Guacolda Energía S.A., ubicada en la Península de Guacolda, Comuna de Huasco, Región de Atacama, solicitó a Proterm S.A. realizar ensayos de validación de sus analizadores CEMS de Gases (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>), Flujo y Material Particulado instalados en Chimenea de la Unidad 4 de la Central Termoeléctrica.

La validación de estos equipos se basó en los procedimientos establecidos en el PROTOCOLO PARA VALIDACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO CONTINUO DE EMISIONES “CEMS” EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS y de acuerdo a Resolución Exenta N°57/2013 de la Superintendencia de Medio Ambiente, en el que se especifican los ensayos a ejecutar en el proceso de validación. En la Tabla 1 se presenta un resumen del resultado final obtenido en cada uno de los ensayos realizados:

**Tabla 1: Resultados de Ensayos de Validación del CEMS.**

ENSAYOS	ANALIZADORES						
	GASES				Flujo	COMS	CEMS MP
	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>			
Desviación de la Calibración	Aprobado	Aprobado	Aprobado	Aprobado	Aprobado	—	—
Error de linealidad	Aprobado	Aprobado	Aprobado	Aprobado	—	—	—
Exactitud Relativa	Aprobado	Aprobado	Aprobado	Aprobado	Aprobado	—	—
Pruebas de Funcionamiento y Auditoría de Campo	—	—	—	—	—	Aprobado	—
Período de Prueba Operacional	—	—	—	—	—	Aprobado	—
Margen de Error	—	—	—	—	—	—	Aprobado
Ensayo de Curva de Correlación	—	—	—	—	—	—	Aprobado



Según lo informado en aviso “AEEV02.E2-M-16-055”, se realizaron los ensayos de validación a los CEMS de Material Particulado, Flujo y Gases como si fuera la primera vez, debido a la instalación de nuevo sistema de abatimiento<sup>1</sup> de emisiones en la Unidad 4.

De acuerdo a lo informado en “AEEV02.E3-M-16-055”, los resultados de los Ensayos de Validación para el CEMS de Material Particulado realizados en mayo de 2016 reportaron valores fuera de los parámetros exigidos para su aprobación.

Posterior a los ensayos en terreno, se identificó que durante la ejecución de las mediciones la unidad de control de emisiones, tipo filtro de mangas, no se encontraba en condiciones normales de operación, lo que invalidó los resultados de Correlación de CEMS-MP. Los resultados de la totalidad de los ensayos realizados a los CEMS de la Unidad 4 serán informados una vez concluidos los ensayos de validación de CEMS-MP y serán incluidos en IREV de la unidad.

Los ensayos fueron realizados entre el 28 de abril y el 02 de diciembre de 2016.

---

<sup>1</sup> Instalación de Filtro de Mangas y Desulfurizador (FGD)



A continuación se presenta una descripción de los equipos que conforman el sistema CEMS sometido a las pruebas de validación y que fueron informados en IPV de la unidad entregado en la SMA el 20 de abril de 2016 con carta conductora VPO-DMA-048-2016.

**Tabla 2. Equipos CEMS actualmente en operación.**

Parámetro	Marca	Modelo	Principio funcionamiento	Nº Serie	Rango
MP <sup>2</sup>	DURAG	D-R 290	Atenuación de Luz con doble haz alterno	1201872	0 – 0,3 O.D. 0 – 30 O.P.
Sonda	M&C	SP-2000H	—	20755 / 2041543	—
Acondicionador de Muestra	M&C	EC/L	—	13060060 / 2041543-5	—
SO <sub>2</sub>	ABB	AO2020	NDIR	3.350170.3	0 - 300 ppm
NO <sub>x</sub>			NDIR		0 - 80 ppm
CO <sub>2</sub>			NDIR		0 - 20 %
O <sub>2</sub>			Electroquímico	85666J-A	0 - 20 %
Flujo volumétrico	DURAG	D-FL 200	Ultrasonido	1235924	0 – 30 m/s
Sistema DAHS	Siemens	Simatic S7-300	—	—	—

<sup>2</sup> El Analizador de Material Particulado corresponde a un COMS que reporta resultados en Opacidad (%) y en valores de Atenuación (O.D.)





En la siguiente tabla presenta información de la Entidad Técnica de Fiscalización ambiental (ETFA) y de los Inspectores Ambientales responsables de la medición.

**Tabla 3. Antecedentes ETFA e Inspector Ambiental.**

ETFA	PROTERM S.A.
Representante Legal	Manfred Hellwig Franckenhoff
Código ETFA	014-01
Inspector Ambiental	Daniel Burgos Pedraza Fernando Castillo Seguel
Código Inspector Ambiental	12.363.252-4 / 20455 13.952.182-k / 20630
Digitador	Jorge Becerra Hormazábal
Equipo de Medición	DGM
Nº interno equipo / Nº Registro ISP <sup>3</sup>	ESC C-5102 DBL / ISP-MS-15-05 ESC 5102 ISP-MS-15-06
Fecha última calibración	13 de julio de 2015 29 de julio de 2016
Nº corridas	Flujo:12 MPT: 20 Gases:12
Método(s) utilizados(s)	CH 2, 4, 3A, 5, 6C y 7E
Tipo de fuente	Puntual

De acuerdo a los resultados obtenidos e indicados a través de este informe, los CEMS de Material Particulado, Gases y Flujo, instalados en Chimenea de la Unidad 4, cumplen satisfactoriamente con todos los ensayos requeridos para su validación.

  
Mauricio Mera Araya  
Ingeniero Civil Mecánico  
Subgerente de Mediciones  
Proterm S.A.

  
Fernando Castillo Seguel  
Inspector Ambiental  
Jefe de Proyectos  
Proterm S.A.

<sup>3</sup> Ver certificados en Anexo 6



## **1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE LA FUENTE**

Guacolda Energía S.A., se encuentra ubicada en la Península de Guacolda, comuna de Huasco, Región de Atacama. Posee 5 Unidades con una potencia bruta total instalada de aproximadamente 760 MW, la que es generada a través de Turbinas a vapor.

La Unidad 4 utiliza como combustible carbón bituminoso y sub-bituminoso. El Carbón Mineral es pulverizado y conducido a los quemadores de cada Caldera a través de redes neumáticas. Posteriormente, los gases de combustión generados en los quemadores transfieren la energía térmica al agua de circulación generando vapor sobrecalentado a alta presión. Este vapor es utilizado por la turbina, que a través de su potencia mecánica transfiere la energía al generador eléctrico.

Para mitigar las emisiones a la atmósfera producto de la combustión del carbón mineral, la Unidad 4 cuenta con sistema de captación de Material Particulado, Dióxido de Azufre y Óxidos de Nitrógeno del tipo Filtro de Mangas, Fuel Gas Desulfurization (FGD) y Selective Catalytic Reduction (SCR), respectivamente.



## 2. **CÁLCULOS Y RESULTADOS DE DESVIACIÓN DE CALIBRACIÓN**

### 2.1. **Valores de Referencia**

Para la realización de los ensayos de Desviación de Calibración de los parámetros NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> se utilizaron cilindros EPA-Protocol, de acuerdo a las concentraciones y descripciones indicadas en la siguiente tabla:

**Tabla 4: Valores de Referencia para Desviación de Calibración.**

<b>CEMS</b>		<b>Nivel Cero</b>	<b>Botella Utilizada</b>	<b>Nivel Alto</b>	<b>Botella Utilizada</b>
<b>Gases</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	0 ppm	CC474931	71,3 ppm	CC474992
	<b>SO<sub>2</sub></b>	0 ppm	CC474931	267,0 ppm	CC474992
	<b>O<sub>2</sub></b>	0%	CC474992	18,37 %	CC474931
	<b>CO<sub>2</sub></b>	0%	CC474992	17,91 %	CC474931
<b>Flujo</b>		0 m/s	No aplica	21,0 m/s	No aplica

Los certificados de preparación y análisis de cada una de las botellas utilizadas se encuentran en el anexo 5.

Los valores de referencia para el parámetro flujo corresponden a una señal electrónica generada internamente por el equipo.



## 2.2. Registro de Datos Durante el Ensayo de Desviación de Calibración

En las siguientes tablas se detallan los tiempos en que se realizaron las inyecciones de cada uno de los gases de referencia, señales de flujo y los valores almacenados en el registrador de datos e indicados en el anexo 7.

**Tabla 5: Registros de la inyección de Gas SO<sub>2</sub> - NO<sub>x</sub>.**

Inyección de SO <sub>2</sub> - NO <sub>x</sub>							
Día	Fecha	Hora		Respuesta CEMS			
		Inicio	Fin	Nivel Span		Nivel Cero	
				SO <sub>2</sub> [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [%]	O <sub>2</sub> [%]
1	28/04/2016	7:58	8:03	266,02	70,63	0,05	-0,02
2	29/04/2016	7:58	8:03	266,25	70,70	0,05	-0,03
3	30/04/2016	7:58	8:03	266,25	70,55	0,05	-0,02
4	01/05/2016	7:58	8:03	265,55	70,55	0,05	-0,02
5	02/05/2016	7:58	8:03	265,78	70,55	0,05	-0,02
6	03/05/2016	7:58	8:03	265,78	70,63	0,05	-0,02
7	04/05/2016	7:58	8:03	266,02	70,55	0,05	-0,03

**Tabla 6: Registros de la inyección de gas mezcla CO<sub>2</sub> - O<sub>2</sub>.**

Inyección de CO <sub>2</sub> - O <sub>2</sub>							
Día	Fecha	Hora		Respuesta CEMS			
		Inicio	Fin	Nivel Span		Nivel Cero	
				CO <sub>2</sub> [%]	O <sub>2</sub> [%]	NO <sub>x</sub> [ppm]	SO <sub>2</sub> [ppm]
1	28/04/2016	7:52	7:57	17,99	18,25	-2,42	0,00
2	29/04/2016	7:52	7:57	18,00	18,30	-2,34	0,00
3	30/04/2016	7:52	7:57	17,98	18,17	-2,58	0,00
4	01/05/2016	7:52	7:57	18,00	18,25	-2,42	0,00
5	02/05/2016	7:52	7:57	17,97	18,27	-2,42	0,00
6	03/05/2016	7:52	7:57	18,00	18,25	-2,42	0,00
7	04/05/2016	7:52	7:57	18,00	18,25	-2,50	0,23



**Tabla 7: Registros de señales de Flujo.**

Señal de Flujo				
Día	Fecha	Hora <sup>4</sup>	Respuesta CEMS Flujo	
			Nivel Cero	Nivel Span
1	28/04/2016	10:50 – 10:54	-0,06 m/s	20,89 m/s
2	29/04/2016	10:49 – 10:53	-0,05 m/s	20,91 m/s
3	30/04/2016	10:49 – 10:53	-0,04 m/s	20,57 m/s
4	01/05/2016	10:49 – 10:53	-0,06 m/s	20,87 m/s
5	02/05/2016	10:48 – 10:52	-0,05 m/s	20,89 m/s
6	03/05/2016	10:48 – 10:52	-0,06 m/s	20,90 m/s
7	04/05/2016	10:47 – 10:51	-0,05 m/s	20,90 m/s

<sup>4</sup> Existe una diferencia mínima entre la hora del registrador de datos y el CEMS de Flujo, por esta razón el ensayo realizado en forma automática presenta una variación de 1 minuto en la ejecución diaria del ensayo de DC.





### 2.3. Resumen de Registro de Mediciones

En las siguientes tablas se muestran los valores obtenidos en cada una de las mediciones realizadas durante el ensayo de Desviación de Calibración al CEMS de gases y de flujo durante los 7 días de ensayo.

**Tabla 8: Resumen de mediciones del ensayo de DC Gases.**

Día	Fecha	NO <sub>x</sub> [ppm]		SO <sub>2</sub> [ppm]		O <sub>2</sub> [%]		CO <sub>2</sub> [%]	
		Cero	Span	Cero	Span	Cero	Span	Cero	Span
1	28/04/2016	-2,42	70,63	0,00	266,02	-0,02	18,25	0,05	17,99
2	29/04/2016	-2,34	70,70	0,00	266,25	-0,03	18,30	0,05	18,00
3	30/04/2016	-2,58	70,55	0,00	266,25	-0,02	18,17	0,05	17,98
4	01/05/2016	-2,42	70,55	0,00	265,55	-0,02	18,25	0,05	18,00
5	02/05/2016	-2,42	70,55	0,00	265,78	-0,02	18,27	0,05	17,97
6	03/05/2016	-2,42	70,63	0,00	265,78	-0,02	18,25	0,05	18,00
7	04/05/2016	-2,50	70,55	0,23	266,02	-0,03	18,25	0,05	18,00

**Tabla 9: Resumen de mediciones del ensayo de DC Flujo.**

Día	Fecha	Flujo de Gases	
		Cero	Span
1	28/04/2016	-0,06 m/s	20,89 m/s
2	29/04/2016	-0,05 m/s	20,91 m/s
3	30/04/2016	-0,04 m/s	20,57 m/s
4	01/05/2016	-0,06 m/s	20,87 m/s
5	02/05/2016	-0,05 m/s	20,89 m/s
6	03/05/2016	-0,06 m/s	20,90 m/s
7	04/05/2016	-0,05 m/s	20,90 m/s

Los registros de las lecturas de los CEMS se encuentran en el anexo 7.



El ensayo de DC para Gases fue realizado diariamente en forma automática.

Los ensayos de Desviación de Calibración de gases fueron realizados con una generación eléctrica de la Central mayor al 50% del valor nominal de 152 MW bruta. Los registros de potencia se encuentran incluidos en los registros de cada uno de los ensayos.

En el caso de Desviación de Calibración de Flujo, los ensayos fueron realizados con una generación inferior al 50% de su capacidad nominal previamente autorizado por la SMA, en consideración de que estos ensayos no son vinculantes de la carga a la cual opere la fuente. Como respaldo, se adjunta mail de autorización enviado por la SMA, ver anexo 10.

## 2.4. Resumen de Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos al calcular la desviación de la calibración de cada una de las mediciones diarias realizadas para los distintos parámetros.

**Tabla 10: Resumen de resultados del ensayo de DC Gases.**

Día	Fecha	NO <sub>x</sub> [ppm]		SO <sub>2</sub> [%]		CO <sub>2</sub> [%]		O <sub>2</sub> [%]	
		Cero	Span	Cero	Span	Cero	Span	Cero	Span
1	28/04/2016	2,42	0,67	0,00	0,33	0,05	0,08	0,02	0,12
2	29/04/2016	2,34	0,60	0,00	0,25	0,05	0,09	0,03	0,07
3	30/04/2016	2,58	0,75	0,00	0,25	0,05	0,07	0,02	0,20
4	01/05/2016	2,42	0,75	0,00	0,48	0,05	0,09	0,02	0,12
5	02/05/2016	2,42	0,75	0,00	0,41	0,05	0,06	0,02	0,10
6	03/05/2016	2,42	0,67	0,00	0,41	0,05	0,09	0,02	0,12
7	04/05/2016	2,50	0,75	0,08	0,33	0,05	0,09	0,03	0,12

**Tabla 11: Resumen de resultados del ensayo de DC Flujo.**

Día	Fecha	Desviación de Calibración Flujo	
		Cero	Span
1	28/04/2016	0,20 %	0,37 %
2	29/04/2016	0,17 %	0,30 %
3	30/04/2016	0,13 %	1,43 %
4	01/05/2016	0,20 %	0,43 %
5	02/05/2016	0,17 %	0,37 %
6	03/05/2016	0,20 %	0,33 %
7	04/05/2016	0,17 %	0,33 %

Para el cálculo de la Desviación de Calibración del CEMS de Flujo y SO<sub>2</sub> se utilizó la ecuación N°1 del “Protocolo” y para los parámetros NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> se utilizó la ecuación N°2 del mismo documento. Los cálculos se encuentran en [\\CálculosdeEnsayos\01Gases\Gases](#) para gases y en [\\CálculosdeEnsayos\02Flujo\Flujo](#) para Flujo. Estos archivos Excel están disponibles en CD adjunto de IREV.

Considerando los criterios de cálculos para DC indicados en párrafo anterior se presenta Tabla 11 con los valores límites utilizados para la aprobación de cada uno de los parámetros:

**Tabla 12: Límites de Aprobación de Desviación de la Calibración.**

Parámetro	Valor Límite
NO <sub>x</sub>	≤ 5 ppm de NO <sub>x</sub>
SO <sub>2</sub>	≤ 2,5% del Span de SO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub>	± 0,5% de CO <sub>2</sub>
O <sub>2</sub>	± 0,5% de O <sub>2</sub>
Flujo	± 3% del Span

Con los resultados anteriormente descritos en Tablas 10 y 11 y comparados con los valores límites indicados en Tabla 12, se procede a aprobar los ensayos de Desviación de Calibración a analizador de gases para los parámetros SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> marca ABB, modelo AO2020, N° de Serie 3.350170.3 / 85666J-A y Flujo marca Durag, modelo D-FL 200, N° de Serie 1235924.



## 2.5. Gráficos de resultados

A continuación se muestran los resultados de Desviación de Calibración para Cero y Span en forma gráfica para cada uno de los parámetros ensayados:

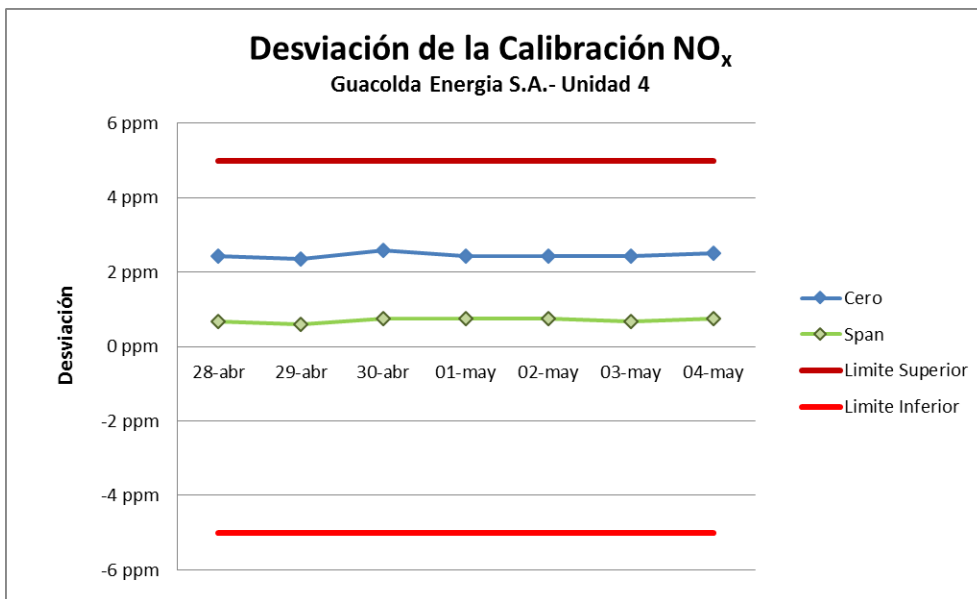


Figura 1: Gráfico de desviación diaria de NO<sub>x</sub>.

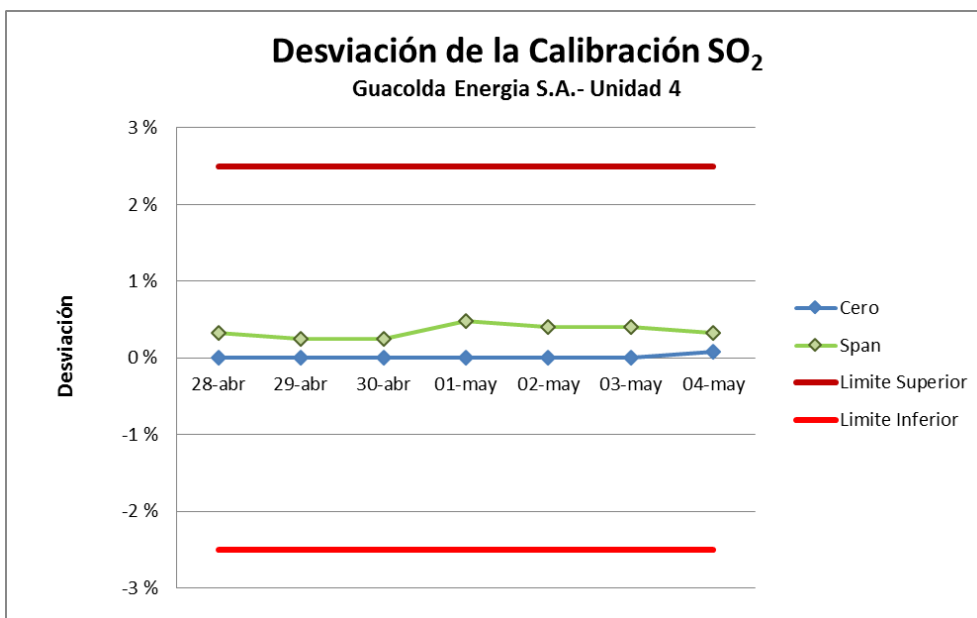


Figura 2: Gráfico de desviación diaria de SO<sub>2</sub>.

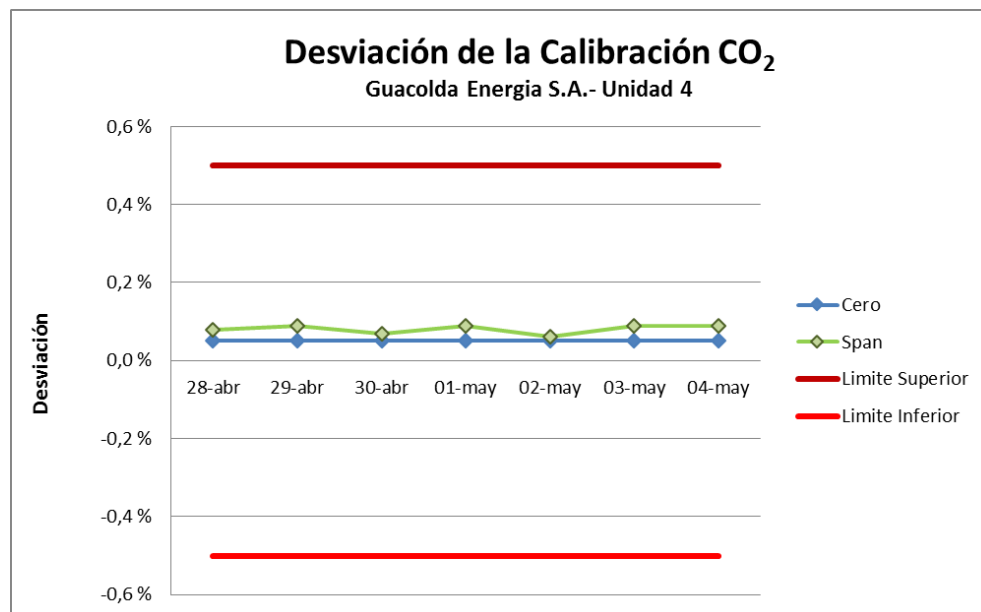


Figura 3: Gráfico de desviación diaria de CO<sub>2</sub>.

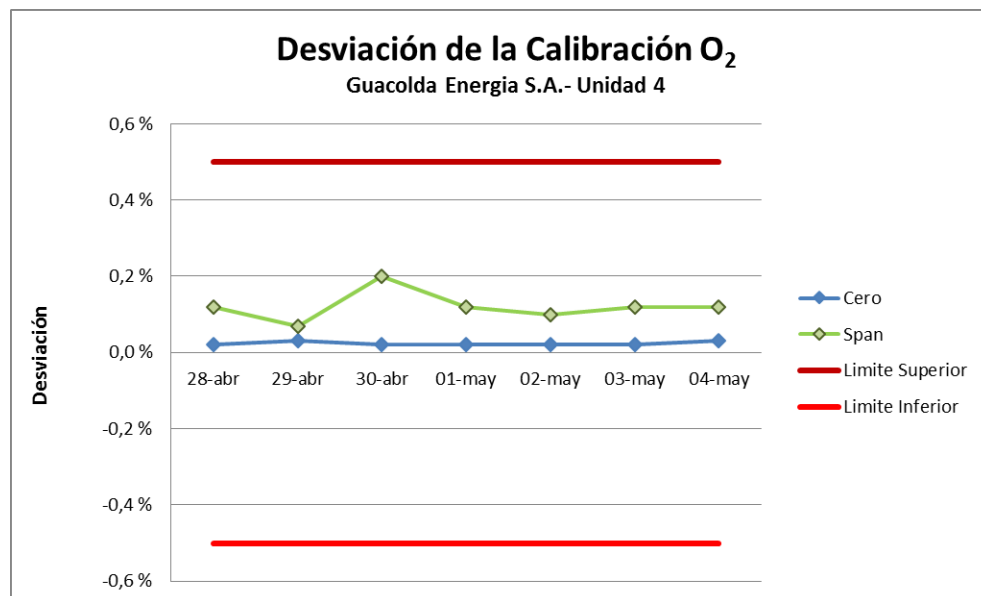


Figura 4: Gráfico de desviación diaria de O<sub>2</sub>.

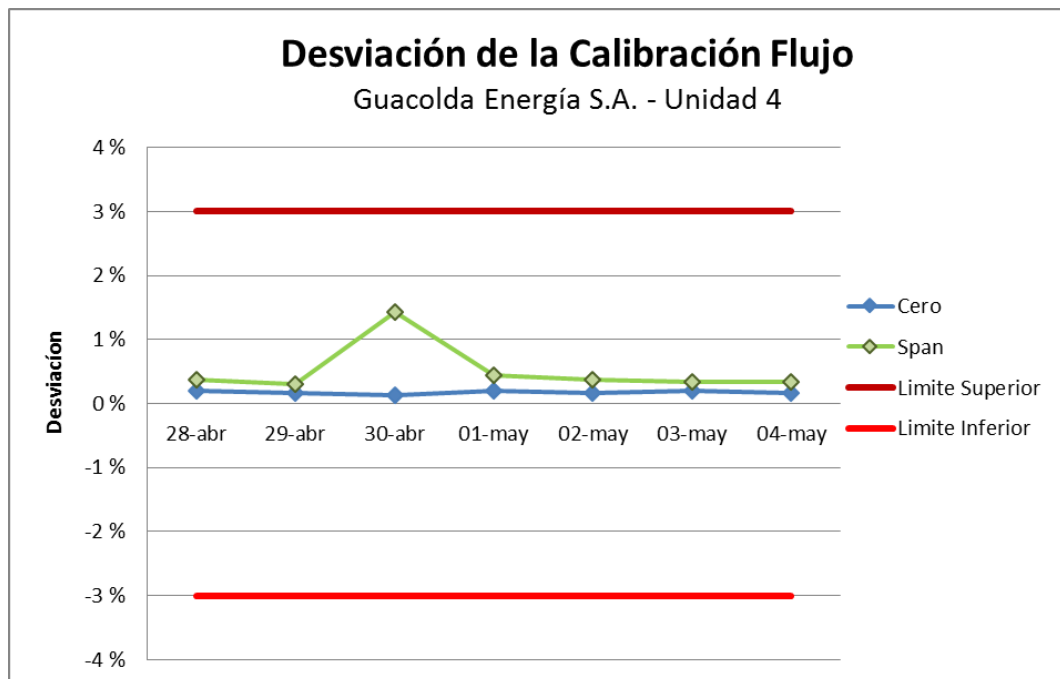


Figura 5: Gráfico de desviación diaria de Flujo.



## 2.6. Tiempos de Respuesta

### 2.6.1. Procedimientos y resultados

Para determinar el tiempo de respuesta de los CEMS de gases se utilizaron los valores de referencia utilizados en el ensayo de desviación de calibración. Estos ensayos fueron realizados durante operación continua y a una generación eléctrica mayor al 50% de la nominal. Los registros de potencia se encuentran incluidos en cada uno de los ensayos.

Para el tiempo de respuesta descendente de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> se utilizó gas cero de éstos parámetros y se determinó el tiempo en alcanzar un cambio del 95% descendente hasta la lectura estable.

El tiempo de respuesta descendente de O<sub>2</sub> se determinó utilizando como cero el cilindro de gas mezcla NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> EPA Protocol balance en Nitrógeno de 71,3 ppm y 267,0 ppm respectivamente y se determinó el tiempo en alcanzar un cambio del 95% descendente hasta la lectura estable.

Para los tiempos ascendentes de los gases NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> se utilizaron los gases de nivel alto de cada parámetro.

Los resultados de los tiempos de respuesta, considerando el valor más alto de cada uno de los analizadores se muestran a continuación:

**Tabla 13: Tiempos de Respuesta de Analizadores CEMS.**

Tiempos de Respuesta		
Parámetro	CEMS	MR
NO <sub>x</sub>	3 min.	4 min.
SO <sub>2</sub>	3 min.	3 min.
CO <sub>2</sub>	2 min.	2 min.
O <sub>2</sub>	3 min.	2 min.



La información del registrador de datos utilizada para determinar los tiempos de respuesta se encuentra en anexo 7 y el procesamiento de los datos se puede ver en archivo Excel [\\Cálculos de Ensayos\01 Gases\Gases](#) disponible en CD adjunto de IREV.

Los tiempos de respuesta calculados para los analizadores gases de Proterm S.A, método de referencia, se indican en Tabla 13. Estos valores se encuentran calculados en planilla de calculos excel en [\\Cálculos de Ensayos\01 Gases\Gases](#) disponible en CD adjunto de IREV.

El tiempo de respuesta del CEMS de Flujo se considera instantáneo debido a su principio de funcionamiento. Como el registrador almacena los datos en forma minatural no es posible corroborar este ensayo directamente del registrador, sin embargo, se evidenció desde pantalla de visualización de datos en caseta CEMS que al momento del comienzo de los chequeos de cero y span la señal variaba en forma instantánea con un tiempo de respuesta menor a 3 segundos.

Adicionalmente, el método de referencia CH-2 aplicado para la medición de Flujo es de lectura instantánea, por lo que estos resultados son comparables en los mismos tiempos en los que son almacenados en el analizador CEMS de Flujo.

### 2.6.2. Respuestas gráficas de los Analizadores CEMS

A continuacion se muestran los gráficos con las tendencias de respuesta de los distintos analizadores de gases de planta.

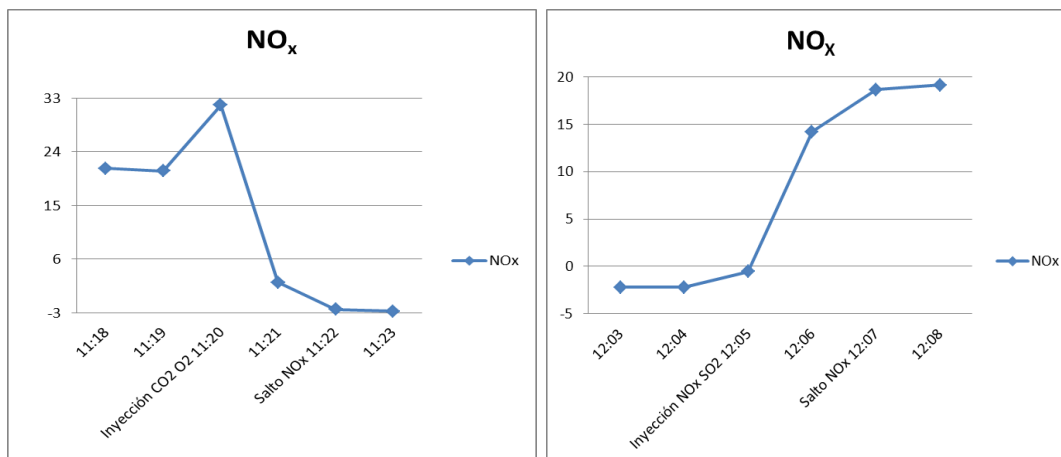


Figura 6: Tiempos de respuesta de NO<sub>x</sub>.



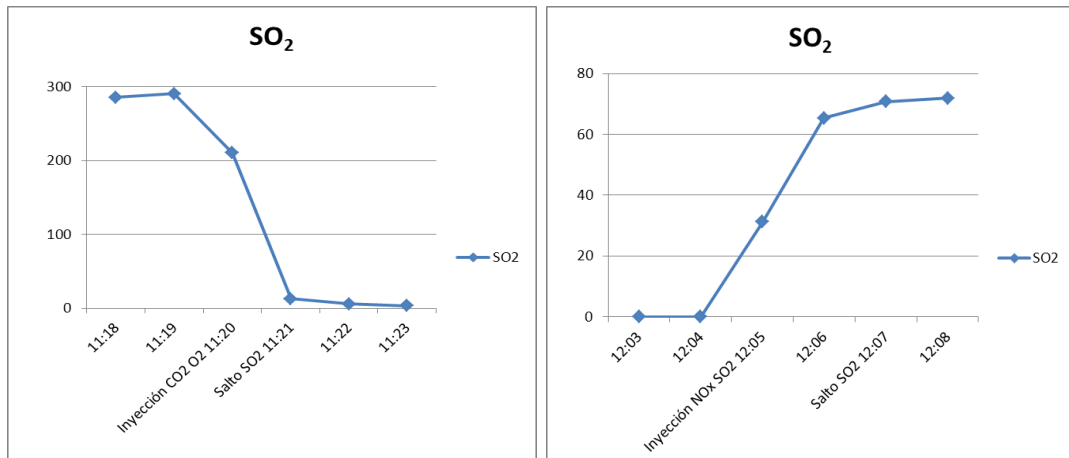


Figura 7: Tiempos de respuesta de SO<sub>2</sub>.

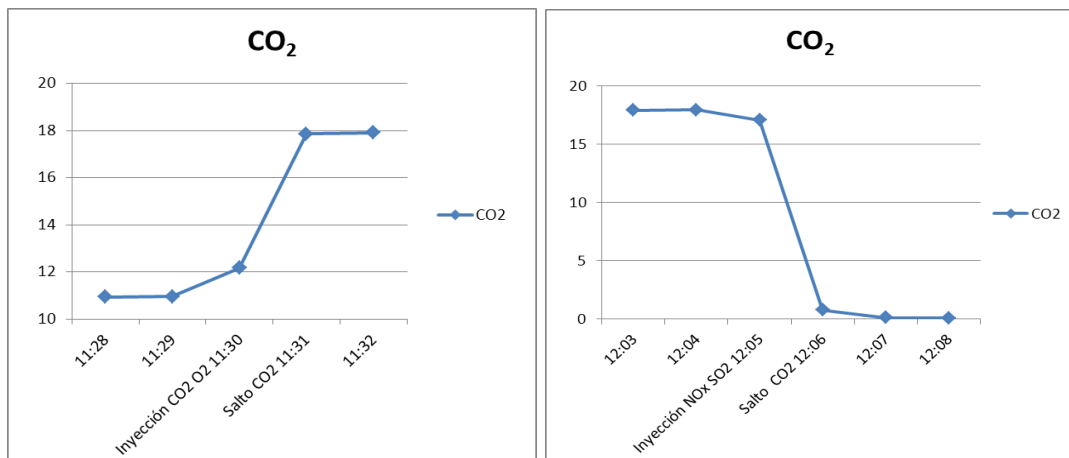


Figura 8: Tiempos de respuesta de CO<sub>2</sub>.

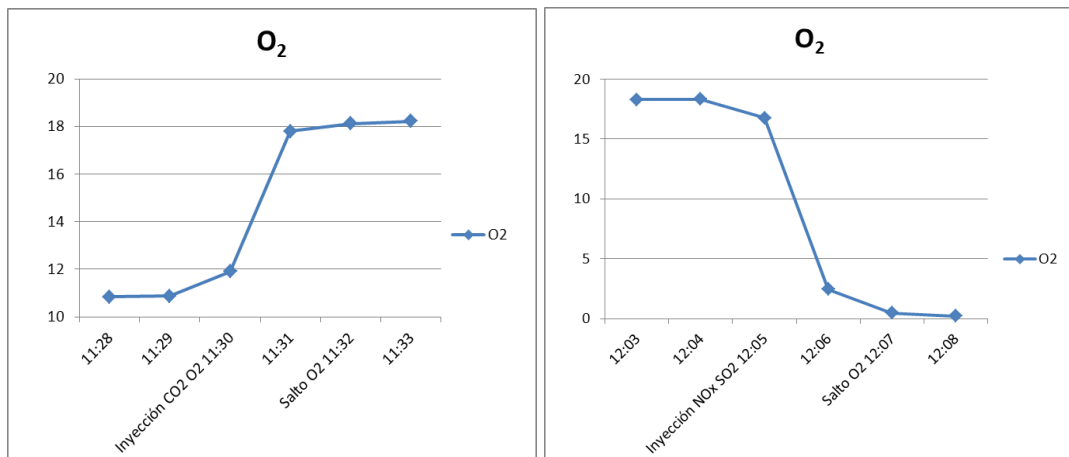


Figura 9: Tiempos de respuesta de O<sub>2</sub>.



### 3. CÁLCULOS Y RESULTADOS DE DETERMINACIÓN DE ERROR DE LINEALIDAD

#### 3.1. Valores de Referencia

Para la realización de los ensayos de Error de Linealidad se utilizaron cilindros EPA-Protocol para los parámetros NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. En la siguiente tabla se indican las concentraciones de cada cilindro utilizado para el ensayo de Error de Linealidad:

**Tabla 14: Valores de referencia ensayo de Error de Linealidad.**

Gases	Nivel Bajo	Nº Botella	Nivel Medio	Nº Botella	Nivel Alto	Nº Botella
NO <sub>x</sub>	20,32 ppm	CC434612	44,43 ppm	CC434920	71,3 ppm	CC474992
SO <sub>2</sub>	74,59 ppm	CC434612	165,1 ppm	CC434920	267,00 ppm	CC474992
O <sub>2</sub>	5,05 %	CC433448	11,11 %	CC455916	18,37 %	CC474931
CO <sub>2</sub>	5,01 %	CC433448	10,93 %	CC455916	17,91 %	CC474931

Los certificados de cada una de las botellas se encuentran en el anexo 5.

#### 3.2. Registro de Datos Durante el Ensayo de Error de Linealidad

A continuación se detallan los instantes en que se realizaron las inyecciones de cada uno de los gases de referencia y los valores almacenados en el registrador de datos e indicada en el anexo 7.

**Tabla 15: Registros de Error de Linealidad de NO<sub>x</sub>.**

Nivel Bajo		Nivel Medio		Nivel Alto	
Inicio	12:05	Inicio	12:10	Inicio	12:15
Fin	12:09	Fin	12:14	Fin	12:19
Lectura	19,38 ppm	Lectura	44,22 ppm	Lectura	71,48 ppm
Inicio	12:20	Inicio	12:25	Inicio	12:30
Fin	12:24	Fin	12:29	Fin	12:34
Lectura	19,53 ppm	Lectura	43,67 ppm	Lectura	71,02 ppm
Inicio	12:35	Inicio	12:40	Inicio	12:45
Fin	12:39	Fin	12:44	Fin	12:49
Lectura	19,84 ppm	Lectura	43,75 ppm	Lectura	71,02 ppm



**Tabla 16: Registros de Error de Linealidad de SO<sub>2</sub>.**

Nivel Bajo		Nivel Medio		Nivel Alto	
Inicio	12:05	Inicio	12:10	Inicio	12:15
Fin	12:09	Fin	12:14	Fin	12:19
Lectura	72,66 ppm	Lectura	163,36 ppm	Lectura	265,55 ppm
Inicio	12:20	Inicio	12:25	Inicio	12:30
Fin	12:24	Fin	12:29	Fin	12:34
Lectura	74,77 ppm	Lectura	164,30 ppm	Lectura	266,02 ppm
Inicio	12:35	Inicio	12:40	Inicio	12:45
Fin	12:39	Fin	12:44	Fin	12:49
Lectura	74,77 ppm	Lectura	164,77 ppm	Lectura	269,77 ppm

**Tabla 17: Registros de Error de Linealidad de CO<sub>2</sub>.**

Nivel Bajo		Nivel Medio		Nivel Alto	
Inicio	11:20	Inicio	11:25	Inicio	11:30
Fin	11:24	Fin	11:29	Fin	11:34
Lectura	4,97 %	Lectura	10,95 %	Lectura	17,93 %
Inicio	11:35	Inicio	11:40	Inicio	11:45
Fin	11:39	Fin	11:44	Fin	11:49
Lectura	4,98 %	Lectura	10,95 %	Lectura	17,94 %
Inicio	11:50	Inicio	11:55	Inicio	12:00
Fin	11:54	Fin	11:59	Fin	12:04
Lectura	4,99 %	Lectura	10,95 %	Lectura	17,94 %

**Tabla 18: Registros de Error de Linealidad de O<sub>2</sub>.**

Nivel Bajo		Nivel Medio		Nivel Alto	
Inicio	11:20	Inicio	11:25	Inicio	11:30
Fin	11:24	Fin	11:29	Fin	11:34
Lectura	4,88 %	Lectura	10,87 %	Lectura	18,28 %
Inicio	11:35	Inicio	11:40	Inicio	11:45
Fin	11:39	Fin	11:44	Fin	11:49
Lectura	5,00 %	Lectura	10,91 %	Lectura	18,31 %
Inicio	11:50	Inicio	11:55	Inicio	12:00
Fin	11:54	Fin	11:59	Fin	12:04
Lectura	5,01 %	Lectura	10,92 %	Lectura	18,32 %

Las pruebas de Linealidad de los parámetros fueron realizadas en su totalidad el día 18 de mayo 2016.

### **3.3. Resumen de Registro de Mediciones**

A continuación se presentan los valores reportados por el CEMS de gases durante el ensayo de Error de Linealidad.

**Tabla 19: Resumen de Mediciones del ensayo de Error de Linealidad.**

Inyección	NO <sub>x</sub> [ppm]			SO <sub>2</sub> [ppm]		
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
1º	19,38	44,22	71,48	72,66	163,36	265,55
2º	19,53	43,67	71,02	74,77	164,30	266,02
3º	19,84	43,75	71,02	74,77	164,77	269,77
Inyección	O <sub>2</sub> [%]			CO <sub>2</sub> [%]		
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
1º	4,88	10,87	18,28	4,97	10,95	17,93
2º	5,00	10,91	18,31	4,98	10,95	17,94
3º	5,01	10,92	18,32	4,99	10,95	17,94

Este ensayo fue realizado por parámetro, procurando no realizar una inyección de la misma concentración dos veces consecutivos.



Las mediciones fueron realizadas mientras la central mantuvo una generación mayor al 50% de su capacidad nominal. Los registros de la potencia se encuentran incluidos en los de cada uno de los ensayos.

El detalle de las inyecciones de las distintas concentraciones de gases se encuentra en el anexo 7.

### 3.4. Resumen de Resultados

Los resultados obtenidos de cada inyección de gas utilizando los cilindros patrones son promediados para calcular el Error de linealidad y los resultados de estos cálculos se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 20: Resultados ensayo de Error de Linealidad.**

Nivel	Error de Linealidad			
	NO <sub>x</sub> [ppm]	SO <sub>2</sub> [ppm]	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]
Bajo	0,74	0,52	0,09	0,03
Medio	0,55	0,96	0,21	0,02
Alto	0,13	0,11	0,07	0,03

Para el cálculo del Error de linealidad de los parámetros NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> se utilizó la ecuación 4 del protocolo. Los cálculos se encuentran detallados en archivo Excel [\\Cálculos de Ensayos\01 Gases\Gases](#), disponible en CD adjunto de IREV. Los límites aceptables para cumplir con la exigencia del Protocolo son de 5 ppm para NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> y de 0,5% para CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> de Error de Linealidad.

**Tabla 21: Límites aceptables de Error de Linealidad.**

Parámetro	Valor Límite
NO <sub>x</sub> y SO <sub>2</sub>	≤ 5 ppm
O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub>	± 0,5%

Con los resultados anteriormente descritos, se procede a aprobar los ensayos de Error de Linealidad a analizador de gases para los parámetros SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> marca ABB, modelo AO2020, N° de Serie 3.350170.3 / 85666J-A.



### 3.5. Gráficos de resultados

Las Figuras 10 y 11 muestran el gráfico de Error de Linealidad obtenido en los distintos niveles y para los distintos analizadores.

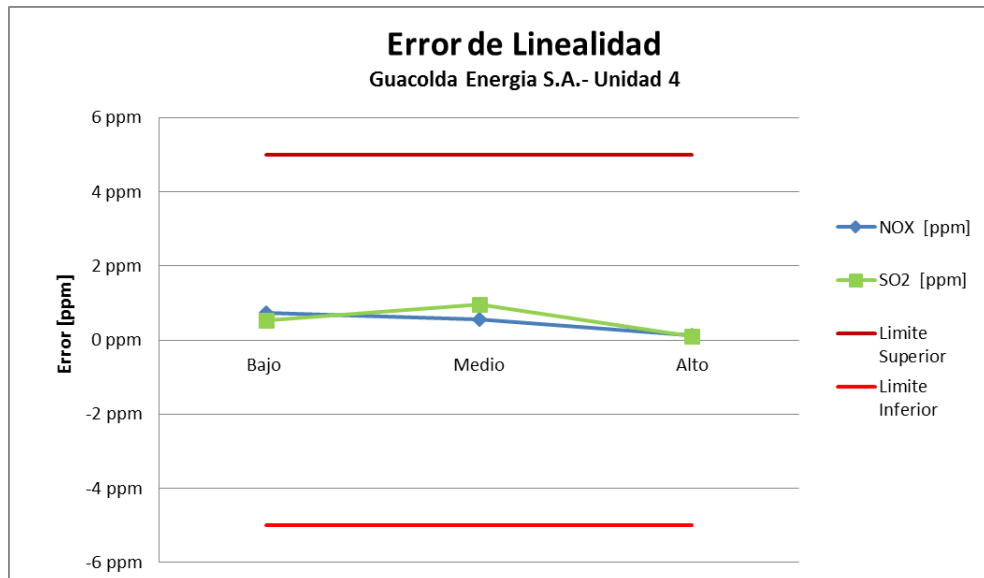


Figura 10: Gráfico Error de Linealidad NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>

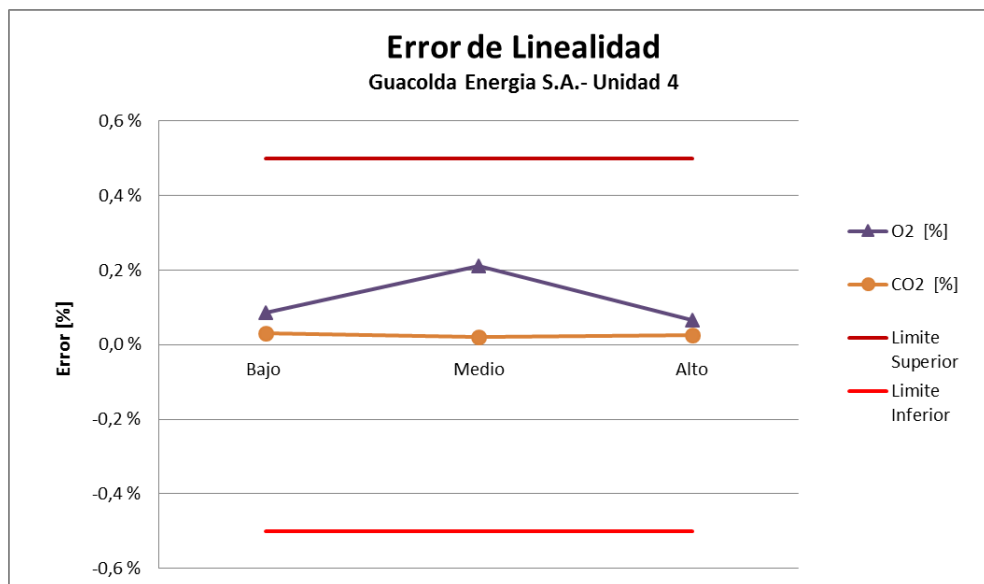


Figura 11: Gráfico Error de Linealidad CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>



#### 4. **CÁLCULOS Y RESULTADOS DE VERIFICACIÓN DE EXACTITUD RELATIVA**

##### 4.1. **Valores de Referencia**

Para la realización de ensayos de Exactitud Relativa (ER), Proterm S.A utilizó los equipos descritos a continuación:

**Tabla 22: Analizadores Continuos Proterm S.A.**

<b>Medición de Gases de Combustión</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>O2</b>	<b>CO2</b>	<b>NOx</b>	<b>SO2</b>
<b>Marca</b>	HORIBA			
<b>Modelo</b>	PG 350			
<b>Rangos</b>	0-20%	0-20%	80 ppm	300 ppm
<b>Tecnología de Medición</b>	Paramagnético	NDIR	Luminiscencia química	NDIR
<b>Método Referencia</b>	CH-3A	CH-3A	CH-7E	CH 6C
<b>Medición de Flujo de Gases</b>				
<b>Método Referencia</b>	CH-2			

Las calibraciones previas a los muestreos y las calibraciones para validación de las corridas se encuentran en anexo 2.

Las pruebas de Exactitud Relativa realizadas a analizador de Flujo fueron llevadas a cabo mediante método de referencia CH-2, utilizando Tubo Pitot tipo "S" debidamente certificado en dependencias del Instituto de Salud Pública de Chile. Ver certificados en Anexo 6.



#### 4.2. Resumen de Registro de Mediciones

A continuación se presentan los resultados de las mediciones realizadas tanto por los métodos de referencia como los entregados por el analizador CEMS de gases durante el ensayo de Exactitud Relativa (ER). Estos ensayos fueron ejecutados en los analizadores CEMS de gases mientras la Central mantuvo una generación eléctrica mayor al 50% de la carga nominal. Los registros de la generación eléctrica se encuentran incluidos en los archivos de cada uno de los ensayos.

**Tabla 23: Resumen de Mediciones de Exactitud Relativa de Gases.**

Nº	Fecha	Hora		NO <sub>x</sub> [ppm]		SO <sub>2</sub> [ppm]		CO <sub>2</sub> [%]		O <sub>2</sub> [%]	
		Inicio	Fin	MR	CEMS	MR	CEMS	MR	CEMS	MR	CEMS
1	21/05/2016	10:40	11:00	24,15	23,47	268,4	278,7	13,67	13,64	5,73	5,59
2	21/05/2016	11:01	11:21	23,68	22,60	248,9	259,2	13,56	13,53	5,83	5,69
3	21/05/2016	11:22	11:42	23,88	23,10	250,5	258,3	13,70	13,67	5,60	5,53
4	21/05/2016	11:43	12:03	23,76	23,28	244,1	257,2	13,72	13,83	5,43	5,36
5	21/05/2016	12:04	12:24	23,38	22,51	236,7	251,0	13,35	13,60	5,68	5,64
6	21/05/2016	12:25	12:45	23,42	22,84	227,2	240,7	13,44	13,67	5,51	5,53
7	21/05/2016	12:46	13:06	23,09	22,44	227,1	240,9	13,29	13,62	5,63	5,61
8	21/05/2016	13:07	13:27	22,95	22,60	219,0	234,6	13,21	13,54	5,67	5,70
9	21/05/2016	13:28	13:48	23,26	22,68	222,1	235,5	13,12	13,46	5,76	5,77
10	21/05/2016	13:49	14:09	22,99	22,54	213,0	229,6	12,95	13,41	5,80	5,84
11	21/05/2016	14:10	14:30	23,23	22,24	222,9	229,6	12,92	13,33	5,90	5,93
12	21/05/2016	14:31	14:51	23,09	22,42	221,4	227,5	12,95	13,30	5,95	5,96

En los registros de la tabla de resumen anterior se consideraron los tiempos de respuesta de cada analizador CEMS y de los del Método de Referencia. Los cálculos de tiempos de respuesta y la correlación de los datos se encuentran en [\\Cálculos de Ensayos\01 Gases\Gases](#) disponible en CD adjunto de IREV.



**Tabla 24: Resumen de Mediciones de Exactitud Relativa de Flujo.<sup>5</sup>**

Nº	Fecha	Hora		Flujo [m/s]	
		Inicio	Fin	MR	CEMS
1	20-05-2016	10:24	12:15	14,8	14,1
2	20-05-2016	12:45	14:37	14,7	14,2
3	20-05-2016	16:35	18:19	14,4	14,3
4	21-05-2016	9:59	11:50	14,6	14,1
5	21-05-2016	12:05	14:02	14,6	14,3
6	21-05-2016	14:16	16:09	14,6	14,7
7	24-05-2016	11:09	12:57	13,7	14,3
8	24-05-2016	14:47	16:21	13,8	14,4
9	24-05-2016	16:57	18:38	13,8	14,4
10	25-05-2016	12:12	13:48	13,8	14,8
11	25-05-2016	15:30	17:05	13,8	15,3

En planillas de terreno de anexo 1 sólo se encuentra el valor promedio cuadrático de la Presión de Velocidad, ya que este corresponde al dato que se mide y se registra en terreno. Los valores indicados en columna “MR” de Tabla N°24 son extraídos desde planilla de cálculo Excel de resultados de Flujo, donde el Flujo es calculado de acuerdo al promedio aritmético de los promedios cuadráticos de las 4 travesas que conforman una corrida de medición según metodología CH - 2.

La hora indicada en Tabla 24 corresponde al inicio de la primera travesa y al final de la cuarta travesa. La hora total de la medición se encuentra en archivo [\\CálculodeEnsayos\02Flujo\Flujo](#) disponible en CD adjunto de IREV.

<sup>5</sup> Se realizaron 11 corridas de medición mientras la Unidad 4 mantuvo una operación a plena carga.



### 4.3. Resumen de Resultados

En la siguiente tabla se indican los resultados obtenidos al procesar las corridas seleccionadas para el cálculo de la Exactitud Relativa de gases de combustión y velocidad de éstos. Para el cálculo se utilizó la ecuación N°5 del Protocolo de Validación y se encuentran en [\\CálculodeEnsayos\01Gases\Gases](#) para gases y en [\\CálculodeEnsayos\02Flujo\Flujo](#) para flujo. Estos archivos Excel están disponibles en CD adjunto de IREV.

**Tabla 25: Resumen de Resultados de Exactitud Relativa.**

CEMS	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Flujo
<b>Corridas Descartadas</b>	2-5-11	5-8-10	10-11-12	1-2-4	10-11
<b>Promedio MR</b>	23,40	237,0	13,45	5,72	14,34
<b><math>\bar{d}</math></b>	0,58	-10,56	-0,17	0,00	0,02
<b>Sd</b>	0,134	3,119	0,163	0,035	0,53
<b>CC</b>	0,103	2,397	0,125	0,027	0,41
<b>ER</b>	<b>0,25%</b>	<b>5,47%</b>	<b>2,18%</b>	<b>0,48%</b>	<b>2,99%</b>

Las corridas descartadas para cada uno de los parámetros corresponden a las que presentan mayor diferencia absoluta entre resultados de mediciones del método de referencia y los obtenidos por el CEMS.



Los límites de aprobación se muestran en la Tabla N°26, y se basan en los dispuesto en el punto 6.1.3 del “Protocolo”.

**Tabla 26: Límites de Aprobación de Exactitud Relativa.**

Compuesto	Valor Limite
NO <sub>x</sub>	< 10 %
SO <sub>2</sub>	< 20 %
CO <sub>2</sub>	< 10 %
O <sub>2</sub>	< 10 %
Flujo	< 10 %

Se considera valor límite  $\leq 20\%$  para el SO<sub>2</sub> ya que el promedio de concentración durante los ensayos corresponde a valores superiores al 50% del estándar de emisión. Para el NO<sub>x</sub>, se considera valor límite  $\leq 10\%$  ya que el promedio de concentración durante los ensayos corresponde a valores inferiores al 50% del estándar de emisión. Ver valores y cálculos en archivo Excel ubicado en [\\Cálculos de Ensayos\01Gases\Gases](#) disponible en CD adjunto de IREV.

Para el parámetro de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> se considera criterio del < 10% utilizando la ecuación 5 del Protocolo de Validación.

En parámetro de flujo se considera criterio  $\leq 10\%$  utilizando la ecuación 5 debido a que los ensayos fueron realizados sólo a una carga de operación.<sup>6</sup>

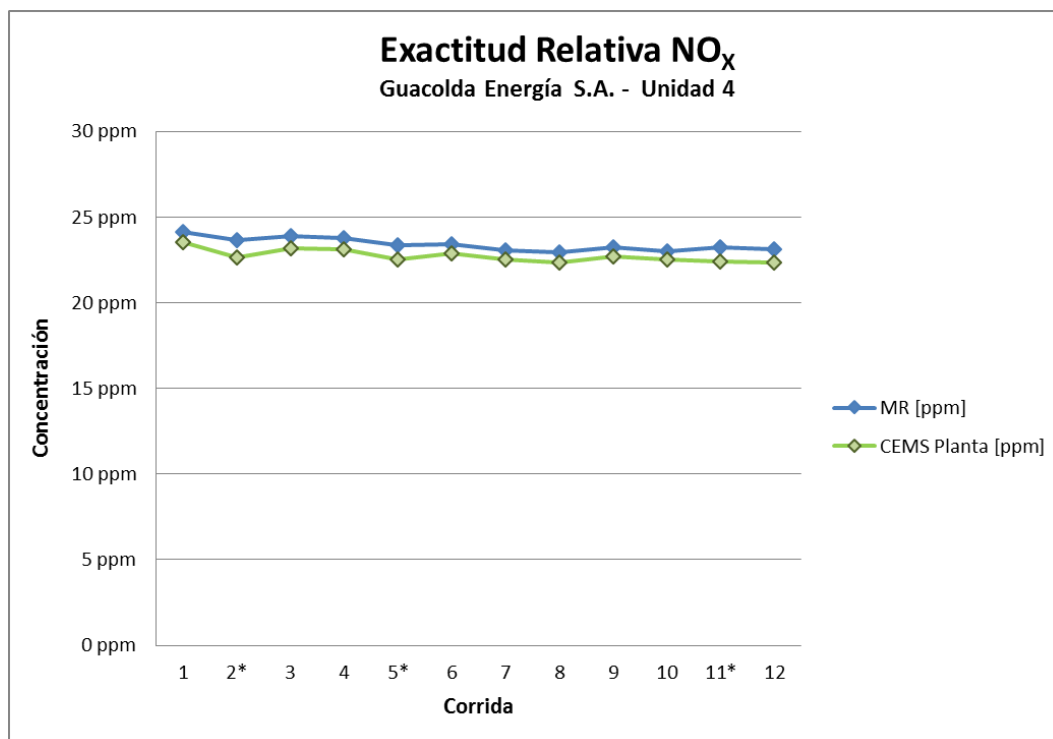
Con los resultados presentados anteriormente, se procede a aprobar los ensayos de Exactitud Relativa a analizador de gases para los parámetros SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> marca ABB, modelo AO2020, N° de Serie 3.350170.3 / 85666J-A y Flujo marca Durag, modelo D-FL 200, N° de Serie 1235924.

<sup>6</sup> La condición de operación para el ensayo de Exactitud Relativa de Flujo en una sola carga se informó en AEEV02.E2.M-16-055.

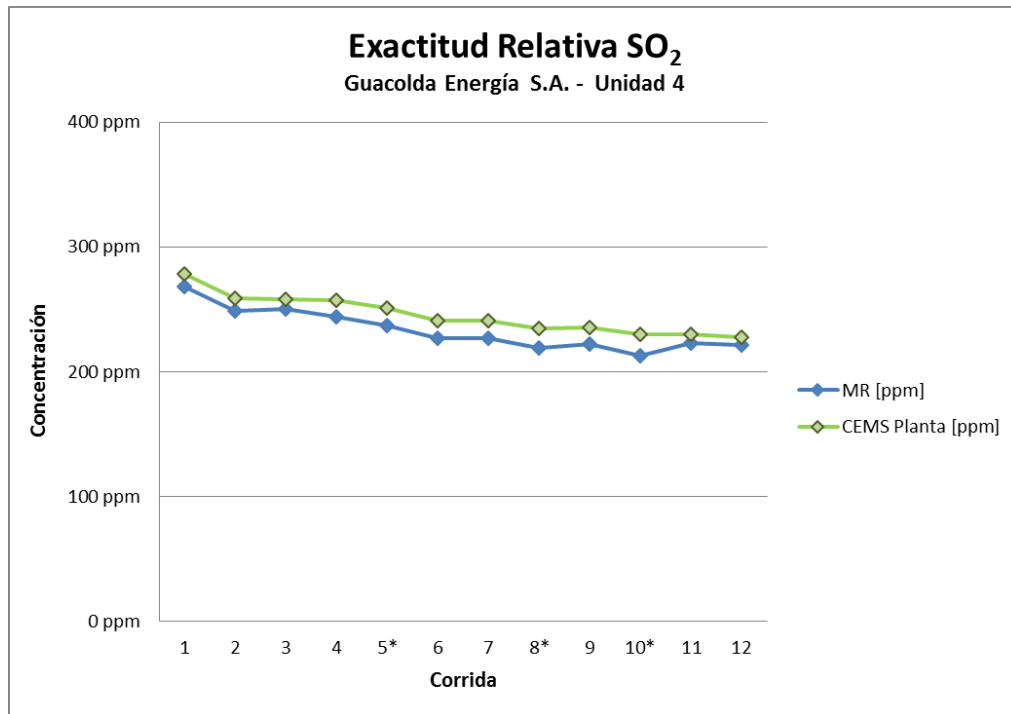


#### 4.4. Gráficos de resultados

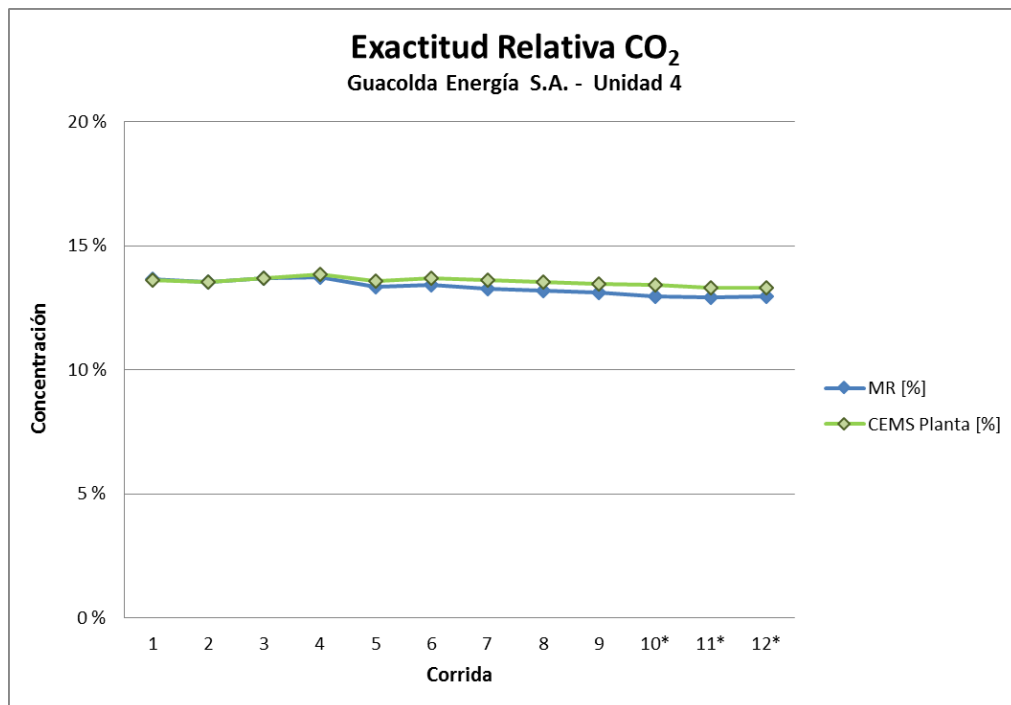
A continuación se presentan los gráficos de cada uno de los parámetros comparando los resultados del Método de Referencia con las lecturas del CEMS de planta. En cada uno de estos se indica con un asterisco (\*) las corridas que no se utilizaron para el cálculo de la Exactitud Relativa.



**Figura 12: Corridas de Exactitud Relativa de NO<sub>x</sub>.**



**Figura 13: Corridas de Exactitud Relativa de SO<sub>2</sub>.**



**Figura 14: Corridas de Exactitud Relativa de CO<sub>2</sub>.**

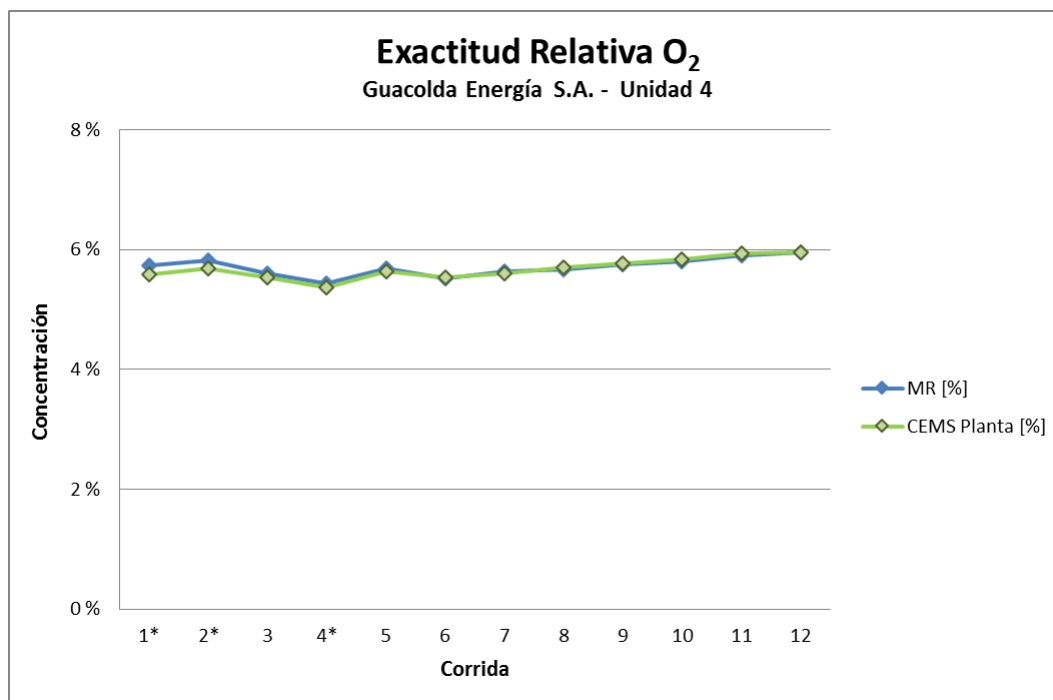


Figura 15: Corridas de Exactitud Relativa de O<sub>2</sub>.

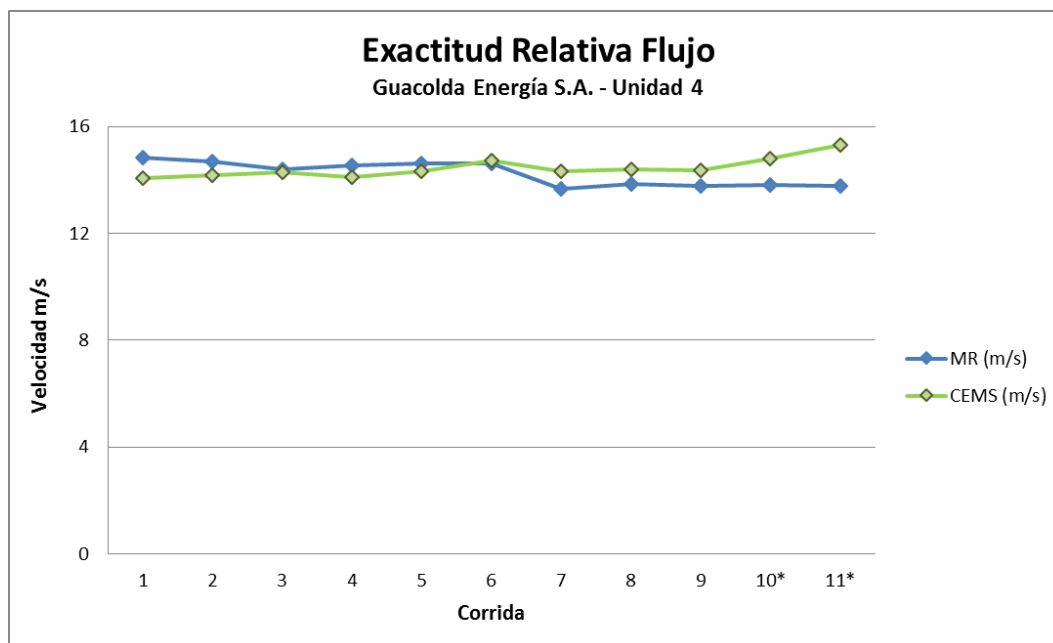


Figura 16: Corridas de Exactitud Relativa de Flujo.



## 5. CÁLCULOS Y RESULTADOS DE ENSAYO MARGEN DE ERROR

### 5.1. Valores de Referencia

Las señales de referencia utilizadas en esta prueba corresponden a señales eléctricas de 0,0% del rango de respuesta para Cero y de 71,5% del rango de respuesta para Span.

Según lo descrito en el Tabla 2 de este informe, el equipo se encuentra ajustado a un rango de medición de 0 a 0,3 O.D., con lo cual los valores de referencia utilizados para el ensayo de Margen de Error en concentración corresponden a los siguientes:

**Tabla 27: Valores de referencia Margen de Error.**

Nivel	Valor referencia
Cero	0,0 O.D.
Span	0,2145 O.D.

### 5.2. Resumen de Registro de Mediciones

A continuación se presentan los valores obtenidos de los registros de chequeos diarios realizados al CEMS MP DURAG D-R 290.

**Tabla 28: Resumen de mediciones de Margen de Error.**

Día	Fecha	Señal de Respuesta		
		Hora	Cero	Span
1	19-11-2016	11:31-11:33	-0,002 O.D.	0,214 O.D.
2	20-11-2016	11:31-11:33	-0,002 O.D.	0,214 O.D.
3	21-11-2016	11:31-11:33	-0,002 O.D.	0,214 O.D.
4	22-11-2016	11:30-11:32	-0,002 O.D.	0,214 O.D.
5	23-11-2016	11:30-11:32	-0,002 O.D.	0,214 O.D.
6	24-11-2016	11:30-11:32	-0,002 O.D.	0,214 O.D.
7	25-11-2016	11:29-11:31	-0,002 O.D.	0,214 O.D.

El detalle de los registros diarios de este ensayo se puede ver en el anexo 7.



El ensayo se desarrolló en un lapso de siete días, en forma automática y durante los periodos de la prueba la central mantuvo una operación normal<sup>7</sup>.

### 5.3. Resumen de Resultados

La siguiente tabla muestra los resultados diarios de Margen de Error obtenidos al procesar las mediciones diarias. Para el cálculo de este ensayo se utilizaron las ecuaciones 8 y 9 del Protocolo de Validación. El detalle del cálculo se encuentra en archivo [\\Cálculos de Ensayos\03 CEMS-MP\CEMS-MP](#) disponible en CD adjunto de IREV.

**Tabla 29: Resumen de Resultados de Margen de Error.**

Día	Fecha	Margen de Error de CEMS MP a Señal escala inferior [%]	Margen de Error de CEMS MP a Señal escala superior [%]
1	19-11-2016	0,93 %	0,23 %
2	20-11-2016	0,93 %	0,23 %
3	21-11-2016	0,93 %	0,23 %
4	22-11-2016	0,93 %	0,23 %
5	23-11-2016	0,93 %	0,23 %
6	24-11-2016	0,93 %	0,23 %
7	25-11-2016	0,93 %	0,23 %

Según indicación del Protocolo de Validación, el límite de desviación diaria máxima corresponde a 2% del estándar de referencia de escala superior ( $R_u$ ).

Con los resultados anteriormente descritos, se procede a aprobar los ensayos de Margen de Error al CEMS de Material Particulado DURAG D-R 290, N° de Serie 1201872.

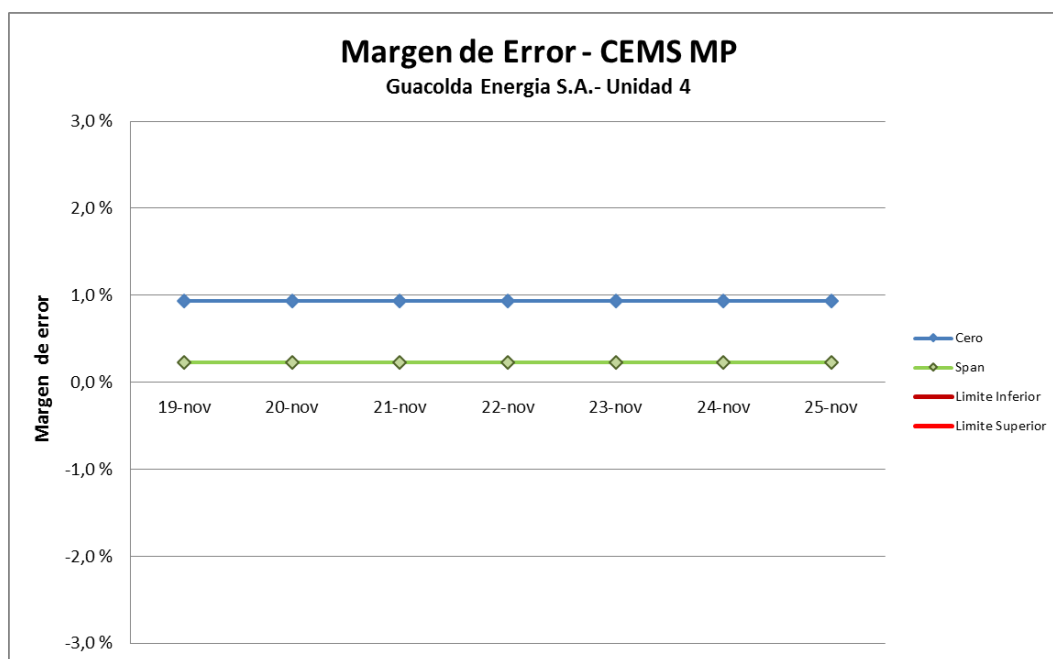
<sup>7</sup> Los ensayos fueron realizados con una generación inferior al 50% de su capacidad nominal previamente autorizado por la SMA, en consideración de que estos ensayos no son vinculantes de la carga a la cual opere la fuente. Como respaldo, se adjunta mail de autorización enviado por la SMA, ver anexo 10





#### 5.4. Gráficos de resultados

A continuación se presenta la gráfica de las desviaciones diarias observadas en el ensayo de Margen de Error del CEMS MP para Cero y Span.



**Figura 17: Gráfico de desviación diaria de CEMS-MP.**



## 6. CÁLCULOS Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORRELACIÓN

### 6.1. Valores de Referencia

Para llevar a cabo los ensayos de correlación se realizaron mediciones de Material Particulado empleando los siguientes métodos de referencia:

- CH-1: Determinación de los puntos de Medición.
- CH-2: Determinación de la Velocidad del gas en la chimenea.
- CH-3: Análisis del gas para la determinación del peso molecular.
- CH-4: Determinación de contenido de humedad en los gases de la Chimenea
- CH-5B: Determinación de concentración de Material Particulado <sup>8</sup>

Los certificados de calibración del Medidor de Gases Secos DGM, Temperaturas de entrada y salida DGM, Tubo Pitot “S”, Temperatura cuarto Impinger, Sensor de Chimenea y de Boquilla de medición se encuentran en anexo 6.

---

<sup>8</sup> Metodología utilizada EPA 5B informada en AEEV.02.E3.M-16-055



## **6.2. Resumen de Registro de Mediciones**

A continuación se presentan los resultados de las 20 corridas de Material Particulado ejecutadas por Proterm S.A. y los valores de concentración registrados por el CEMS PM.

**Tabla 30: Resumen de mediciones del Ensayo de Correlación.**

<b>Corrida</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>		<b>CEMS MP [O.D.]</b>	<b>Método Referencia [mg/m<sup>3</sup> Real]</b>
1	25-11-2016	17:30	18:58	0,04	4,06
2	26-11-2016	09:54	11:21	0,04	6,01
3	26-11-2016	11:48	13:26	0,04	3,65
4	26-11-2016	15:30	17:14	0,04	4,48
5	27-11-2016	09:58	11:31	0,04	3,86
6	27-11-2016	11:54	13:26	0,04	4,35
7	27-11-2016	14:22	15:54	0,04	9,56
8	28-11-2016	09:34	11:20	0,04	5,20
9	28-11-2016	15:00	16:42	0,04	9,64
10	28-11-2016	17:48	19:18	0,04	7,71
11	29-11-2016	09:21	11:02	0,05	10,49
12	29-11-2016	11:32	13:06	0,05	13,22
13	29-11-2016	15:12	17:02	0,05	6,96
14	30-11-2016	10:14	12:01	0,06	17,69
15	30-11-2016	13:58	15:40	0,06	19,98
16	30-11-2016	16:26	18:08	0,06	13,56
17	01-12-2016	09:52	11:34	0,06	15,08
18	01-12-2016	12:03	13:48	0,06	15,89
19	01-12-2016	16:17	17:50	0,05	11,38
20	02-12-2016	10:06	11:43	0,04	8,47

Los resultados de concentración de Material Particulado del Método de Referencia son presentados en condiciones reales de temperatura, presión y humedad de la corriente de gases al interior de la chimenea.

Los tiempos indicados en la tabla anterior corresponden al inicio de la primera travesa y al final de la cuarta travesa de medición de cada una de las corridas. El detalle de los tiempos se encuentra en el archivo [\\Cálculos de Ensayos\03 CEMS-MP\CEMS-MP](#) disponible en CD adjunto de IREV.



### 6.3. Resumen de Resultados

Las corridas de medición de Material Particulado fueron realizadas en tres cargas de polvo, por lo que se inyectó ceniza controlada (Spiking) en la salida del Filtro de Mangas para obtener un nivel medio y alto de partículas en la Chimenea de la Unidad 4.

Del total de las 20 corridas de medición realizadas a través de método de referencia, se eliminó una corrida, lo que permitió mejorar la correlación, el intervalo de confianza y de tolerancia. La corrida eliminada corresponde a la N° 15. A continuación se presentan las corridas utilizadas para el cálculo de la curva de regresión.

**Tabla 31: Corridas seleccionadas para Ensayo de Correlación.**

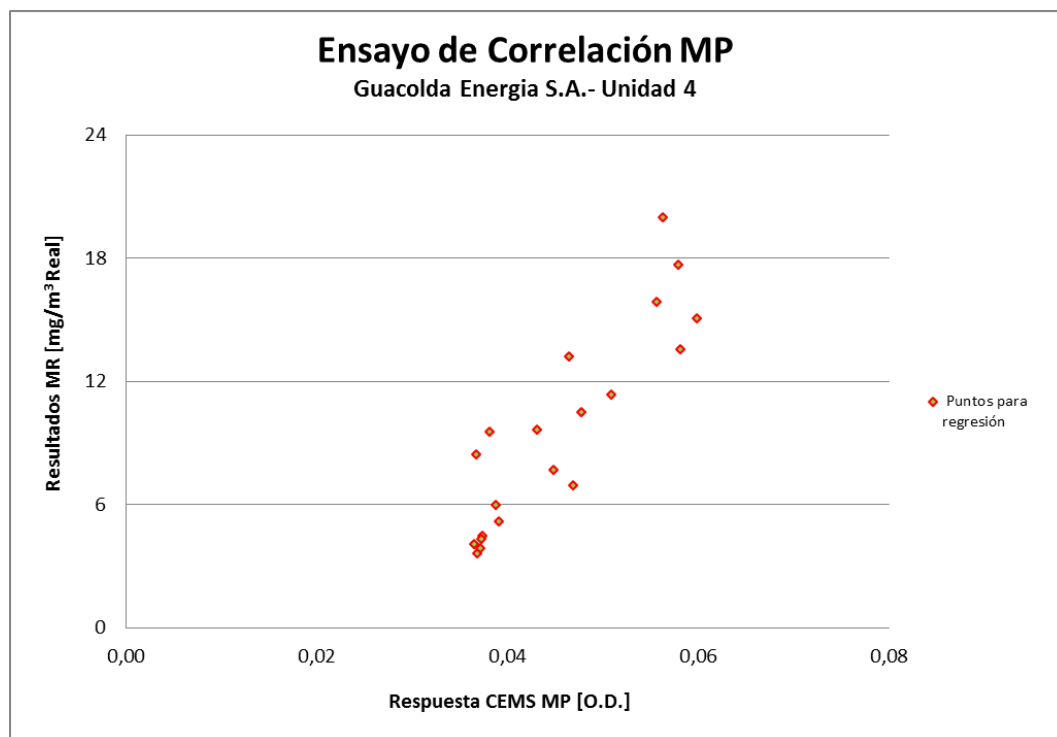
Corridas Seleccionadas		
Corrida	CEMS MP [O.D.]	Método Referencia [mg/m <sup>3</sup> Real]
1	0,04	4,06
2	0,04	6,01
3	0,04	3,65
4	0,04	4,48
5	0,04	3,86
6	0,04	4,35
7	0,04	9,56
8	0,04	5,20
9	0,04	9,64
10	0,04	7,71
11	0,05	10,49
12	0,05	13,22
13	0,05	6,96
14	0,06	17,69
16	0,06	13,56
17	0,06	15,08
18	0,06	15,89
19	0,05	11,38
20	0,04	8,47

El detalle de los cálculos y resultados de la totalidad de las corridas se pueden encontrar en el archivo [\\Cálculos de Ensayos\03 CEMS-MP\CEMS-MP](#) disponible en CD adjunto de IREV.



#### 6.4. Gráfico de Resultados

A continuación se presenta la dispersión de la totalidad de las corridas realizadas durante los ensayos de correlación:



**Figura 18: Gráfico de resultados de corridas para correlación.**

El ensayo fue realizado con una generación inferior al 50% de su capacidad nominal previamente autorizado por la SMA, en consideración de que este ensayo no es vinculante de la carga a la cual opere la fuente sino que depende de la inyección controlada de polvo (Spiking) para alcanzar los 3 niveles de Material Particulado en la chimenea.



## 7. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN, INTERVALO DE CONFIANZA E INTERVALO DE TOLERANCIA

Para la realización de la curva de regresión se consideran las 19 corridas preseleccionadas y los cinco tipos de correlación aceptados por el Protocolo de Validación. Se debe considerar que el valor límite de emisión de 50 mg/m<sup>3</sup>N al 6% de Oxígeno fue llevado a condiciones reales de temperatura, presión, humedad y concentración de oxígeno contemplando los valores promedios de las 19 corridas seleccionadas para el cálculo de correlación. El cálculo se encuentra en archivo [\\Cálculos de Ensayos\03 CEMS-MP\CEMS-MP](#) disponible en CD adjunto de IREV.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros exigidos:

**Tabla 32: Valores de evaluación de las correlaciones.**

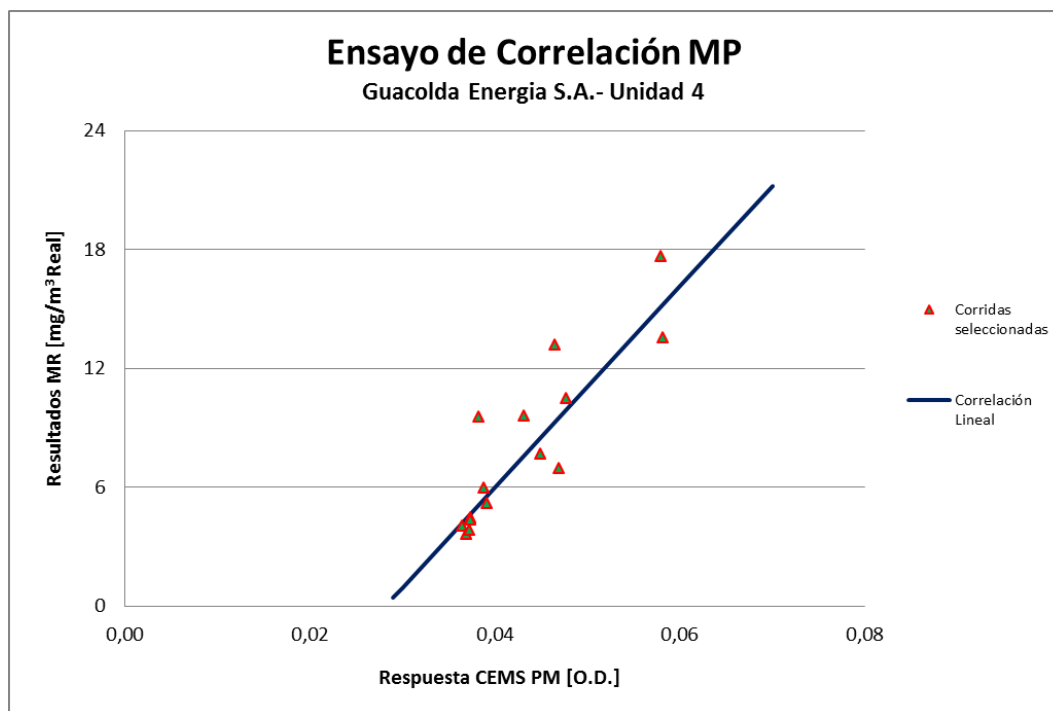
Modelo	Coeficiente de correlación	Intervalo de confianza	Intervalo de tolerancia	Cumplimiento
Lineal	0,887	3,48%	11,9%	SI
Polinomial	0,880	4,41%	12,5%	SI
Logarítmico	0,887	3,49%	11,9%	SI
Exponencial	0,847	3,75%	13,2%	NO
Potencial	0,856	3,65%	12,8%	SI

Cuatro de los Cinco modelos de curva cumplen con la totalidad de requerimientos exigidos para su utilización. Se selecciona la curva Lineal ya que posee una mejor correlación, intervalo de confianza y de tolerancia.

$$y = -12,597 + 483,324 x$$

Para la realización de los cálculos de correlación de las distintas curvas de regresión se utilizó la planilla para ensayos de correlación PS-11 Versión 2-6 la que se encuentra en [\\Cálculos de Ensayos\03 CEMS-MP\Curva de Regresión](#). Este archivo Excel está disponible en CD adjunto de IREV.

A continuación se presenta la curva de regresión Lineal seleccionada junto con las corridas utilizadas para el cálculo de ésta.



**Figura 19: Gráfico de curva de regresión.**

Esta curva de regresión seleccionada deberá ser incorporada en el CEMS MP DURAG D-R 290 o en el Sistema Adquisidor de Datos Medioambientales (SADMA) de planta para que los registros en unidades de O.D. correspondan a la concentración de Material Particulado Real. Los valores obtenidos de esta curva deberán ser normalizados y corregidos por concentración de Oxígeno.



## 8. CÁLCULOS Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PARA SISTEMAS OPACÍMETROS (COMS)

### 8.1. Prueba de funcionamiento y auditoria de campo

#### 8.1.1. Evaluación de Alineación Óptica

La verificación de la alineación del COMS se realizó a través de una mirilla dispuesta para este ensayo en el CEMS. En la figura siguiente se muestra la alineación obtenida:



Figura 20: Alineación de COMS.

#### 8.1.2. Chequeo de Error de Calibración

El rango del analizador fue ajustado previo a los ensayos de 0 a 30% de Opacidad.

Para los chequeos de Error de Calibración se utilizaron tres atenuadores como valores de referencia los que corresponden a los siguientes:

Tabla 33: Valores de referencia para COMS (atenuadores).

Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
7,47 %	16,42 %	26,36 %

Los certificados de los atenuadores se encuentran en el anexo 5.





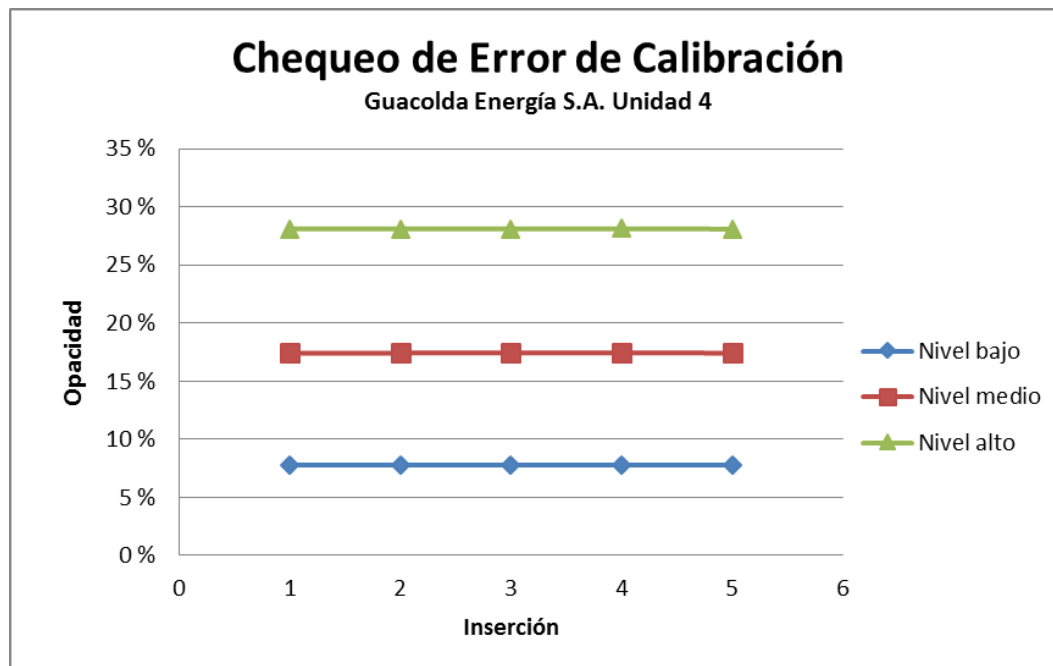
En esta prueba se realizaron 5 inserciones con cada uno de los 3 atenuadores. Al realizar la correlación de cada uno de los datos se obtienen los siguientes registros.

**Tabla 34: Resumen de mediciones de Error de Calibración de COMS.**

Nº inserción	% Opacidad		
	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
1	7,805 %	17,423 %	28,102 %
2	7,805 %	17,433 %	28,106 %
3	7,805 %	17,428 %	28,116 %
4	7,809 %	17,452 %	28,130 %
5	7,791 %	17,423 %	28,097 %

Detalle de los cálculos se encuentra en [\\Cálculo de Ensayos\04COMS\COMS](#). Estos archivos Excel están disponibles en CD adjunto de IREV.

A continuación se presenta la gráfica de los registros en cada uno de los niveles.



**Figura 21: Gráfico de Error de Calibración de COMS.**



Para el cálculo de aprobación del ensayo se utilizan las fórmulas de PS-1 de diferencia media aritmética, desviación estándar y coeficiente de confianza, obteniéndose los siguientes resultados:

**Tabla 35: Resumen de mediciones de Error de Calibración de COMS.**

Nivel	Bajo	Medio	Alto
<b>d</b>	0,33 %	1,01 %	1,75 %
<b>Sd</b>	0,01 %	0,01 %	0,01 %
<b>CC</b>	0,01 %	0,01 %	0,02 %
<b>Er</b>	<b>0,34 %</b>	<b>1,03 %</b>	<b>1,77 %</b>

Ver cálculos en archivo Excel [\\CálculodeEnsayos\04COMS\COMS](#) disponible en CD adjunto de IREV.

De acuerdo a los resultados mostrados en tabla anterior se verifica que los valores de Error de Calibración para nivel bajo, medio y alto son menores al 3% de Opacidad exigido por el Protocolo de Validación. Por lo tanto, se procede a aprobar los ensayos de Error de Calibración a analizador COMS DURAG DR-290 N° 1201782.



### 8.1.3. Chequeo de Tiempo de respuesta del sistema

Para la realización de la prueba de tiempo de respuesta se utilizaron los atenuadores de nivel bajo y alto correspondientes a 7,47 % y a 26,36% de opacidad. Estos se insertaron en forma alternada cinco veces cada uno.

Actualmente el registrador de datos posee almacenamiento de información minutar por lo que se debió instalar un datalogger externo para el registro de la señal segundo a segundo. Ver detalles de registros en [\\CálculodeEnsayos\04COMS\COMS](#). Estos archivos Excel están disponibles en CD adjunto de IREV.

Al procesar los registros se obtienen los siguientes tiempos de respuesta.

**Tabla 36: Tiempos de respuesta de COMS.**

Ronda	Tiempos de respuesta			
	Nivel Bajo		Nivel Alto	
	Inserción	Extracción	Inserción	Extracción
1	5 s	3 s	9 s	8 s
2	5 s	3 s	8 s	9 s
3	4 s	4 s	8 s	9 s
4	4 s	5 s	9 s	9 s
5	3 s	4 s	9 s	8 s
Media	4,1 s	3,7 s	8,6 s	8,6 s

Ver cálculos en archivo Excel [\\CálculodeEnsayos\04COMS\COMS](#) disponible en CD adjunto de IREV.

De acuerdo a los resultados mostrados en tabla anterior se verifica que los valores de Tiempo de Respuesta para nivel bajo y nivel alto son menores al tiempo de 10 segundos exigido por el Protocolo de Validación. Por lo tanto, se procede a aprobar los ensayos de Tiempo de Respuesta a analizador COMS DURAG DR-290 N° 1201872.



#### 8.1.4. Cálculo de período de promedio y chequeo de registros

El ensayo se llevó a cabo según las especificaciones de PS-1, insertando cada uno de los atenuadores por un período de 13 minutos continuos. El cálculo promedio de la lectura obtenida durante el tiempo de inserción de cada uno de los atenuadores se muestra a continuación:

**Tabla 37: Lectura promedio de atenuadores.**

Nivel	Bajo	Medio	Alto
Opacidad media	7,969 %	16,479 %	28,121 %
Desviación	0,50 %	0,06 %	1,76 %

Los valores de referencia (atenuadores) utilizados en este ensayo son los mismos que se utilizaron en el ensayo de Error de Calibración y se identifican en la Tabla 33. Los certificados de los atenuadores se encuentran en el anexo 5.

Los detalles se encuentran en [\\CálculodeEnsayos\04COMS\COMS](#). Estos archivos Excel están disponibles en CD adjunto de IREV.

Con los resultados anteriormente descritos se comprueba que el valor promedio de las lecturas para cada atenuador se desvía menos de 2% de opacidad por lo que se procede a aprobar los ensayos de Período Promedio chequeo de registro a analizador COMS DURAG DR-290 N° 1201872.



## 8.2. Período de prueba operacional

Las señales de referencia utilizadas en esta prueba corresponden a señales eléctricas de 0% del rango de respuesta para Cero y de 71,5% del rango de respuesta para Span.

El rango del analizador fue ajustado previo a los ensayos de 0 a 30% de Opacidad. Por lo tanto los valores de referencia corresponden a:

**Tabla 38: Valores de referencia de Período de Prueba Operacional.**

Nivel	Valor referencia
Cero	0,0%
Span	21,45%

A continuación se presenta la tendencia diaria de las lecturas registradas. El detalle de estos registros se encuentra en el anexo 7.

**Tabla 39: Resumen de registros de Período operacional<sup>9</sup>.**

Día	Fecha	Respuesta COMS	
		Nivel Cero	Nivel Span
1	12-11-16	-0,244 %	21,441 %
2	13-11-16	-0,263 %	21,450 %
3	14-11-16	-0,244 %	21,450 %
4	15-11-16	-0,272 %	21,450 %
5	16-11-16	-0,253 %	21,441 %
6	17-11-16	-0,248 %	21,436 %
7	18-11-16	-0,248 %	21,436 %

Estos registros diarios son procesados de acuerdo a ecuaciones 1-3, 1-4, 1-5 y 1-6 de PS-1 para determinar el Error de DC. Los resultados finales son los siguientes:

<sup>9</sup> Los ensayos fueron realizados con una generación inferior al 50% de su capacidad nominal previamente autorizado por la SMA, en consideración de que estos ensayos no son vinculantes de la carga a la cual opere la fuente. Como respaldo, se adjunta mail de autorización enviado por la SMA, ver anexo 10



**Tabla 40: Resultados de Error de Desviación de Calibración.**

<b>Factor</b>	<b>Nivel Cero</b>	<b>Nivel Span</b>
<b><math>\bar{d}</math></b>	0,25 %	0,01 %
<b>Sd</b>	0,01 %	0,01 %
<b>CC</b>	0,01 %	0,01 %
<b>Error de DC</b>	<b>0,26 %</b>	<b>0,01 %</b>

Los cálculos se encuentran en archivo <\\CálculodeEnsayos\04COMS\COMS> disponible en CD adjunto de IREV.

Con los resultados presentados en tabla anterior se determina que los valores de error de DC en 24 horas para nivel Cero y Span se encuentran dentro del  $\pm 2\%$  de opacidad respecto a los valores de referencia por lo que se procede a aprobar los ensayos de Período de Prueba Operacional a analizador COMS DURAG DR-290 N° 1201872.



## 9. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA FUENTE Y PLANOS DE UBICACIÓN DE LOS CEMS

### 9.1. Condiciones operaciones

La condición de generación eléctrica de la Unidad 4, se mantuvo estable durante la ejecución de cada uno de los ensayos. De esta forma se dio cumplimiento a lo exigido en el Protocolo de Validación el cual solicita realizar los ensayos a cargas superiores al 50% de la nominal. La información de la condición operacional de generación eléctrica se encuentra incluidos en los registros de cada uno de los ensayos.

### 9.2. Ubicaciones de Caseta CEMS

A continuación se muestra imagen de la ubicación de la caseta CEMS al interior de planta, junto a la chimenea.



Figura 22: Ubicación de caseta CEMS en planta.

Coordenadas UTM referenciales	Coord. Este: 279177.00 m E	Coord. Norte: 6849248.00 m S
-------------------------------	-------------------------------	---------------------------------



### 9.3. Ubicación de los puntos de muestreo

En la siguiente figura se presenta esquema básico de la chimenea.

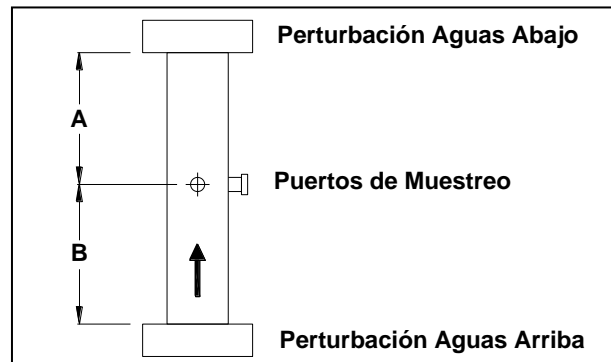


Figura 23: Esquema de chimenea y puertos de muestreo.

#### Características de la chimenea y puertos de muestreo:

Diámetro interno	: 4,524 metros
Distancia "A"	: 33,65 metros
Distancia "B"	: 40,35 metros
Posición del ducto	: Vertical
Singularidad aguas abajo	: Expansión por término de la chimenea
Singularidad aguas arriba	: Codo por cambio de dirección
Sección ducto	: Circular
Largo de coplas	: 0,55 metros
Matriz puntos	: 4 x 4

Tabla 41: Punto de Muestreo.

Ubicación de los puntos de muestreo		
Nº puntos	Distancia pared interna centro de boquilla (cm)	Distancia entre boquilla y marca sonda con largo copla (cm)
1	14	69
2	48	103
3	88	143
4	146	201





## 10. **CONCLUSIONES**

En consideración a las exigencias establecidas en el artículo N°8 del Decreto Supremo N°13, del Ministerio del Medio Ambiente, que establece la Norma de Emisión para Centrales Termoeléctricas, la cual exige la obligación de instalar y certificar un Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones (CEMS) para ciertos contaminantes y parámetros de interés y de acuerdo a los resultados de los ensayos y pruebas informadas en el presente informe, se concluye lo siguiente:

Los CEMS de Material Particulado, Flujo y de Gases de Combustión para los parámetros Dióxido de Azufre, Óxidos de Nitrógeno, Dióxido de Carbono y Oxígeno instalados en la chimenea de la Unidad 4 de Guacolda Energía S.A. ubicada en la comuna de Huasco, cumplen satisfactoriamente con los parámetros de validación exigidos en "Protocolo Para la Validación de Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones CEMS en Centrales Termoeléctricas".

Mauricio Mera Araya  
Ingeniero Civil Mecánico  
Subgerente de Mediciones  
Proterm S.A.

Fernando Castillo Seguel  
Ingeniero (E) Mecánico  
Jefe de Proyectos  
Proterm S.A.

Dr. Manfred Hellwig Franckenhoff  
Representante Legal  
Proterm S.A.