

JCH-FC
Ambiental
1798
C-1



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Evaluación de la eficacia del método de adición controlada de polvo “Spiking” para calibrar y validar sistemas de monitoreo continuo de material particulado en Centrales Termoeléctricas

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de:

Químico Ambiental

LUCIANO FELIPE MONTOYA VÁSQUEZ

Director de Seminario de Título: Ing. Francisco González Montenegro (ESINFA)
Profesor Patrocinante: Dr. Richard Toro

Agosto de 2016
Santiago – Chile

ESCUELA DE PREGRADO - FACULTAD DE CIENCIAS - UNIVERSIDAD DE CHILE



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el candidato:

LUCIANO FELIPE MONTOYA VÁSQUEZ

Evaluación de la eficacia del método de adición controlada de polvo “Spiking” para calibrar y validar sistemas de monitoreo continuo de material particulado en Centrales Termoeléctricas

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en el cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Francisco González Montenegro

Director de Seminario de Título

Richard Toro

Profesor Patrocinante

Marcela Urzúa

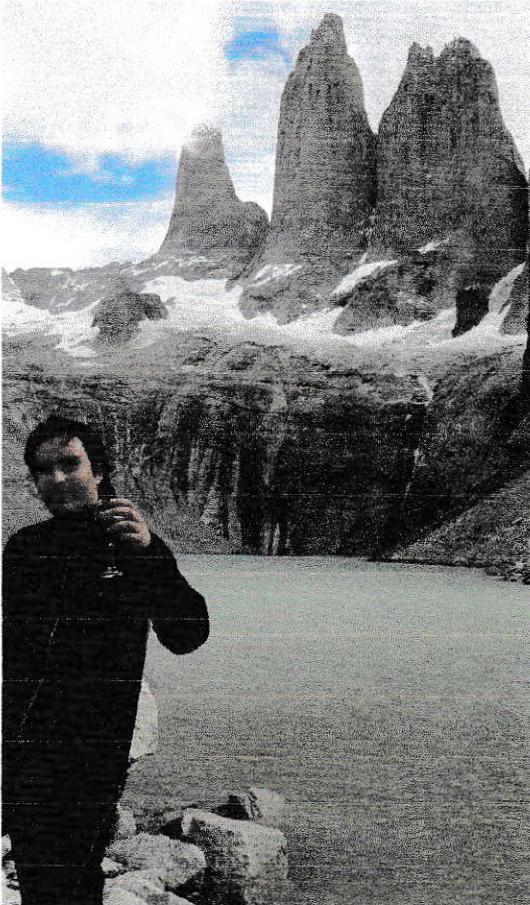
Presidente de la Comisión

Manuel Leiva

Corrector

FACULTAD DE CIENCIAS
BIBLIOTECA CENTRAL
U. DE CHILE

Santiago de Chile, Agosto de 2016



Nací el 16 de Julio de 1986 en la ciudad de Rancagua, sexta Región de Chile. Cursé mi enseñanza básica en los colegios INUT, San Joseph C. Thomas School y Ensenada, y enseñanza media en el colegio RAIMAPU (todos de la comuna de La Florida). Posteriormente, en el año 2005 inicié mis estudios superiores en la carrera de Química Ambiental de la Universidad de Chile, de la cuál egresé en el primer lugar de mi promoción en el año 2009.

En el ámbito profesional he trabajado desde el año 2011 en la empresa ESINFA, realizando proyectos de ingeniería asociados a la determinación de

emisiones atmosféricas de contaminantes por fuentes fijas, de acuerdo a las nuevas normativas y protocolos dictados por la autoridad ambiental.

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a toda mi familia. A Carolina, mi compañera, por todo su apoyo en cada momento y siempre recordarme las cosas más importantes de la vida. A mis padres, porque de ambos aprendí mis valores y a siempre dar lo mejor en los estudios y el trabajo. A mi madre, por enseñarme a ser optimista en la vida. A mi padre, por inspirarme a ver las cosas desde la perspectiva de la lógica y de las ciencias. A mi hermana por su cariño incondicional y valiosos consejos.

A mis profesores de la Universidad, quienes contribuyeron en el proceso de formación y/o maduración de las habilidades claves para desarrollar investigaciones y proyectos que debe poseer un Químico Ambiental. Especialmente a Richard Toro, Margarita Préndez, Boris Weiss y Silvia Copaja.

Al equipo de trabajo en ESINFA, porque entre todo hemos contribuido a encontrar las oportunidades que tenemos. En especial a Francisco, por haber tenido la visión y atreverse a armar ESINFA y por guiarme en los cimientos de mi trayectoria profesional. A Victor y a Denis, por ser los tremendos compañeros de trabajo que son y por cada discusión y/o análisis que realizamos día a día, que son los que más nos hacen crecer.

A Robert Baxter, presidente de B3 Systems Inc., por su contribución en el diseño del sistema de Spiking y propuesta del método para calibrar equipo CEMS-MP, y a Ralph Bard, por entrenarnos en terreno en su uso y enseñarnos aspectos claves para su correcta aplicación.

Finalmente, al departamento de gestión ambiental del Complejo Ventanas. A André Picart, Milka Kera, Felipe Hernández, Luis Pérez y Sebastián Cardenas, por creer en este proyecto y prestar todo su apoyo en que se cumplieran las condiciones para su correcto desarrollo.

LISTADO DE CONTENIDOS

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.2. Marco teórico.....	3
1.2.1. Contaminación de aire por material particulado.....	3
1.2.2. La contaminación por MP en Chile y las medidas adoptadas.....	4
1.2.3. Centrales termoeléctricas.....	5
1.2.4. Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones para Material Particulado	9
1.2.5. Exigencias de validación para CEMS-MP	11
1.2.6. Aseguramiento y control de calidad para CEMS-MP	14
1.2.7. Método de referencia para mediciones de MP	15
1.2.8. Sistema de Spiking para adición controlada de polvo.....	19
1.3. Planteamiento del problema	21
1.4. Hipótesis y Objetivos	24
1.4.1 Hipótesis	24
1.4.2 Objetivos generales de la investigación	24
1.4.3 Objetivos específicos	24
II. MÉTODO	26
2.1. Descripción general del método.....	26
2.2. Equipos utilizados en la integración del sistema de Spiking.....	32
2.2.1. Alimentador por pérdida de peso	32
2.2.2. Eductor de manipulación de sólidos.....	35
2.3. Procedimiento para desarrollar Curvas de Correlación utilizando Spiking....	36
2.4. Condiciones experimentales para las aplicaciones	40
2.4.1. Ubicación del punto de inyección de polvo.....	40
2.4.2. Mantenimiento de las condiciones operacionales.....	42
2.4.3. Pruebas de funcionamiento y aseguramiento de calidad de los CEMS-MP	42
2.4.4. Aseguramiento de calidad de los muestreos por método CH-5	43
2.5. Ensayos de desempeño del sistema de Spiking	47
2.5.1. Ensayos de exactitud	47

2.5.2. Ensayos de precisión	49
2.5.3. Ensayos de tiempo de respuesta	50
2.5.4. Ensayos de estabilidad	51
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
3.1. Resultados de las Curvas de Correlación obtenidas	56
3.1.1. Curvas de Correlación de la UGE 1	57
3.1.2. Curvas de Correlación de la UGE 2	60
3.1.3. Curvas de Correlación de la UGE 4	63
3.2. Resultados obtenidos de los ensayos de desempeño del sistema Spiking ..	66
3.2.1. Exactitud del sistema de Spiking	66
3.2.2. Precisión del sistema de Spiking	72
3.2.3. Tiempo de respuesta del sistema de Spiking	75
3.2.4. Estabilidad del sistema de Spiking	78
3.2.5. Reproducibilidad de los resultados obtenidos	79
3.3. Análisis comparativo entre las Curvas de Correlación obtenidas	80
3.4. Mecanismos y condiciones que inciden en los resultados de los procesos de Curvas de Correlación	85
3.4.1. Cantidad de niveles de variación de la concentración de MP	86
3.4.2. Uso del valor de 0 teórico	88
3.4.3. Error de los muestreos del método de referencia CH-5	90
3.4.4. Efectos de los cambios en la distribución de tamaños del MP	93
IV. CONCLUSIONES	98
V. RECOMENDACIONES	99
VI. BIBLIOGRAFÍA	100

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Límites de concentración horaria para Unidades Generadoras de Electricidad existentes por tipo de combustible de acuerdo al D.S. N°13/2011 del Ministerio del Medio Ambiente. _____	8
Cuadro 2. Límites de concentración horaria para Unidades Generadoras de Electricidad nuevas por tipo de combustible de acuerdo al D.S. N°13/2011 del Ministerio del Medio Ambiente. _____	8
Cuadro 3. Características de los monitores de Material Particulado instalados en las chimeneas de las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4 del Complejo Termoeléctrico Ventanas. _____	27
Cuadro 4. Características de las Unidades Generadoras de Electricidad 1, 2 y 4 del Complejo Termoeléctrico Ventanas. _____	30
Cuadro 5. Estado de control para las condiciones operacionales de las Unidades de	53
Cuadro 6. Mezclas de carbones utilizados para cada Curva de Correlación. _____	53
Cuadro 7. Pruebas de funcionamiento realizadas a los Sistemas de Monitoreo Continuo de Material Particulado previo a la ejecución de los ensayo de Curvas de Correlación. _____	54
Cuadro 8. Condiciones de los sitio de muestreo en chimenea en que se realizan las mediciones para cada Unidad de Generación Eléctrica. _____	55
Cuadro 9. Condiciones de muestreo obtenidas en las corridas de mediciones isocinéticas realizadas para cada proceso de Curvas de Correlación. _____	56
Cuadro 10. Tasas de inyección de cenizas utilizadas para las corridas de las Curvas de Correlación de la Unidad Generadora de Electricidad 1. _____	59
Cuadro 11. Resultados estadísticos obtenidos de las Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 1. _____	60
Cuadro 12. Tasas de inyección de cenizas utilizadas para las corridas de las Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 2. _____	62

Cuadro 13. Resultados estadísticos obtenidos de las Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 2.	63
Cuadro 14. Tasas de inyección de cenizas utilizadas para las corridas de las Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 4.	65
Cuadro 15. Resultados estadísticos obtenidos de las Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 4.	66
Cuadro 18. Concentraciones de Material Particulado base de las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4 determinadas por método CH-5 en condiciones normales de funcionamiento.	67
Cuadro 19. Concentraciones de Material Particulado real y teórica para cada corrida de acuerdo a su tasa de inyección de polvo para la Unidad de Generación Eléctrica 1.	68
Cuadro 20. Concentraciones de Material Particulado real y teórica para cada corrida de acuerdo a su tasa de inyección de polvo para la Unidad de Generación Eléctrica 2.	69
Cuadro 21. Concentraciones de Material Particulado real y teórica para cada corrida de acuerdo a su tasa de inyección de polvo para la Unidad de Generación Eléctrica 4.	70
Cuadro 22. Resultados de Exactitud Relativa obtenida para las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4.	71
Cuadro 23. Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los resultados de concentración por método CH-5 y lecturas del Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones de Material Particulado, para cada tasa de inyección, del proceso de Curvas de Correlación la Unidad de Generación Eléctrica 1.	73
Cuadro 24. Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los resultados de concentración por método CH-5 y lecturas del Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones de Material Particulado, para cada tasa de inyección, del proceso de Curvas de Correlación la Unidad de Generación Eléctrica 2.	73
Cuadro 25. Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los resultados de concentración por método CH-5 y lecturas del Sistema de Monitoreo Continuo de	

Emisiones de Material Particulado, para cada tasa de inyección, del proceso de Curvas de Correlación la Unidad de Generación Eléctrica 4. _____	74
Cuadro 26. Resultados de los ensayos de tiempo de respuesta del sistema de Spiking para algunas muestras de ciclos ascendente/descendente realizados en las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4, a distintas tasas de inyección de polvo. _____	75
Cuadro 27. Resultados de los ensayos de estabilidad del sistema de Spiking para algunas muestras de ciclos ascendente/descendente realizados en las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4, a distintas tasas de inyección de polvo. _____	79
Cuadro 16. Resumen de resultados obtenidos en todos los proceso de Curvas de Correlación realizados en las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4. _____	80
Cuadro 17. Concentraciones en condiciones normales y máximas alcanzadas y porcentaje de extensión en todos los procesos de Curvas de Correlación realizados en las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4. _____	84
Cuadro 28. Resultados estadísticos obtenidos de las Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 1, sin utilización del punto 0 teórico. _____	88
Cuadro 29. Resultados estadísticos obtenidos de las Curvas de Correlación de la Unidad Generación Eléctrica 2, sin utilización del punto 0 teórico. _____	89
Cuadro 30. Resultados estadísticos obtenidos de las Curvas de Correlación de la Unidad Generación Eléctrica 4, sin utilización del punto 0 teórico. _____	89

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de funcionamiento de una central de ciclo convencional (extraído SMA, 2014).	7
Figura 2. Diagrama de un ejemplo de Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones (modificado de EPA, 2013).	10
Figura 3. Diagrama de la trayectoria de las partículas en muestreos isocinéticos y no isocinéticos.	16
Figura 4. Diagrama del tren de muestreo utilizado para mediciones isocinéticas de MP.	18
Figura 5. Diagrama general del sistema de Spiking (Juneau y Baxter, 2004).	19
Figura 6. Monitor de Material Particulado instalado en la chimenea de la Unidad de Generación Eléctrica 1 del Complejo Ventanas.	26
Figura 7. Monitor de Material Particulado instalado en la chimenea de la Unidad de Generación Eléctrica 4 del Complejo Ventanas.	27
Figura 8. Imagen satelital de la zona en que se emplaza el Complejo Termoeléctrico Ventanas (Elaborado a partir de Google Earth).	29
Figura 9. Diagrama de la chimenea de la Unidad de Generación Eléctrica 4.	31
Figura 10. Fotografías de la ceniza utilizada para inyectar.	32
Figura 11. Diagrama general del alimentador Brabender modelo FlexWall Plus.	33
Figura 12. Diagrama complementario del alimentador Brabender modelo FlexWall Plus.	33
Figura 13. Diagrama del principio de funcionamiento de un alimentador por pérdida de peso.	34
Figura 14. Diagrama del principio de funcionamiento de un eductor de manipulación de sólidos.	36
Figura 15. Diagrama general del método de Spiking.	37

Figura 16. Ubicación punto de inyección de polvo y puertos de muestreo de la Unidad de Generación Eléctrica 1 del Complejo Ventanas. _____	41
Figura 17. Ubicación punto de inyección de polvo y puertos de muestreo de la Unidad de Generación Eléctrica 2 del Complejo Ventanas _____	41
Figura 18. Ubicación punto de inyección de polvo y puertos de muestreo de la Unidad de Generación Eléctrica 4 del Complejo Ventanas. _____	41
Figura 19. Curvas de Correlación obtenidas para la Unidad de Generación Eléctrica 1 del Complejo Ventanas. _____	58
Figura 20. Curvas de Correlación obtenidas para la Unidad de Generación Eléctrica 2 del Complejo Ventanas. _____	61
Figura 21. Curvas de Correlación obtenidas para la Unidad Generación Eléctrica 4 del Complejo Ventanas. _____	64
Figura 22. Gráfico de las corridas de resultados de concentraciones determinadas por el método CH-5 y teóricas para el proceso de Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 1. _____	68
Figura 23. Gráfico de las corridas de resultados de concentraciones determinadas por el método CH-5 y teóricas para el proceso de Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 2. _____	69
Figura 24. Gráfico de las corridas de resultados de concentraciones determinadas por el método CH-5 y teóricas para el proceso de Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 4. _____	70
Figura 25. Curvas de respuesta ascendente de los Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones de Material Particulado ante inyección de polvo a distintas tasas para las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4. _____	76
Figura 26. Curvas de respuesta descendente de los Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones de Material Particulado ante inyección de polvo a distintas tasas para las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4. _____	77

Figura 27. Gráfica del primer y segundo proceso de Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 4, incluyendo las líneas de tendencia de los mejores modelos de correlación obtenidos.	87
Figura 28. Curvas de Correlación obtenidas con el sistema de Spiking en las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4.	94
Figura 29. Curvas de Correlación obtenidas para la Unidad de Generación Eléctrica 4, considerando la concentración MP obtenida sólo en el filtro de los muestreos del método CH-5.	96
Figura 30. Curvas de Correlación obtenidas para la Unidad de Generación Eléctrica 4, considerando la concentración MP obtenida sólo en el recuperado de los muestreos del método CH-5.	96

RESUMEN

El Material Particulado (MP) es reconocido mundialmente como un contaminante crítico por su impacto sobre la salud humana y animal. Debido a esto, el uso de Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones de Material Particulado (CEMS-MP) para determinar la concentración de este contaminante, y así verificar el cumplimiento de los límites de emisión establecidos por las autoridades, ha aumentado aceleradamente en las últimas décadas en el mundo y en Chile.

Debido a que los CEMS-MP no determinan en forma directa la concentración de MP, estos sistemas deben ser sometidos al ensayo de Curvas de Correlación (CC). Por medio de éste se obtiene un modelo de tendencia por método de mínimos cuadrados, comparando las lecturas del CEMS-MP respecto a los resultados de concentración de MP obtenidos por laboratorios acreditados utilizando el método de referencia CH-5.

Desarrollar ensayos de CC con buen desempeño es un desafío complejo de acuerdo a las dificultades reportadas en la literatura (EPRI, 2006; EPRI, 2007). Dentro de los desafíos críticos se encuentra la exigencia de realizar el ensayo de CC midiendo 3 niveles de concentración de MP, "variando las condiciones de operación del proceso, variando las condiciones del dispositivo de control de MP o utilizando adición controlada de MP (spiking)" (SMA, 2013). Esta es una condición que en general no se ha alcanzado en los procesos de Curvas de Correlación que se han realizado en Chile, pese a la aplicación de algunas metodologías para la variación de la concentración de MP.

Ante esta problemática, en el presente Seminario de Título se realiza una evaluación de la eficacia del sistema de Spiking o adición controlada de polvo para variar la concentración de MP, y así calibrar y validar CEMS-MP mediante el procedimiento de Curvas de Correlación en Centrales Termoeléctricas.

Este sistema es una tecnología emergente (patentada en EE.UU. en el año 2004), con la cual es posible inyectar en forma controlada polvo hacia el ducto o chimenea en que se encuentra un CEMS-MP, y así generar aumentos determinados de la concentración de MP de acuerdo a los requerimientos del proceso.

Para evaluar la eficiencia del sistema de Spiking se ejecutaron procesos de Curvas de Correlación utilizando esta técnica en las Unidades de Generación Eléctrica (UGE) 1, 2 y 4 del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

Hasta antes de este trabajo, el sistema de Spiking había sido aplicado en EE.UU., pero no existían estudios en que se analizaran sus resultados.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que el sistema de Spiking fue capaz de generar variaciones de la concentración de MP en chimenea en forma exacta, precisa, estable y con un bajo tiempo de respuesta.

Asimismo, el sistema de Spiking permitió obtener CC de MP que tienen ventajas comparativas respecto a los resultados obtenidos utilizando otros procedimientos para la variación de la concentración de MP, como son:

- Mayor coeficiente de correlación y menores Intervalos de Confianza e Intervalo de Tolerancia de las Curvas de Correlación.
- Mayor extensión de la Curvas de Correlación, lo que permite evitar que se sobrepasen los criterios de extrapolación de la correlación.
- Obtención de modelo de menor pendiente y con tendencia cercanas a la tendencia lineal.

Finalmente, las conclusiones obtenidas por medio de este trabajo de investigación resultan un aporte relevante en un área de desarrollo incipiente en Chile y de solo algunas décadas en el mundo, como es la determinación continua de MP desde procesos industriales, y por ende, de una gran importancia para lograr una efectiva regulación de las emisiones de este contaminante.

ABSTRACT

Particulate Matter (PM) is worldwide recognized as a critical contaminant for their impact on human and animal health. Because of this, the use of Particulate Matter Continuous Emissions Monitoring Systems (PM-CEMS) to determine the concentration of this pollutant, and verify by this way compliance with the emission limits set by the authorities, has increased rapidly in past decades in the world and in Chile.

Because PM-CEMS does not directly determine the concentration of PM, these systems must be tested by Correlation Curves (CC) procedure. By this test is obtained a trend model with the least square method, comparing readings from PM-CEMS regarding concentration results obtained by accredited PM laboratories using the method CH-5.

Develop CC tests with good performance is a complex challenge according to the difficulties reported in the literature (EPRI, 2006; EPRI, 2007). The critical challenge is the requirement to perform the CC measuring on 3 concentration levels of PM "varying operating conditions of the process, varying the conditions of the control device MP or using controlled MP addition (spiking)" (SMA, 2013). This is a condition which generally has not been reached in the CC process that has been made in Chile, despite the application of some methodologies for varying the concentration of PM.

Faced with this problem, in this Title Seminar is analyzed the effectiveness of the Spiking system or controlled powder addition to varying the concentration of PM, and so calibrate and validate PM-CEMS by the method of correlation curves in Power Plants.

This system is an emerging technology (patented in the US in 2004), with which it is possible to controlled inject powder into the duct or stack that there is a PM-CEMS, and generate increases in certain of the MP concentration according to process requirements.

To evaluate the efficiency of the Spiking, correlation curves process was executed using this technique in Electric Units Generation (EUG) 1, 2 and 4 of Ventanas Power Plants Complex.

Even before this work, Spiking system had been applied in the US, but there were no studies that their results are analyzed.

According to the results of this study, it is observed that the system was able to generate Spiking variations in the concentration of PM in stacks accurately, accurate, stable and with low response time.

Spiking system also allowed to obtain CC that have comparative advantages over other made with other procedures for change concentrations of MP, such as:

- Increased correlation coefficient and lower confidence intervals and tolerance interval of correlation curves.
- More extension of the correlation curves, thus avoiding the criteria of extrapolating the correlation is exceeded.
- Obtaining models with lower slope and near to the linear trend.

Finally, the conclusions obtained through this research are an important contribution in an area of incipient development in Chile and only a few decades in the world, as is the continuous determination of MP from industrial processes, and therefore have a great importance for effective regulation of emissions of this pollutant.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes generales

Considerando los graves efectos globales, regionales y locales que produce la contaminación del aire por material particulado sobre la salud humana y animal (Pope y Dockery, 2006), y en particular las emisiones de carbono negro sobre el calentamiento global (Ramanathan y Carmichael, 2008), la regulación de sus emisiones es una tarea fundamental. Así mismo, la implementación de métodos que permitan determinar en forma representativa su concentración, es una condición necesaria para verificar el cumplimiento de los límites establecidos.

Durante los últimos años, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), ante el reconocimiento que la contaminación del aire por MP fino (con diámetro aerodinámico $<10 \mu\text{m}$) es el principal problema ambiental a nivel país, ha implementado y revisado una serie de normas de emisión que regulan los límites máximos de MP y de sus precursores que pueden emitir las industrias.

Asimismo, para verificar el cumplimiento de los límites de emisión establecidos, se ha exigido la implementación y validación de Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones (CEMS, por sus siglas en ingles). Estos sistemas son capaces de determinar la concentración de los contaminantes y otros parámetros de interés, emitidos por chimenea en procesos industriales.

Si bien el desarrollo y uso de este tipo de sistemas lleva algunas décadas en países desarrollados como EE.UU., Canadá y Alemania, en el caso específico del monitoreo continuo para MP, debido a la complejidad de este contaminante, actualmente no existen sistemas que midan en forma directa su concentración.

En consecuencia, para determinar la concentración de MP, la respuesta de los Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisión para MP (CEMS-MP), debe ser correlacionada con resultados obtenidos aplicando el método de referencia (Jahnke, 2000; EPA, 2000), el que corresponde a un complejo método manual de muestreo isocinético y análisis de laboratorio.

En el marco del cumplimiento del D.S. N°13/2011 del MMA o Norma de Emisión para Central Termoeléctricas, desde el año 2013 se ha validado varias decenas de CEMS-MP en Chile.

Dentro de las pruebas de validación y auditorías de los CEMS-MP, la prueba más importante es el ensayo de Curvas de Correlación. Por medio de este ensayo se obtiene un modelo de tendencia por método de mínimo cuadrados, comparando las lecturas del CEMS-MP frente a los resultados de concentración de MP con el método de referencia. Con la ecuación de tendencia de mayor correlación obtenida, se determina las concentraciones de MP emitidas en chimenea, en función de los valores obtenidos por el CEMS-MP.

Desarrollar un ensayo de Curvas de Correlación con buen desempeño es un desafío complejo (EPRI, 2006; EPRI, 2007). A las dificultades reportadas en la bibliografía, es necesario agregar que la experiencia nacional es muy incipiente, tanto en sistemas CEMS-MP como en sus procesos de validación y auditorías.

Dentro de los desafíos críticos, se encuentra la exigencia del Protocolo para la Validación de CEMS en Centrales Termoeléctricas de la SMA, por realizar el ensayo de Curvas de Correlación midiendo 3 niveles de concentración de MP, “variando las condiciones de operación del proceso, variando las condiciones del dispositivo de control de MP o utilizando adición controlada de MP (spiking)” (SMA, 2013).

Esta es una condición que en general no se ha cumplido en los procesos de Curvas de Correlación que se han realizado en Chile, pese a que en varias aplicaciones se han realizado maniobras operacionales para buscar variar la concentración de MP. Esto afecta el rendimiento de las curvas obtenidas.

Mientras que, en los casos en que se ha logrado obtener variaciones en las concentraciones, las maniobras realizadas han tenido un alto riesgo operacional y bajo control sobre las emisiones máximas.

En este contexto, la utilización del sistema de Spiking patente norteamericana 6,694,796 B2 (Juneau y Baxter, 2004) de B3 Systems Inc., que permite calibrar y validar CEMS-MP a partir de variaciones en la concentración de MP mediante la adición controlada de polvo, permite cumplir esta exigencia del Protocolo y se perfila

como una buena alternativa para ser utilizado en proceso de Curvas de Correlación en Chile.

No obstante, pese a que el sistema se ha utilizado en decenas de aplicaciones en EE.UU., a la fecha nunca ha sido utilizado en Chile y no hay estudios sistemáticos que evalúen su desempeño en variar la concentración de MP y de los resultados obtenidos en procesos de Curvas de Correlación utilizándolo.

En vista de este vacío, en el presente Seminario de Título se aplicó el sistema de Spiking para obtener variaciones en la concentración de MP en las unidades de generación eléctrica 1, 2 y 4 del Complejo Termoeléctrico Ventanas. A partir de estos resultados se analizará el desempeño de este sistema para variar la concentración de MP y si con él se logra obtener Curvas de Correlación que posean ventajas comparativas respecto a las obtenidas en procesos en que se ha utilizado otros métodos para variar la concentración de MP.

1.2. Marco teórico

1.2.1. Contaminación de aire por material particulado

La contaminación del aire es un tema de especial preocupación en el mundo debido a su impacto sobre la salud humana y animal y el calentamiento global. Dentro de los contaminantes críticos, el Material Particulado (MP) recibe especial atención, por ser el que más significativamente impacta sobre la mortalidad y morbilidad en la población (Pope y Dockery, 2006). Asimismo, el carbón negro, que es un aerosol producido por la combustión incompleta de combustibles fósiles, es identificado por algunos estudios como el segundo contaminante de la atmósfera, detrás del CO₂ antrópico, que más impacta sobre el calentamiento global actualmente (Ramanathan y Carmichael, 2008).

Material particulado es un concepto genérico utilizado para una amplia categoría de sustancias química y físicamente diversas que existen como partículas discretas (gotas líquidas o sólidos), en una amplia gama de tamaños, suspendidas en una masa de aire estable (U.S. EPA, 2004). Las partículas atmosféricas se originan desde una variedad de fuente y poseen un amplio rango de propiedades morfológicas,

químicas, físicas y termodinámicas. Posiblemente el MP es la forma más compleja de contaminación atmosférica, puesto que sus características como composición química, forma, tamaño y color están determinadas por los materiales iniciales, las fuentes emisoras y las condiciones atmosféricas en las cuales se encuentra.

Diversas investigaciones (Pope y col., 2004; Cohen y col., 2005) han demostrado que el MP ocasiona diversos efectos adversos en la salud, como son enfermedades cardiovasculares y respiratorias crónicas, bronquitis, ataques de asma, cáncer de pulmón, tranquea y bronquios e infecciones respiratorias agudas.

1.2.2. La contaminación por MP en Chile y las medidas adoptadas

En Chile, la contaminación de aire ha sido reconocida por las autoridades como un problema grave en las últimas décadas. Producto de esto se han implementado una serie de normativas que regulan las emisiones a la atmósfera de diversos contaminantes gaseosos y de MP. Así mismo, se ha implementado planes de prevención y descontaminación ambiental en diversas regiones.

No obstante, a pesar de estas medidas, de acuerdo a estimaciones realizadas por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA, 2011), al menos 10 millones de personas están expuestas a una concentración promedio anual de MP fino superior a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, es decir superior al límite dado por la Norma primaria de Calidad Ambiental para MP fino, y más de 4.000 persona mueren prematuramente al año por enfermedades cardiopulmonares asociadas a la exposición crónica a este contaminante.

En este contexto, el año 2010 el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) inició la elaboración e implementación del Programa Aire Limpio (PAL), cuyo principal objetivo es mejorar la calidad aire de las principales zonas urbanas del país, incorporando un enfoque nacional a la gestión de la problemática. El PAL está orientado al control de MP fino, así como sus contaminantes precursores.

Por medio del PAL, el gobierno definió priorizar acciones sobre los sectores identificados como los mayores responsables de la contaminación por MP fino, es decir, los sectores industrial, transportes y residencial.

Respecto al sector industrial, a la fecha se han implementado las siguientes normativas:

- D.S. N°13/2011 del MMA o Norma de Emisión para Central Termoeléctricas.
- D.S. N°28/2013 del MMA o Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre.
- D.S. N°29/2013, del MMA o Norma de Emisión para Incineración, Coincineración y Coprocesamiento.
- D.S. N°37/2013 del MMA o Actualización de la Norma de Emisión para Olores Molestos.

Además, actualmente está en proceso de desarrollo la Norma de Emisión para Calderas de Generación de vapor y otros procesos de combustión.

Para todas estas normas de emisión de los procesos industriales determinados como críticos, el MMA ha exigido la implementación y validación de Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones (CEMS), los que han sido considerados como fundamentales para facilitar la fiscalización del cumplimiento de la normativa (MMA, 2011).

La instalación y validación de los CEMS deben realizarse de acuerdo a una serie de protocolos técnicos emitidos por la SMA desde el año 2013 hasta la actualidad. Estos protocolos se han elaborado de acuerdo con las normativas para CEMS elaboradas por la Agencia Ambiental de los EE.UU. (US-EPA, por sus siglas en inglés), específicamente la Parte 75 y la Parte 60 del Volumen 40 del Código de Regulaciones Federales (Parte 75 o Parte 60, en adelante).

1.2.3. Centrales termoeléctricas

Las centrales termoeléctricas tienen un rol importante en la producción de electricidad a nivel mundial, debido a su confiabilidad, modularidad, independencia climática, disponibilidad, flexibilidad de localización y costos. Así es que la termoelectricidad tiene una participación de un 67% a nivel global y un 61% en la OECD. Debido a esto, producen un gran beneficio para la humanidad, pero su operación también trae costos para la salud de las personas y para el medio ambiente.

Las emisiones de contaminantes atmosféricos de las centrales termoeléctricas producen impactos a escala local, regional y global. Sus principales efectos sobre la salud de las personas se deben a las emisiones de partículas finas (<2,5 μm) y gases precursores para la formación de partículas finas, como son el SO_2 y los NO_x (Markandya y Wilkinson, 2007). En el caso de las centrales termoeléctricas a carbón, las partículas finas se encuentran enriquecidas de metales pesados, principalmente Hg (Meji y col., 2002), los que son altamente tóxicos. Así mismo, en el año 2004 se estimaba que el aporte de las centrales termoeléctricas a la emisión global de CO_2 , principal gas de efecto invernadero, era un de 27% (IPCC, 2007).

En Chile, la mayor parte de la energía eléctrica es producida por centrales termoeléctricas. El año 2008 (CONAMA, 2009), la generación de energía eléctrica en el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) fue de un 99% proveniente de termoeléctricas, mientras que en Sistema Interconectado Central (SIC) fue de un 47,5%.

De acuerdo al catastro de centrales termoeléctricas realizado por la SMA (SMA, 2014), la mayoría de las centrales en Chile funcionan a base de carbón.

Las centrales termoeléctricas son plantas industriales en las que, mediante la quema de combustibles fósiles o biomasa, se genera energía eléctrica o calor. En general una central típica se compone de: una caldera, donde se produce la combustión; una turbina o motor a calor, que transforma la energía térmica proveniente de la combustión en energía mecánica; y un generador, que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. En la Figura 1 se muestra un diagrama de funcionamiento de una central termoeléctrica de ciclo convencional.

En la mayoría de las centrales termoeléctricas a carbón, éste es pulverizado y posteriormente inyectado al horno mediante corriente de aire caliente a alta velocidad. Así el carbón pulverizado es quemado estando en suspensión, a una temperatura de 1.500 ± 200 °C.

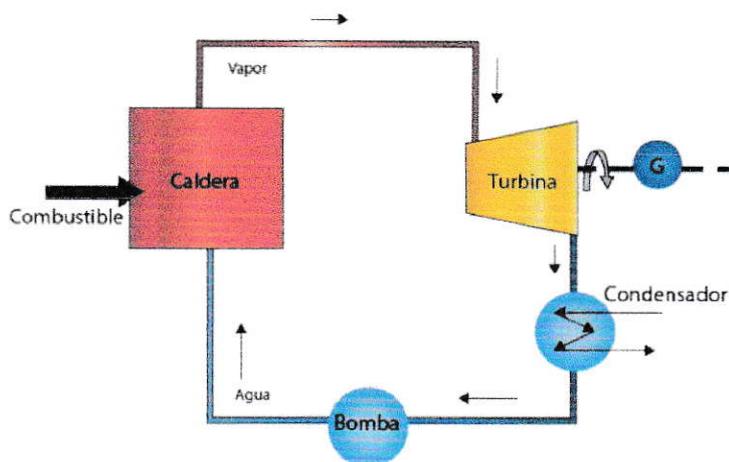


Figura 1. Diagrama de funcionamiento de una central de ciclo convencional (extraído SMA, 2014).

Durante este proceso una fracción de las partículas no sufre una combustión completa y, por ende, se producen ceniza. Asimismo, dado que las temperaturas que se alcanzan en la combustión están por encima del punto de fusión de la mayoría de minerales presentes en el carbón, hay una serie de elementos y componentes que se volatilizan parcial o completamente y posteriormente re-condensan en la superficie de las partículas de combustión cuando la temperatura baja (Linak y Wendt, 1993). Por ende, de acuerdo a los puntos de ebullición y sublimación de los elementos, generalmente las cenizas volantes (denominación utilizada para el MP emitido por centrales termoeléctricas a carbón) se encuentran enriquecidas de elementos traza, incluyendo metales pesados como Hg, V y Ni (Schroeder y col., 1987; Rausch y col., 1993).

Aproximadamente el 30% de la masa de carbón consumido se transforma en cenizas. Parte de la ceniza cae al fondo de la caldera (ceniza de fondo), no obstante la mayoría (típicamente el 85% para calderas de carbón pulverizado) es liberada como cenizas volantes y llevada por los gases de combustión (EPRI, 1988).

Para reducir las emisiones de MP de las centrales termoeléctricas a carbón, se utilizan equipo de abatimiento como son precipitadores electrostáticos y filtros de mangas. Estos equipos retiran la mayor parte de las cenizas volantes de los gases de

combustión, con eficiencias superiores a 99%. Generalmente la eficiencia de estos equipos se reduce para partículas del rango fino y ultrafino (EPA, 1998).

En función de la importancia que tienen las centrales termoeléctricas dentro de la matriz energética nacional, debido a su aporte significativo en la emisión de MP fino y precursores y que la concentración por MP fino ha sido reconocida nacionalmente como el problema de contaminación más importante, el MMA publicó el año 2011 el D.S. N°13 o Norma de Emisión para Centrales Termoeléctricas (MMA, 2011).

El D.S N°13/2011 del MMA indica los límites de emisión como concentración para MP, SO₂, NO_x y Hg de las unidades de generación eléctrica (UGE), dependiendo de tipo de combustible utilizado (sólido, líquido o gaseoso) y si estas son existentes (es decir, que se encuentra operativa o declarada en construcción con anterioridad al 30/11/2010) o nuevas. Los límites de concentraciones como promedio horarios se indican en los cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. Límites de concentración horaria para Unidades Generadoras de Electricidad existentes por tipo de combustible de acuerdo al D.S. N°13/2011 del Ministerio del Medio Ambiente.

Combustible	MP (mg/m ³ N)	SO ₂ (mg/m ³ N)	NO _x (mg/m ³ N)	Hg (mg/m ³ N)
Sólido	50	400	500	0,1
Líquido	30	30	200	N/A ⁽¹⁾
Gaseoso	N/A ⁽¹⁾	N/A ⁽¹⁾	50	N/A ⁽¹⁾

⁽¹⁾, N/A: No Aplica.

Cuadro 2. Límites de concentración horaria para Unidades Generadoras de Electricidad nuevas por tipo de combustible de acuerdo al D.S. N°13/2011 del Ministerio del Medio Ambiente.

Combustible	MP (mg/m ³ N)	SO ₂ (mg/m ³ N)	NO _x (mg/m ³ N)	Hg (mg/m ³ N)
Sólido	30	200	200	0,1
Líquido	30	10	120	N/A ⁽¹⁾
Gaseoso	N/A ⁽¹⁾	N/A ⁽¹⁾	50	N/A ⁽¹⁾

⁽¹⁾, N/A: No Aplica.

Para dar cumplimiento a los límites de emisión dados en el D.S. N°13/2011 del MMA, los titulares de UGE han debido implementar una serie de equipos de abatimiento como son filtros de manga, quemadores de baja generación de NO_x (NO_x = NO₂ + NO), equipos desulfurizadores, entre otros.

Para que las UGE puedan acreditar el cumplimiento de los límites de emisión, el D.S. N°13/2011 del MMA exige que los titulares de las fuentes deben “instalar y certificar un sistema de monitoreo continuo de emisiones para: Material particulado (MP), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y de otros parámetros de interés, de acuerdo a lo indicado en la Parte 75, Volumen 40 del Código de Regulaciones Federales (CFR) de la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA)”.

En función de esta exigencia, la SMA publicó el año 2013 el Protocolo para Validación de Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones (CEMS) para Centrales Termoeléctricas (SMA, 2013). Este Protocolo sistematiza las definiciones centrales dadas en la Parte 60 y la Parte 75 del CFR 40 de la US-EPA, en relación a validación de CEMS para los parámetros de interés del D.S. N°13/2011 del MMA. Estas normativas se han tomado como referencia, dado que la US-EPA es una de las organizaciones gubernamentales que más experiencia tienen en el mundo en CEMS.

1.2.4. Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones para Material Particulado

Los CEMS son sistemas que permiten medir en forma exacta y precisa, minuto a minuto, las concentraciones y otros parámetros interés, en los flujos de los gases de combustión que son emitidos hacia la atmósfera por chimeneas de procesos industriales. En el diagrama de la Figura 2 se muestra un ejemplo de CEMS que tiene equipos in-situ (instalados directamente en chimenea) de monitoreo para MP y Flujo y un sistema extractivo (extrae la muestra de gas de combustión desde la chimenea) con dilución para la determinación de los parámetros gaseosos. El DAHS es el Sistema de Adquisición Manejo de Datos, por las siglas de Data Acquisition and Handling System.

Un CEMS para MP o CEMS-MP es un sistema constituido por un monitor de MP (ya sea in-situ o extractivo) y un DAHS. El monitor permite obtener directamente

lecturas de alguna variable física que da cuenta de la concentración de MP en chimenea, mientras que el DAHS procesa los datos de las lecturas tomadas por el equipo monitor de acuerdo a los requerimientos de tratamiento de datos según la normativa aplicable.

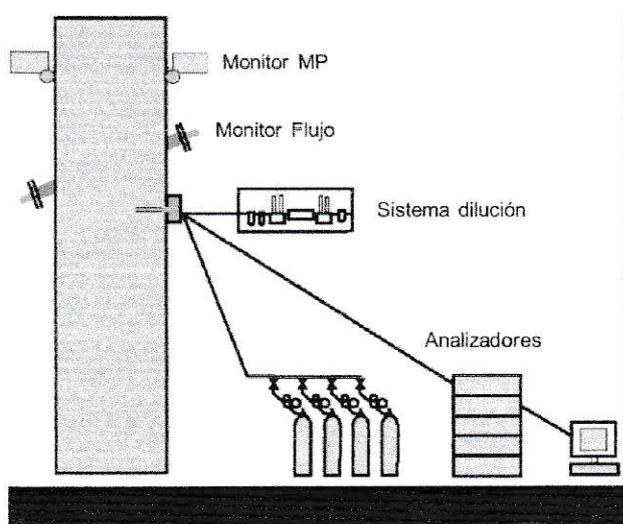


Figura 2. Diagrama de un ejemplo de Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones (modificado de EPA, 2013).

Los CEMS-MP se han implementado extensamente por Europa y EE.UU. durante las últimas décadas (EPA, 2000), con el objetivo de dar cumplimiento a las normativas ambientales de emisión de contaminantes. No obstante, las tecnologías disponibles actualmente tienen una limitación básica: no entregan una medición directa de la concentración de MP. Al contrario, se basan en diferentes técnicas indirectas, cuyas lecturas dependen de la distribución del tamaño de las partículas y de las características físicas (forma, color, etc) y químicas (composición) de éstas (Jahnke, 2000).

Las principales tecnologías de monitores de MP actualmente disponibles son: Atenuación Beta, absorción de luz, dispersión de luz, escintilación óptica y efecto triboeléctrico.

Debido a esto, la única forma para que un sistema CEMS-MP pueda monitorear la concentración de MP, es que sus resultados sean correlacionados con los resultados obtenidos por mediciones de la concentración de MP, utilizando los métodos de referencia autorizados (Jahnke, 2000). No obstante, los problemas surgen cuando las características como composición química, forma, tamaño y color del MP emitido exhiben una variabilidad significativa, dado que en estos casos la respuesta del CEMS-MP puede ser diferente a las obtenidas en el ensayo de CC (EPRI, 2007).

1.2.5. Exigencias de validación para CEMS-MP

Para que un CEMS-MP entregue datos válidos, de acuerdo a la normativa, debe cumplir los requisitos del Protocolo CEMS. Estos requisitos son: validación inicial e inmediatamente después de la aprobación de la validación inicial, aplicar un plan de aseguramiento y control de calidad.

Las directrices técnicas del Protocolo respecto a CEMS-MP se han extraído del Especificación de Desempeño 11 (PS-11, por sus siglas en inglés de Performance Specification 11) del Apéndice B de la Parte 60 del CFR 40, en cuanto al proceso de validación inicial, del Procedimiento 2 del Apéndice F de la Parte 60 del CFR 40, en cuanto a los requisitos de aseguramiento y control de calidad (QA/QC, por sus siglas en inglés de Quality Assurance and Quality Control).

Los 2 componentes primarios del PS-11 son: 1) el ensayo de margen de error por 7 días y 2) el ensayo de curvas de correlación.

En el ensayo de margen de error de 7 días, se chequea que el CEMS-MP, en ninguno de los días del periodo, tenga una desviación de su respuesta mayor a 2%, durante chequeos de los puntos alto y cero de la escala respecto a los valores de referencia. Estos chequeos se realizan cada 24 horas por 7 días consecutivos en que el proceso que monitorea el CEMS-MP se encuentra operativo.

Para ejecutar el ensayo de margen error los monitores de MP son diseñados de modo que, dependiendo de cada principio de funcionamiento y diseño, se pueda chequear la respuesta de sensor en nivel cero (0-20% del rango) y nivel span (80-100% del rango) para la variable física que mide el monitor (Jahnke, 2000). Por ende,

normalmente un equipo debe tener una falla para no aprobar el ensayo de margen de error.

Mientras, el ensayo de curvas de correlación se ejecuta realizando un mínimo de 15 corridas de mediciones del método de referencia para MP, mientras simultáneamente se registra la respuesta del CEMS-MP. A partir de estos pares ordenados (lecturas CEMS-MP y resultados medición MP método de referencia) se ejecuta un análisis de correlación de los resultados obtenidos, por el método de mínimos cuadrados.

Para realizar el ensayo de curvas de correlación, "las muestras deben ser obtenidas considerando al menos, el 20% de las 15 muestras mínimas, en tres niveles, nivel de concentración cero, nivel de concentración medio y nivel de concentración máxima, los que corresponden a valores entre 0-50, 25-75 y 50-100 por ciento, referidas al valor de máxima concentración de material particulado. Se debe intentar obtener los tres niveles de concentración de masa de material particulado, variando las condiciones de operación del proceso, variando las condiciones del dispositivo de control de MP o utilizando adición controlada de MP (spiking)" (SMA, 2013).

No obstante, "en caso de no ser posible obtener los tres niveles anteriores, se deben realizar los ensayos de correlación en el máximo rango de concentración de material particulado que sea práctico para el CEMS-MP y así asegurar que el rango del equipo sea el máximo. Se deberá seguir el siguiente procedimiento:

- Para instrumentos in-situ, los datos de punto cero, se deberían obtener, en lo posible, quitando el instrumento de la chimenea y monitoreando el aire ambiente en una plataforma de ensayo.
- Para instrumentos extractivos, los datos de punto cero, se deberán obtener quitando la sonda de la chimenea y apartándola a un ambiente de aire limpio.
- También, los datos de punto cero, pueden ser obtenidos con el equipo a medir en no operación productiva, sólo con los extractores operando.
- Si no fuera posible lo anterior, se deberá estimar la respuesta del monitor cuando no hay material particulado en el gas de emisión, por ejemplo, 4 mA = 0 mg/acm" (SMA, 2013).

Para cumplir con el PS-11 un modelo de correlación debe cumplir con los siguientes criterios estadísticos:



- El coeficiente de correlación debe ser $\geq 0,85$.
- El Intervalo de Confianza (95%) del rango medio de la respuesta promedio del CEMS-MP, debe estar dentro del 10% del límite de emisión para MP dado por la normativa.
- El Intervalo de Tolerancia (75%) del rango medio de la respuesta promedio del CEMS-MP, debe estar dentro del 25% del valor de límite emisión de MP.

La experiencia ha demostrado que el modelo de correlación obtenido es único por fuente, dado que no necesariamente un equipo en particular responde de la misma forma en diferentes unidades o viceversa (Jahnke, 2000). Así mismo, hay casos en que aprobar los criterios del PS-11 para el ensayo de curvas de correlación puede implicar grandes dificultades (EPA, 2000; EPRI, 2006; EPRI, 2007), sobre todo en términos de generar variaciones controladas de la concentración de MP y obtener resultados representativos con el CEMS-MP y el método de referencia.

Finalmente, el Protocolo limita la validez del mejor modelo de correlación obtenido, hasta una extrapolación máxima de 125% respecto al valor más alto de respuesta del CEMS-MP obtenido en ensayo de curvas de correlación. Por ende, se requiere realizar corridas adicionales para ampliar la curva, si alguna de las siguientes condiciones ocurre:

- El CEMS-MP produce respuestas de promedios horarios consecutivos por 24 horas que sean mayores al 125% del mayor valor de medición del CEMS-MP usado en el análisis de correlación inicial.
- Las respuestas acumulativas de los promedios horarios del CEMS-MP superiores al 125% de la más alta respuesta del CEMS-MP usada en el análisis de correlación es superior al 5% de datos totales de lecturas en horas operativas para el periodo de 30 días previos.

En caso de exceder los criterios de extrapolación de las correcciones indicados arriba, se debe realizar un mínimo de 3 corridas adicionales en la nueva condición. Luego estos resultados se agregan a la base de datos de la correlación inicial y se obtiene una ecuación de modelo correlación revisada. Los ensayos adicionales y la ecuación de correlación revisada se debe completar antes de transcurrido 60 días después de ocurrido el evento que requiere los ensayos adicionales.

Dados los criterios de extrapolación de la curvas de correlación indicados arriba, es importante generar variaciones en la concentración de MP durante el desarrollo del ensayo de curvas de correlación, de lo contrario, ante pequeños aumentos de las concentraciones se obtienen resultados inválidos.

1.2.6. Aseguramiento y control de calidad para CEMS-MP

Una vez aprobados los criterios de validación inicial, el CEMS-MP debe ser sometido a pruebas QA/QC (por las siglas de Quality Assurance and Quality Control, es decir, Aseguramiento de Calidad y Control de Calidad) en forma continua (SMA, 2014). Estas pruebas son: chequeos diarios de respuesta en cero y span, pruebas trimestrales de Auditoría de Correlación Absoluta (ACA), pruebas anuales de Auditoría de Respuesta Relativa (ARR) y pruebas trianuales de Auditoría de Correlación de Respuesta (ACR).

El procedimiento de ACA consiste en un chequeo de la respuesta del CEMS-MP a 3 estándares de referencia, generalmente filtros de atenuación óptica certificados a valores de nivel bajo, medio y alto, para equipos con principio de funcionamiento ópticos. Por medio de este ensayo se verifica que el sensor conserva la linealidad de su respuesta.

Los ensayos de ARR y ACR evalúan si nuevas corridas de mediciones con el método de referencia y el CEMS-MP en simultáneo, caen dentro de los rangos de resultados e intervalo de tolerancia obtenidos en la curva inicial, para el mejor modelo de correlación.

La ARR se realiza colectando 3 corridas simultáneas de medición del CEMS-MP y del método de referencia en condiciones normales de operación. Para aprobar la ARR:

- Para los 3 puntos de datos, el valor de respuesta del CEMS-MP no debe ser mayor que el mayor valor de respuesta del CEMS-MP usado para realizar la Curva de Correlación inicial.
- Para 2 de los 3 puntos, el valor de respuesta del CEMS-MP debe estar dentro de rango del CEMS-MP usado para desarrollar la Curva de Correlación inicial.

- Al menos 2 de las 3 corridas de datos del CEMS-MP y del método de referencia deben caer dentro del área especificada en el gráfico de regresión lineal de la correlación inicial. El área especificada está definida por 2 líneas paralelas a la línea de regresión de la correlación, a una distancia de $\pm 25\%$ de valor del límite emisión en el eje y (en el eje y de una CC se obtiene las concentraciones de MP, en el eje x se ingresan las mediciones del equipo CEMS-MP).

Finalmente, la ACR se realiza colectando 12 corridas simultáneas de medición del CEMS-MP y del método de referencia en 3 niveles de concentración de MP, es decir, siguiendo el mismo procedimiento del ensayo de curvas de correlación. Para aprobar la ACR:

- Para el total de 12 puntos, el valor de respuesta del CEMS-MP no debe ser mayor al mayor valor de respuesta del CEMS-MP usado para desarrollar la Curva de Correlación inicial.
- Para 9 de los 12 puntos, la respuesta del CEMS-MP debe estar dentro del rango del CEMS-MP utilizado para desarrollar la Curva de Correlación inicial.
- Al menos el 75% de las 12 corridas de lecturas del CEMS-MP y de medición del método de referencia deben caer dentro del área especificada en el gráfico de regresión lineal de la correlación inicial. El área especificada está definida por 2 líneas paralelas a la línea de regresión de la correlación, a una distancia de $\pm 25\%$ de valor del límite emisión en el eje y.

Hay casos en que aprobar los ensayos de ARR y ACR puede tener grandes dificultades (Roberson y col., 1999; EPA, 2000; Dunn y col., 2002), debido a que, a través del tiempo, pueden variar la eficiencia de los equipos de procesos y de los equipos de abatimiento, el tipo y calidad de los combustibles o materias primas de los procesos, entre otras variables que afectan la distribución de diámetros de partículas, la forma, el tamaño y composición química del MP.

1.2.7. Método de referencia para mediciones de MP

En Chile el método de referencia para medir la concentración de MP total filtrable en fuentes fijas es el método CH-5 (ISP, 2012). Este método es homólogo al método EPA 5 de la US-EPA (US-EPA, 1996).

El método consiste en un muestreo isocinético de MP, es decir, un muestreo en que la velocidad de succión de la muestra desde el ducto o chimenea muestreado sea igual a la velocidad que trae el flujo de gases. Por medio del isocineticismo se asegura no provocar una separación mecánica de los contaminantes con respecto al gas portador, logrando obtener muestras representativas de la concentración existente en el gas de chimenea. En la Figura 3 se incluye un diagrama que explica el comportamiento de las partículas en muestreos isocinéticos y no isocinéticos.

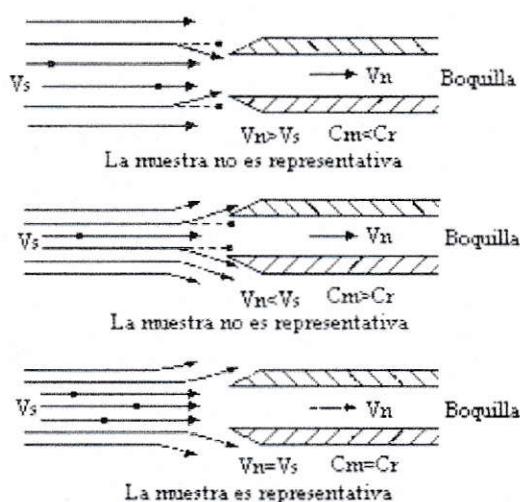


Figura 3. Diagrama de la trayectoria de las partículas en muestreos isocinéticos y no isocinéticos.

Para aplicar el método CH-5, es necesario realizar algunos procedimientos en forma previa y en paralelo que están dado por los métodos CH-1, CH-2, CH-3 y CH-4 (ISP, 1996a, 1996b; 1996c, 1996d).

Con el método CH-1 se selecciona el sitio de medición en el ducto o chimenea. Este debe estar a distancias suficientes de las últimas perturbaciones flujo abajo y flujo arriba, para que exista un flujo homogéneo y paralelo al eje del ducto. Así mismo, para determinar la validez del área de medición seleccionada se realiza una determinación de la ausencia de flujo ciclónico (ángulo de inclinación promedio del flujo $>10^\circ$). Una vez validado el sitio de medición el método permite determinar el número de puntos mínimos de muestreo con los que se debe obtener una muestra representativa, en

función del diámetro del ducto y las distancias que hay desde el área transversal de muestreo y las últimas perturbaciones flujo arriba y flujo abajo.

Una vez determinado el sitio de medición, se puede dar inicio a la medición aplicando en conjunto los métodos: CH-2 para determinación de la velocidad del gas de chimenea, CH3 para determinar la masa molar del gas, CH4 para determinación del contenido de humedad, y CH5 para determinar la concentración de MP.

A partir del método CH-2 se determina la velocidad de los gases de chimenea. Para esto se determinan los promedios de la presión diferencial de velocidad, estática y absoluta para el área de muestreo, realizando muestreos empleando un tubo pitot de tipo S. La velocidad del gas en la chimenea se relaciona con la presión diferencial a través de la ecuación de Bernoulli.

Para realizar el cálculo de velocidad de gases de acuerdo a la ecuación de Bernoulli se requiere determinar la masa molar del gas en la chimenea. Para esto se aplican los métodos CH-3 y CH-4.

El método CH-3 permite determinar la masa molar del gas seco a partir de la determinación del porcentaje molar de gases de combustión. Para esto se utiliza el equipo de análisis Orsat. En éstas reacciones químicas selectivas para O_2 y CO_2 permiten determinar la concentración en volumen de estos componentes y, por diferencia, la concentración de N_2 .

El método CH-4 permite determinar el porcentaje de humedad de los gases de chimenea. Con este resultado se determina la masa molar del gas en condiciones de chimenea a partir de la masa molar del gas seco. Para realizar la determinación del contenido de humedad del gas de chimenea se utiliza el tren de muestreo con el que se realiza la medición isocinética de MP.

La descripción de las características que requiere el tren de muestreo y los procedimientos para realizar un muestreo isocinético se describen en el método CH-5. En la Figura 4 se muestra un diagrama del tren de muestreo utilizado para realizar mediciones isocinéticas de MP.

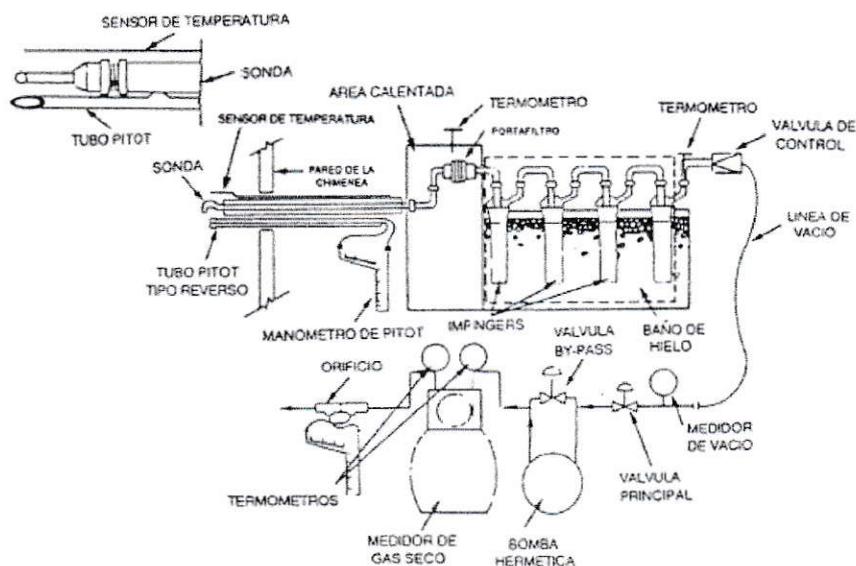


Figura 4. Diagrama del tren de muestreo utilizado para mediciones isocinéticas de MP.

Utilizando el tren de muestreo se toma isocinéticamente una muestra de gases de chimenea, succionándolos con una bomba, que los hace pasar por un filtro calefaccionado ($120 \pm 14^\circ\text{C}$) de retención de partículas y por unos burbujeadores que se encuentran en baño de hielo para condensar la humedad (temperatura menor o igual a 20°C).

Para asegurar que el muestreo se realice en condiciones isocinéticas, el método CH-5 se inicia realizando una corrida preliminar de muestreo para determinar la velocidad de los gases de chimenea. A partir de este resultado se determina el diámetro ideal de la boquilla a utilizar para el muestreo de MP. Una vez determinada la boquilla se debe realizar el muestreo en cada punto procurando la velocidad de succión generada por la bomba de vacío sea igual a la velocidad de los gases de chimenea. Para esto el tren de muestreo cuenta con medidores y válvula de regulación de vacío, los que deben ser utilizados apropiadamente para asegurar un muestreo isocinético.

Una vez finalizada la corrida de medición, es decir, el muestreo completo en cada uno de los puntos definidos por la matriz de muestreo determinada con el método CH-1 para la fuente, se debe calcular el coeficiente de isocinetismo obtenido. Si el

resultado se encuentra dentro del rango entre 90-110% la corrida es válida. Así mismo, se debe asegurar que el volumen de muestreo obtenido por corrida sea de al menos $1 \text{ m}^3\text{N}$, para asegurar que la muestra sea representativa.

A partir del método CH-5 se obtiene el material particulado total del gas de chimenea que condensa a la temperatura de filtración. El material particulado se determina gravimétricamente a partir del peso del filtro obtenido en la corrida de medición más el peso del particulado recuperado (y llevado a sequedad) al lavar la boquilla de la sonda de muestreo, el cuerpo de la sonda y el porta filtro con acetona. Luego, la concentración se determina como cociente entre este valor en masa y el volumen de muestreo obtenido durante la corrida.

1.2.8. Sistema de Spiking para adición controlada de polvo

El diseño general del sistema descrito en la patente 6,694,796 B2 (Juneau y Baxter, 2004) se muestra en la Figura 5.

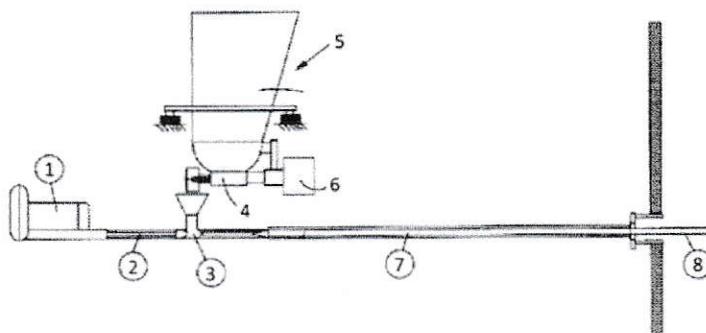


Figura 5. Diagrama general del sistema de Spiking (Juneau y Baxter, 2004).

(1): Fuente de flujo de aire presurizado. (2): Línea de entrada al eductor. (3): Eductor. (4): Tornillo sinfín del alimentador. (5): Alimentador por pérdida de peso. (6): Unidad de control de velocidad del tornillo sinfín. (7): Línea de salida del eductor. (8): Sonda de inyección del polvo.

El alimentador por pérdida de peso, almacena el polvo y lo entrega en una tasa de flujo másico (kg/h) configurable y en forma constante al eductor.

La tolva del alimentador permite almacenar la suficiente cantidad de polvo para asegurar el funcionamiento del sistema por algunas horas, dependiendo de la tasa de

alimentación seleccionada. La tolva posee lados empinados y posee un agitador de paletas masajeadoras, de este modo se evita que el polvo se segregue o se separe por tamaño de partículas en el descenso.

Este equipo funciona mediante el giro de un tornillo sinfín, el que recibe el polvo desde la tolva y la entrega al eductor a una tasa de flujo uniforme. El tamaño del sinfín debe ser seleccionado de acuerdo a las tasas de inyección que se desee seleccionar.

La velocidad con que gira el tornillo sinfín debe mantenerse constante en todo momento para que la tasa de inyección se mantenga constante. Para esto el equipo cuenta con una unidad de control de velocidad. En esta unidad, a través del monitoreo del peso del polvo, ajusta continuamente la velocidad del motor de alimentación, para mantener una velocidad de giro tal que permita mantener la tasa de alimentación de polvo hacia el eductor.

El eductor permite que el polvo sea fluidizado en aire presurizado. El tamaño y forma de éste se seleccionan de forma que la tasa de flujo sea la suficiente para que el polvo se mantenga fluidizado, para llegar a la sonda de inyección, pero a la vez no diluya el flujo de gases de chimenea en una tasa superior a 10% en volumen.

Para que el eductor trabaje debe ser suministrado de una fuente de flujo de aire presurizado. La fuente de aire debe entregar la suficiente presión y tasa de flujo para permitir la fluidización del polvo en el eductor. Las presiones y flujos típicos de trabajo son 10 a 15 psi (0,7 a 1 bar) y 40 a 50 ft³/min (68 m³/h a 85 m³/h), respectivamente, dependiendo de las aplicaciones. Para regular la presión se utiliza un manoreductor en la línea de entrada de aire hacia el eductor. Además en la línea de entrada se incluye un sensor de flujo de rotor para aire comprimido, el que permite monitorear el flujo y asegurar que este se mantenga dentro de los márgenes requeridos.

Para monitorear si hay presencia de obstrucciones en el eductor y en las líneas, se utiliza un manómetro en la línea de salida del eductor. Así, en caso de existir una caída de presión, se puede tomar medidas antes de que la obstrucción del sistema perjudique la tasa de inyección de polvo.

Para controlar la tasa de alimentación de polvo el sistema dispone de una Interface Hombre-Máquina (en adelante HMI, por la siglas en inglés de Human-Machine Interface) que comanda un Controlador Lógico Programable (en adelante

PLC, por las siglas en inglés de Programmable Logic Controller) que se comunica con el alimentador para controlar las variables de operación del alimentador y monitorear los indicadores de funcionamiento.

Finalmente, la sonda de inyección se une flujo abajo al final de la línea de salida del eductor y se extiende hacia el interior del ducto o la chimenea, por el que se conducen los gases de desecho del proceso. La sonda debe extenderse lo suficiente para inyectar el MP lo más cerca del punto central del ducto, donde el flujo es más laminar, para asegurar que el polvo se mezcle en forma eficiente con el gas de chimenea.

La sonda se debe ubicar flujo abajo de cualquier equipo de control de emisiones de material particulado, de modo que el polvo adicionado no sea abatido, de lo contrario no se podrá determinar en forma precisa la concentración final de MP producida. Así mismo, debe ser ubicada flujo arriba del CEMS-MP y de los puertos de muestreo que utiliza el laboratorio que realiza muestreo con el método CH-5.

1.3. Planteamiento del problema

Desarrollar ensayos de Curvas de Correlación con buen desempeño es un desafío complejo de acuerdo a las dificultades reportadas en la literatura (EPRI, 2006; EPRI, 2007). Asimismo, en Chile la experiencia ejecutando estos ensayos es escasa, dado que las primeras Curvas de Correlación fueron realizadas recién en el año 2013.

Dentro de los desafíos críticos se encuentra la exigencia del Protocolo CEMS por realizar el ensayo de Curvas de Correlación midiendo 3 niveles de concentración de MP, "variando las condiciones de operación del proceso, variando las condiciones del dispositivo de control de MP o utilizando adición controlada de MP (spiking)" (SMA, 2013). Esta es una condición que en general no se ha alcanzado en los procesos de Curvas de Correlación que se han realizado en Chile, pese a aplicación de algunas metodologías para la variación de la concentración de MP.

El motivo por el cual el Protocolo exige obtener respuestas de concentración de MP en 3 niveles, es obtener una Curva de Correlación que cubra el rango de condiciones operacionales y escenarios de emisiones posibles de la fuente. De lo

contrario, si estos niveles no se obtienen, habrá un limitado rango de respuestas del CEMS-MP dentro del cual la Curva de Correlación será representativa y se pueda utilizar para determinar las emisiones en forma válida.

De la experiencia recopilada sobre los esfuerzos realizados a la fecha por los titulares para obtener cambios en la concentración MP, las principales dificultades encontradas para cada metodología de variación de la concentración de MP son las siguientes:

- El método de cambios de carga operacional de la Planta (potencia, producción, etc) muchas veces no provocan un cambio en las concentraciones de MP que permita obtener diferentes niveles.
- El método de cambios en las condiciones de los equipos de control de MP (precipitadores electrostáticos, filtros de manga, etc) en algunas ocasiones han provocado aumento en las emisiones no esperados o incluso fallas que los dejan fuera de servicio, lo que puede ocasionar condiciones de superación de los límites de emisión.
- La aplicación de los métodos anteriormente mencionados, en muchos casos implicar altos riesgos operacionales y ambientales para los titulares de las Plantas.
- Pese a que el Spiking o adición controlada de polvo es un método para la variación de la concentración de MP que cuenta con una patente en EE.UU., hasta antes del presente estudio no era una metodología disponible en Chile, y dado que su aplicación a nivel internacional acumula una experiencia de apenas una década, hasta la fecha no hay estudios que analicen y/o demuestren su eficacia como tratamiento experimental para obtener Curvas de Correlación que incentiven su uso a nivel nacional.

Estas dificultades y/o limitancias de las metodologías disponibles para variar la concentración de MP han derivado en que la mayoría de los titulares en Chile que tienen UGE sin equipos de abatimiento de emisiones para MP, pese a realizar en muchos casos esfuerzos para variar las condiciones operacionales del proceso, no logren obtener variaciones en la concentración de MP que permitan obtener Curvas de

Correlación con 3 niveles, como exige el Protocolo, lo que afecta el desempeño de las curvas.

Además, en los casos en que en estas Plantas se ha logrado obtener variaciones en la concentración MP, muchas veces no se ha logrado evitar generar emisiones que superan los límites de emisión de MP durante el ensayo, lo que ha derivado en costos ambientales y/u operacionales, o incluso en que algunos resultados estadísticos para evaluar la validez de las curvas obtenidas no aprueben los criterios, lo que implica la invalidez de las Curvas de Correlación, por lo que han debido repetirse estos ensayos.

Ante esta problemática, en el presente Seminario de Título se realiza una evaluación de la eficacia del sistema de Spiking o adición controlada de polvo para variar la concentración de MP, y así calibrar y validar CEMS-MP mediante el procedimiento de Curvas de Correlación en Centrales Termoeléctricas.

Este sistema es una tecnología emergente (patentada en EE.UU. en el año 2004), con la cual es posible inyectar en forma controlada polvo hacia el ducto o chimenea en que se encuentra un CEMS-MP, y así generar aumentos determinados de la concentración de MP de acuerdo a los requerimientos del proceso. Utilizando este sistema es posible obtener 3 o más niveles de concentraciones de MP para desarrollar Curvas de Correlación de acuerdo a las exigencias del Protocolo.

Para evaluar la eficiencia del sistema de Spiking se ejecutaron procesos de Curvas de Correlación utilizando esta técnica en las UGE 1, 2 y 4 del Complejo Termoeléctrico Ventanas. Estas son las primeras aplicaciones utilizando el sistema de Spiking que se ejecutan fuera de EE.UU.

En el marco de la presente investigación, la eficiencia del sistema de Spiking será determinada en función de:

- El desempeño del sistema de Spiking para generar variaciones de la concentración de MP en forma exacta, precisa, rápida, estable y reproducible.
- El desempeño de las Curvas de Correlación obtenidas con Spiking en comparación con las obtenidas anteriormente en las mismas UGE con otros métodos de variación de la concentración de MP.

A la fecha no hay estudios científicos o técnicos que discutan la eficiencia del sistema de Spiking. Asimismo, es escasa la investigación que se ha realizado sobre las dificultades que existen para realizar procesos de Curvas de Correlación con un buen desempeño y cuáles son los mecanismos y/o condiciones que pueden incidir en éste.

1.4 Hipótesis y Objetivos

1.4.1 Hipótesis

El sistema de Spiking es eficaz para variar la concentración de MP y, de este modo, para desarrollar Curvas de Correlación de CEMS-MP en Centrales Termoeléctricas que logran ventajas comparativas respecto a las obtenidas con otros métodos.

1.4.2 Objetivos generales de la investigación

Evaluar la eficacia del sistema de Spiking para variar la concentración de MP en ensayos de Curvas de Correlación de CEMS-MP realizados en unidades de generación termoeléctrica a carbón, y comparar los resultados de estas Curvas de Correlación con los obtenidos utilizando otros métodos de variación de la concentración de MP en las mismas unidades.

1.4.3 Objetivos específicos

- Determinar la exactitud, precisión, rapidez, estabilidad y reproducibilidad del sistema de Spiking para generar aumentos controlados en la concentración de MP en las Unidades 1, 2 y 4 del Complejo Termoeléctrico Ventanas.
- Evaluar el desempeño de las Curvas de Correlación obtenidas utilizando el sistema de Spiking para variar la concentración de MP en las unidades 1, 2 y 4 del Complejo Termoeléctrico Ventanas, en comparación con los resultados previos obtenidos con otros métodos de variación de la concentración de MP para las mismas unidades.

- Identificar y analizar el impacto de otros mecanismos y/o condiciones, independientes al método de variación de concentración de MP, que inciden sobre el desempeño de los resultados de las Curvas de Correlación obtenidas.

II. MÉTODO

2.1. Descripción general del método

Se ejecutaron ensayos de Curvas de Correlación (CC) en las UGE 1, 2 y 4 del Complejo Termoeléctrico Ventanas. Para variar la concentración de MP se utilizó el sistema de adición controlada de polvo Spiking, patente norteamericana US 6,694,796 B2 (Juneau y Baxter, 2004) de la empresa norteamericana B3 Systems.

En las UGE 1 y 2, el CEMS-MP está constituido por el monitor de MP marca SICK modelo C200 (ver Figura 6), que utiliza el principio de medición de dispersión de luz hacia adelante, y el DAHS marca INERCO modelo SADMA. Mientras, en la UGE 4, el CEMS-MP está constituido por el monitor de MP marca SICK modelo SB100 (ver Figura 7), que utiliza el principio de medición de retrodispersión de luz, y el DAHS marca NEXUS SOLUTIONS modelo CEMView.



Figura 6. Monitor de Material Particulado instalado en la chimenea de la Unidad de Generación Eléctrica 1 del Complejo Ventanas.



Figura 7. Monitor de Material Particulado instalado en la chimenea de la Unidad de Generación Eléctrica 4 del Complejo Ventanas.

En el Cuadro 3 se indican las características de los monitores de MP instalados en las chimeneas de las UGE del Complejo Ventanas. Todos los CEMS-MP corresponden a equipos que miden luz dispersada o SL (por las siglas de Scattered Light, que significa luz dispersada en inglés).

Cuadro 3. Características de los monitores de Material Particulado instalados en las chimeneas de las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4 del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

UGE ⁽¹⁾	Marca	Modelo	Principio de funcionamiento	Rango (SL ⁽²⁾)
1	SICK	C200	Dispersión hacia adelante	0 – 20
2	SICK	C200	Dispersión hacia adelante	0 – 30
3	SICK	SB100	Dispersión hacia atrás	0 – 100

⁽¹⁾, UGE: Unidad de Generación Eléctrica.

⁽²⁾, SL: Scattered Light (Luz dispersada).

Los monitores de MP modelos C200 y SB100, funcionan por el principio de dispersión de luz. Estos equipos miden la cantidad de luz reflejada o refractada debido a la presencia de partículas. La cantidad de luz dispersada depende de las propiedades físicas de las partículas, tanto como de la concentración.

En estos instrumentos, un rayo de luz visible colimado (los rayos son paralelos entre sí) es emitido al flujo de gas. La luz es dispersada por partículas en el paso de luz y la óptica de recepción focaliza un área de esa luz hacia el detector que genera una señal eléctrica proporcional a la intensidad de la luz recibida. El ángulo de la fuente respecto a la óptica de recepción y las características de la óptica determina el volumen de espacio en que la luz dispersada es medida.

Las mediciones isocinéticas con el método de referencia CH-5, las ha realizado el laboratorio acreditado Axis Tecnologías Ambientales. Ltda.

La ingeniería del proyecto, la instalación y operación del sistema de Spiking, la supervisión de las inspecciones realizadas sobre los CEMS-MP, las mediciones de laboratorio y las condiciones operacionales de las UGE y el procesamiento de los resultados, estuvo a cargo de la empresa ESINFA. El autor del presente Seminario de Título fue el supervisor responsable del proyecto.

Las CC realizadas en el presente estudio se enmarcan en los procesos oficiales de validación de los CEMS-MP de las UGE 1, 2 y 4 del Complejo Ventanas.

El Complejo Termoeléctrico Ventanas posee cuatro unidades de generación eléctrica, las Unidades 1, 2, 3 y 4. Estas Fuentes se encuentran ubicadas en la V Región de Chile, Provincia de Valparaíso, Comuna de Puchuncaví, en la calle Camino costero s/n. En la Figura 8 se presenta una imagen satelital de la zona en que en encuentran instalado el Complejo Termoeléctrico Ventanas. Además se indica la ubicación de la Refinería de Cobre de CODELCO Ventanas y la ubicación de las estaciones de calidad del aire instaladas en la zona.

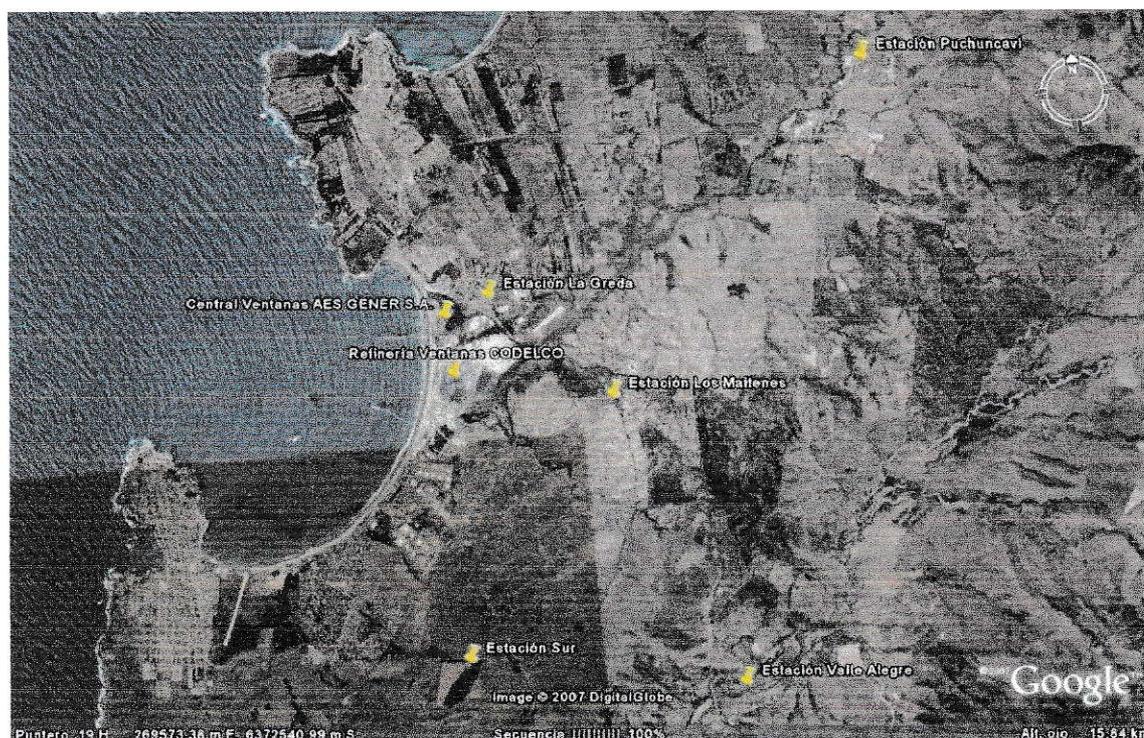


Figura 8. Imagen satelital de la zona en que se emplaza el Complejo Termoeléctrico Ventanas (Elaborado a partir de Google Earth).

Las UGE del Complejo Ventanas son unidades de ciclo convencional, es decir, centrales que obtienen la energía mecánica necesaria para mover el rotor del generador a partir del vapor generado por la caldera. Estas UGE usan como combustible carbón.

En el Cuadro 4 se indican las principales características de cada UGE.

Cuadro 4. Características de las Unidades Generadoras de Electricidad 1, 2 y 4 del Complejo Termoeléctrico Ventanas.

		UGE ⁽¹⁾ 1	UGE ⁽¹⁾ 2	UGE ⁽¹⁾ 4
Potencia (MW)		120	218	267
Carbón		Bituminoso	Bituminoso	Bituminoso + sub-bituminoso
Turbina	Marca	General Electric	General Electric	Ansaldo Energía
	Modelo	Tandem Compound	Tandem Compound	RH-TCDF42
	Puesta en marcha	1964	1977	2013
Caldera	Marca	Babcock and Wilcox	Babcock and Wilcox	DOOSAN
Abatimiento MP	Equipo	FMAE ⁽²⁾	FMAE ⁽²⁾	FMAE ⁽²⁾
	Marca	Andritz	Andritz	STX
	Modelo	-	-	-
	Eficiencia (%)	99,9	99,9	99,99
	Puesta en marcha	2014	2015	2013
Abatimiento NO _x	Equipo	LNB ⁽³⁾	LNB ⁽³⁾	LNB ⁽³⁾
	Marca	Babcox and Wilcox	Babcox and Wilcox	DOOSAN
	Modelo	Quemadores Aire Jet	Quemadores Aire Jet	Mezcla externa
	Eficiencia (%)	-	-	50
	Puesta en marcha	2015	2015	2013
Abatimiento SO ₂	Equipo	FGD ⁽⁴⁾	FGD ⁽⁴⁾	FGD ⁽⁴⁾
	Marca	Andritz	Alstom	STX
	Modelo	Turbosorp	Sea water	Spray Drying - Absortion
	Eficiencia (%)	-	80	74,5
	Puesta en marcha	2015	2010	2013

(1), UGE: Unidad Generadora de Electricidad.

(2), FMAE: Filtro de Mangas de Alta Eficiencia.

(3), LNB: Low NO_x Burner (quemadores de Baja emisión de NO_x).

(4), FGD: Flue Gas Desulfurizer (Desulfurizador de Gas de Combustión).

Mientras, en la Figura 9 se presenta un diagrama de la chimenea de la UGE 4, donde se identifica la ubicación de los puertos de muestreo para el CEMS-MP y para los muestreos del método CH-5, los que se encuentran a una distancia flujo arriba de la última perturbación, consistente en los ductos de entrada de gases de combustión a la chimenea, superior a 2 veces el diámetro interno, pero inferior a 8

veces. Así mismo, se encuentran a una distancia flujo abajo de la última perturbación, consistente en la salida hacia la atmósfera, superior a 2 veces el diámetro interno.

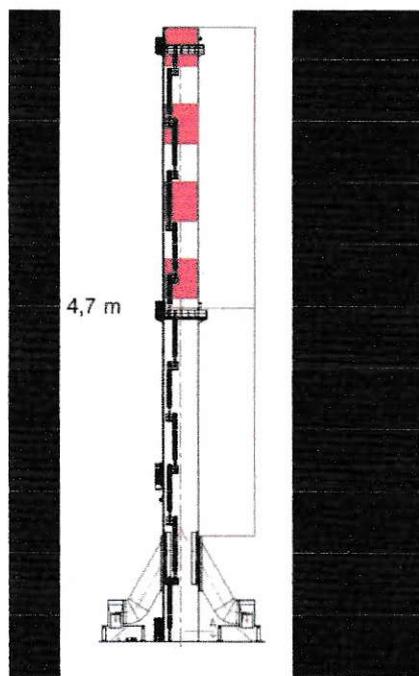


Figura 9. Diagrama de la chimenea de la Unidad de Generación Eléctrica 4.

A: Distancia desde los puertos a la última perturbación flujo abajo. B: Distancia desde los puertos de muestreo a la última perturbación flujo arriba. D: Diámetro interno de la chimenea.

Para las chimeneas de las UGE 1 y 2, no se cuenta con planos o diagramas de como el presentado en la Figura 9 para la UGE 4, no obstante, de acuerdo a las observaciones realizadas en terreno, las condiciones de estas chimeneas son similares a las reportadas para la UGE 4. Es decir, la ubicación de los puertos de muestreo del CEMS-MP y para realizar mediciones con el método CH-5, se encuentra a una distancia que cumple el criterio mínimo de distancia flujo arriba y cumple el criterio ideal flujo abajo. No obstante, la relación de distancia de la última perturbación flujo arriba es menor para la UGE 1 respecto a la UGE 4, y para la UGE 2 respecto a la UGE 1.

Respecto al polvo utilizado, en las 3 aplicaciones se utilizó cenizas. En los procesos de CC de las UGE 1 y 2, se usó cenizas obtenidas desde el propio proceso. En el caso de la CC de la UGE 4, no fue factible retirar cenizas desde la propia unidad, por lo que se utilizó cenizas obtenidas en la UGE 3. La Figura 10 corresponde a una fotografía de la ceniza seca utilizada. Su consistencia es la de un polvo muy fino.



Figura 10. Fotografías de la ceniza utilizada para inyectar.

En las siguientes secciones se describen los aspectos críticos de los equipos utilizados y del método de trabajo.

2.2. Equipos utilizados en la integración del sistema de Spiking

El sistema de Spiking puede ser integrado considerando diferentes equipos, dependiendo de las necesidades de cada aplicación. En esta sección se describen los principales equipos considerados en la integración del sistema para las aplicaciones del presente estudio.

2.2.1. Alimentador por pérdida de peso

Se utilizó un alimentador por pérdida de peso marca Brabender, modelo FlexWall Plus. Este equipo es un dosificador de tipo gravimétrico de sólidos en polvo. El equipo tiene una alta precisión gravimétrica, capacidad de manipulación de diversos materiales y precisión a tasas bajas. En las Figuras 11 y 12 se presentan diagramas del alimentador.

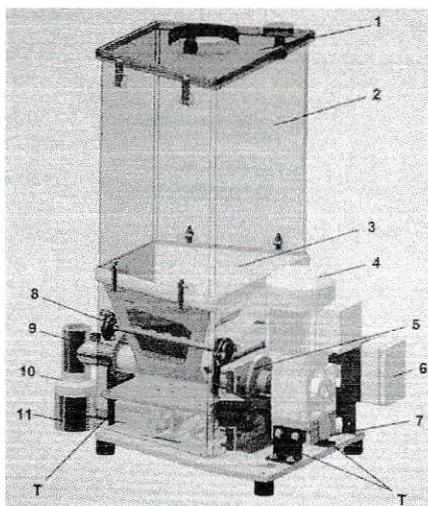


Figura 11. Diagrama general del alimentador Brabender modelo FlexWall Plus.

1, Tapa de la tolva. 2, Tolva. 3, Canaleta flexible. 4, Motor de accionamiento. 5, Conector del sinfín. 6, Caja de conexiones. 7, Dispositivo de monitoreo de la velocidad. 8, Paletas masajeadoras de la canaleta. 9, Salida vertical. 10, Conector flexible. 11, Punto de ajuste de salida. T, Seguros de transporte.

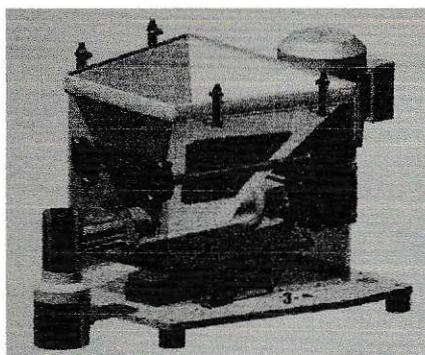


Figura 12. Diagrama complementario del alimentador Brabender modelo FlexWall Plus.

1, Placa de montaje sobre celdas de carga. 2, Celdas de carga. 3, Placa base del alimentador.

En el alimentador la descarga de material es provocada por el giro del tornillo sinfín. Este permite entregar una cantidad conocida de material en cada vuelta. El tornillo sinfín opera a través del giro que provoca el accionamiento de un motor de 3 fases. La tasa de alimentación depende de las dimensiones, la forma del sinfín y la velocidad de giro.

El canal del tornillo sin fin es flexible y tiene 4 paredes internas inclinadas. Las paredes laterales tienen activación asimétrica de paletas. Esto permite activar el flujo del sólido a dosificar en el canal del tornillo y, por ende, mejora el grado de llenado del tornillo.

El motor de accionamiento trabaja sobre el tornillo sinfín y sobre el mecanismo de paletas de la tolva. La velocidad de operación nominal está determinada por la velocidad nominal de motor de accionamiento y la razón de transmisión.

El alimentador tiene en su base una balanza de celdas de carga. Estas celdas permiten determinar el peso del polvo.

En la Figura 13 se muestra un diagrama que describe el principio de funcionamiento del alimentador.

El alimentador tiene un sistema de control, para mantener la tasa de alimentación constante en base a la señal de peso del material. A medida que el dosificador descarga material, se reduce el peso del polvo, por ende, se reduce el trabajo que debe realizar el motor para girar el sinfín, por lo que, para mantener la velocidad de giro del sinfín, se ajusta la velocidad de giro del motor.

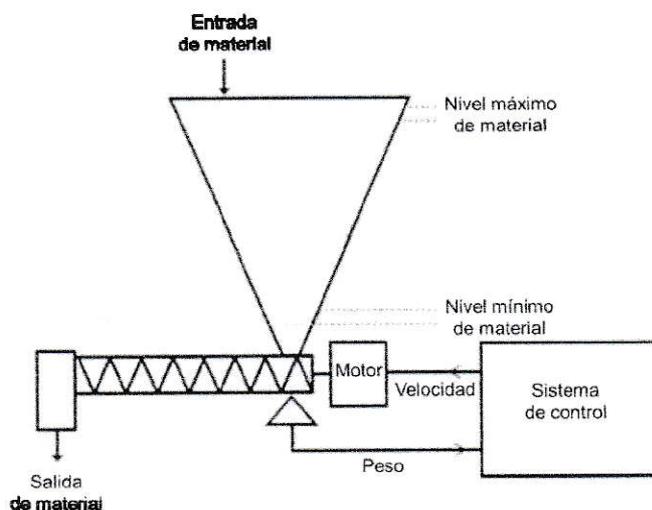


Figura 13. Diagrama del principio de funcionamiento de un alimentador por pérdida de peso.

Para medir el peso del material se utiliza celdas de cargas. Las celdas de carga son transductores que generan una señal eléctrica proporcional al peso. Para calibrar la respuesta se utilizan pesos patrones.

El dispositivo de monitoreo de la velocidad nominal del motor es un sensor de proximidad inductivo. Estos sensores detectan objetos de metal sin contacto a través de la variación que provocan en su campo magnético, generando una señal de corriente inducida. Este sensor escanea la rueda dentada montada al eje de transmisión. De este modo es posible obtener la cantidad de pulsos o revoluciones del motor en un tiempo determinado.

La velocidad de giro del motor es controlada por un variador de frecuencia. Este equipo controla la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor.

Para mantener la tasa de alimentación constante, el sistema mide la tasa de alimentación y la controla como una función del punto seteado a partir de la siguiente secuencia: En primer lugar, se selecciona el punto de seteo deseado de la tasa de alimentación (kg/h). Luego, comienza la operación del alimentador con este punto de seteo. El equipo computa la pérdida de peso durante un ciclo. La diferencia entre la tasa de alimentación actual y la tasa seteada es ingresada en el algoritmo de control. En función del resultado del algoritmo de control, el equipo actúa sobre el punto de seteo del controlador de accionamiento del motor, variando la velocidad de giro del sinfín.

2.2.2. Eductor de manipulación de sólidos

Se utilizaron eductores de manipulación de sólidos marca Jacoby-Tarbox, modelos SG y HG. Los eductores utilizan toberas convergentes-divergentes para movilizar y transportar sólidos secos mediante suministro de flujo de aire a la presión suficiente.

Los eductores modelo SG están diseñados para trabajar con vapor o aire como medio motriz. El rango de presión de entrada es entre 60-120 PSIG (4-8 bar). El vacío que genera es de 24 inHg. La presión de salida es de 12 PSIG (0,8 bar).

Los eductores modelo HG también están diseñados para trabajar con vapor o aire como medio motriz. El rango de presión de entrada es de entre 20-80 PSI (1,5-5,5 bar). El vacío que se genera es de 24 inHg. La presión de salida es de 20 PIG (1,4 bar).

La Figura 14 muestra un diagrama que describe el principio de funcionamiento de un eductor para transporte de sólidos. Estos eductores utilizan una tobera convergente-divergente para movilizar, a partir de un fluido motriz a alta presión, un material sólido generando una mezcla fluidizada a una presión intermedia.

La sección convergente permite, por efecto Venturi, aumentar la velocidad del fluido motriz y, por ende, disminuir su presión. Luego, en la sección divergente la mezcla fluidizada se expande obteniéndose una presión intermedia creando un vacío en la cámara de succión que permite tomar el sólido hacia el eductor.

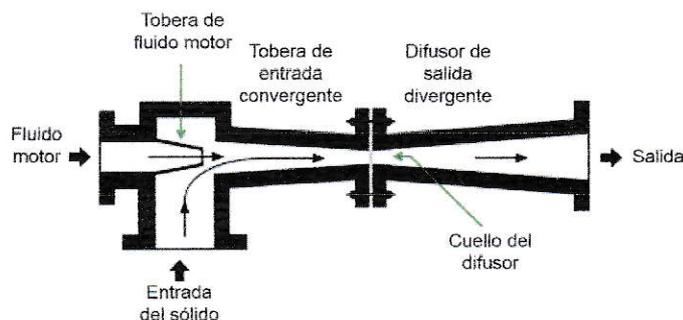


Figura 14. Diagrama del principio de funcionamiento de un eductor de manipulación de sólidos.

2.3. Procedimiento para desarrollar Curvas de Correlación utilizando Spiking

De acuerdo al método descrito en la patente 6,694,796 B2, el procedimiento para calibrar CEMS-MP utilizando el sistema de Spiking, considera pasos generales indicados en el diagrama de la Figura 15.

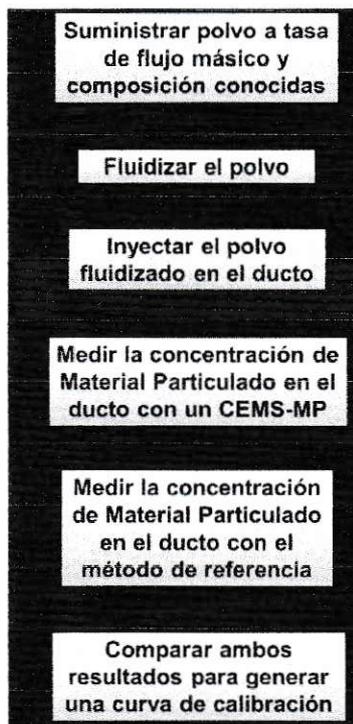


Figura 15. Diagrama general del método de Spiking.

Como se indica en la Figura 15, el procedimiento de Spiking considera 6 etapas secuenciales en un ciclo. Cada vez que se realiza un ciclo se obtiene un punto de la CC, correspondiente a un par ordenado del resultado de la medición de la concentración de MP por parte del método de referencia, y el resultado promedio de las lecturas del CEMS-MP, durante el tiempo en que se realizó el muestreo de laboratorio.

Así, el procedimiento dado en la Figura 15 se repite un mínimo de 15 veces, o más si se quiere descartar los peores resultados, para obtener una CC. Para generar 3 o más niveles de concentración de MP, se debe utilizar diferentes tasas de inyección de polvo entre corridas.

Debido a la capacidad del sistema de Spiking de inyectar una tasa másica de polvo conocida y constante, una vez determinada (o estimada) la concentración de MP base del proceso, es decir, emitida en condiciones normales de funcionamiento, es posible determinar (o estimar) la concentración de MP producida en chimenea. Para

que esta determinación funcione en forma práctica, se requiere que el MP base se mantenga lo más constante posible. Esto se logra manteniendo las condiciones operacionales constantes.

Para determinar la concentración de MP producida a una tasa de inyección de polvo determinada, se utiliza las siguientes relaciones.

$$C_s = \frac{T_s}{F_c} \quad \text{Ec.1}$$

Donde, C_s es la concentración del aumento del material particulado, mg/m^3
 T_s es el flujo másico de adición de polvo, mg/h
 F_c es el flujo gases de chimenea, m^3/h

$$C_c = C_s + C_b \quad \text{Ec.2}$$

Donde, C_c es la concentración final de MP en chimenea, mg/m^3
 C_s es la concentración de MP adicionada por el Spiking, mg/m^3
 C_b es la concentración de MP base en chimenea, mg/m^3

La ecuación 1 permite obtener la concentración de MP agregada en el ducto o chimenea debido a la inyección de polvo. Para esto se usa la tasa de alimentación de polvo, la que es medida en forma precisa por el equipo alimentador, y el flujo de gases que ducto o chimenea en que se inyecta el polvo, el que se obtiene desde la medición del monitor de flujo del ducto (en caso que se encuentre implementado) o a partir de las mediciones de laboratorio realizadas con el método CH-2.

La relación de la ecuación 1 se cumple si:

- No existen pérdidas de polvo en las líneas del sistema previo a la inyección al ducto.
- El flujo de polvo fluidizado llegue en forma efectiva a la sonda de inyección.
- El volumen adicionado a chimenea sea despreciable respecto al flujo de gases de chimenea.



A partir de la ecuación 2 se obtiene la concentración de MP producida en el ducto o chimenea, que corresponde a la suma entre la concentración de MP base y la concentración de MP agregada por el sistema de Spiking.

La relación de la ecuación 2 se cumple si:

- El volumen adicionado a chimenea sea despreciable respecto al flujo de gases de chimenea.

Para determinar la concentración de MP base, se pueden realizar mediciones de la concentración de MP por método CH-5 en forma previa a la ejecución de las pruebas. Esto se debe realizar al menos 2 semanas antes de desarrollar el ensayo de CC con Spiking, dado que este es el tiempo que tarda el laboratorio en realizar el análisis de los muestreos de MP obtenidos por método CH-5. Así mismo, se debe registrar en la forma más completa posible las condiciones operacionales críticas de la planta, para poder verificar que estas se mantienen constantes y, por ende, no debiera haber cambios en la concentración de MP base.

Una vez obtenido el valor de concentración de MP base, y utilizando la ecuación 1 para determinar el valor de concentración de MP agregada por el Spiking, se determina en forma exacta la concentración de MP total producida en chimenea. La precisión de esta determinación depende de la capacidad del sistema de Spiking de mantener la tasa de alimentación constante y, sobretodo, de que las condiciones operacionales se mantengan constante y sean similares a las condiciones en que se obtuvo el valor de concentración de MP base.

Alternativamente, el valor de concentración de MP total se puede estimar relacionando los resultados de los muestreos con método CH-5 realizados en los últimos meses, las condiciones operacionales en que se realizan y las lecturas del CEMS-MP. A partir de esta relación se puede estimar la concentración de MP base, y utilizando la ecuación 1 para determinar el valor de concentración de MP agregada por el Spiking, se estima la concentración de MP total producida en chimenea.

A partir de este método, es posible determinar (o estimar), en forma previa a la ejecución de las mediciones en terreno, las tasas de inyección de polvo requeridas para obtener las concentraciones de MP total, con que se decida desarrollar la CC. Esto permite darle a la CC la extensión deseada, en función de no superar los límites

de emisión dados por la normativa, pero obtener un margen suficiente para cubrir condiciones operacionales que deriven en mayores emisiones de MP.

Para que el modelo de correlación sea representativo, se debe utilizar un polvo que tenga las mismas o similares características al MP de los gases residuales del proceso. De lo contrario, las diferencias en la distribución de tamaños y características como composición química, tamaño, forma y color, pueden derivar en que a iguales concentraciones de MP, las lecturas de CEMS-MP sean diferentes para polvo utilizado en Spiking y el MP real de fuente, por ende, determinen valores de concentración diferentes.

Por ende, en el caso de centrales termoeléctrica a carbón, se recomienda utilizar cenizas volantes tomadas desde los equipos de abatimiento de MP (precipitadores electrostáticos, filtros de manga, etc), para utilizar como polvo de alimentación.

2.4. Condiciones experimentales para las aplicaciones

2.4.1. Ubicación del punto de inyección de polvo

Las Figuras 16, 17 y 18 corresponden a fotografías mostrando la ubicación de la sonda de inyección de polvo, del ducto en que es inyectado el polvo, de la chimenea, los puertos de muestreo, entre otros.



Figura 16. Ubicación punto de inyección de polvo y puertos de muestreo de la Unidad de Generación Eléctrica 1 del Complejo Ventanas.

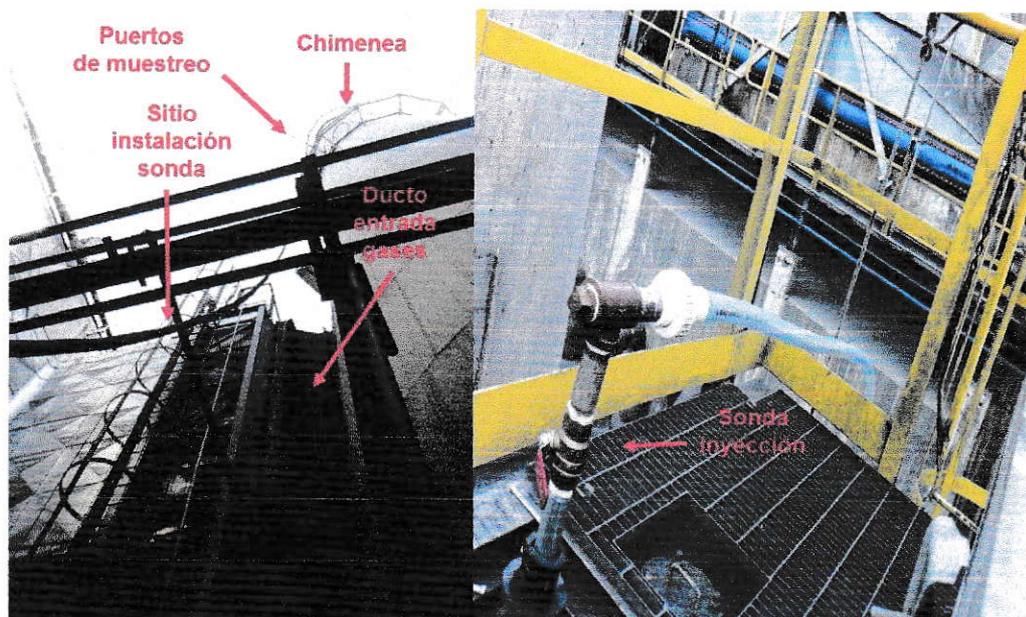


Figura 17. Ubicación punto de inyección de polvo y puertos de muestreo de la Unidad de Generación Eléctrica 2 del Complejo Ventanas



Figura 18. Ubicación punto de inyección de polvo y puertos de muestreo de la Unidad de Generación Eléctrica 4 del Complejo Ventanas.

En las aplicaciones de las UGE 2 y 4, dado que hay 2 ductos de entrada a chimenea, se instaló 1 sonda de inyección de polvo por cada ducto.

2.4.2. Mantenimiento de las condiciones operacionales

Durante la ejecución de los procesos de CC, se coordinó con personal de Planta y se monitoreó el mantenimiento de las condiciones operacionales. Las variables de control fueron:

- Mantener carga en nivel base.
- Mantenimiento del nivel de carga constante.
- Mantenimiento de la mezcla de carbones combustibles.
- Suspensión de los sopladors de caldera.
- Operación estable de los Filtros de Mangas de Alta Eficiencia.
- Operación estable de los equipos Desulfurizadores de Gases de Combustión.
- Monitorear ocurrencia de falla o mantenimiento correctivo de la Unidad entre corridas.

2.4.3. Pruebas de funcionamiento y aseguramiento de calidad de los CEMS-MP

Previo a la ejecución de los procesos de CC se realizó una evaluación previa de funcionamiento de los CEMS-MP utilizados en cada aplicación. Esta evaluación incluyó los siguientes chequeos:

- **Chequeo de condiciones de instalación y configuración:** Para medir la concentración en forma representativa con un CEMS-MP, este debe estar instalado en una posición del ducto o chimenea en que se minimicen las perturbaciones de flujo de gases. Para esto el sitio de instalación del equipo debe cumplir una distancia ideal ≥ 2 veces el diámetro equivalente hasta la última perturbación flujo abajo y ≥ 8 veces el diámetro equivalente hasta la última perturbación flujo arriba, o una distancia mínima $\geq 1/2$ vez el diámetro equivalente hasta la última perturbación flujo abajo y ≥ 2 veces el diámetro equivalente hasta la última perturbación flujo arriba. Así mismo, un CEMS-MP debe estar correctamente configurado respecto a sus parámetros operacionales de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.
- **Retiro de factores de ajuste de la señal de MP:** Se verifica si es que la señal de respuesta a la concentración de MP del monitor es bruta, es decir, no incluya factores de ajuste. En caso que hayan factores de ajuste aplicados al

CEMS-MP, estos deben ser retirados, siempre que sea técnicamente factible, dado que es recomendable trabajar con las señales brutas del equipo para obtener CC que no dependan de los factores y sean directamente comparables entre equipos del mismo principio de funcionamiento.

- **Comprobación de alineación óptica:** Para todos los CEMS-MP con principios de funcionamiento ópticos, posteriormente a su instalación y en forma periódica es necesario verificar y/o ajustar la alineación óptica. En las aplicaciones de este proyecto, todos los monitores tienen principio de funcionamiento óptico, por ende, previo a la ejecución de los ensayos de CC se ha verificado y/o ajustado la alineación óptica.
- **Comprobación de respuesta con filtros patrones:** Para todos los CEMS-MP con principios de funcionamiento ópticos, a través del tiempo pueden ocurrir falla de sus componentes ópticos u obtenerse respuestas que no son representativas debido a deficientes procesos de mantenimiento. Para verificar esto, existen accesorios llamados filtros de atenuación óptica que son dispositivos patrones que simulan la atenuación de la luz por parte del MP a valores preestablecidos en niveles bajo, medio y alto. Así, a través de la utilización de estos dispositivos es posible verificar que los CEMS-MP están respondiendo en forma adecuada y no hay desviaciones de la linealidad de la respuesta.

2.4.4. Aseguramiento de calidad de los muestreos por método CH-5

Durante los procesos de CC realizado, se tomó una serie de medidas de control para asegurar la calidad de los resultados obtenidos de los muestreos isocinéticos realizados mediante método CH-5.

Entre estas medidas se consideró las siguientes condiciones respecto al sitio de muestreo:

- **Cumplimiento de criterios de distancias de los puertos de muestreo a las últimas perturbaciones:** De acuerdo al método de referencia CH-1 sobre selección de puntos de muestreo, para que estos sean válidos deben cumplir una distancia ideal ≥ 2 veces el diámetro equivalente hasta la última

perturbación flujo abajo y ≥ 8 veces el diámetro equivalente hasta la última perturbación flujo arriba, o una distancia mínima $\geq 1/2$ vez el diámetro equivalente hasta la última perturbación flujo abajo y ≥ 2 veces el diámetro equivalente hasta la última perturbación flujo arriba.

- **Ausencia de flujo ciclónico:** De acuerdo al método de referencia CH-1 sobre selección de puntos de muestreo, antes de comenzar un muestreo se debe verificar en todo el perfil de muestreo si es que el ángulo de inclinación promedio del flujo es $< 20^\circ$, en cuyo caso se considera que hay ausencia de flujo ciclónico y el muestreo puede realizarse.
- **Perfil de flujo homogéneo:** Para que los resultados de medición de un CEMS-MP de paso corto o paso completo sean representativos respecto a los muestreos realizados por el método de referencia en el perfil completo de la sección transversal de chimenea, el perfil de flujo de la chimenea debe ser homogéneo, de lo contrario el monitor puede registrar variaciones en las concentración de MP diferentes a los obtenidos mediante mediciones del método de referencia. Respecto a este punto, de acuerdo a la US-EPA, un flujo se considera estratificado o no-homogéneo cuando la velocidad puntual en al menos 1 puntos del perfil de muestreo tiene un coeficiente de variación superior a 10%.

Adicionalmente a las medidas de control sobre las características del sitio de muestreo, se consideró las siguientes medidas de control para el aseguramiento de la calidad de las condiciones de muestreo de las corridas de medición de los laboratorios:

- **Realización de barrido preliminar al inicio de cada día o durante cambios de condiciones operacionales:** Para realizar un muestreo isocinético es necesario en forma previa realizar un barrido de velocidad con el que se determina el diámetro ideal de la boquilla del tomamuestra con la cual, dadas las condiciones del flujo de gases por chimenea, es posible mantener el isocinetismo del muestreo. Es obligatorio que este barrido se realice cada día en forma previa a las corridas o antes cambios en las condiciones operacionales, dado que en caso de ocurrir cambios en las condiciones de flujo de gases por chimenea, es posible que sea necesario cambiar la boquilla para

asegurar el isocinetismo del muestreo. Por ende, durante la ejecución de cada corrida de muestreo en los procesos de Curvas de Correlación se ha verificado la ejecución del barrido preliminar. Si este procedimiento no se hubiera realizado, todas las corridas realizadas hasta la ejecución del próximo barrido preliminar serían descartadas del conjunto de datos válidos.

- **Mantenimiento de la temperatura de sonda y filtro dentro de los límites:** Para asegurar que no haya condensación de agua durante un muestreo isocinético en los componentes flujo arriba del filtro calefaccionado para colección de partículas, es necesario que la temperatura de la sonda tomamuestra y del filtro se mantengan dentro del rango 120 ± 14 °C. Por ende, durante la ejecución de cada corrida de muestreo en los procesos de Curvas de Correlación se verifica el cumplimiento de este criterio. En caso que no se cumpliera en al menos 1 medición dentro de una corrida, la corrida es automáticamente descartada de los resultados finales.
- **Mantenimiento de la temperatura del 4to impinger bajo el límite:** Para que la humedad sea eficientemente retirada del flujo de muestra y, de este modo, se obtengan una correcta determinación de humedad y medición de flujo muestreo seco, se requiere asegurar que durante todo el muestreo la temperatura del 4to impinger no supere los 20 °C. Por ende, durante la ejecución de cada corrida de muestreo en los procesos de Curvas de Correlación se verifica el cumplimiento de este criterio. En caso que no se cumpliera en al menos 1 medición dentro de una corrida, la corrida es automáticamente descartada de los resultados finales.
- **Mantenimiento del coeficiente de isocinetismo dentro de los límites:** Para que un muestreo sea considerado válidamente isocinético debe obtenerse una vez finalizada la corrida un coeficiente de isocinetismo dentro del rango de 90 – 110%, lo cual indica que la relación entre las velocidades del flujo de gases de chimenea y de muestreo se mantuvo cercana a 1 durante todo el muestreo. Por ende, durante la ejecución de cada corrida de muestreo en los procesos de Curvas de Correlación se verifica el cumplimiento de este criterio. En caso que no se cumpliera la corrida es automáticamente descartada de los resultados finales.

- **Obtención del volumen de muestra mínimo requerido:** Para que un muestreo isocinético sea válido, de acuerdo al método CH-5, se requiere obtener un volumen de muestreo de al menos 1 m³N, sólo así se asegura obtener una cantidad suficiente de material particulado de modo que se reduzcan los errores del método contaminación, ineficientes procesos de limpieza y/o pesaje de filtros. Por ende, durante la ejecución de cada corrida de muestreo en los procesos de Curvas de Correlación se verifica el cumplimiento de este criterio. En caso que no se cumpliera la corrida es automáticamente descartada de los resultados finales.
- **Verificación de ausencia de fugas del tren de muestreo:** Durante la ejecución de una corrida de muestreo o bien una vez finalizada la corrida para preparar una nueva, se debe desarmar el tren de muestreo para realizar ciertos traslados o para realizar el lavado de la sonda y porta filtro y cambio de filtro. En estos procesos alguna conexión podría quedar no hermética, por lo cual se podría producir fuga de parte del volumen de muestra tomado, obteniéndose un muestreo de material particulado no representativo. Para evitar esto problemas, de acuerdo al método CH-5 es obligatorio ejecutar un chequeo de fuga del tren de muestreo al inicio y al final de cada corrida. Por ende, durante la ejecución de cada corrida de muestreo en los procesos de Curvas de Correlación se verifica el cumplimiento de este criterio. En caso que este procedimiento no haya sido realizado o al realizarlo se haya detectado fuga, la corrida es automáticamente descartada de los resultados finales.
- **Certificación al día de los equipos y del laboratorio:** Finalmente, para que las corridas sean válidas de acuerdo al método CH-5, una serie de equipos, como el medidor de gas seco, la consola para muestreo isocinéticos, las termocuplas, entre otros, deben haber sido chequeados y contar con sus certificaciones al día. Así mismo el laboratorio debe tener su certificación vigente como laboratorio acreditado. En caso que alguno de estos certificados no se encuentre vigente, las corridas realizadas en esta condición son descartadas.

2.5. Ensayos de desempeño del sistema de Spiking

En esta sección se describe los métodos propuestos para realizar ensayos de desempeño del sistema Spiking, en cuanto a exactitud, precisión, tiempo de respuesta y estabilidad de los aumentos de concentración de MP obtenidos en los procesos de CC desarrollados.

2.5.1. Ensayos de exactitud

En el presente estudio se propone determinar la exactitud del sistema/método de Spiking para controlar la concentración de MP en chimenea a partir del procedimiento dado en el Protocolo CEMS para determinar la Exactitud Relativa (ER). La comparación se realiza utilizando como dato real los resultados obtenidos por el método de referencia CH-5. Estos datos son comparados con los resultados de determinación de concentración de MP teórica calculada a partir de la tasa de inyección de polvo medida en el alimentador. Ambos resultados se obtienen en condiciones de chimenea.

Los resultados de concentración de MP determinados por muestreo con el método de referencia CH-5 son reportados por el laboratorio. Estos valores son llevados a condiciones de chimenea utilizando la ecuación 3.

$$MP_c = MP_s \times \left(\frac{P_c}{P_s} \right) \times \left(\frac{T_s + 273,15}{T_c + 273,15} \right) \times \left(\frac{100 - \%H_c}{100} \right) \times \left(\frac{20,9 - \%O_{2c}}{20,9 - \%O_{2s}} \right) \text{ Ec.3}$$

Donde,

- MP_c es la concentración de MP en condiciones de chimenea
- MP_s es la concentración de MP en condiciones estándar
- P_c es la presión medida en chimenea
- P_s es la presión estándar, 760 mmHg
- T_c es la temperatura medida en chimenea
- T_s es la temperatura estándar, 25°C
- %H_c es el porcentaje de humedad medida en chimenea
- %O_{2c} es el porcentaje de O₂ medido en chimenea
- %O_{2s} es el porcentaje de O₂ de referencia, 6% para centrales termoeléctricas a carbón

Mientras, los resultados de concentración de MP teórica se determinan utilizando las ecuaciones 1 y 2. Como se ha indicado en la sección 2.1., el valor de T_s se obtiene a partir del promedio de lecturas de la tasa de inyección de polvo registradas en el alimentador. El flujo en condiciones de chimeneas se calcula utilizando la ecuación 4 a partir de los datos de velocidad entregados por el laboratorio y el área de chimenea.

$$F_c = F_s \times \left(\frac{P_c}{P_s} \right) \times \left(\frac{T_c + 273,15}{T_s + 273,15} \right) \times \left(\frac{100 - \%H_c}{100} \right) \quad \text{Ec.4}$$

Donde, F_c es el flujo en condiciones de chimenea, m^3/h
 F_s es el flujo seco en condiciones estándar ($25^\circ C$ y 1 atm), m^3N/h
 P_c es la presión medida en chimenea, mmHg
 P_s es la presión estándar, 760 mmHg
 T_c es la temperatura medida en chimenea, $^\circ C$
 T_s es la temperatura estándar, $25^\circ C$
 $\%H_c$ es el porcentaje de humedad medida en chimenea, %

Para determinar el valor de concentración de MP base (C_b en la ecuación 2) se promedia las corridas del método CH-5 realizadas sin adición de polvo.

En el caso de contar como más de 9 corridas, para realizar los cálculos se descarta las 3 corridas con mayor diferencia.

Para el cálculo de la ER se utiliza la ecuación (5).

$$ER = \frac{[|\bar{d}| + |CC|]}{MR} \times 100 \quad \text{Ec.5}$$

Donde, ER es la Exactitud Relativa, %
 d es el promedio de las diferencia obtenidas a partir de la ecuación 6., mg/m^3
 CC se determina a partir de la ecuación 7
 MR es la concentración promedio determinada con el método CH-5, mg/m^3

$$d_i = MR_i - RCEM_i \quad \text{Ec.6}$$

Donde, MR_i es la concentración de método de referencia CH-5 para la corrida i , mg/m^3
 $RCEM_i$ es el valor promedio de la lectura del CEMS-MP para la corrida i , mg/m^3

$$CC = t_{0,025} \frac{Sd}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec.7}$$

Donde, $t_{0,025}$ es el coeficiente de confianza (Student)
 Sd es la desviación estándar de los resultados determinada con la ecuación Ec.8
 n es la cantidad de corridas usada en el cálculo

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2 - \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n d_i \right)^2}{n} \right]}{n-1}} \quad \text{Ec.8}$$

Donde, Sd es la desviación estandar de los resultados
 d_i es diferencia de los resultados por corrida obtenida con ecuación 6
 n es la cantidad de corridas usada en el cálculo

2.5.2. Ensayos de precisión

En el presente estudio se propone determina la precisión del sistema de Spiking para generar aumentos de la concentración de MP, como el Coeficiente de Variación (CV) calculado para los resultados de concentración determinados por el método CH-5 y las lecturas del CEMS-MP para cada tasa de inyección de cenizas.

El cálculo de CV se realiza a partir de la ecuación 9 para cada nivel de tasa de inyección de polvo en que se haya realizado al menos 3 corridas de medición de MP.

Ec.9

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100$$

Donde, CV es el coeficiente de variación, %
 σ es la desviación estándar de los resultados del método CH-5 o del CEMS-MP
 \bar{x} es el promedio de los resultados del método CH-5 o del CEMS-MP

Así mismo, se obtiene un CV promedio para cada proceso a partir de los CV obtenidos para cada tasa de inyección de polvo.

2.5.3. Ensayos de tiempo de respuesta

Con este ensayo se busca determinar el tiempo que se demora en llegar y ser medido en forma estable por el equipo CEMS-MP el aumento de concentración de MP generado por el sistema de Spiking.

Para este ensayo se ha utilizado como base el método de determinación del tiempo de respuesta establecida en el Protocolo CEMS. En primer lugar se debe establecer una condición inicial con un valor de lectura estable del equipo CEMS-MP y registrar el tiempo en que se obtiene. Una vez verificado este valor estable se da inicio al minuto siguiente a la inyección de polvo a través del sistema Spiking, tomando registro del minuto en que se inicia la inyección. Finalmente, una vez la lectura del CEMS-MP ha subido hasta el nivel esperado y se ha dado algunos minutos para verificar la estabilización del lectura, se registran los valores de lectura y tiempo correspondiente a la condición final.

Una vez realizado este procedimiento se determina el punto de salto en el cambio de la repuesta del equipo CEMS-MP, de acuerdo a los siguientes pasos.

En primer lugar se determina la diferencia entre el valor estable inicial y el valor estable una vez inyectado polvo, de acuerdo a la ecuación 10.

$$R = D - A$$

Ec.10

Donde, R es la diferencia de lectura entre el valor estable inicial y el valor estable una vez inyectado polvo
D es valor estable de lectura final
A es el valor estable de lectura inicial

Una vez obtenido el valor de R obtenido, se determina el 95% de este valor y se le suma el valor de A para obtener el punto de salto en el cambio de la repuesta. A partir de este valor se busca en el registro de lecturas obtenidos del ensayo el valor de lectura del CEMS-MP más cercano al valor determinado.

El tiempo de respuesta corresponde al tiempo transcurrido desde iniciada la inyección de polvo y hasta el tiempo en que se obtiene el valor de lectura del CEMS-MP más cercano al valor del punto de salto en el cambio de la repuesta.

Este mismo procedimiento, descrito para obtener el tiempo de respuesta ascendente del sistema, se utiliza para determinar el tiempo de respuesta descendente.

2.5.4. Ensayos de estabilidad

A partir de la prueba de capacidad de estabilización se busca determinar si el sistema de Spiking entrega un aumento estable a través del tiempo de la concentración de MP determinada por el equipo CEMS-MP.

Para esta prueba, se calcula el CV para una serie de 10 valores promedio minuto de lectura del CEMS-MP obtenidos posteriormente a un cambio en la tasa de inyección de cenizas y transcurrido el tiempo de respuesta determinado.

En consideración a que la condición base de funcionamiento de cada UGE tiene cierta variabilidad la concentración de MP, más allá de que se controlen las condiciones operacionales para mantenerla lo más posible, a la desviación estándar obtenida de los valores de respuesta del CEMS-MP una vez alcanzado el tiempo de respuesta, se le resta la desviación estándar determinada para las lecturas del CEMS-MP previo a la inyección de polvo.

Así, el cálculo de coeficiente de variación para los ensayos de estabilidad se realiza de acuerdo a la ecuación 11.

$$CV = \frac{\sigma_s - \sigma_b}{\bar{x}} \times 100 \quad \text{Ec.11}$$

Donde, CV es el coeficiente de variación, %
 σ_s es la desviación estándar de las lecturas del CEMS-MP posteriormente a la inyección de polvo y alcanzado el tiempo de respuesta, SL
 σ_b es la desviación estándar de las lecturas del CEMS-MP en condición de funcionamiento base de la UGE sin adición de polvo, SL
 \bar{x} es el promedio de las lecturas del CEMS-MP posteriormente a la inyección de polvo y alcanzado el tiempo de respuesta, SL

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Condiciones de obtención de las Curvas de Correlación

Los Cuadros 5 y 6 presentan las condiciones operacionales de la UGE para cada proceso de CC.

Cuadro 5. Estado de control para las condiciones operacionales de las Unidades de Generación de Electricidad para cada Curva de Correlación.

UGE ⁽¹⁾	¿carga base? ⁽²⁾	¿se mantuvo carga? ⁽³⁾	¿se mantuvo mezcla de carbón? ⁽³⁾	¿se suspende sopladors? ⁽³⁾	¿Los FMAE ⁽⁴⁾ operaron en forma estable? ⁽³⁾	¿El FGD ⁽⁵⁾ operó en forma estable? ⁽³⁾	¿No hubo falla Unidad entre corridas? ⁽⁶⁾
1	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓
2	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓
4	✓✓	✓✓	x	✓✓	✓✓	✓✓	✓

(1), UGE: Unidad de generación eléctrica.

(2), ✓✓ : carga >80% en 100% de las corridas; ✓ : Carga >80% sobre el 80% de las corridas; x: carga >80% bajo el 80% de las corridas.

(3), ✓✓ : misma condición en 100% de las corridas; ✓ : misma condición sobre el 80% de las corridas; x: misma condición bajo el 80% de las corridas; o: cambios realizados con el propósito de variar concentración de MP; N/A: la Unidad no utiliza este equipo de abatimiento.

(4), FMAE: Filtro de Manga de Alta Eficiencia.

(5), FGD: Flue Gas Desulfurizer (Desulfurizador de Gas de Combustión).

(6), ✓ : si, no ocurrió en ninguna; x: no, ocurrió en 1 o más.

Cuadro 6. Mezclas de carbones utilizados para cada Curva de Correlación.

UGE ⁽¹⁾	Mezcla de carbones	Cantidad de corridas	Composición	Contenido de cenizas (%)
1	1era	20	70% Calenturita / 30% M. Stanley	9,9
2	1era	20	100% Cerrejón	11,4
4	1era	14	60% Cerrejón / 40% M. Invierno	14,2
	2da	6	50% S. Peak / 40% M. Invierno / 10% M. Stanley	13,7

(1), UGE: Unidad Generadora de Electricidad.

Como se puede observar, en general en los procesos de CC realizados se han mantenido estables la mayoría de las condiciones operacionales de las UGE.

En el Cuadro 7, se incluyen los resultados de la evaluación previa de funcionamiento realizada a cada CEMS-MP

Cuadro 7. Pruebas de funcionamiento realizadas a los Sistemas de Monitoreo Continuo de Material Particulado previo a la ejecución de los ensayo de Curvas de Correlación.

UGE ⁽¹⁾	¿El CEMS-MP ⁽²⁾ está bien instalado y configurado?	¿Se retiraron factores?	¿Se comprobó alineación óptica?	¿Se comprobó respuesta con filtros patrones?
1	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓

⁽¹⁾, UGE: Unidad de Generación Eléctrica.

⁽²⁾, CEMS-MP: Continuous Emission Monitoring System (Sistema de monitoreo continuo) para Material Particulado.

Como se observa, los CEMS-MP se encontraban midiendo en forma correcta, por ende sus resultados son representativos.

Finalmente, durante la ejecución de los procesos de CC se verificó diariamente que los CEMS-MP aprobaran el ensayo diario de Margen de Error, como chequeo de aseguramiento de calidad. Así mismo, para cada corrida analizada se verificaron los datos obtenidos por los CEMS-MP de modo que no tuvieran marcaje por falla, falta de mantenimiento u otra condición que invalide los datos.

En el Cuadro 8, se incluyen los resultados obtenidos sobre condiciones del sitio de muestreo obtenidas para cada proceso de CC.

De acuerdo a los resultados del Cuadro 8, en todos los procesos de CC realizados se cumplen las exigencias del método CH-1, respecto a ubicación de los puntos de muestreo, tanto en el criterio de distancias mínimas como de ausencia de flujo ciclónico.

No obstante, como se observa, hay varios procesos en los que se ha encontrado un perfil de flujo estratificado, lo cual puede estar afectando la representatividad de las mediciones de los CEMS-MP respecto a los resultados obtenidos por los laboratorios.

Cuadro 8. Condiciones de los sitio de muestreo en chimenea en que se realizan las mediciones para cada Unidad de Generación Eléctrica.

UGE ⁽¹⁾	¿Se cumple criterios distancias A y B? ⁽²⁾	¿Ausencia de flujo ciclónico? ⁽³⁾	¿Perfil de flujo homogéneo? ⁽⁴⁾
1	✓	✓✓	✓
2	✓	✓✓	x
4	✓	✓	x

⁽¹⁾, UGE: Unidad Generadora de Eléctricidad.

⁽²⁾, ✓✓: A es \geq a 2 diámetros equivalentes, mientras B es \geq a 8; ✓; x: A es \geq a 1/2 diámetros equivalentes, mientras B es \geq a 2; x: no se cumple criterio mínimo CH-1.

⁽³⁾, ✓✓: ángulo inclinación promedio $<10^\circ$ en el 100% de las corridas; ✓: ángulo de inclinación promedio $<20^\circ$ en el 100% de las corridas; x: ángulo de inclinación promedio $>20^\circ$ en alguna corrida.

⁽⁴⁾, ✓✓: si ningún valor de velocidad puntual supera en 5% el promedio del barrido; ✓: si ningún valor de velocidad puntual supera en 10% el promedio del barrido; x: si algún valor de velocidad puntual supera en 10% el promedio del barrido.

Es destacable que en las configuraciones de chimenea y ductos de entrada de gases de todas las chimeneas, pero sobre todo en las UGE 1 y 2, no se cumplen los criterios ideales de distancia a la última perturbación flujo arriba, por lo que el tramo para la estabilización del flujo podría ser insuficiente, lo que podría estar provocando la estratificación del flujo. Así mismo, como las chimeneas de las UGE 2 y 4 tienen 2 ductos de entrada, esta configuración también contribuye a la generación de patrones de estratificación en el flujo.

En el Cuadro 9, se incluyen los resultados obtenidos sobre condiciones de muestreo de las mediciones realizadas por el laboratorio aplicando el método CH-5.

Cuadro 9. Condiciones de muestreo obtenidas en las corridas de mediciones isocinéticas realizadas para cada proceso de Curvas de Correlación.

UGE ⁽¹⁾	¿Se realizó barrido preliminar al inicio de cada día? ⁽¹⁾	¿Se mantuvo temperatura de sonda y filtro dentro de los límites? ⁽²⁾	¿Se mantuvo temperatura del 4to impinger bajo límite? ⁽³⁾	¿El muestreo fue isocinético? ⁽⁴⁾	¿Se obtuvo un volumen suficiente de muestra? ⁽⁵⁾	¿Se verificó la presencia de fugas del tren de muestreo? ⁽⁶⁾	¿Equipos contaban con su acreditación al día? ⁽⁷⁾
1	✓	✓	✓	✓✓	✓	✓✓	✓
2	✓	✓	✓	✓✓	✓	✓✓	✓
4	✓	✓	✓	✓✓	✓	✓✓	✓

⁽¹⁾, UGE: Unidad Generadora de Electricidad.

⁽²⁾, ✓ : se realiza barrido preliminar cada día o ante cambios en condiciones operacionales; x: al menos 1 día o después de cambio de condiciones operacionales no se realiza barrido preliminar.

⁽³⁾, ✓ : temperatura de la sonda y filtro en el rango $120\pm 14^{\circ}\text{C}$ durante cada corrida; ✓ : la temperatura de la sonda y filtro se sale del rango $120\pm 14^{\circ}\text{C}$ durante alguna corrida.

⁽⁴⁾, ✓ : temperatura del 4to impinger $< 20^{\circ}\text{C}$ durante todas las corridas; x: temperatura del 4to impinger $> 20^{\circ}\text{C}$ en alguna corrida.

⁽⁵⁾, ✓✓ : coeficiente de isocinetismo dentro del rango 95-105% para todas las corridas; ✓ : coeficiente de isocinetismo dentro del rango 90-110% para todas las corridas; x: coeficiente de isocinetismo se sale del rango 90-110% para alguna de las corridas.

⁽⁶⁾, ✓✓ : volumen de muestra $> 1,2 \text{ m}^3\text{N}$ en todas las corridas; ✓ : volumen de muestra $> 1,0 \text{ m}^3\text{N}$ en todas las corridas; x: volumen de muestra $< 1,0 \text{ m}^3\text{N}$ en alguna corrida.

⁽⁷⁾, ✓✓ : se verifica ausencia de fuga cada vez que se desmonta tren de muestreo; ✓ : se verifica ausencia de fuga inicial y final en cada corrida; x: no se verifica fugas mínimas en alguna corrida.

⁽⁸⁾, ✓ : equipos y laboratorio con acreditación vigente durante corridas; x: algún equipo o el laboratorio no cuentan con acreditación vigente durante corridas.

Como se observa en la Cuadro 9 precedente, en todos los procesos las corridas utilizadas para realizar el procesamiento de los resultados, cumplen con los criterios de aseguramiento de calidad establecidos.

3.1. Resultados de las Curvas de Correlación obtenidas

Todos los cálculos para obtención de los modelos de CC, se han realizado en la planilla Excel del PS-11 elaborada por la US-EPA disponible en el sitio web <https://www3.epa.gov/ttnemc01/prompspec11.html>. Se utilizaron los resultados de las mediciones del CEMS-MP y del método de referencia CH-5, obtenidos en condiciones de chimenea, que es la condición propia de medición de los CEMS-MP.

Para llevar los resultados de los muestreos de laboratorio a condiciones de chimenea se utiliza la ecuación 3. Las variables que corresponden a mediciones de chimenea en la ecuación 3, se obtuvieron del promedio de los valores obtenidos por el

laboratorio para todas las corridas de cada proceso. Como los procesos se han realizado manteniendo en general constantes las condiciones operacionales, se ha constatado que las variables de la ecuación 3 tiene baja variabilidad dentro de las 20 corridas de cada proceso.

Asimismo, para el valor de límite de emisión, que se utiliza para determinar los resultados de Intervalo de Confianza e Intervalo de Tolerancia del rango medio, se utilizó el valor de $50 \text{ mg/m}^3\text{N}$ corregidos al 6% de O_2 , correspondiente al límite de emisión para MP en calderas a carbón, de acuerdo al D.S. N°13/2011. Este valor también fue llevado a condiciones de chimenea utilizando la ecuación 3.

Los resultados de lectura de MP de los CEMS-MP se obtuvo desde la planilla de resultados promedio minuto para cada DAHS. Luego se ha calculado el valor promedio, considerado los horarios de la corrida de medición, filtrando de análisis los datos minutales correspondiente a los traslados entre puertos de medición por parte del laboratorio para cada corrida.

Como durante las campañas de terreno se sincronizó los relojes del DAHS y el laboratorio, se comparan los resultados obtenidos en el mismo tiempo.

Así mismo, para todas las CC se utiliza el punto 0 teórico, de acuerdo a la opción dada en la normativa, y en los procesos de 20 corridas se descarta las 5 corridas que generar mayor desviación a la tendencia de los modelos con mayor coeficiente de correlación inicial.

3.1.1. Curvas de Correlación de la UGE 1

En la Figura 19, se presentan las CC obtenidas para la UGE 1.

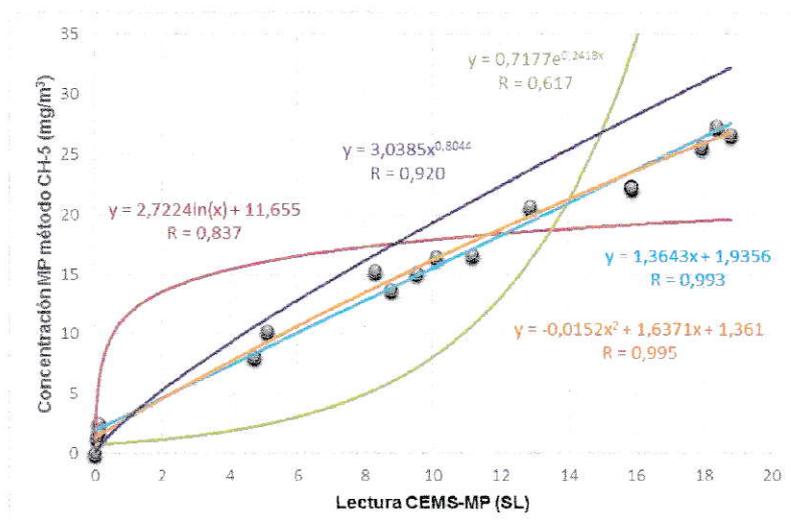


Figura 19. Curvas de Correlación obtenidas para la Unidad de Generación Eléctrica 1 del Complejo Ventanas.

En rojo: modelo logarítmico; en naranja: modelo polinomial; en morado: modelo potencia; en celeste: modelo lineal; en verde: modelo exponencial.

Como se observa en la Figura 19, en esta CC se obtuvo más de 3 niveles de concentración MP. Asimismo, se observa que los modelos lineal y polinomial son los que mejor siguen la tendencia de los resultados. También, se observa que existe una baja dispersión de los resultados, tanto CEMS-MP como método de referencia, respecto a estos modelos de tendencia.

En el Cuadro 10, se incluye las tasas de inyección de polvo utilizadas para cada corrida del proceso de CC.



Cuadro 10. Tasas de inyección de cenizas utilizadas para las corridas de las Curvas de Correlación de la Unidad Generadora de Electricidad 1.

Corrida	Fecha	Tasa de inyección de cenizas (kg/h)
1	08-05-2015	0
2		0
3		10
4		10
5	09-05-2015	10
6		8
7		8
8	10-05-2015	8
9		6
10		6
11		6
12	11-05-2015	4
13		4
14		15
15		15
16		15
17	12-05-2015	10,6
18		7,6
19		0
20		0

Como se observa en el Cuadro 10, en esta CC se ha utilizado 5 niveles principales de inyección de cenizas, con lo que obtiene 6 niveles de concentración de MP, considerando el nivel de concentración base.

En el Cuadro 11, se incluyen los resultados estadísticos obtenidos del proceso de CC.

Cuadro 11. Resultados estadísticos obtenidos de las Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 1.

Modelo	CC ⁽¹⁾	¿>0,85?	IC ⁽²⁾ del rango medio (%)	¿<10%?	IT ⁽³⁾ del rango medio (%)	¿<25%?	¿La razón mín/máx ⁽⁴⁾ está dentro del rango permitido?	¿El modelo cumple los criterios?
Lineal	0,993	Si	1,55	Si	5,0	Si	-	Si
Polinomial	0,995	Si	1,82	Si	4,4	Si	Si	Si
Logarítmico	0,837	No	7,20	Si	23,2	Si	-	No
Exponencial	0,617	No	20,57	No	246,6	No	-	No
Potencia	0,920	Si	8,95	Si	42,9	No	-	No

(1), CC: Coeficientes de correlación.

(2), IC: Intervalo de Confianza.

(3), IT: Intervalo de Tolerancia.

(4), Este criterio aplica sólo para el modelo polinomial.

Como se observa en el Cuadro 11, solo 2 modelos matemáticos cumplen los criterios del PS-11, éstos son el modelo lineal y polinomial, obteniendo un mejor desempeño este último, con un coeficiente de correlación muy alto de 0,995, e intervalos de confianza o tolerancia del rango medio muy bajos, de 1,82% y 4,4%, respectivamente.

En el caso de los modelos que no cumplen los criterios, como se observa en la Figura 19, estos describen trayectorias que generan una subestimación o una sobreestimación de las concentraciones de MP, dependiendo del modelo y de los valores de las lecturas del CEMS-MP que se quieran evaluar.

3.1.2. Curvas de Correlación de la UGE 2

En la Figura 20 se presentan las CC obtenidas para la UGE 2.

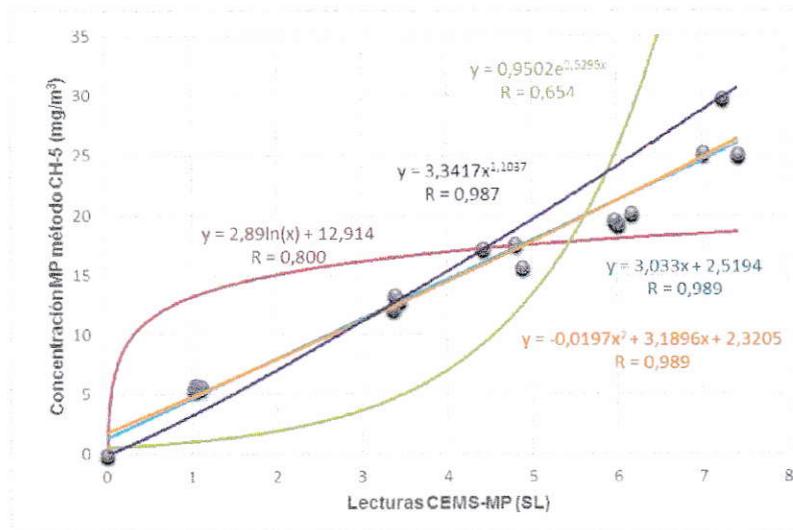


Figura 20. Curvas de Correlación obtenidas para la Unidad de Generación Eléctrica 2 del Complejo Ventanas.

En rojo: modelo logarítmico; en naranja: modelo polinomial; en morado: modelo potencia; en celeste: modelo lineal; en verde: modelo exponencial.

Como se observa en la Figura 20, en esta CC se obtuvo más de 3 niveles de concentración de MP. Así mismo, se observa que los modelos lineal, polinomial y potencia son los que mejor siguen la tendencia de los resultados. No obstante, se observa una mayor dispersión de los resultados respecto a los modelos de tendencia, en comparación con el proceso de la UGE 1. En el caso de los modelos lineal y polinomial, tienen una desviación significativa respecto al punto de 0 teórico, mientras que el modelo de potencia, pasa por el 0 teórico, pero tiene una desviación significativa para los niveles de bajas concentraciones y altas.

En el Cuadro 12, se incluye las tasas de inyección de polvo utilizadas para cada corrida del proceso de CC.

Cuadro 12. Tasas de inyección de cenizas utilizadas para las corridas de las Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 2.

Corrida	Fecha	Tasa de inyección de cenizas (kg/h)
1	10-06-2015	0
2		0
3	15-06-2015	6
4		14
5		18
6		14
7	16-06-2015	18
8		18
9		10
10		10
11		6
12	17-06-2015	18
13		14
14		14
15	18-06-2015	6
16		6
17		10
18		10
19		0
20	19-06-2015	0

Como se observa en el Cuadro 12, en esta CC se ha utilizado 5 niveles principales de inyección de cenizas, con lo que se obtiene 6 niveles de concentración de MP.

Finalmente, en el Cuadro 13, se incluye los resultados estadísticos obtenidos del proceso de CC. Como se observa, 3 modelos matemáticos cumplen los criterios del PS-11, estos son el modelo potencia, polinomial y lineal, obteniendo un mejor desempeño este último, con un coeficiente de correlación muy alto de 0,989, e intervalos de confianza o tolerancia del rango medio muy bajos, de 1,46% y 4,7%, respectivamente.

Cuadro 13. Resultados estadísticos obtenidos de las Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 2.

Modelo	CC ⁽¹⁾	$\hat{r} \geq 0,85?$	IC ⁽²⁾ del rango medio (%)	$\hat{r} \leq 10\%?$	IT ⁽³⁾ del rango medio (%)	$\hat{r} \leq 25\%?$	¿La razón mín/máx ⁽⁴⁾ está dentro del rango permitido?	¿El modelo cumple los criterios?
Lineal	0,989	Si	1,46	Si	4,7	Si	-	Si
Polinomial	0,989	Si	1,97	Si	5,0	Si	Si	Si
Logarítmico	0,800	No	5,92	Si	19,0	Si	-	No
Exponencial	0,654	No	18,74	No	128,8	No	-	No
Potencia	0,987	Si	3,66	Si	12,3	Si	-	Si

⁽¹⁾, CC: Coeficientes de correlación.

⁽²⁾, IC: Intervalo de Confianza.

⁽³⁾, IT: Intervalo de Tolerancia.

⁽⁴⁾, Este criterio aplica sólo para el modelo polinomial.

En el caso de los modelos que no cumplen los criterios, como se observa en la Figura 19, estos describen trayectorias que generan una subestimación o una sobreestimación de las concentraciones de MP, dependiendo del modelo y de los valores de las lecturas del CEMS-MP que se quieran evaluar.

3.1.3. Curvas de Correlación de la UGE 4

En la Figura 21 se presentan las CC obtenidas para la UGE 4.

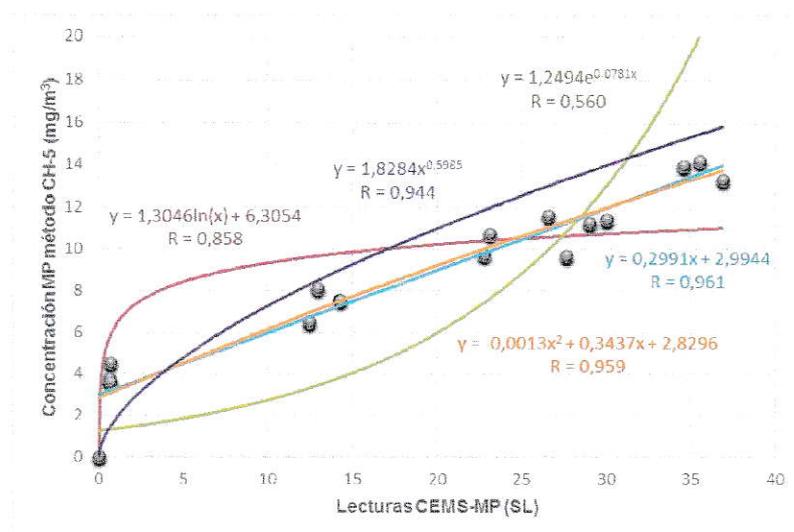


Figura 21. Curvas de Correlación obtenidas para la Unidad Generación Eléctrica 4 del Complejo Ventanas.

En rojo: modelo logarítmico; en naranja: modelo polinomial; en morado: modelo potencia; en celeste: modelo lineal; en verde: modelo exponencial.

Como se observa en la Figura 21, para esta CC se obtuvo más de 3 niveles de concentración de MP. Así mismo, se observa que los modelos lineal, polinomial y potencia son los que mejor siguen la tendencia de los resultados. No obstante, se observa una mayor dispersión de los resultados respecto a los modelos de tendencia, en comparación con el proceso de la UGE 1. En el caso de los modelos lineal y polinomial, tienen una desviación significativa respecto al punto de 0 teórico, aún mayores a los vistos en la UGE 2, mientras que el modelo de potencia, pasa por el 0 teórico, pero tiene una desviación significativa para los niveles de bajas y altas concentraciones.

En el Cuadro 14, se incluyen las tasas de inyección de polvo utilizadas para cada corrida del proceso de CC.

Cuadro 14. Tasas de inyección de cenizas utilizadas para las corridas de las Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 4.

Corrida	Fecha	Tasa de inyección de cenizas (kg/h)
1	20-10-2015	0
2		10
3		10
4		10
5	21-10-2015	6
6		10
7		14
8		18
9		18
10	22-10-2015	6
11		6
12		14
13		14
14		18
15	23-10-2015	6
16		14
17		0
18		0
19	26-10-2015	0
20		0

Como se observa en el Cuadro 14, en esta CC se ha utilizado 5 niveles principales de inyección de cenizas, con lo que se obtiene 6 niveles de concentración de MP.

Finalmente, en el Cuadro 15, se incluyen los resultados estadísticos obtenidos del proceso de CC.

Cuadro 15. Resultados estadísticos obtenidos de las Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 4.

Modelo	CC ⁽¹⁾	$\hat{z} \geq 0,85?$	IC ⁽²⁾ del rango medio (%)	$\hat{z} \leq 10\%?$	IT ⁽³⁾ del rango medio (%)	$\hat{z} \leq 25\%?$	¿La razón mín/máx ⁽⁴⁾ está dentro del rango permitido?	¿El modelo cumple los criterios?
Lineal	0,961	Si	1,75	Si	5,6	Si	-	Si
Polinomial	0,959	Si	2,32	Si	6,0	Si	Si	Si
Logarítmico	0,858	Si	3,27	Si	10,5	Si	-	Si
Exponencial	0,560	No	13,72	No	96,7	No	-	No
Potencia	0,944	Si	5,02	Si	18,6	Si	-	Si

(1), CC: Coeficientes de correlación.

(2), IC: Intervalo de Confianza.

(3), IT: Intervalo de Tolerancia.

(4), Este criterio aplica sólo para el modelo polinomial.

Como se observa en el Cuadro 15, 4 modelos matemáticos cumplen los criterios del PS-11, estos son el modelo logarítmico, potencia, polinomial y lineal, obteniendo un mejor desempeño este último, con un coeficiente de correlación muy alto de 0,961, e intervalos de confianza o tolerancia del rango medio muy bajos, de 1,75% y 5,6%, respectivamente.

En el caso del modelo que no cumple los criterios, como se observa en la Figura 21, este describe una trayectoria que genera una subestimación o una sobreestimación de las concentraciones de MP, dependiendo de los valores de las lecturas del CEMS-MP que se quieran evaluar.

3.2. Resultados obtenidos de los ensayos de desempeño del sistema Spiking

3.2.1. Exactitud del sistema de Spiking

Para determinar la exactitud del sistema de Spiking, en cuanto a su capacidad para generar aumentos de la concentración de MP, se ha utilizado el procedimiento descrito en la sección 2.7.1. del presente Seminario.

Para los procesos de CC de las UGE 1 y 2, se obtuvo un total de 16 corridas con inyección de polvo, mientras que para la UGE 4 se obtuvo 15.

En el Cuadro 18, se presentan los resultados de concentración de MP base, obtenidos por el método CH-5 para cada UGE, en condiciones normales de funcionamiento. Se incluye el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de los resultados obtenidos.

Cuadro 16. Concentraciones de Material Particulado base de las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4 determinadas por método CH-5 en condiciones normales de funcionamiento.

Corrida	Concentración MP ⁽²⁾ (mg/m ³)					\bar{x} ⁽³⁾ (mg/m ³)	σ ⁽⁴⁾ (mg/m ³)	CV ⁽⁵⁾ (%)
	1	2	3	4	5			
UGE ⁽¹⁾ 1	1,3	12,0*	1,7	2,6	-	1,86	0,63	34
UGE ⁽¹⁾ 2	5,3	8,1	5,8	5,7	-	6,21	1,25	20
UGE ⁽¹⁾ 4	4,1	6,0	4,5	3,8	3,6	4,40	0,96	22

⁽¹⁾, UGE: Unidad de Generación Eléctrica.

⁽²⁾, MP: Material Particulado.

⁽³⁾, \bar{x} : Promedio.

⁽⁴⁾, σ : Desviación Estándar.

⁽⁵⁾, CV: Coeficiente de Variación.

*, Este valor es descartado de los análisis, dado que es anómalo respecto a la tendencia.

Como se observa en los resultados del Cuadro 18, para todas las UGE se obtuvo concentraciones de MP base $<10 \text{ mg/m}^3$. Esto se debe a que las UGE poseen equipos FMAE, que reducen en forma eficiente las emisiones de MP. Así mismo, se obtuvo una varianza $>20\%$ para todas las UGE, lo que indica imprecisión de las mediciones realizadas por el laboratorio en este nivel de concentración.

A partir de las concentraciones promedio de MP base del Cuadro 18, y las lecturas de tasa de inyección de polvo y flujo volumétrico de los gases de chimenea, se obtiene la concentración teórica de MP utilizando la ecuación 1.

Los resultados de concentración real obtenida por método CH-5 y concentración teórica determinada con la ecuación 1, para la corrida de acuerdo a su nivel de inyección de polvo, y para cada UGE, se presentan en los Cuadros 19, 20 y 21. Así mismo, en las Figuras 22, 23 y 24, se presentan los gráficos de los resultados obtenidos de las corridas para cada proceso.

Cuadro 17. Concentraciones de Material Particulado real y teórica para cada corrida de acuerdo a su tasa de inyección de polvo para la Unidad de Generación Eléctrica 1.

Corrida	Tasa inyección Spiking (kg/h)	Conc. real MP ⁽¹⁾ CH-5 (mg/m ³)	Conc. MP ⁽¹⁾ teórica (mg/m ³)
1	4	10,3	8,7
2	4	8,2	8,6
3	6	13,8	12,4
4	6	15,3	12,5
5	6	18,1	12,5
6	7,6	15,2	15,2
7	8	16,6	16,0
8	8	16,5	15,9
9	8	16,5	16,2
10	10	20,7	19,4
11	10	23,5	19,4
12	10	22,3	19,4
13	10,6	20,7	20,2
14	15	25,7	27,5
15	15	26,7	27,4
16	15	27,4	27,5

(1), MP: Material Particulado.

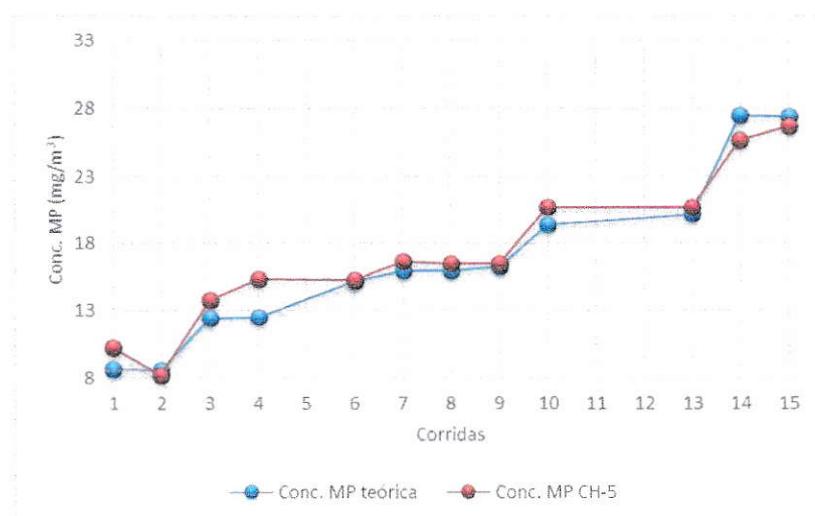


Figura 22. Gráfico de las corridas de resultados de concentraciones determinadas por el método CH-5 y teóricas para el proceso de Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 1.

Cuadro 18. Concentraciones de Material Particulado real y teórica para cada corrida de acuerdo a su tasa de inyección de polvo para la Unidad de Generación Eléctrica 2.

Corrida	Tasa inyección Spiking (kg/h)	Conc. real MP ⁽¹⁾ CH-5 (mg/m ³)	Conc. MP ⁽¹⁾ teórica (mg/m ³)
1	6,5	14,5	13,3
2	6,5	13,4	13,4
3	6,5	12,2	13,2
4	6,5	12,9	13,1
5	10,8	16,3	18,1
6	10,8	17,3	17,6
7	10,8	15,7	17,7
8	10,8	17,6	17,8
9	15,1	20,2	22,9
10	15,1	18,6	23,0
11	15,1	19,3	22,8
12	15,1	19,7	22,6
13	19,4	24,5	27,6
14	19,4	25,1	27,9
15	19,4	29,8	27,8
16	19,4	25,3	27,4

(1), MP: Material Particulado.

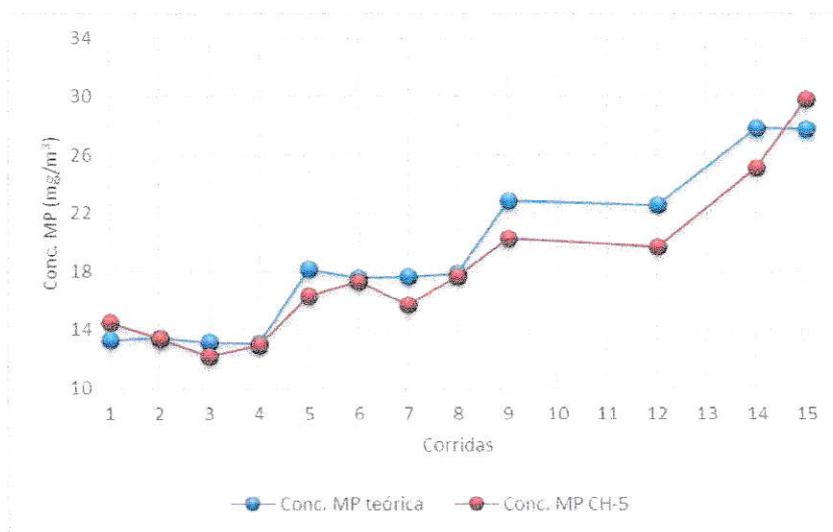


Figura 23. Gráfico de las corridas de resultados de concentraciones determinadas por el método CH-5 y teóricas para el proceso de Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 2.

Cuadro 19. Concentraciones de Material Particulado real y teórica para cada corrida de acuerdo a su tasa de inyección de polvo para la Unidad de Generación Eléctrica 4.

Corrida	Tasa inyección Spiking (kg/h)	Conc. real MP ⁽¹⁾ CH-5 (mg/m ³)	Conc. MP ⁽¹⁾ teórica (mg/m ³)
1	6	7,5	8,7
2	6	7,9	8,4
3	6	6,5	8,3
4	6	8,1	8,3
5	10	10,7	11,1
6	10	9,7	11,3
7	10	11,1	11,3
8	10	10,4	11,3
9	14	11,4	13,9
10	14	11,6	13,5
11	14	9,6	13,3
12	14	11,3	12,9
13	18	13,3	16,0
14	18	14,2	16,5
15	18	14,0	16,1

⁽¹⁾, MP: Material Particulado.

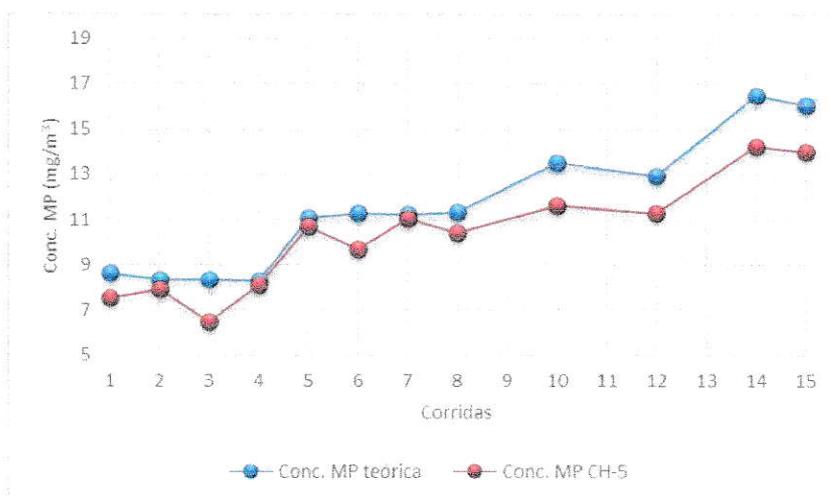


Figura 24. Gráfico de las corridas de resultados de concentraciones determinadas por el método CH-5 y teóricas para el proceso de Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 4.

Dados los resultados obtenidos en los Cuadros 19, 20 y 21, y utilizando las ecuaciones 5, 6, 7 y 8 de la sección 2.7.1., se ha determinado la Exactitud Relativa para cada proceso de CC. Los resultados se presentan en el Cuadro 22. Para obtener estos resultados se han descartado las 3 corridas con mayores diferencias entre el resultado de MP real y el teórico.

Cuadro 20. Resultados de Exactitud Relativa obtenida para las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4.

UGE ⁽¹⁾	Corridas descartadas	ER ⁽²⁾ (%)
1	5, 11 y 12	6,5
2	10, 11 y 13	10,3
4	9, 11 y 13	16,5

⁽¹⁾, UGE: Unidad de Generación Eléctrica.

⁽²⁾, ER: Exactitud Relativa.

Como se observa, en los 3 procesos se obtuvo resultados de Exactitud Relativa <20%, que corresponde al criterio de aceptación de la exactitud dado en el Protocolo CEMS. Esto indica que el sistema de Spiking permite producir en forma exacta un aumento de concentración de MP en chimenea, en relación al valor esperado en base a la tasa de inyección de polvo utilizada y la concentración de MP base de la fuente.

Así mismo, se observan diferencias significativas entre los resultados de Exactitud Relativa obtenidos para los diferentes procesos. Estas diferencias podrían estar relacionadas con:

- Imprecisión en los resultados de MP base obtenidos por el laboratorio.
- Inestabilidad de la concentración de MP base de la fuente.
- Pérdida de la exactitud de la medición de la tasa de alimentación de polvo.
- Presencia de fugas o pérdidas de polvo del sistema flujo arriba del punto de inyección.

En relación a estos factores, se debe considerar que, como se indica en el Cuadro 18, efectivamente se encontró una alta imprecisión en los resultados de MP base obtenidos por el laboratorio. Asimismo, en el caso del proceso de la UGE 4 se podría esperar cierto nivel de inestabilidad de la concentración de MP base, dado que

hubo cambios en la mezcla de carbón dentro del proceso (ver Cuadro 6), no así para los procesos de las UGE 1 y 2, dado que se mantuvieron bastante estables las condiciones operacionales (ver Cuadros 5 y 6).

Las eventuales pérdidas de exactitud de la medición de la tasa de alimentación de polvo no se exploraron durante las campañas de terreno. No obstante, en futuras aplicaciones se pueden verificar realizando un chequeo de la calibración de la celda de carga por medio de pesos patrones.

Finalmente, respecto a la presencia de fugas o pérdidas de polvo del sistema flujo arriba del punto de inyección, se debe comentar que en las campañas de terreno no se observó caídas de presión del sistema por acumulación de material, tampoco pérdidas de polvo, las que serían visibles desde el sitio de trabajo.

3.2.2. Precisión del sistema de Spiking

Para determinar la precisión del sistema de Spiking, en cuanto a su capacidad para generar aumentos de la concentración de MP, como se indica en la sección 2.7.2. del presente Seminario, se utiliza el Coeficiente de Variación (CV) obtenido sobre los valores de concentración de MP determinados por el método CH-5 y las lecturas del CEMS-MP, para cada tasa de inyección de polvo.

En los Cuadros 23, 24 y 25, se presentan los resultados obtenidos para cada tasa de inyección de polvo y promedio por cada proceso realizado.

Cuadro 21. Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los resultados de concentración por método CH-5 y lecturas del Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones de Material Particulado, para cada tasa de inyección, del proceso de Curvas de Correlación la Unidad de Generación Eléctrica 1.

Tasa inyección (kg/h)	Número de corridas	Concentración método CH-5			Lecturas CEM-MP ⁽⁴⁾		
		$\bar{x}^{(1)}$ (mg/m ³)	$\sigma^{(2)}$ (mg/m ³)	CV ⁽³⁾ (%)	$\bar{x}^{(1)}$ (SL)	$\sigma^{(2)}$ (SL)	CV ⁽³⁾ (%)
6	3	15,7	2,2	13,8	8,6	0,3	3,9
8	3	16,5	0,1	0,5	11,2	1,1	10,1
10	3	22,2	1,4	6,4	16,4	0,6	3,9
15	3	16,5	0,1	0,5	18,4	0,4	2,4
		$\bar{x}^{(1)}$ CV ⁽³⁾ (%)		5,1	$\bar{x}^{(1)}$ CV ⁽³⁾ (%)		5,3

(1), \bar{x} : Promedio.

(2), σ : Desviación Estándar.

(3), CV: Coeficiente de Variación.

(4), CEMS-MP: Continuous Emission Monitoring Systems (sistema de monitoreo continuo de emisiones) para Material Particulado.

Cuadro 22. Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los resultados de concentración por método CH-5 y lecturas del Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones de Material Particulado, para cada tasa de inyección, del proceso de Curvas de Correlación la Unidad de Generación Eléctrica 2.

Tasa inyección (kg/h)	Número de corridas	Concentración método CH-5			Lecturas CEM-MP ⁽⁴⁾		
		$\bar{x}^{(1)}$ (mg/m ³)	$\sigma^{(2)}$ (mg/m ³)	CV ⁽³⁾ (%)	$\bar{x}^{(1)}$ (SL)	$\sigma^{(2)}$ (SL)	CV ⁽³⁾ (%)
6,5	4	13,3	1,0	7,4	3,4	0,1	2,5
10,8	4	16,7	0,9	5,4	4,7	0,2	4,4
15,1	4	19,5	0,7	3,5	6,1	0,2	3,6
19,4	4	26,2	2,4	9,3	7,4	0,4	5,2
		$\bar{x}^{(1)}$ CV ⁽³⁾ (%)		6,4	$\bar{x}^{(1)}$ CV ⁽³⁾ (%)		3,9

(1), \bar{x} : Promedio.

(2), σ : Desviación Estándar.

(3), CV: Coeficiente de Variación.

(4), CEMS-MP: Continuous Emission Monitoring Systems (sistema de monitoreo continuo de emisiones) para Material Particulado.

Cuadro 23. Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los resultados de concentración por método CH-5 y lecturas del Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones de Material Particulado, para cada tasa de inyección, del proceso de Curvas de Correlación la Unidad de Generación Eléctrica 4.

Tasa inyección (kg/h)	Número de corridas	Concentración método CH-5			Lecturas CEM-MP ⁽⁴⁾		
		$\bar{x}^{(1)}$ (mg/m ³)	$\sigma^{(2)}$ (mg/m ³)	CV ⁽³⁾ (%)	$\bar{x}^{(1)}$ (SL)	$\sigma^{(2)}$ (SL)	CV ⁽³⁾ (%)
6	4	7,5	0,7	9,6	13,0	0,9	6,9
10	4	10,5	0,6	5,6	23,1	0,6	2,6
14	4	11,0	0,9	8,3	28,3	1,5	5,4
18	3	13,9	0,5	3,3	35,7	1,2	3,3
		$\bar{x}^{(1)}$ CV ⁽³⁾ (%)		6,7	$\bar{x}^{(1)}$ CV ⁽³⁾ (%)		4,5

⁽¹⁾, \bar{x} : Promedio.

⁽²⁾, σ : Desviación Estándar.

⁽³⁾, CV: Coeficiente de Variación.

⁽⁴⁾, CEMS-MP: Continuous Emission Monitoring Systems (sistema de monitoreo continuo de emisiones) para Material Particulado.

Como se observa, la mayoría de los resultados de CV por nivel de tasa de inyección de polvo son <10%, tanto para las respuestas de los CEMS-MP como para los resultados del laboratorio, lo que indica que hay una baja variabilidad en la concentración por cada nivel de inyección de polvo. Asimismo, se aprecia que los CV promedio para cada proceso tienen el mismo orden de magnitud, entre 3,9 - 6,7 %.

En vista de estos resultados, es posible indicar que el sistema de Spiking permite generar concentraciones de MP en chimenea con una alta precisión en procesos estables.

Al comparar estos resultados entre unidades, se aprecia que las mayores variaciones se distribuyen aleatoriamente en los distintos procesos respecto a las tasas de inyección de polvo.

Por otro lado, si bien en la UGE 1 se obtiene prácticamente el mismo CV para los resultados obtenidos con método CH-5 y las lecturas del CEMS-MP, en los procesos de las UGE 2 y 4 es posible notar un mayor CV para los resultados del laboratorio. Es decir, en las aplicaciones de las UGE 2 y 4 hay una mayor imprecisión en los resultados del laboratorio, lo que puede ser atribuible al error propio del método CH-5.

Finalmente, se observa que la precisión de los resultados de laboratorio es mayor a la obtenida en el nivel de concentración base de las UGE (ver Cuadro 18). Esto se debe a que el método CH-5 es más impreciso a concentración de MP <10 mg/m³.

3.2.3. Tiempo de respuesta del sistema de Spiking

Durante la ejecución de los procesos de CC ejecutados, se verificó que en cada transición realizada con el sistema de Spiking desde una condición sin inyección de polvo a una con inyección, y viceversa, el tiempo de respuesta se mantuvieron menor a 10 minutos.

Asimismo, dado que en cada proceso hubo una gran cantidad de transiciones de este tipo, se ha seleccionado aleatoriamente 6 transiciones de entre 3 aplicaciones que tengan ciclos ascendente/descendente y para diferentes tasas de inyección de polvo. Los resultados de estas transiciones se presentan en el Cuadro 26.

Cuadro 24. Resultados de los ensayos de tiempo de respuesta del sistema de Spiking para algunas muestras de ciclos ascendente/descendente realizados en las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4, a distintas tasas de inyección de polvo.

UGE ⁽¹⁾	Ensayo		Tasa Inyección (kg/h)	Tiempo de Respuesta (min)
1	1er	Ascendente	10	4
		Descendente		4
	2do	Ascendente	8	4
		Descendente		7
	3er	Ascendente	8	3
		Descendente		3
2	1er	Ascendente	14	5
		Descendente		4
	2do	Ascendente	18	5
		Descendente		4
4	1er	Ascendente	18	4
		Descendente		4

⁽¹⁾, UGE: Unidad de Generación Eléctrica.

En las Figuras 25 y 26, se presentan los gráficos de las respuestas ascendente y descendente, respectivamente, de los ciclos seleccionados.

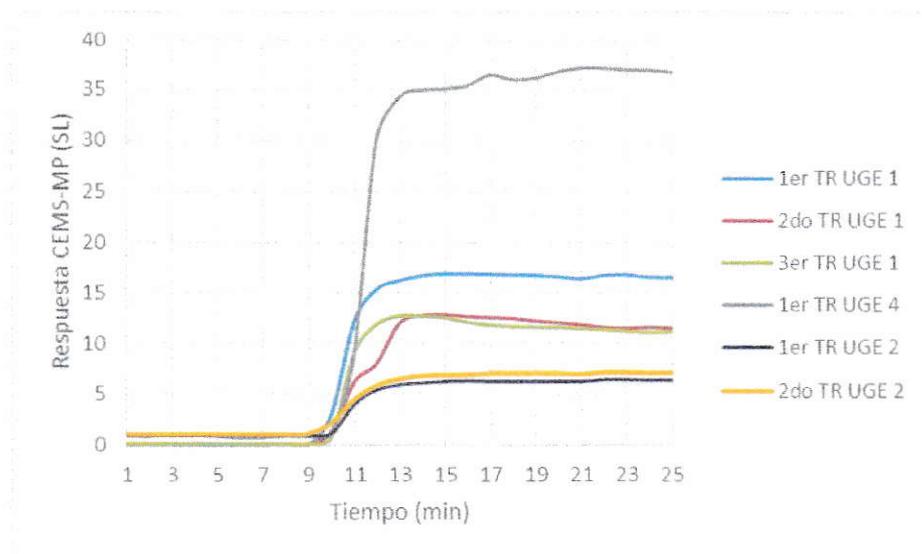


Figura 25. Curvas de respuesta ascendente de los Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones de Material Particulado ante inyección de polvo a distintas tasas para las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4.

En azul: UGE 1 a 10 kg/h de inyección. En rojo: UGE 1 a 8 kg/h de inyección. En verde: UGE 1 a 8 kg/h de inyección. En morado: UGE 2 a 14 kg/h. En amarillo: UGE 2 a 18 kg/h. En gris: UGE 4 a 18 kg/h.

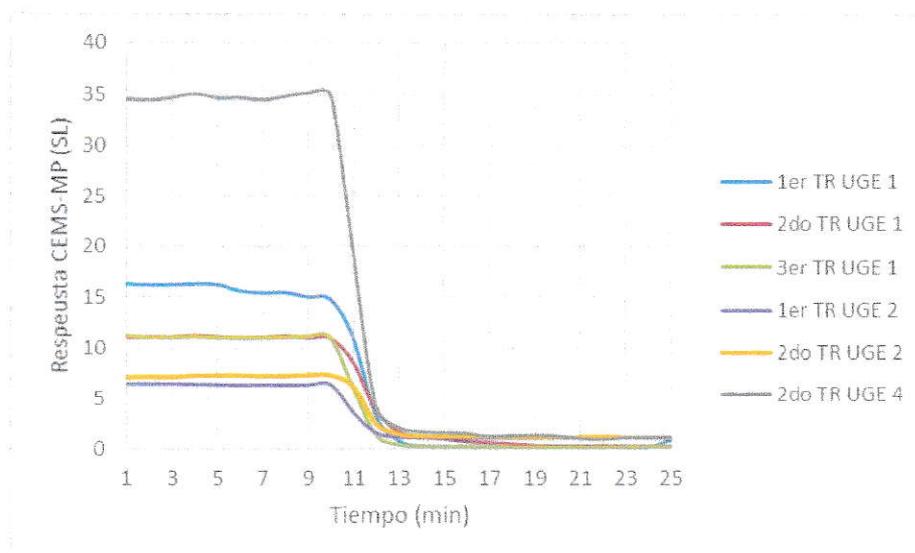


Figura 26. Curvas de respuesta descendente de los Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones de Material Particulado ante inyección de polvo a distintas tasas para las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4.

En azul: UGE 1 a 10 kg/h de inyección. En rojo: UGE 1 a 8 kg/h de inyección. En verde: UGE 1 a 8 kg/h de inyección. En morado: UGE 2 a 14 kg/h. En amarillo: UGE 2 a 18 kg/h. En gris: UGE 4 a 18 kg/h.

Como se observa, el tiempo de respuesta del sistema fue menor a 10 minutos en todas las muestras. Así mismo, se aprecia que las diferencias entre los tiempos de respuesta ascendente y descendente para cada tasa de inyección de polvo en cada aplicación en general son prácticamente despreciables.

Por otro lado, se observa que no existen diferencias significativas en los tiempos de respuesta obtenidos a diferentes tasas de inyección y entre las diferentes UGE, independientemente de: las diferencias de montaje del sistema de Spiking en cada aplicación, las diferentes distancias entre el punto de inyección y la ubicación de los CEMS-MP, el principio de funcionamiento de los CEMS-MP y las diferencias en las velocidades de los gases a través de los ductos y chimenea.

Asimismo, en las Figuras 25 y 26, se observa la forma de las curvas de respuestas ascendentes o descendentes en general son prácticamente iguales para los diferentes CEMS-MP y en las diferentes UGE. Además, no existen

comportamientos irregulares en las mismas, como por ejemplo, aumentos por sobre el nivel determinado por la tasa de inyección o variaciones de la respuesta no esperados.

Finalmente, los bajos tiempos de respuesta obtenidos permiten que, en caso de que se identifique un cambio no esperado de la concentración de MP, debido a problemas de proceso o del propio sistema de Spiking, rápidamente se pueda ajustar la tasa de inyección de cenizas, de modo de evitar eventos de superación de los límites de emisión o ajustar el nivel de acuerdo a la concentración final de MP esperada. Es decir, permite un rápido control ante contingencias.

3.2.4. Estabilidad del sistema de Spiking

Al igual que para la determinación del tiempo de respuesta del sistema de Spiking, durante la ejecución de los procesos de CC ejecutados, se verificó que posteriormente a cada cambio en la tasa de inyección de polvo, la respuesta de los CEMS-MP se mantuviera estable.

No obstante, dado que en cada proceso hubo una gran cantidad de transiciones de este tipo, se realiza el análisis de resultados sobre las mismas transiciones seleccionadas en el análisis de tiempo de respuesta. Los resultados de estas transiciones se presentan en el Cuadro 27.

Como se observa, en todas las transiciones analizadas se mantuvo una alta estabilización de las lecturas de los CEMS-MP, posteriormente alcanzado el tiempo de respuesta del sistema de Spiking, con CVs $\leq 1,0\%$. Esto indica que, manteniéndose las condiciones operacionales de las UGEs, el sistema de Spiking permite generar un aumento de concentración de MP que es estable a través del tiempo.

Asimismo, se observa que prácticamente no hay diferencias en los CV obtenidos para cada transición, independientemente del CEMS-MP utilizado, la UGE en que fue realizada, los niveles de tasa de inyección de polvo o las diferencias de montaje del sistema en cada aplicación

Cuadro 25. Resultados de los ensayos de estabilidad del sistema de Spiking para algunas muestras de ciclos ascendente/descendente realizados en las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4, a distintas tasas de inyección de polvo.

UGE ⁽¹⁾	Ensayo	Tasa inyección (kg/h)	$\bar{x}^{(2)}$ CEMS-MP ⁽³⁾ Spiking (SL ⁽⁴⁾)	$\sigma^{(2)}$ CEMS-MP ⁽³⁾ Spiking (SL ⁽⁴⁾)	$\sigma^{(2)}$ CEMS-MP ⁽³⁾ Base (SL ⁽⁴⁾)	Diferencia $\sigma^{(5)}$ (SL ⁽⁴⁾)	CV ⁽⁶⁾ (%)
1	1er	10	16,7	0,15	0,03	0,12	0,7
	2do	8	12,5	0,14	0,01	0,13	1,0
	3er	8	11,8	0,13	0,02	0,11	0,9
2	1er	14	6,4	0,07	0,01	0,06	0,9
	2do	18	7,1	0,07	0,01	0,06	0,8
4	1er	18	36,2	0,49	0,12	0,37	1,0

⁽¹⁾, UGE: Unidad de Generación Eléctrica.

⁽²⁾, \bar{x} : Promedio.

⁽³⁾, CEMS-MP: Continuous Emission Monitoring Systems (sistema de monitoreo continuo de emisiones) para Material Particulado.

⁽⁴⁾, SL: Scatter Light (luz dispersada).

⁽⁵⁾, σ : Desviación Estándar.

⁽⁶⁾, CV: Coeficiente de Variación en base a la ecuación (11).

3.2.5. Reproducibilidad de los resultados obtenidos

De acuerdo a los resultados informados en las secciones 3.4.1., 3.4.2., 3.4.3. y 3.4.4. del presente Seminario, no hubo variaciones significativas respecto a los resultados obtenidos en cuanto a precisión, tiempo de respuesta y estabilidad del sistema de Spiking, lo que indica una alta reproducibilidad para estos resultados entre distintas aplicaciones.

No obstante, en particular respecto a los resultados obtenidos para el parámetro exactitud, se observó variaciones significativas entre las aplicaciones. Si bien se recomienda seguir evaluando la reproducibilidad de los resultados del sistema de Spiking en cuanto a la exactitud relativa en futuras aplicaciones, de acuerdo a los puntos discutidos en la sección 3.4.1. Una hipótesis planteada es que las diferencias obtenidas se deben fundamentalmente a la imprecisión de las mediciones de laboratorio para determinar la concentración de MP base de las UGEs. Asimismo, en el caso de la UGE 4, adicionalmente puede haber afectado el cambio en el contenido de cenizas de la mezcla de carbón.

3.3. Análisis comparativo entre las Curvas de Correlación obtenidas

En esta sección se comparan los resultados obtenidos en los procesos de CC utilizando el sistema de Spiking, considerando en el análisis las CC obtenidas anteriormente en las UGE 1, 2 y 4 del Complejo Ventanas.

En el Cuadro 16 se presenta un resumen de los resultados obtenidos, en los diferentes procesos realizados para cada UGE.

Cuadro 26. Resumen de resultados obtenidos en todos los procesos de Curvas de Correlación realizados en las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4.

UGE ⁽¹⁾	Proceso	Método de variación conc. MP	Niveles de concentración de MP	Mejor modelo	CC ⁽⁸⁾	IC ⁽⁹⁾ (%)	IT ⁽¹⁰⁾ (%)
1	1era Curva de Correlación ⁽²⁾	Sin variaciones	1	Potencia	0,999	1,0	3,1
	2da Curva de Correlación ⁽³⁾	Sin variaciones	2	Potencia	0,965	3,2	13,7
	2da Curva de correlación ⁽⁴⁾	Sin variaciones	1	Potencia	0,991	1,4	4,5
	3era Curva de Correlación ⁽⁵⁾	Spiking	>3	Polinomial	0,995	1,8	4,4
2	1era Curva de correlación ⁽²⁾	Contenido cenizas	2	Potencia	1,000	2,1	6,9
	2da Curva de Correlación ⁽³⁾	Contenido cenizas + Eficiencia FMAE	>3	Lineal	0,934	5,0	19,4
	2da Curva de Correlación ⁽⁴⁾	Eficiencia FMAE	3	Polinomial	0,979	8,9	31,5
	3era Curva de correlación ⁽⁵⁾	Spiking	>3	Lineal	0,989	1,5	4,7
4	1era Curva de Correlación ⁽⁶⁾	Sin variaciones	1	Potencia	0,990	0,7	2,3
	2da Curva de Correlación ⁽⁷⁾	Spiking	>3	Lineal	0,961	1,8	5,6

⁽¹⁾, UGE: Unidad de Generación Eléctrica.

⁽²⁾, Los 1eros procesos de Curvas de Correlación de las UGE 1 y 2 se realizaron con las unidades operando con precipitadores electroestáticos y con un monitor de MP marca CODEL, modelo DCEM2000.

⁽³⁾, Los 2dos procesos de Curvas de Correlación de las UGE 1 y 2 corresponde a una auditoría ACR ejecutada debido al cambio de los precipitadores electroestáticos por FMAE en las unidades. En este caso se elabora las Curvas de Correlación con todos los resultados obtenidos, Curva de Correlación original más ACR.

⁽⁴⁾, Se elabora la Curva de correlación sólo con los resultados obtenidos en la ACR.

⁽⁵⁾, Los 3eros procesos de CC de las UGE 1 y 2 SE realizaron con el monitor de MP marca SICK, modelo C200 y utilizando el Spiking.

⁽⁶⁾, El 1er proceso de CC de la UGE 4 se realizó con la unidad en sus condiciones actuales, sin generaciones de MP.

⁽⁷⁾, El 2do proceso de CC de la UGE 4 se realizó utilizando el Spiking.

⁽⁸⁾, CC: Coeficiente de Correlación.

⁽⁹⁾, Intervalo de Confianza.

⁽¹⁰⁾, Intervalo de Tolerancia.

Como se observa en el Cuadro 16, todas las CC realizadas a la fecha en las UGE 1, 2 y 4 del Complejo Ventanas, sin importar la cantidad de niveles de MP que se hayan obtenido o el método de variación de la concentración de MP utilizada, han obtenido coeficientes de correlación altos ($>0,90$) y, en general bajos valores de IC e IT ($<5\%$ y $<10\%$, respectivamente). Las excepciones son altos valores de IC e IT para los procesos de 2da CC de la UGE 2, obtenida combinando datos de la 1era CC con los del ensayo ACR, y solo con datos del ensayo ACR. En este último caso, excede el criterio de 25% para el IT por lo que no se obtiene CC que cumpla el PS-11. Asimismo, se obtuvo valores altos, pero dentro del límite (25%), en el 1er proceso de CC de la UGE 1 y en el 2do proceso de CC de la UGE 2, realizado combinando los datos de la CC original y la ACR.

Estos resultados indican que es posible obtener CC con buen desempeño en UGEs a carbón, operando con diferentes equipos de abatimiento, utilizando diferentes métodos de variación de la concentración de MP e, incluso, sin realizar variaciones de la concentración de MP u obteniendo menos de 3 niveles.

Resultados similares se han obtenido en otros estudios realizados sobre CC para CEMS-MP en centrales termoeléctricas a carbón (Conner y Kanpp, 1988; Roberson y col., 1999), sin presencia de gases saturados. No obstante, también han sido documentadas dificultades en el caso de chimeneas con presencia de gas saturado y/o debido a problemas de instalación, configuración y/o funcionamiento de los CEMS-MP (EPRI, 2006).

Así, en vista de estos resultados, se esperaría que en la mayoría de las UGE en que se ejecutan CC (a excepción de las chimeneas con gases saturados), si se realiza un correcto aseguramiento de calidad del funcionamiento del CEMS-MP y de las mediciones del método de referencia, y no hay variaciones en las condiciones operacionales que afecten los resultados, estas aprueben los criterios. Incluso si no se realiza variaciones en la concentración de MP o se realizan en menos de 3 niveles.

Asimismo, de acuerdo a los resultados del Cuadro 16, solo en 5 de los 10 procesos se obtuvo 3 o más niveles de concentración de MP. En estos procesos se utilizó el sistema de Spiking ó reducción en la cantidad de mangas del FMAE.

En el proceso en que se realizó la reducción de la cantidad de mangas (2do proceso de CC de la UGE 2), la CC que se obtuvo sólo con los datos de ACR no aprueba. Por ende, no se obtuvo buenos resultados.

De entre los procesos de CC realizados sin obtener 3 o más niveles de concentración de MP, hay 3 procesos en los que no se realizaron variaciones en la concentración de MP. En el caso de los 1er proceso de la UGE 1, no fue factible realizar cambios en la concentración de MP, dado que al realizar las pruebas con el equipo precipitador electrostático, con que contaba la UGE en ese momento, se obtuvo peaks indeseados de altas concentración de MP. Para el 2do proceso de CC de la UGE 1, sin considerar los datos de la CC original, no fue factible técnicamente realizar maniobras de los equipos FMAE para ejecutar variaciones de la concentración de MP.

Por otro lado, en el caso del 1er proceso de CC de la UGE 2, ante la incapacidad del equipo precipitador electrostático de aumentar en forma controlada la concentración de MP, se aplicó cambios del contenido de cenizas de la mezcla de carbones. No obstante, estos cambios no alcanzaron para obtener 3 niveles de concentración de MP.

Adicionalmente, de acuerdo a las experiencias de ejecución de pruebas de variación de la concentración de MP, a través de maniobras en los equipos de abatimiento de MP, se ha determinado que existen importantes riesgos operacionales asociados. Estos riesgos incluyen problemas en el funcionamiento de los equipos de abatimiento y aumentos indeseados y no controlables en las emisiones de MP. Además, tiene altos costos para operaciones y mantenimiento de las Plantas.

Otro aspecto crítico a comparar en las CC obtenidas, es la extensión lograda. De acuerdo a la normativa (ver sección 1.2.6.), si es que la respuesta del CEMS-MP excede los criterios de extrapolación de la correlación, los datos obtenidos son inválidos. Esta situación puede ocurrir con frecuencia en las UGE que obtuvo CC sin generar variaciones en la concentración de MP, dado que tienen un reducido rango de respuesta para el CEMS-MP. En estos casos, basta que las condiciones operacionales, la eficiencia de los equipos de abatimiento ó el ajuste de la medición

del CEMS-MP varíen un poco para que puedan generarse condiciones de superación los criterios de extrapolación de la correlación (ver sección 1.2.5.).

En el Cuadro 17, se indica el porcentaje de extensión de las curvas obtenidas, en relación al límite de emisión de MP. Éste se obtuvo como la relación porcentual de la diferencia entre el valor máximo de concentración, y el valor normal de concentración de MP, ambos obtenidos utilizando los resultados de la CC, con respecto al valor del límite de emisión de MP, correspondiente a 50 mg/m³N corregido al 6% O₂. La concentración máxima de MP, corresponde a la concentración determinada aplicando el mejor modelo de la CC, para el valor promedio más alto registrado por el CEMS-MP entre todas las corridas del proceso. La concentración normal de MP, corresponde a la concentración determinada aplicando el mejor modelo de CC, para el promedio de las mediciones del CEMS-MP obtenidas sin realizas variaciones en la concentración de MP y en condiciones normales de funcionamiento. Los resultados en mg/m³ en condiciones de chimenea, obtenidos utilizando el mejor modelo de correlación, se estandariza y se corrige al 6% de O₂ en base a las condiciones de chimenea obtenidas durante cada proceso.

Cuadro 27. Concentraciones en condiciones normales y máximas alcanzadas y porcentaje de extensión en todos los procesos de Curvas de Correlación realizados en las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4.

UGE ⁽¹⁾	Proceso	Método de variación Conc. MP ⁽²⁾	Niveles Conc. MP ⁽²⁾	Conc. Normal ⁽⁸⁾ (mg/m ³ N@O ₂)	Conc. Máxima ⁽⁹⁾ (mg/m ³ N@O ₂)	% Extensión CC ⁽¹⁰⁾
1	1era CC ⁽³⁾	Sin variaciones	1	17,5	18,6	2
	2da CC ⁽⁴⁾	Sin variaciones	1	8,4	12,5	8
	3era CC ⁽⁵⁾	Spiking	>3	2,0	35,6	67
2	1era CC ⁽³⁾	Contenido cenizas	2	47,1	66,6	39
	2da CC ⁽⁴⁾	Eficiencia FMAE	3	19,5	36,7	34
	3era CC ⁽⁵⁾	Spiking	>3	6,2	31,8	51
4	1era CC ⁽⁶⁾	Sin variaciones	1	3,7	6,2	5
	2da CC ⁽⁷⁾	Spiking	>3	4,6	20,0	31

(1), UGE: Unidad de Generación Eléctrica.

(2), MP: Material Particulado.

(3), Los 1eros procesos de Curvas de Correlación de las UGE 1 y 2 se realizaron con las unidades operando con precipitadores electrostáticos y con un monitor de MP marca CODEL, modelo DCEM2000.

(4), Los 2dos procesos de Curvas de correlación de las UGE 1 y 2 corresponde a una auditoría ACR ejecutada debido al cambio de los precipitadores electrostáticos por FMAE en las unidades. En este caso se elabora las Curvas de Correlación solo con los resultados obtenidos en la ACR.

(5), Los 3eros procesos de Curvas de Correlación de las UGE 1 y 2 SE realizaron con el monitor de MP marca SICK, modelo C200 y utilizando el Spiking.

(6), El 1er proceso de Curvas de Correlación de la UGE 4 se realizó con la unidad en sus condiciones actuales, sin generaciones de MP.

(7), El 2do proceso de Curvas de Correlación de la UGE 4 se realizó utilizando el Spiking.

(8), Concentración normal determinada utilizando la Curva de Correlación y estandarizando y corrigiendo al 6% de O₂.

(9), Concentración máxima determinada utilizando la Curva de Correlación y estandarizando y corrigiendo al 6% de O₂.

(10), Porcentaje de extensión de la Curva de Correlación relativo al límite de emisión (50 mg/m³N).

Como se observa en el Cuadro 17, los 1eros procesos de CC de las UGE 1 y UGE 4 y el 2do proceso de CC de la UGE 2, todos realizados sin variar la concentración de MP, tienen un porcentaje de extensión muy bajo en relación al límite de emisión, por ende, presentan un alto riesgo de superar los criterios de extrapolación de la correlación dados en el Protocolo CEMS.

En el resto de los procesos de CC, se realizaron variaciones en la concentración de MP al menos en 2 niveles, lo que permitió generar un porcentaje de extensión de la CC en relación al límite de emisión de entre 31-67%. Con estos niveles de extensión, se espera que las CC permitan cubrir los criterios de extrapolación de la

correlación, ante pérdidas de eficiencia de los equipos de abatimiento, variaciones en las diferentes condiciones operacionales de las UGEs y desviaciones de la respuesta de los CEMS-MP.

Asimismo, se observa que en los 3eros procesos de CC de las UGE 1 y 2, los que fueron realizados variando la concentración de MP con el sistema de Spiking, se alcanzó un porcentaje de extensión superior al 50%. Estas aplicaciones son los mejores desempeños alcanzados en este criterio de calidad.

En el caso de las CC realizadas con el sistema de Spiking, se podría haber extendido aún más las curvas, y particularmente en el caso del 2do proceso de CC de la UGE 4, en que no se obtuvo una extensión alta. No obstante, durante el desarrollo de las campañas de terreno se desconocía la exactitud del Spiking para obtener aumentos controlados de concentración (ver sección 3.4.2. del presente estudio), por ende se decidió no aumentar más las tasas de inyección de ceniza como resguardo para no superar el límite de emisión de MP dado por el D.S. N°13/2011 del MMA.

No obstante, dados los resultados de la sección 3.4.2., del presente Seminario, en futuras aplicaciones es posible maximizar el porcentaje de extensión de las CC generando concentración de MP cercanas, pero siempre por debajo, del límite de emisión. Esto permitirá cumplir con los criterios de extrapolación de la correlación aun en casos en que ocurran fallas a nivel operacional por parte de la UGE y sus equipos de abatimiento, logrando determinar con precisión la concentración de MP emitida aún en estos casos y evitando la invalidación de datos.

En el Cuadro 17, no se incluyen los resultados de las 2das CC de las UGEs 1 y 2, combinando los resultados de las CC originales y de los ensayos ACR, dado que se incluyen resultados con equipos de abatimiento distintos, por ende, esta no es una condición reproducible para realizar nuevos procesos de CC en estas UGEs.

3.4. Mecanismos y condiciones que inciden en los resultados de los procesos de Curvas de Correlación

En función de los resultados obtenidos en la presente investigación y las principales discusiones planteadas en la literatura, en la presente sección se analiza los mecanismos y/o condiciones que inciden en los resultados de los procesos de CC.

3.4.1. Cantidad de niveles de variación de la concentración de MP

De acuerdo a los resultados presentados en un estudio del EPRI (EPRI, 2007), la cantidad de niveles de variación de la concentración de MP puede tener un efecto sobre la pendiente del mejor modelo de correlación logrado, en procesos realizados con fuentes de baja emisión y en condiciones normales de funcionamiento. En el estudio se compara 5 CC obtenidas en diferentes UGEs y con diferentes CEMS-MP. En 4 de ellas la pendiente del mejor modelo es más alta cuando se considera solo resultados obtenidos en nivel de concentraciones normales de la fuente, que cuando se consideran variaciones en la concentración de MP.

Dentro de los resultados obtenidos en la presente investigación, sólo es posible comparar la pendiente de los mejores modelos en relación a la cantidad de niveles de variación de la concentración de MP, para las CC del 1er y 2do proceso de la UGE 4, dado que en ambos la UGE cuenta con los mismos equipos de proceso y CEMS-MP. Para el resto de los procesos en que hay variaciones en los niveles de concentraciones de MP, adicionalmente hay cambios en los equipos de procesos y/o de los CEMS-MP, por lo que las variaciones en las formas de las curvas pueden deberse también a los efectos provocados por estas condiciones.

En la Figura 27 se presenta un gráfico donde se observa el cambio de pendiente que ocurre, entre el mejor modelo de correlación obtenido en el 1er y 2do proceso de CC de la UGE 4.

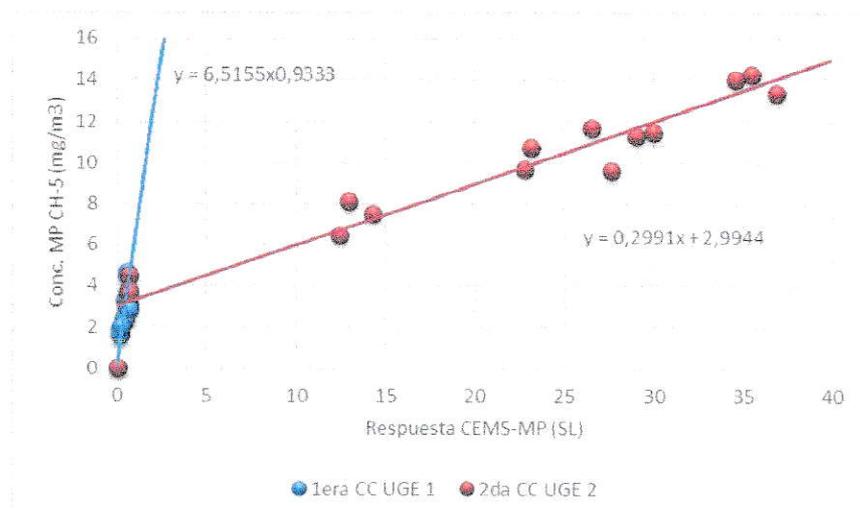


Figura 27. Gráfica del primer y segundo proceso de Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 4, incluyendo las líneas de tendencia de los mejores modelos de correlación obtenidos.

Como se observa, la tendencia del mejor modelo obtenido sin generar variaciones en la concentración de MP, es decir, con resultados en solo 1 nivel de concentración de MP, es mucho mayor que la pendiente del mejor modelo obtenido con el proceso desarrollado con el Spiking, en que se obtuvo 5 niveles de concentración de MP.

De acuerdo a estos resultados, se aprecia que al desarrollar procesos de CC sin realizar variaciones de la concentración de MP, se pueden obtener modelos de tendencia que sobrestiman las emisiones de MP, debido a que tienen una mayor pendiente. Este comportamiento es especialmente crítico para las UGE que tienen bajas concentraciones en condiciones normales de funcionamiento, dado que, como se discute en la sección 3.4.3., en estos casos habitualmente los laboratorio obtienen concentraciones mayores a las reales, lo que provoca la obtención de modelos de mayor pendiente.

Este análisis no se puede realizar comparando las CC de diferentes procesos realizados en las UGE 1 y 2 del Complejo Ventanas, dado que entre procesos hubo cambios en los equipos de abatimiento de las UGE y de los CEMS-MP.

Como se discute en las secciones 3.4.3. y 3.4.4., estos resultados se pueden deber a las desviaciones inducidas por el error del laboratorio a bajas concentraciones de MP ($<10 \text{ mg/m}^3$) y/o los cambios en la sensibilidad de los CEMS-MP, dependiendo del principio de funcionamiento, antes los cambios en las distribución de tamaños del MP que van asociados a los procesos con que se induce los aumentos de concentración.

3.4.2. Uso del valor de 0 teórico

El valor de 0 teórico ha sido ampliamente utilizado en los procesos de CC realizados en centrales termoeléctricas en Chile. Sin embargo, a diferencia de esta realidad, en la mayoría de los estudios disponibles que se han realizado en EE.UU. (Conner y Knapp, 1998; Roberson y col., 1991; Calcagno, 2001; Dunn y col., 2002; Kargas, 2004), este punto no es incorporado en las CC.

En la presente sección se realizará una comparación entre los resultados obtenidos de las CC con Spiking utilizando el valor de 0 teórico (ver secciones 3.2.1., 3.2.2. y 3.2.3.) y los resultados en caso de no utilizarlo.

En los Cuadros 28, 29 y 30, se presentan los resultados de las CC sin utilizar el punto de 0 teórico. En estos procesos se obtuvo bajas concentraciones de MP en condiciones normales de funcionamiento y se efectuaron variaciones de la concentración de MP utilizando Spiking.

Cuadro 28. Resultados estadísticos obtenidos de las Curvas de Correlación de la Unidad de Generación Eléctrica 1, sin utilización del punto 0 teórico.

Modelo	CC ⁽¹⁾	$\lambda \geq 0,85?$	IC ⁽²⁾ del rango medio (%)	$\lambda \leq 10\%?$	IT ⁽³⁾ del rango medio (%)	$\lambda \leq 25\%?$	¿La razón mín/máx ⁽⁴⁾ está dentro del rango permitido?	¿El modelo cumple los criterios?
Lineal	0,994	Si	1,42	Si	4,5	Si	-	Si
Polinomial	0,995	Si	1,74	Si	4,2	Si	Si	Si
Logarítmico	0,868	Si	6,45	Si	20,4	Si	-	Si
Exponencial	0,901	Si	7,06	Si	24,2	Si	-	Si
Potencia	0,985	Si	2,77	Si	8,9	Si	-	Si

⁽¹⁾, CC: Coeficientes de correlación.

⁽²⁾, IC: Intervalo de Confianza.

⁽³⁾, IT: Intervalo de Tolerancia.

⁽⁴⁾, Este criterio aplica sólo para el modelo polinomial.

Cuadro 29. Resultados estadísticos obtenidos de las Curvas de Correlación de la Unidad Generación Eléctrica 2, sin utilización del punto 0 teórico.

Modelo	CC ⁽¹⁾	$\lambda \geq 0,85?$	IC ⁽²⁾ del rango medio (%)	$\lambda \leq 10\%?$	IT ⁽³⁾ del rango medio (%)	$\lambda \leq 25\%?$	¿La razón mín/máx ⁽⁴⁾ está dentro del rango permitido?	¿El modelo cumple los criterios?
Lineal	0,989	Si	1,35	Si	4,3	Si	-	Si
Polinomial	0,989	Si	1,81	Si	4,6	Si	Si	Si
Logarítmico	0,949	Si	2,84	Si	9,0	Si	-	Si
Exponencial	0,969	Si	2,49	Si	7,9	Si	-	Si
Potencia	0,993	Si	1,18	Si	3,7	Si	-	Si

⁽¹⁾, CC: Coeficientes de correlación.

⁽²⁾, IC: Intervalo de Confianza.

⁽³⁾, IT: Intervalo de Tolerancia.

⁽⁴⁾, Este criterio aplica sólo para el modelo polinomial.

Cuadro 30. Resultados estadísticos obtenidos de las Curvas de Correlación de la Unidad Generación Eléctrica 4, sin utilización del punto 0 teórico.

Modelo	CC ⁽¹⁾	$\lambda \geq 0,85?$	IC ⁽²⁾ del rango medio (%)	$\lambda \leq 10\%?$	IT ⁽³⁾ del rango medio (%)	$\lambda \leq 25\%?$	¿La razón mín/máx ⁽⁴⁾ está dentro del rango permitido?	¿El modelo cumple los criterios?
Lineal	0,978	Si	1,18	Si	3,7	Si	-	Si
Polinomial	0,976	Si	1,54	Si	4,0	Si	Si	Si
Logarítmico	0,884	Si	2,66	Si	8,4	Si	-	Si
Exponencial	0,969	Si	1,55	Si	4,9	Si	-	Si
Potencia	0,949	Si	1,98	Si	3,7	Si	-	Si

⁽¹⁾, CC: Coeficientes de correlación.

⁽²⁾, IC: Intervalo de Confianza.

⁽³⁾, IT: Intervalo de Tolerancia.

⁽⁴⁾, Este criterio aplica sólo para el modelo polinomial.

Como se observa, sin la utilización del valor de 0 teórico mejoran levemente los resultados estadísticos respecto a los resultados obtenidos utilizando este valor. Por ende, se podría indicar que el desempeño de los procesos de CC realizados variando la concentración de MP, mejora levemente si no se utiliza el valor de 0 teórico para desarrollar las curvas.

Si se observa los gráficos de las Figuras 19, 20 y 21 (ver secciones 3.2.1., 3.2.2. y 3.2.3.), se observa que los modelos tendencias con mayor correlación de estos procesos, cruzan el eje de las ordenadas en valores positivos de concentración y no en 0. Este corrimiento de los resultados se puede deber a la dispersión de los

resultados del laboratorio, debido al error a bajos niveles de concentración de MP (ver sección 3.4.3.), y/o a la dispersión de los resultados del CEMS-MP debido a efectos de estratificación y/o del principio de funcionamiento.

En función de estos análisis se espera que, en procesos de baja emisión de MP en condiciones normales de funcionamiento y en los que se realizan variaciones en las concentraciones de MP en 3 o más niveles, se obtenga mejores correlaciones sin utilizar el valor de 0 teórico.

No obstante, es necesario considerar que la no utilización del punto 0 teórico para el desarrollo de una CC, implica un riesgo para la aprobación de las auditorías ARR y ACR, dado que en estos procesos de auditorías, ya sea por condiciones de mantenimiento o uso de mezcla de carbón de bajo contenido de cenizas, existe la posibilidad de obtener lecturas de los CEMS-MP menores a las mínimas lecturas obtenidas durante el proceso de CC. En estos casos el ensayo ARR reprobaría y sería necesario realizar una auditoría de ACR, aumentando los costos operativos para la Central.

3.4.3. Error de los muestreos del método de referencia CH-5

El efecto de los errores de los muestreos del método de referencia en los resultados de las CC, es un tema que ha sido abordado extensamente en la literatura. De acuerdo a Jahnke (2000), los problemas más habituales son:

- Utilizar métodos de filtración fuera de la chimenea con temperaturas de filtro menores a las temperaturas de los gases de chimenea.
- Incapacidad del método de referencia para medir precisamente bajas concentraciones de MP.
- Uso de Inadecuadas técnicas experimentales por parte de los laboratorios:
 - ❖ Inadecuadas técnicas de limpieza de la boquilla, la sonda y/o el porta filtro.
 - ❖ Fallas o procedimientos inadecuados en la calibración de los equipos del método de referencia.
 - ❖ Técnicas de baja calidad en el pesaje del filtro y el recuperado.
 - ❖ Falla en la aplicación de procedimientos de control de calidad de las mediciones.

En relación a la incapacidad del método de referencia EPA 5 para medir precisamente bajas concentraciones de MP, la US-EPA realizó un estudio sistemático de laboratorio (EPA, 1997) para definir el límite de detección del método, obteniendo como resultados que el límite de cuantificación práctico es de 3 mg y el límite de detección de 1 mg.

Asimismo, se determinó que una parte importante de la variabilidad de los resultados obtenidos en los intentos por calibrar CEMS-MP, se debían a imprecisiones en la realización de los procedimientos de recuperación del filtro dados en el método EPA 5. Este error ocurre cuando la masa de MP en el tren de muestreo es muy pequeña (<50 mg).

En base a estos resultados se propuso la implementación de método EPA 5i. Este método se diferencia del método EPA 5 principalmente en 3 aspectos:

- Se utiliza filtros y portafiltros más pequeños y ligeros que son tarados como una sola unidad. Esta mejora elimina el paso de recuperar el filtro y sus errores asociados por contaminación o pérdida de muestra.
- Se realizan muestreos pareados con 2 trenes de muestreo en paralelo partiendo en distintos puertos.
- Una vez obtenidos los resultados estos son procesados de acuerdo a un criterio de precisión para analizar si es que la corrida es válida o inválida. Si la corrida es válida se utiliza el promedio de ambas concentraciones obtenidas.

Dadas estas recomendaciones, la mayoría de las investigaciones sobre CC se han realizado utilizando el método EPA 5i. De acuerdo a las investigaciones de Calcagno (2001), Dunn y col. (2002) y Kangas (2004), para resultados de concentraciones de MP <10 mg/m³, se vuelve difícil cumplir el criterio de precisión para validar las mediciones de trenes pareados, obteniendo en la mayoría de los muestreos desviaciones relativas entre ambos resultados mayores a 20%, por lo que deben ser descartadas. Asimismo, en estas investigaciones se observa que la utilización del método EPA 5i permite determinar qué muestreos, de entre todos los realizados a <10 mg/m³ de concentración de MP en la fuente, son representativos.

En el caso específico de la investigación de Roberson y col. (1991), se utilizó los criterios del método EPA 5i pero utilizando trenes pareados del método EPA 17.

Este método se diferencia del método EPA 5 sólo en que tienen el filtro dentro de la chimenea. La selección de este método se basa en que se reduce el error asociado a la recuperación del material particulado del tren de muestreo, dado que sólo se requiere realizar el lavado de la boquilla y del porta filtro, a diferencia del método EPA 5 en que es necesario realizar el lavado de la sonda, que mide varios metros.

Debido a la utilización de este método, en esta investigación se obtuvo una gran cantidad de resultados que aprueban el criterio de precisión del método EPA 5i en el tramo entre 5-10 mg/m³, e incluso en algunos muestreo con concentraciones <5 mg/m³.

Debido a que en las aplicaciones de la presente investigación no se utilizó el método EPA 5i, no ha sido posible determinar la precisión de los muestreos con trenes pareados. No obstante, como se observa en el Cuadro 18 (ver sección 3.4.1.), el laboratorio obtuvo una alta dispersión (CV > 20%) de los resultados de concentración de MP base, correspondiente a valores de MP bajo <10 mg/m³, pese a que las condiciones operacionales se mantuvieron constantes entre las corridas realizadas para cada UGE. Asimismo, como se observa en los Cuadros 23, 24 y 25 (ver sección 3.4.2.), en general la dispersión de los resultados del laboratorio son mayores a las dispersiones obtenidas para los CEMS-MP.

De acuerdo a estos resultados, y en consideración con las observaciones realizadas en la literatura, se puede indicar que los resultados obtenidos por el laboratorio a concentraciones de MP <10 mg/m³ tiene una baja confiabilidad.

En vista de este análisis, se podría atribuir un impacto importante del error de los resultados de las mediciones de laboratorio, en las desviaciones de los mejores modelos de correlación respecto al punto 0 teórico que se observan en las Figuras 19, 20 y 21. No obstante, se debe considerar que estas desviaciones también se pueden deber a otros mecanismos o condiciones, como por ejemplo, la presencia de estratificación de MP o el efecto de los cambios en la distribución de tamaño del MP sobre las respuestas de los CEMS-MP.

En función de estas discusiones, se recomienda ejecutar futuros procesos de CC utilizando el método EPA 5i e idealmente utilizando trenes de muestreo de acuerdo

al método EPA 17. En los casos en que esto no sea factible, se recomienda realizar corridas con más de 1,0 m³N de volumen de muestra, que es el volumen mínimo que exige la metodología, cuando se estime que la concentración de MP < 10 mg/m³. De este modo se reduce el error en las determinaciones de peso, dado que se obtiene una mayor masa de particulado.

Asimismo, se recomienda que las autoridades realicen esfuerzos para determinar los límites de cuantificación y detección de los laboratorios nacionales.

3.4.4. Efectos de los cambios en la distribución de tamaños del MP

Diferentes estudios (Conner y Knapp, 1988; Calcagno, 2001; Dunn y col., 2002) han indicado que el cambio en la distribución de tamaños del MP incide directamente en la forma de las CC desarrolladas con CEMS-MP de principio de funcionamiento óptico.

Este comportamiento se debe a que la distribución de tamaño del MP y las características como composición química, forma, tamaño y color de las partículas, tienen directa relación con los fenómenos ópticos que ocurren a la luz emitida por el monitor de MP en los gases de chimenea (Jahnke, 2000). Por ende, la respuesta de un mismo equipo CEMS-MP puede ser diferente, aun cuando las concentraciones de MP sean iguales, si es que las distribuciones de tamaño del MP y sus características como composición química, tamaño, color y forma son diferentes.

Debido a estos efectos, como se observa en la Figura 28, las CC obtenidas utilizando el sistema de Spiking en las UGEs 1, 2 y 4 tienen pendientes bastante diferentes, pese a que los 3 equipos CEMS-MP tienen principio de funcionamiento en base a luz dispersada, e incluso en los CEMS-MP de las UGE 1 y UGE 2 son de la misma marca y modelo.

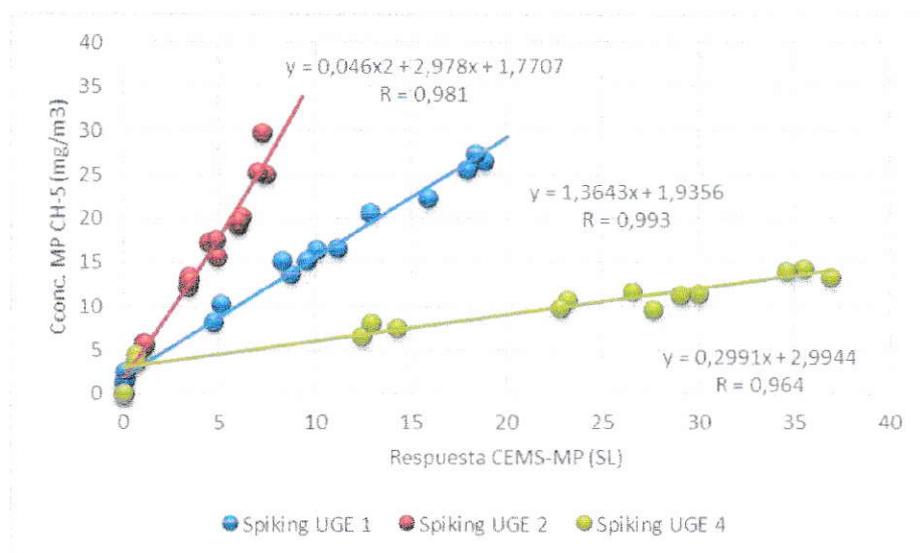


Figura 28. Curvas de Correlación obtenidas con el sistema de Spiking en las Unidades de Generación Eléctrica 1, 2 y 4.

Asimismo, al comparar los resultados obtenidos en los procesos de CC de las UGE 1 y 2, se observa que en el nivel de concentración de MP base (sin adición de polvo), el equipo C200 en la UGE 1 tiene lecturas cercanas a 0 SL, mientras que el mismo equipo en la UGE 2 tiene lecturas de aprox. 1 SL. También el equipo SB100 de la UGE 4 tiene lecturas cercanas a 0 SL en el nivel de bajas concentraciones de MP.

Es decir, en las UGE 1 y 4 los CEMS-MP tienen una lectura cercana a 0 SL en el nivel de concentración de MP base. No obstante, en ambos casos el laboratorio mide concentraciones de MP entre 0-5 mg/m³. Como se ha discutido en la sección 3.4.3., a estos niveles las concentraciones de MP registradas por el laboratorio no son confiables, por lo que es posible que la concentración en chimenea fuera cercana a 0 mg/m³, tal cual como registra el CEMS-MP.

No obstante, puntualmente en el caso de la UGE 4, de acuerdo a los resultados del Cuadro 18, se observa que las 5 corridas realizadas en nivel de concentración de MP base tienen resultados similares, dando un promedio y desviación estándar de

4,40 y 0,96 mg/m³, respectivamente. Es decir, podría considerarse como un resultado impreciso, pero que indica la presencia de MP en chimenea.

En consideración con este análisis, se tendría que el CEMS-MP de la UGE 4 no registra prácticamente lecturas de 0 SL cuando en la chimenea realmente puede haber una concentración de aprox. 3-6 mg/m³. Este comportamiento se podría deber al efecto de los cambios de distribución de tamaño del MP sobre las mediciones del CEMS-MP.

Para evaluar este efecto se realiza un análisis de CC en que se obtendrá los resultados utilizando solo la masa obtenida en el filtro de los muestreos isocinéticos, por un lado, y solo la masa obtenida en el recuperado de los muestros, por el otro.

De acuerdo a investigaciones realizadas (Durham y Lundgren, 1979; Elder y col., 1981; Hangel y Willeke, 1990), en los muestreos isocinéticos las partículas de mayor tamaño (>3 µm de diámetro aerodinámico) tienen menos poder de penetración, debido al asentamiento gravitacional y la impactación inercial, y por ende suelen quedar adheridas a las paredes del tren de muestreo. Mientras que las partículas finas (<3 µm) son capaces de atravesar todo el tren de muestreo hasta el filtro.

Por ende, en el filtro se espera obtener la fracción fina del MP, mientras en el recuperado se encuentren partículas más gruesas.

A partir de las concentraciones de MP divididas en filtro y recuperado se ha reprocesado las CC de la UGE 4, obteniendo las CC de las Figuras 29 y 30.

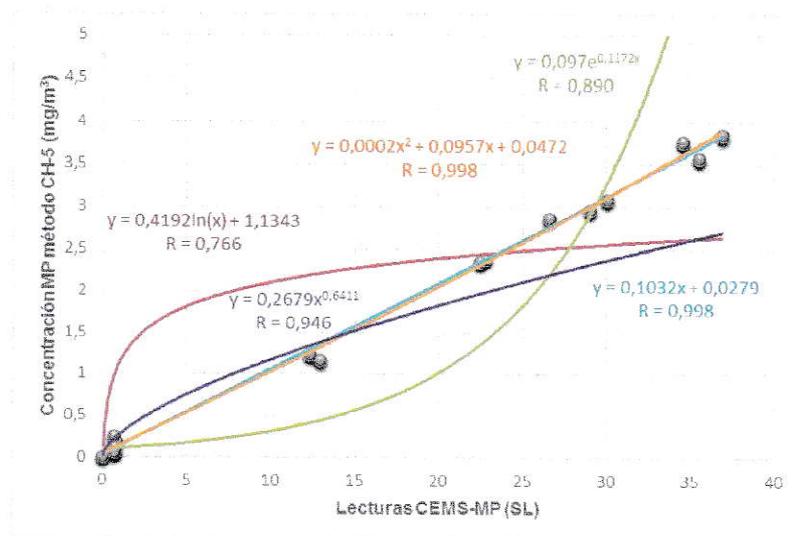


Figura 29. Curvas de Correlación obtenidas para la Unidad de Generación Eléctrica 4, considerando la concentración MP obtenida sólo en el filtro de los muestreos del método CH-5.

En rojo: modelo logarítmico; en naranja: modelo polinomial; en morado: modelo potencia; en celeste: modelo lineal; en verde: modelo exponencial.

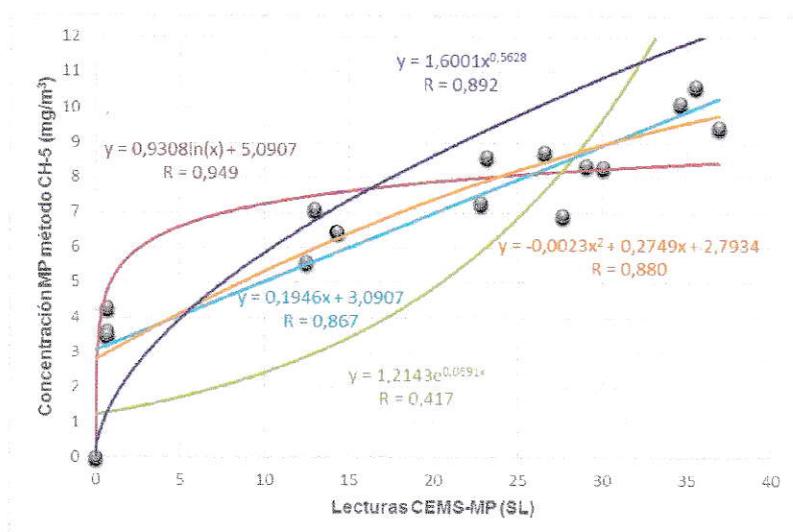


Figura 30. Curvas de Correlación obtenidas para la Unidad de Generación Eléctrica 4, considerando la concentración MP obtenida sólo en el recuperado de los muestreos del método CH-5.

En rojo: modelo logarítmico; en naranja: modelo polinomial; en morado: modelo potencia; en celeste: modelo lineal; en verde: modelo exponencial.

Como se observa en la Figura 29, las respuestas del CEMS-MP de la UGE 4 correlacionan fuertemente para los modelos logarítmico y lineal, para las concentraciones de MP obtenidas sólo utilizando la masa del filtro, es decir, las partículas más finas. Mientras que, como se observa en la Figura 30, la tendencia de las respuestas del CEMS-MP sólo correlaciona más fuertemente con el modelo potencia, considerando las concentraciones obtenidas sólo del recuperado, es decir, el MP grueso.

De acuerdo a este análisis, se puede proponer que el CEMS-MP de la UGE 4 tiene una mayor sensibilidad para las partículas finas, que para las partículas gruesas, por ende, es afectado por los cambios en la distribución de tamaños del MP.

IV. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que el sistema de Spiking fue capaz de generar variaciones de la concentración de MP en chimenea en forma exacta, precisa, estable y con un bajo tiempo de respuesta, en las unidades 1, 2 y 4 de la Central Termoeléctrica Ventanas. Además, se determinó una alta reproducibilidad entre las diferentes aplicaciones para los parámetros precisión, estabilidad y tiempo de respuesta. No obstante, no se obtuvo una alta reproducibilidad para el parámetro exactitud relativa.

Asimismo, el sistema de Spiking permitió obtener Curvas de Correlación de MP en las unidades del presente estudio que tienen ventajas comparativas respecto a los resultados obtenidos utilizando otros procedimientos para la variación de la concentración de MP, como son:

- Mayor coeficiente de correlación y menores Intervalos de Confianza e Intervalo de Tolerancia de las Curvas de Correlación.
- Mayor extensión de la Curvas de Correlación, lo que permite evitar que se sobrepasen los criterios de extrapolación de la correlación.
- Obtención de modelo de menor pendiente y con tendencia cercanas a la tendencia lineal.

A través del análisis de otros mecanismos y condiciones que afectan los resultados de las Curvas de Correlación, se determinó que para obtener resultados de alto desempeño es importante, a lo menos:

- verificar el correcto funcionamiento de los CEMS-MP.
- Asegurar la calidad de las mediciones del método de referencia.
- Mantener un control sobre las condiciones operacionales de la Planta.

Finalmente, las conclusiones obtenidas por medio de este trabajo de investigación resultan un aporte relevante en un área de desarrollo incipiente en Chile y de solo algunas décadas en el mundo, como es la determinación continua de MP desde procesos industriales, y por ende, de una gran importancia para lograr una efectiva regulación de las emisiones de este contaminante.

V. RECOMENDACIONES

Dado que para asegurar la exactitud del sistema de Spiking, se requiere mantener controlada la concentración de MP base de la fuente, se deberá analizar la capacidad del sistema de Spiking para controlar la concentración de MP en procesos de tipo batch, inestables y/o que utilicen diferentes tipos de materias primas o combustibles.

Se recomienda seguir evaluando la reproducibilidad del sistema de Spiking en cuanto a su exactitud relativa para lograr una concentración aumentada de MP en chimenea en futuras aplicaciones.

Debido a que la imprecisión de las mediciones de MP a través del método de referencia es importante para concentraciones bajo $<10 \text{ mg/m}^3$, se recomienda que los procesos de CC sean realizados utilizando el método EPA 5i de trenes pareados, para analizar el error de las corridas y descartar los puntos de menor representatividad.

Se recomienda realizar estudios que profundicen en los mecanismos y condiciones que inciden en los resultados de los procesos de CC, debido a que estos trabajos son escasos y muy iniciales, y contribuiría a esclarecer los motivos por lo que sigue siendo complejo obtener CC de alto desempeño.

Se recomienda evaluar el desempeño de la CC obtenidas con el sistema de Spiking respecto a las Auditorías de Respuesta Relativa y Auditorías de Correlación de Respuesta.

Se recomienda evaluar el desempeño del sistema de Spiking, respecto al control que puede obtenerse sobre los efectos en la calidad del aire para MP de la zona en que se ejecutan ensayos.

Finalmente, se recomienda evaluar la eficiencia del sistema de Spiking, respecto al uso de recursos y riesgos operacionales, en comparación con otros métodos para variación la concentración de MP.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Calcagno, J.A. 2001. Data analysis and Correlations for the Particulate Matter Continuous Emission Monitoring System Test Program at the TSCA Incinerator. Universidad de Tennessee, Knoxville.
- Cohen, A.J., Anderson, H.R., Ostro, B., Pandey, K.D., Krzyzanowski, M., Kunzli, N., Gutschmidt, K., Pope, A., Romieu, I., Samet, J.M., Smith, K., 2005. The Global Burden of Disease Due to Outdoor Air Pollution. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A: Current issues*. 68:13-14, 1301-1307.
- Conner, W.D., Knapp, K.T., 1988. Relationship between the Mass Concentration and Light Attenuation of Particulate Emissions from Coal-Fired Power Plant. *JAPCA*, 38:2, 152-157.
- CONAMA, 2007. Informe de seguimiento Plan de descontaminación de Ventanas 1993-1996. Comité Técnico del Aire.
- CONAMA, 2009. Análisis General del Impacto Económico y Social de una Norma de Emisión para Termoeléctricas. Informe Final.
- Dunn, J.E., Davis, W.T., Calcagno III, J.A., Allen, M.W., 2002. Field testing of particulate matter continuous emission monitors at DOE Oak Ridge TSCA incinerator. *Waste Management* 22: 427-438.
- Durham, M.D., Lundgren, D.A., 1979. Evaluation of aerosol aspiration efficiency as a function of stokes number, velocity ratio and nozzle angle. *J. Aerosol Sci.* Vol. 11: 179-188.
- Elder, J.C., Tillery, M.I., Ettinger, H.J., 1981. Evaluation of EPA Method 5 Probe Deposition and Filter Media Efficiency. *Air Pollution Control Association*. Volumen 31: 66-68.
- EPA, 1996. Method 5 – Determination of Particulate Matter Emissions From Stationary Sources. Code of Federal Regulations 40, pt. 60, app. A.

- EPA, 1997. Method 5i – Determination of Low Level Particulate Matter Emissions From Stationary Sources. Code of Federal Regulation 40, pt 60, app A.
- EPA, 1998. Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter, Air Quality Strategies and Standards Division, Research Triangle Park, NC 27711/ EPA-68-D-98-026.
- EPA, 2000. Evaluation of Particulate Matter Continuous Emission Monitoring Systems. Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC 27711 / EPA-454/R-00-040a.
- EPA, 2004. Air Quality Criteria for Particulate Matter. National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, Report no. EPA/600/P-99/002aF. North Carolina.
- EPA, 2013. Part 75 CEMS Field Audit Manual. Clean Air Markets Division. Washington, DC20014.
- EPRI, 1988. Fabric Filters for the Electric Utility Industry. Volumen 1, General Concepts. Southern Research Institute, California.
- EPRI, 2006. Status of Particulate Matter Continuous Emission Monitoring Systems. Technical Update. 1010337. California.
- EPRI, 2007. Status of Particulate Matter Continuous Emission Monitoring Systems 2007. Technical Update. 1014180. California.
- Hangal, S., Willeke, K., 1990. Overall efficiency of tubular inlets sampling at 0-90 degrees from horizontal aerosol flows. Atmospheric Environment. Vol, 24A, No 9.: 1279-2386.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007, Mitigation of Climate Change. Technical Support Unit IPCC Working Group III, Netherlands Environmental Assessment Agency.
- ISP, 1996a. Método CH-1: Localización de puntos de muestreo y de medición de velocidad para fuentes estacionarias. Libro de metodologías aprobadas.

- ISP, 1996b. Método CH-2: Determinación de la velocidad y de el flujo volumétrico en gases de chimenea (tubo pitot tipo S). Libro de metodologías aprobadas.
- ISP, 1996c. Método CH-3: Análisis de gas para la determinación del peso molecular seco. Libro de metodologías aprobadas.
- IPS, 1996d. Método CH-4: Determinación del contenido de humedad en gases de chimenea. Libro de metodologías aprobadas.
- ISP, 2012. Método CH-5: Determinación de las emisiones de partículas desde fuentes estacionarias. Libro de metodologías aprobadas.
- Jahnke, J.A. 2000. Continuous Emission Monitoring (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Juneau, P.J. y Baxter, R. 2004. Device and Method for introducing a known dust concentration spike for calibrating Particulate Matter Continuous Emission Monitoring Systems. Patente de EE.UU. 6,694,796 B2.
- Kangas, R., 2004. Continuous monitoring of exhaust gas dust emissions from a Steel melting shop. Research article from Outokumpu Stainless Oy, Finland.
- Linak, W. P., Wendt, O. L., 1993. Toxic metal emissions from incineration: mechanisms and control. Progress in Energy and Combustion Science. 19(2): 145-185.
- Markandya, A., Wilkinsin, P., 2007. Electricity generation and health. Energy and Health. The Lancet. 370: 979-990.
- Meij, R., Vredenburg, L.H.J., Winkel, H., 2002. The Fate and Behavior of Mercury in Coal-Fired Power Plants. Journal of the Air & Waste Management Association. 52:8. 912-917.
- MMA, 2011a. D.S. N°13: Establece norma de emisión para centrales termoeléctricas (D.O. 23/02/2011).
- MMA, 2011b. Informe del Estado del Medio Ambiente 2011. AMF A. Molina Flores S.A. Santiago de Chile. 512 pp.

- Pope, C.A., Burnett, R.T., Thurston, G.D., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D. y Godleski, J.J., 2004. Cardiovascular Mortality and Long-Exposure to Particulate Air Pollution: Epidemiological Evidence of General Pathophysiological Pathways of Disease. American Heart Association. 70-77.
- Pope III, C. A., & Dockery, D. W., 2006. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the air & waste management association* 56(6): 709-742.
- Ramanathan, V., Carmichael, G., 2008. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature geoscience* 1: 221-227.
- Rausch, H., Fliszár-Baranyai, R., Sandor, S., Laszlo-Sziklai, I., Török, S., & Papp-Zenplén, E., 1993. Distribution of toxic elements in fly-ash particulates. *Science of the total environment*, 130, 317-330.
- Schroeder, W. H., Dobson, M., Kane, D. M., Johnson N. D., 1987. Toxic Trace Elements Associated with Airborne Particulate Matter: A Review. *Japca*, 37(11): 1267-1285.
- SMA, 2013. Res. Ex. N°57/2013. Protocolo para Validación de Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones (CEMS) en Centrales Termoeléctricas (DO 25.01.2015).
- SMA, 2014a. Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas.
- SMA, 2014b. Catastro de titulares de centrales termoeléctricas y su caracterización. Departamento de Planificación, Control y Estudios.
- Roberson, R.L., Mitchell G.C., Dene C.E., 1999. Evaluation of Continuous Particulate Matter (PM) Monitors for Coal-Fired Utility Boilers with Electrostatic Precipitators. <http://www.rmb-consulting.com/cinnati/rlrpaper.htm>.