

Eficiencia Ambiental y Energética de Calderas en la Provincia de Córdoba, Argentina

Roberto C. Pepino Minetti¹, José M. Fonseca¹ y Eduardo G. López¹

¹CIQA (Centro de Investigación y Transferencia en Ingeniería Química Ambiental), Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 21/09/2018

Fecha de aceptación del manuscrito: 12/12/2018

Fecha de publicación: 26/12/2018

Resumen—La eficiencia energética de los procesos productivos siempre ha sido un tema de especial interés para los ingenieros de proceso por cuestiones asociadas a costos. En la actualidad, la sociedad está ejerciendo una marcada presión sobre el comportamiento ambiental del sector industrial. La eficiencia energética y ambiental en los procesos de generación de vapor son variables dependientes que permiten llevar adelante mejoras en ambos aspectos. En este trabajo se presenta un estudio realizado sobre 43 equipos de generación de vapor de la Provincia de Córdoba que funcionan con diferentes combustibles: gas natural, fuel oil y leña. El análisis de esta información indica que el gas natural es el combustible que permite obtener mejor relación entre la eficiencia ambiental y energética.

Palabras clave—eficiencia ambiental, eficiencia energética, combustión, calderas.

Abstract—The energetic efficiency of productive processes has always acquired particular interest for process engineers due to its costs. At present, society is exercising a strong pressure over the environmental behavior of the industrial sector. Energetic and environmental efficiency in vapor generation processes is dependent variables that allow to accomplished improvements in both aspects. In the present work, a study on 43 steam generation equipment using different combustibles: natural gas, fuel oil, and firewood in Córdoba Province, is presented. The evaluation and analysis carried out show that natural gas is the fuel that allows procuring a better relationship between environmental and economic efficiency.

Keywords—environmental efficiency, energy efficiency, combustion, boilers

INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética dentro de los procesos industriales se ha planteado como un tema de actual interés en el ámbito industrial de Argentina. A su vez, las cuestiones ambientales son un tópico recurrente en la vida diaria de la sociedad quien ha incluido a la contaminación del medio ambiente dentro de sus preocupaciones cotidianas. Afortunadamente, en el caso de los procesos de combustión para obtención de vapor, la eficiencia energética viene acompañada por la eficiencia ambiental, lo cual es una atractiva apuesta para los ingenieros de planta encarar estos desafíos de mejora con ahorros económicos inmediatos para los procesos productivos. Factores como el aumento constante del precio de los combustibles y la mayor demanda de hidrocarburos para la generación termoeléctrica y el transporte debido al crecimiento de la actividad económica de los países emergentes refuerzan las consideraciones asociadas a la eficiencia energética de los procesos productivos.

Dentro de un proceso industrial, los equipos de mayor consumo de combustibles suelen ser las calderas. La eficiencia de combustión es uno de los parámetros más importantes cuando se analiza el funcionamiento de una caldera debido que indica la porción del calor generado por la combustión de un combustible que está siendo aprovechado para la generación de vapor. Debido que este parámetro está asociado al real aprovechamiento del combustible consumido, tanto los fabricantes como la industria han realizado serios esfuerzos por estudiar este tema, lo cual se ve manifestado por la abundancia de literatura técnica sobre el tema.

Por otro lado, estos procesos de combustión generan contaminantes primarios que son evacuados a la atmósfera a través de las emisiones de los gases de combustión por la chimenea (Wark y Warner, 1999). Las condiciones de operación de las calderas influyen directamente en la concentración o en la tasa de emisión de los productos de combustión, por lo cual para lograr realizar un estudio completo resulta imprescindible contar con datos reales de calderas operando en condiciones normales de proceso con el empleo de diferentes combustibles.

Para este estudio se seleccionaron los monitoreos realizados por el área Calidad de Aire de CIQA (Centro de Investigación y Transferencia en Ingeniería Química

Dirección de contacto:

Roberto Pepino Minetti, Maestro M. López y Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, X5016 ZAA, Teléfono +54 351 5986022, ciga@ciqa.com.ar

Ambiental, perteneciente a la Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional) en 43 calderas humotubulares desde el año 2008 a 2013 en industrias lácteas de la Provincia de Córdoba (ver Fig. 1), las cuales se encontraban trabajando en condiciones normales de operación. Las mediciones se llevaron a cabo de acuerdo a métodos de referencia publicados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA). Todos los valores obtenidos fueron comparados con los límites establecidos en la normativa ambiental vigente aplicable para poder determinar cuál es el combustible que genera menos emisiones al ambiente y presenta mayor eficiencia energética.

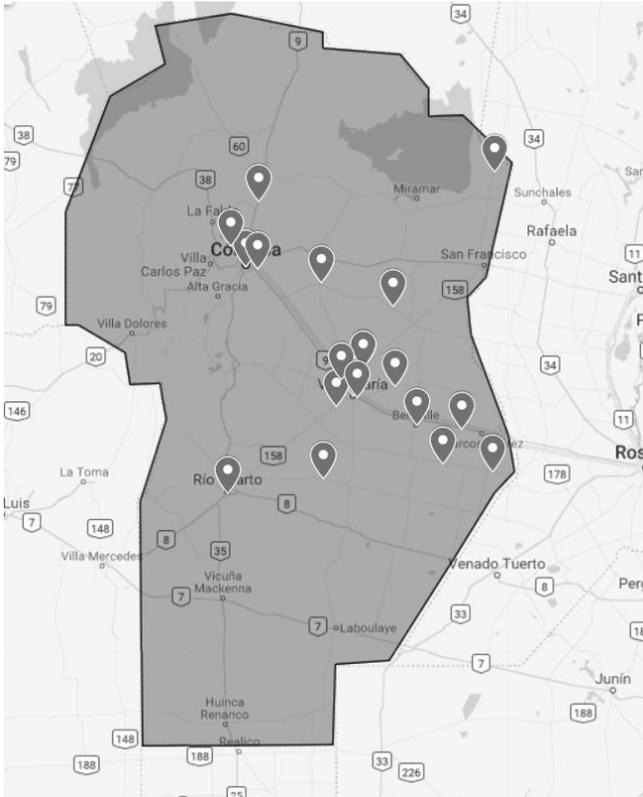
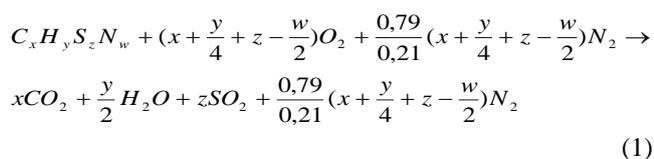


Fig. 1: Ubicación de las calderas analizadas en Córdoba.

Combustión en Calderas

Se denomina combustión a la reacción de oxidación del C (carbono) del combustible por la acción del O₂ (oxígeno) del aire para la generación de calor. La reacción completa, considerando que el aire está compuesto solamente por 21% de O₂ y 79% de N₂, despreciando la formación de NO_x por la oxidación del N₂ y considerando que no se genera SO₃ sería:



Para lograr una combustión completa se requiere que el combustible y el comburente entren en contacto y se den las siguientes condiciones para que se lleve a cabo la reacción: *temperatura* para lograr la energía de activación de la reacción, adecuada *turbulencia* que permita un correcto mezclado y suficiente *tiempo* para que los reactivos entren

en contacto y reaccionen. Si las condiciones de combustión no son las adecuadas, pueden aparecer productos de combustión incompleta, como ser: humo o hollín (material particulado), monóxido de carbono (CO) y otros productos de oxidación parcial como ser compuestos orgánicos volátiles (VOC's, por sus siglas en inglés) (Baukal, 2012).

Una caldera es una instalación en la que se emplea calor, para producir vapor o agua caliente, para ser utilizados fuera de la instalación. El calor se obtiene quemando distintos combustibles orgánicos, o bien de procesos tecnológicos, de la energía eléctrica o de gases de escape calientes. Las calderas humotubulares, se denominan así por ser los gases calientes, procedentes de la combustión de un combustible, los que circulan por el interior de tubos cuyo exterior esta bañado por el agua de la caldera. El combustible se quema en un hogar, en donde tiene lugar la transmisión de calor por radiación, y los gases resultantes se los hace circular a través de los tubos que constituyen el haz tubular de la caldera y donde tiene lugar el intercambio de calor por conducción y convección. Según sea la cantidad de veces que los gases pasan a través del haz de tubos, se tienen las calderas de uno o de varios pasos. En caso de calderas de varios pasos, en cada uno de éstos, los humos solo atraviesan un determinado número de tubos, cosa que se logra mediante las denominadas cámaras de humos. Una vez realizado el intercambio térmico, los humos son expulsados al exterior a través de la chimenea (Perry y Green, 2002).

Debido que la mayoría de los quemadores no realizan un perfecto mezclado del combustible y el aire, entonces para asegurar que todo el combustible sea quemado, se suele utilizar más aire que el estequiométrico indicado por la ec.(1). Esta cantidad extra se llama exceso de aire. La cantidad de exceso de aire requerida dependerá de: el tipo de combustible, el diseño del quemador, el diseño del horno, las condiciones ambientales, entre otros. Para cada unidad hay que estudiar este parámetro detalladamente, y si es posible, realizando pruebas mediante el empleo de equipos analizadores de gases. A grandes rasgos, si se suministra poco aire, parte del combustible no se quemará y se formarán productos de combustión incompleta; y si se suministra en demasía, una excesiva cantidad de gases calientes se emitirán por chimenea produciendo una elevada pérdida del calor generado. Considerando el combustible, se debe producir una mezcla con oxígeno dentro del rango de inflamabilidad y la temperatura debe ser superior al punto de ignición (Testo AG, 2003).

El análisis de la eficiencia de combustión puede ser un cálculo complejo si se consideran todas las pérdidas de calor que pueden tener las calderas, es por eso que por lo general sólo se consideran las pérdidas de calor por chimenea debido a los gases secos y se dejan de lado las asociadas a pérdidas por radiación.

Para evaluar la eficiencia ambiental se consideró el cumplimiento de los estándares de emisiones gaseosas de las calderas monitoreadas aplicable a la región geográfica de realización del estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Eficiencia de combustión

La mayoría de los analizadores de gases de combustión preparados para cumplimentar el método CTM-30 de la US-EPA, los cuales poseen celdas electroquímicas específicas para la determinación de O₂, CO y NO_x, tienen la capacidad de calcular la eficiencia de combustión mediante el empleo de la fórmula de Siegert (García Sánchez, 2016). El modelo de Siegert considera solamente las pérdidas de calor por chimenea (gas seco) empleando la concentración en %CO₂, la temperatura de los gases en el conducto (por eso los equipos generalmente poseen una termocupla tipo K) y la temperatura del aire que ingresa al quemador de la caldera. En este último caso, los equipos miden la temperatura ambiente y asumen que esta temperatura es la temperatura del aire a la entrada del sistema evaluado. El %CO₂ en estos equipos electroquímicos de bajo costo suele no ser analizado (por lo general el sensor NDIR para CO₂ es un opcional oneroso) y puede ser calculado conociendo el tipo de combustible empleado y el %O₂ en el gas de escape (Saacke, 2012; Bacharach Inc., 2010). La fórmula de Siegert es:

$$Eficiencia = 100 - K \frac{(T_{chimenea} - T_{ambiente})}{\%CO_2} \quad (2)$$

Donde K es una constante que depende del tipo de combustible y T es la temperatura del gas que fluye por la chimenea y del aire ambiente respectivamente. En este caso debemos señalar el error cometido al asumir que la temperatura del aire que ingresa al quemador es igual a la temperatura ambiente.

En las mediciones consideradas para este trabajo se han determinado los %O₂ y %CO₂ mediante un equipo Horiba según el US-EPA método 3A.



Fig. 2: Equipo Horiba PG-250 utilizado en el estudio.

Eficiencia ambiental

1) *Material particulado*

La US-EPA estipula dos métodos de medición para este parámetro que son el método 5 y el 17. En el primero, el filtro se encuentra ubicado en la caja caliente a 120°C y el material particulado se define como la masa que queda retenida en el filtro a 120°C. En el segundo, el filtro se encuentra en el extremo frontal de la sonda, y el material particulado se define como la masa retenida a la temperatura de chimenea. La medición de este parámetro requiere de una serie de condiciones que resultan críticas para su determinación. El principal requerimiento de esta

medición es la isocineticidad en el muestreo. Esto implica que la velocidad de los gases en la toma de muestra debe ser igual a la velocidad dentro del conducto monitoreado. Suponiendo un flujo desarrollado dentro del conducto, se tienen diferentes velocidades en las paredes y en el centro del mismo, por lo que se deben seleccionar una serie de puntos en la sección transversal de la chimenea y medir la velocidad en cada punto en los cuales se tendrá la condición de isocineticidad deseada. Finalmente, la determinación de material particulado total para este estudio se realiza mediante lo estipulado por el método 5 el cual expresa que se debe: determinar la cantidad de puntos según el método 1, determinar velocidad y temperatura en cada punto según el método 2, determinar la masa molar del gas según el método 3 y determinar la humedad del gas según el método 4.

2) *Gases de combustión*

Debido a que la medición de gases de combustión no es isocinética, US-EPA en su método 3A especifica tres metodologías de muestreo a elección: punto único al azar, punto único y muestreo integrado; y/o puntos múltiples y muestreo integrado. A continuación, se mencionan los diferentes métodos que US-EPA propone para el muestreo de los diferentes gases. Las mediciones en este trabajo fueron realizadas continuamente durante una hora.

a) *Monóxido de Carbono (CO)*

Las técnicas para su determinación consisten en su captura y posterior análisis por diferentes técnicas de análisis. Para la determinación de CO en este estudio se utilizó el método US-EPA método 10 mediante análisis infrarrojo no dispersivo, utilizando el analizador de gases Horiba con sistema de adquisición de datos, realizando un monitoreo continuo en condiciones normales de operación.

b) *Óxidos de Nitrógeno (NO_x siendo x = 1 y 2)*

Cuando hablamos de combustión tenemos que señalar que las dos especies de NO_x predominantes son el NO y el NO₂ siendo el primero el más abundante. Para la determinación de NO_x en este estudio se utilizó el método instrumental US-EPA método 7E por quimioluminiscencia utilizando el analizador de gases Horiba con sistema de adquisición de datos, realizando un monitoreo continuo en condiciones normales de operación.

c) *Dióxido de Azufre (SO₂)*

La emisión de SO₂ está directamente relacionada con la presencia de azufre en el combustible. Para la determinación de SO₂ en este estudio se utilizó el método instrumental US-EPA método 6C mediante análisis infrarrojo no dispersivo, utilizando el analizador de gases Horiba con sistema de adquisición de datos, realizando un monitoreo continuo en condiciones normales de operación.

RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN

En el año 2017, la Provincia de Córdoba sancionó la Resolución N° 105 del Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos. La norma establece en sus anexos los estándares ambientales o de emisión. Los gases de

combustión y el material particulado se encuentran regulados en el Anexo II.

Los resultados obtenidos en las distintas calderas se presentan en las siguientes figuras según el combustible utilizado.

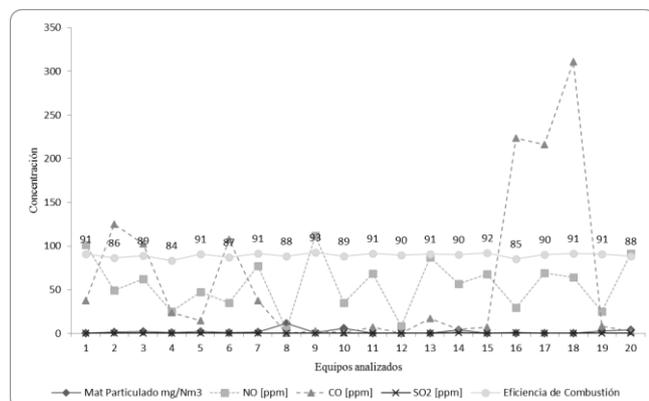


Fig. 3: Eficiencia ambiental y de combustión para calderas a gas.

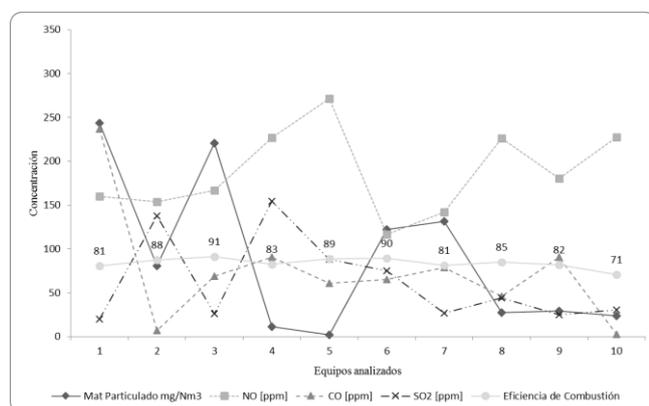


Fig. 4: Eficiencia ambiental y de combustión para calderas a fuel oil.

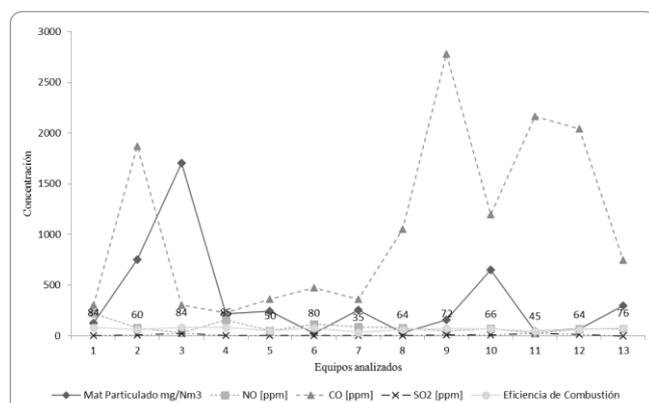


Fig. 5: Eficiencia ambiental y de combustión para calderas a leña.

Los valores promedio de los contaminantes relevados se resumen en la siguiente tabla donde se comparan con los estándares fijados en la resolución mencionada anteriormente.

TABLA 1: Valores promedio obtenidos en calderas y valores de referencia en emisiones gaseosas expresados en mg/m^3 .

Sustancia química	Concentraciones promedio según tipo de combustible			Res. 105/17 – Anexo II: Niveles guía de emisión (*)		
	Gas natural	Fuel oil	Leña	Gas natural	Fuel oil	Leña
CO	78,13	105,65	1333,05	100	175	250
NO _x	114,61	384,76	174,06	450	450	450
SO ₂	0,34	334,01	21,45	500	500	500
Material particulado	2,00	89,20	351,30	250	250	250
Eficiencia de combustión promedio	89,35	83,86	66,49	N.C	N.C.	N.C.

(*) Niveles guía de emisión para contaminantes presentes en efluentes gaseosos para nuevas fuentes industriales (valores promedio para 1 hora y en funcionamiento normal)

N.C.: No corresponde

De acuerdo a los resultados obtenidos podemos observar que el gas natural es el combustible que permite obtener la mejor eficiencia de combustión y ambiental debido que la concentración promedio de los gases en chimenea para las 20 calderas analizadas fueron inferiores a los valores legales considerados. En este caso, sólo en 3 equipos se presentaron concentraciones de CO superiores a los niveles guía (ver Fig. 3). Los sistemas que trabajan con fuel oil también mostraron valores promedios por debajo de los niveles guía; sin embargo, el comportamiento en los 10 equipos monitoreados fue dispar (ver Fig. 4). Por último, cuando los equipos de generación de vapor emplearon leña como combustible, se observa importantes picos de emisión de CO en 7 de 13 equipos analizados (ver Fig. 5).

En algunos casos, en donde la eficiencia del equipo analizado no ha sido adecuada debemos mencionar que hay ciertos factores humanos que pueden jugar un rol muy importante, un claro ejemplo de esto es el hecho de que si, en busca de aumentar la eficiencia de combustión, los gases de chimenea son emitidos a temperaturas bajas y cercanas al punto de rocío, apenas dichos gases salen de la chimenea y entran en contacto con aire más frío de los alrededores, se puede formar niebla de vapor por condensación que podría ser confundida con una emisión elevada de contaminantes por parte de los vecinos, por este motivo, es práctica común que los gases sean emitidos a temperaturas más altas, reduciendo la eficiencia de combustión del equipo, tal como lo indica la ec.(2), pero evitando la formación de una pluma de vapor que pueda ser confundida por la población como una emisión de contaminantes desde las plantas industriales (Sinnot y Towler, 2012).

CONCLUSIONES

El gas natural es el combustible que permite obtener la mayor eficiencia de combustión ($89,4 \pm 2,3$ %) y ambiental en calderas. Los sistemas que trabajan con fuel oil también mostraron concentraciones promedio por debajo de los niveles guía; sin embargo, el comportamiento en los 10 equipos monitoreados fue dispar en cuanto a la eficiencia ($83,9 \pm 6$ %). Cuando se utiliza leña como combustible, se observó que la mayor dificultad se presenta en la carga de combustible a la caldera, ya que produce grandes ingresos

de corrientes de aire con la apertura de la compuerta que afectan la eficiencia de dichos equipos ($66,5 \pm 15,9$ %).

Para reducir las pérdidas de calor por chimenea al mínimo y de esa manera lograr alta eficiencia de combustión, es conveniente adoptar las siguientes medidas: minimizar el exceso de aire realizando trabajos sobre el quemador, minimizar la temperatura de los gases de combustión antes que los mismos abandonen la caldera sin sobrepasar el punto de rocío ácido (esto se realiza en función de la carga, la infiltración de aire, la limpieza de las superficies de transferencia de calor, entre otros), aumentar la temperatura del aire de combustión, variar el exceso de aire de acuerdo a la carga del equipo. Todas las acciones correctivas mencionadas anteriormente se deben realizar prestando atención a la concentración de monóxido de carbono, las cuales pueden aumentar drásticamente si alguna de estas medidas no es adoptada correctamente. A su vez, es posible que la concentración de óxidos de nitrógeno se eleve dentro de valores regulatorios permitidos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Investigación y Transferencia en Ingeniería Química Ambiental (CIQA), Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional.

REFERENCIAS

- [1] Bacharach Inc. (2010): "Q&A on Combustion Efficiency, Combustion Safety, and Environmental Measurements", disponible en www.mybacharach.com
- [2] Baukal, C. E. (editor), (2012), *The John Zink Hamworthy Combustion Handbook: Volume 1 – Fundamentals*, 2nd Edition, CRC Press, USA.
- [3] García Sánchez, L., (2016) *Mediciones para la evaluación de la eficiencia de combustión en equipos generadores de vapor*, Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.
- [4] Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba, (2017), *Estándares de aire para el cumplimiento del Plan de Gestión Ambiental*, Resolución N° 105, Anexo II.
- [5] Perry, R.; Green, D. (2002), *Manual del Ingeniero Químico*, 7^{ma} Edición, Mc Graw Hill, España.
- [6] Saacke (2012): "Optimizing efficiency", disponible en www.saacke.com
- [7] Sinnot, R.; Towler, G., (2012), *Diseño en Ingeniería Química*, Ed. Reverté, Barcelona, España.
- [8] Testo AG, (2003), *Análisis de gases de combustión en la industria: guía práctica para medir emisiones y procesos*, Testo.
- [9] US-EPA – 40 CFR, Pt. 60, CTM 30, *Determination of Nitrogen Oxides, Carbon Monoxide, and Oxygen Emissions from Natural Gas-Fired Engines, Boilers and Process Heaters Using Portable Analyzers*.
- [10] US-EPA – 40 CFR, Pt. 60, App. A, Meth. 1, *Sample and velocity traverses for stationary sources*.
- [11] US-EPA – 40 CFR, Pt. 60, App. A, Meth. 2, *Determination of Stack Gas Velocity and Volumetric Flow Rate (Type S Pitot Tube)*.
- [12] US-EPA – 40 CFR, Pt. 60, App. A, Meth. 3, *Gas Analysis for the Determination of molecular weight*.
- [13] US-EPA – 40 CFR, Pt. 60, App. A, Meth. 3A, *Determination of Oxygen and Carbon Dioxide Concentrations in Emissions from Stationary Sources (Instrumental Analyzer Procedure)*.
- [14] US-EPA – 40 CFR, Pt. 60, App. A, Meth. 4, *Determination of moisture content in stack gases*.
- [15] US-EPA – 40 CFR, Pt. 60, App. A, Meth. 5, *Determination of Particulate Matter Emissions for Stationary Sources*.
- [16] US-EPA – 40 CFR, Pt. 60, App. A, Meth. 6C, *Determination of Sulfur Dioxide emissions from Stationary Sources (Instrumental Analyzer Procedure)*.
- [17] US-EPA – 40 CFR, Pt. 60, App. A, Meth. 7E, *Determination of Nitrogen Oxides emissions from Stationary Sources (Instrumental Analyzer Procedure)*.
- [18] US-EPA – 40 CFR, Pt. 60, App. A, Meth. 10, *Determination of Carbon Monoxide from Stationary Sources (Instrumental Analyzer Procedure)*.
- [19] US-EPA – 40 CFR, Pt. 60, App. A, Meth. 17, *Determination of Particulate Matter Emissions for Stationary Sources*.
- [20] Wark, K., Warner, C., (1999), *Contaminación del Aire: Origen y Control*, Ed. Limusa, S.A. de C.V.