

# MEDICIONES PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN EN EQUIPOS GENERADORES DE VAPOR

Luis E. García Sánchez (lgarcia@cdtdegas.com)

Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

## Resumen:

El presente artículo aborda las generalidades de las mediciones en torno a la evaluación de la eficiencia de combustión en generadores de vapor, centrandó su temática en el modelo matemático utilizado por los analizadores de combustión de uso común. Este es el primero de una serie de artículos en los cuales se presentarán y analizarán en detalle, las mediciones y el aseguramiento metrológico en la evaluación de la eficiencia de combustión, con el objeto de brindar herramientas que permitan validar los resultados de estas mediciones y mejorar el control sobre los procesos de combustión.



## 1 NOMENCLATURA

$\eta_c$	%	Eficiencia de combustión
$\eta_{c-SIE}$	%	Eficiencia de Combustión Modelo Siegert
$T_g$	°C	Temperatura de los gases de combustión
$T_{amb}$	°C	Temperatura ambiente
$PC_{Comb}$	kJ	Poder calorífico del combustible
$L_{Stack}$	kJ	Perdidas en chimenea
$L_{fg,dry}$	kJ	Pérdida por humos secos
$L_{fg,vapor}$	kJ	Pérdidas en el vapor de agua, por oxidación de hidrogeno (H), agua en el combustible (f) y humedad del aire ambiente (a)
$L_{ug}$	kJ	Pérdida por combustión incompleta
$L_{cm}$	kJ	Pérdida por combustible no quemado
$n_i$	mol	Numero de moles de un componente
$\Delta H_i$	kJ/mol	Cambio en la entalpia de un componente.
%O <sub>2</sub>	%	Fracción volumétrica de O <sub>2</sub> en los gases de combustión
%CO	%	Fracción Volumétrica de CO en los gases de combustión
%CO <sub>2</sub>	%	Fracción volumétrica de CO <sub>2</sub> en los gases de combustión
%CO <sub>2-max</sub>	%	Máxima fracción volumétrica de CO <sub>2</sub> que puede generarse en la combustión de un combustible particular
HxCy		Fracción volumétrica del combustible no quemado, en los gases de combustión
$q^o_{CO}$	kJ/mol	Poder Calorífico del CO a condiciones de referencia.
$q^o_{C_{XHY}}$	kJ/mol	Poder Calorífico del combustible no quemado a condiciones de referencia
c	%	Fracción másica del carbono en el combustible
h	%	Fracción másica de hidrogeno en el combustible
HHV	kJ/Nm <sup>3</sup>	Poder calorífico superior del combustible a condiciones de referencia
LHV	kJ/Nm <sup>3</sup>	Poder calorífico superior del combustible a condiciones de referencia

## 2 INTRODUCCIÓN

La eficiencia de combustión constituye uno de los principales indicadores para el monitoreo y control de equipos generadores de vapor. Permite establecer los requerimientos de mantenimiento y ajuste, así como evaluar oportunidades de ahorro energético. Debido a su importancia para la industria a nivel mundial y nacional, abunda la literatura relacionada con la evaluación de la eficiencia de combustión, los parámetros de control y los ajustes necesarios para mantener la eficiencia dentro de límites especificados, acorde con la tecnología y condición del equipo, o los establecidos por las regulaciones aplicables. Sin embargo, las referencias técnicas se limitan, en gran medida, a las acciones que se deben tomar para la mejora de la eficiencia de combustión, sin abordar las mediciones que intervienen y constituyen la base para la toma de decisiones en relación a la mejora del proceso de combustión.

<sup>1</sup> El agua presente en el gas natural (<97 mg/m<sup>3</sup> a condiciones de referencia) bajo condiciones RUT puede considerarse despreciable, para efecto de la evaluación de la eficiencia de combustión.

El interés general de la industria se halla centrado en la evaluación de la eficiencia global de los equipos de combustión, sin embargo el proceso de evaluación puede resultar costoso y complejo si no se cuenta con la instrumentación, procedimientos y personal competente, para la ejecución de esta labor. Por esta razón la eficiencia de combustión, que considera solo las pérdidas de energía en la chimenea, es uno de los métodos más difundidos para monitorear la eficiencia de los generadores de vapor.

El presente artículo inicia con la definición de eficiencia de combustión, describe los modelos comunes para su evaluación, identificando las pérdidas consideradas en cada uno de estos modelos. Luego presenta consideraciones claves para lograr una evaluación de la eficiencia de combustión representativa y reproducible. Finalmente brinda una introducción a las mediciones requeridas para la evaluación de la eficiencia de combustión y concluye con la importancia de la eficiencia de combustión y los parámetros necesarios para lograr una evaluación técnicamente válida.

## 3 LA EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN

La eficiencia de combustión en un equipo generador de vapor es un parámetro clave, que debe ser garantizado por el fabricante del equipo, debido al alto costo de los combustibles [2]. Su evaluación se realiza a partir de mediciones, y permite conocer que tan bien, el equipo esta convirtiendo un combustible específico en energía útil (liberada por el combustible), durante un periodo de operación [3].

La eficiencia de combustión se calcula a partir de las pérdidas de chimenea y la energía que libera el combustible utilizado en el equipo generador de vapor [4], sin considerar las pérdidas por radiación, convección o conducción, como se describe en la Ec. 1. Una eficiencia de combustión completa (100%) permitiría extraer toda la energía disponible en el combustible, sin embargo la combustión con 100% de eficiencia no sucede en la realidad, debido a las pérdidas en la chimenea y pérdidas en las superficies de transferencia de calor, que limitan la eficiencia a valores típicos de 10% a 95% [5].

<sup>2</sup> La eficiencia de combustión no debe ser confundida con la eficiencia del equipo.

### 3.1 MÉTODO DE ENTRADAS Y SALIDAS

En la evaluación de la eficiencia térmica de equipos generadores de vapor se utiliza principalmente el método de entradas y salidas (o Indirecto) descrito en la Norma ASME PTC 4.1 [6]. Este método detalla las pérdidas a través de los gases de chimenea (Ec. 2), permitiendo la evaluación de la eficiencia de combustión. Estas pérdidas pueden ser cuantificadas a partir de la composición del combustible y de los gases de combustión, y del cambio de entalpías (Ec. 3).

$$\eta_c = 100 - \frac{L_{Stack}}{PC_{Comb}} \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

$$L_{Stack} = L_{fg, dry} + L_{fg, vapor} + L_{ug} + L_{cm} \quad \text{Ec. 2}$$

$$L_{Stack} = \sum n_i \cdot \Delta h_i + n_w^H \cdot \Delta h_w + n_w^f \cdot \Delta h_w + n_w^a \cdot \Delta h_w + n_{CO} \cdot q_{CO}^o + n_{CxHy} \cdot q_{CxHy}^o \quad \text{Ec. 3}$$

Bajo condiciones normales, las pérdidas principales se encuentran asociadas al calor sensible de los gases de chimenea [7]. Pero, dependiendo del ajuste del sistema de combustión, la calidad del combustible y las condiciones ambientales, podrían ser relevantes las pérdidas por vapor de agua, combustión incompleta y combustible no quemado. Para ilustrar las pérdidas consideradas en la evaluación de la eficiencia de combustión se presenta en la

Figura 1, un diagrama Sankey [4], en el cual se pueden apreciar los niveles de pérdidas que típicamente se obtienen en generadores de vapor [7].

La evaluación de cada una de las pérdidas en los gases de combustión, requiere de múltiples mediciones. Tales mediciones pueden ser complejas si no se cuenta con la instrumentación e información de referencia válida para las propiedades físico-químicas de los compuestos que intervienen en la reacción. Por esta razón se utilizan comúnmente modelos de evaluación menos complejos que facilitan la evaluación de la eficiencia de combustión con una mayor periodicidad.

### 3.2 MODELO SIEGERT

Entre los modelos más comunes para la evaluación de la eficiencia de combustión se encuentra el modelo Empírico de Siebert (Ec. 4), el cual es utilizado por la mayoría de los analizadores comerciales que determinan automáticamente la eficiencia de combustión. Este modelo, asume que las únicas pérdidas que afectan la eficiencia de combustión, son las debidas a los gases secos, sin considerar pérdidas por combustión incompleta, calor latente del vapor de agua, y combustible no quemado. Por tal razón debe considerarse que la eficiencia evaluada utilizando el modelo Siebert no es exacta, pero provee un indicador que permite evaluar la tendencia en la eficiencia de combustión. [5].



Figura 1. Diagrama Sankey Típico para un Generador de Vapor

$$\eta_{c-SIE} = 100 - k_1 \cdot \left( \frac{T_g - T_{amb}}{\%CO_2} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

En analizadores de combustión actuales, que permiten la medición directa de %CO<sub>2</sub> y %CO, es posible evaluar las pérdidas debidas a la combustión incompleta, combustible no quemado y vapor de agua (Ec. 5). De esta forma se logra una evaluación equivalente a la eficiencia de combustión mediante el método indirecto descrito por ASME PTC 4.1.

$$\eta_{c-SIE} = 100 - k_1 \cdot \left( \frac{T_g - T_{amb}}{\%CO_2} \right) + k_2 \cdot (1185 + T_g - 2 \cdot T_{amb}) + k_3 \cdot \frac{\%CO + H_x C_y}{\%CO_2 + \%CO + H_x C_y} \quad \text{Ec. 5}$$

De la EC. 5 se deduce que la eficiencia puede ser evaluada si se mide la temperatura del ambiente, la temperatura de los gases de combustión y el contenido de CO<sub>2</sub>, CO y CxHy. Sin embargo, se hace necesario conocer la composición, el poder calorífico y el contenido de agua del combustible, para establecer los coeficientes k1, k2 y k3 [8]. En la Tabla 1 se listan estos coeficientes para algunos combustibles comunes, en base seca [9].

Combustible	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub> (seco)	k <sub>3</sub>
Fuel oil Liviano	0,5	0,00491	54
Fuel oil pesado	0,51	0,00489	54
Gas Natural	0,39	0,00887	40
Propano	0,41	0,00683	48
Carbón	0,62	0,003	63
Butano	0,43	0,00662	48

Tabla 1. Coeficientes Siegert para combustibles comunes

La aplicación del modelo Siegert, supone las particularidades descritas a continuación, las cuales afectan el resultado de la eficiencia de combustión y deben ser consideradas a la hora de ejecutar un análisis, y se desean obtener resultados con bajos niveles de incertidumbre:

- La fracción %CO<sub>2</sub> puede ser una medición directa o una estimación indirecta a partir de la medición de oxígeno (en base seca) y la composición del combustible, que determina el %CO<sub>2-max</sub>, como se expresa en la Ec.6.

$$\%CO_2 = \frac{CO_{2-max} \cdot (20,9 - \%O_2)}{20,9} \quad \text{Ec. 6}$$

En caso de estimarse el %CO<sub>2</sub>, se debe conocer la composición del combustible, debido a que el %CO<sub>2-max</sub> (Ec. 7), se obtiene de la reacción estequiométrica de C y H

$$\%CO_{2-max} = \frac{c}{c + \frac{79,1}{20,9} \cdot \left( c + \frac{h}{4} \right)} \% \quad \text{Ec. 7}$$

- La temperatura del aire a la entrada, se asume igual a la temperatura ambiente y ésta corresponde generalmente a la indicada por el analizador de combustión. Esta asunción, no siempre es correcta, especialmente en generadores de vapor que poseen precalentadores que elevan la temperatura del aire de entrada, por lo que se hace necesario muestrear los gases de combustión, aguas abajo del precalentador y no a la salida del generador de vapor [3].
- Las pérdidas por vapor de agua (Lfg, vapor), por combustión incompleta y por combustible no quemado, solo pueden ser evaluadas si se cuenta con sensores para CO y CxHy, y el poder calorífico del combustible.

Para evidenciar las relaciones existentes entre los modelos matemáticos, y las mediciones requeridas en la evaluación de la eficiencia de combustión, se presenta en la Figura 3, el desglose del modelo simplificado de Siegert. En los dos modelos ASME y Siegert se consideran las mismas pérdidas y su diferencia radica en la base en que se realizan las estimaciones (molar, másica o volumétrica) y el tipo de pérdidas incluidas, según la disponibilidad de mediciones directas o indirectas, como en el caso del CO<sub>2</sub>. En conclusión, sin considerar aspectos metrológicos, y con base en la disponibilidad de sensores que permitan evaluar las pérdidas, se deduce la exactitud a obtener, como se aprecia en la Figura 2.

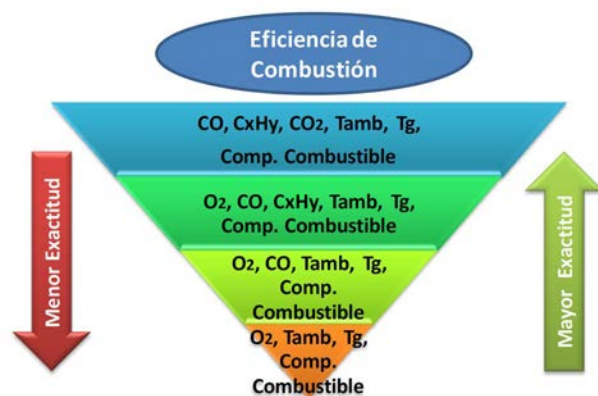


Figura 2. Mediciones y Exactitud<sup>3</sup> en la eficiencia de Combustión

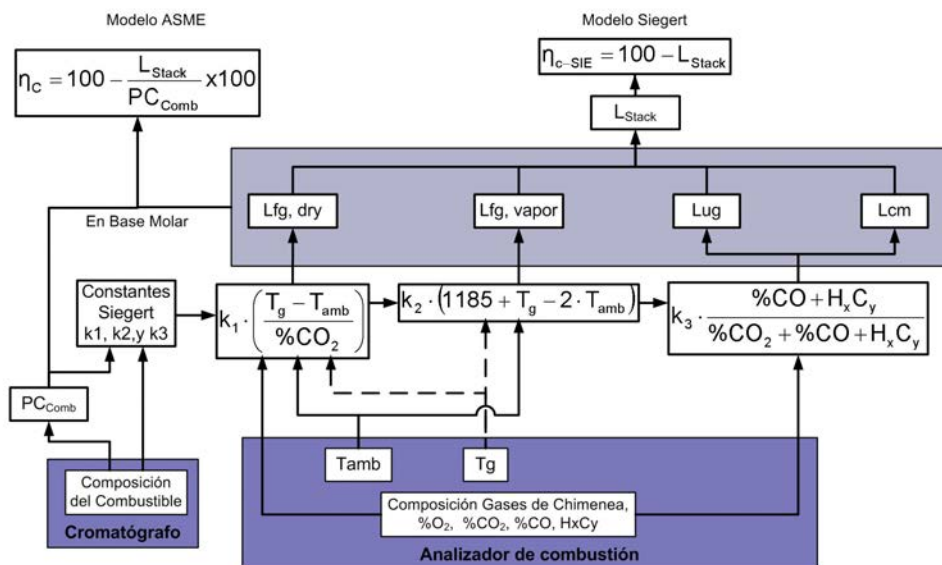


Figura 3. Evaluación de la Eficiencia de combustión

#### 4 CONSIDERACIONES EN LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN

Los modelos presentados hasta el momento, se basan en aproximaciones que permiten evaluar la eficiencia de combustión instantánea, por lo que se deben considerar los siguientes parámetros o referencias al realizar ensayos de combustión, para que los resultados obtenidos sean reproducibles y permitan establecer una tendencia real en la eficiencia de combustión.

##### 4.1 Condición operativa (Nivel de carga)

La eficiencia de combustión depende enormemente de la carga a la cual opera el equipo, en otras palabras de la relación de potencia actual a la potencia máxima de operación del equipo, debido a que el sistema de combustión no posee la capacidad de balancear exactamente las relaciones de aire/combustible, extraer el calor y operar a la misma eficiencia sobre todo su ciclo de carga. Por tal motivo al evaluar la eficiencia de combustión se debe establecer y declarar la condición operativa bajo la cual se ejecutó la evaluación.

Las mediciones deben ser realizadas bajo condiciones de repetibilidad, cuando el equipo generador de vapor se encuentre en estado estable, lo cual se evidencia al estabilizarse las mediciones de composición en los gases de combustión y la temperatura de los gases en la chimenea. Es de resaltar que la eficiencia evaluada bajo estas condiciones es válida si las concentraciones de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO y la temperatura

de chimenea se encuentran entre los límites especificados por el fabricante del generador de vapor o equipos de similar tecnología y condiciones de operación.

##### 4.2 Análisis Húmedo versus Análisis Seco

La diferencia radica en que durante el análisis en base seca, la mayor parte del agua es extraída de la muestra de gas, mediante una trampa<sup>4</sup>, lo cual reduce el volumen de la muestra e incrementa la fracción volumétrica de los componentes. Los analizadores de combustión

electrónicos generalmente emiten resultados en base seca y de requerirse en base húmeda; se debe conocer el contenido de agua del combustible y configurarlo en el equipo.

##### 4.3 Composición y estabilidad del Combustible

Al evaluar la eficiencia de combustión con el modelo indirecto (ASME) o el Siegert, se requiere la composición del combustible, a partir de la cual se obtiene el poder calorífico. Por esta razón los analizadores de combustión poseen pre-configurados algunos combustibles comunes (Ver Tabla 1), que generalmente no corresponden al combustible utilizado en el equipo generador de vapor. Por lo cual es necesario configurar el combustible utilizado, a partir de un análisis cromatográfico como en el caso de los gases naturales y GLP's, o directamente el poder calorífico obtenido de un calorímetro en el caso de combustibles líquidos y sólidos.

De otra parte, se deben realizar los análisis de combustión, garantizando la estabilidad en la composición del combustible. Esto es especialmente necesario en generadores de vapor que no poseen un lazo de control que retroalimente el sistema para balancear la relación aire combustible, o en aquellos equipos que operan con gas natural, cuya composición horaria varía debido a las mezclas de gases que se presentan en los sistemas de transporte.

<sup>3</sup> Proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando [10]

<sup>4</sup> Para disminuir la incertidumbre de los resultados se debe cuantificar el agua residual a partir de la presión parcial del vapor a la temperatura de la trampa o enfriador utilizado. Aunque para efectos prácticos, la humedad residual es despreciable.

#### 4.4 Poder calorífico del combustible

El poder calorífico generalmente aplicado en la evaluación de la eficiencia de combustión, cuando se utilizan analizadores electrónicos, depende del modelo y casa fabricante, debido a que los equipos Europeos son preconfigurados con el LHV de los combustibles comunes, mientras los equipos americanos son preconfigurados con el HHV [8],[11]. En la realidad el calor latente del vapor de agua formado durante la combustión, no es recuperable, por lo que es aconsejable evaluar la eficiencia de combustión preconfigurando o utilizando el LHV del combustible correspondiente.

#### 4.5 Referencias

Al realizar la evaluación de la eficiencia de combustión entran en juego mediciones directas, datos y propiedades de referencia, modelos matemáticos y el fenómeno objeto de medición, los cuales influyen directamente el resultado del mensurando eficiencia. Por tal razón es necesario identificar, aplicar y expresar las condiciones bajo las cuales se realice la evaluación, de forma tal, que se facilite la comparación de resultados y se brinde validez a los mismos [12].

### 5 MEDICIONES PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN

Dejando de lado el requerimiento de la composición del combustible, y su poder calorífico, los cuales serán tema de un próximo artículo, se presenta a continuación una introducción a los analizadores de combustión.

#### 5.1 Analizadores de Combustión

Los analizadores de combustión actuales, cuentan con todas las ventajas que brinda la electrónica, permitiendo el tratamiento de señales para tecnologías de sensores como las celdas electroquímicas, infrarrojas y catalíticas. Existen analizadores portátiles y estacionarios, pero estos últimos, utilizados en monitoreo continuo, son

Principio	Gas	Und Típica - GN	Concentración medición	Alcance	Emax*
Electroquímico	CO	ppm	0→100	2000	10
Infrarrojo	CO <sub>2</sub>	%	10→12	25	0,3
Electroquímico	O <sub>2</sub>	%	2→4	25	0,3
Catalítico (Pellister)	CxHy	ppm	0→100	5000	10

Tabla 2. Sensores comunes en los analizadores de combustión

menos comunes en nuestro medio. Principalmente se hallan en grandes instalaciones, donde las regulaciones ambientales como la Resolución 909 de 2008 expedida por el MAVD, exigen el monitoreo continuo de los gases de combustión.

Los analizadores de combustión portátiles son los equipos más utilizados, por la industria en general, para la evaluación y monitoreo de la eficiencia de combustión de los generadores de vapor. Estos consisten de una sonda de muestreo, con filtro de material sinterizado que retiene el material particulado, a través de la cual se extrae la muestra de gases de combustión. Un cordón o manguera conduce el gas hasta una trampa, en la cual se retiene el vapor de agua, para luego iniciar el paso del gas por los diversos sensores del analizador. En algunos casos, se realiza retención selectiva, mediante filtros químicos, para evitar errores debido a la sensibilidad cruzada de los sensores, como el que se presenta en los sensores de CO que registran lecturas ante la presencia de H<sub>2</sub>S, especialmente en análisis de combustión de equipos que operan con carbón.

Como todo instrumento de medición, el analizador de combustión debe ser seleccionado y utilizado considerando el alcance de medición del proceso, los errores máximos permisibles y el nivel de incertidumbre esperado. Para ilustrar acerca de las características de estos instrumentos se listan en la Tabla 2, los sensores comunes que poseen y los alcances de las concentraciones de gases encontradas en equipos generadores de vapor operados a gas natural.

Adicional a los sensores listados en Tabla 2, los analizadores pueden poseer sensores para la medición de NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, que son incluidos en los equipos, debido a motivaciones relacionadas con el control del impacto ambiental, más que por su aporte a las pérdidas por chimenea. Esto debido a que sus concentraciones en los gases de chimenea son despreciables si se comparan con el N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y O<sub>2</sub>.

#### 5.2 Medición de temperatura

La temperatura es otra de las variables que junto a la composición de los gases de combustión, intervienen en la eficiencia. Esta magnitud se mide mediante una termocupla, generalmente tipo K, ubicada junto con la sonda de muestreo del analizador de combustión. Las termocuplas Tipo K permiten realizar mediciones de hasta 700 °C, pero la limitación real la impone la sonda de muestreo y el cordón o manguera de conducción de gases de combustión. Bajo condiciones normales de

operación un generador de vapor presenta temperaturas de chimenea que no superan los 300 °C.

Para las mediciones de temperatura ambiente, los analizadores poseen internamente una termocupla tipo J, o K, u otro sensor como RTD's o termistor.

## 6 CONCLUSIONES

- La evaluación de la eficiencia de combustión puede ser utilizada como una herramienta de monitoreo y control, pero se deben considerar las limitaciones que poseen los modelos empíricos utilizados para estimarla y la innumerable cantidad de variables y condiciones de influencia que pueden limitar la reproducibilidad de los resultados obtenidos. En este sentido es válido aplicar, mejorar y tomar decisiones con base en la tendencia (incremento o disminución) de cambio de la eficiencia de combustión, si esta es evaluada bajo condiciones controladas.
- Es necesario estudiar en detalle la configuración disponible y los modelos matemáticos utilizados por los analizadores de combustión para evaluar la eficiencia, ajustando la configuración con la información más detallada y válida disponible.
- Se deben utilizar y declarar condiciones de referencia estandarizadas para cada una de las variables o propiedades que intervienen en la evaluación de la eficiencia de combustión. Para lo cual es recomendable tomar como referencias bases de datos de propiedades termodinámicas actualizadas como las provistas por la NASA [13] o CODATA [14].

## 7 REFERENCIAS

- [1] Reglamento Único de Transporte de Gas Natural- (RUT) RESOLUCIÓN N° 071 DE DICIEMBRE 03 DE 1999 y las RESOLUCIONES N° 054 DE JUNIO 21 DE 2007 y N° 041 DE ABRIL 23 DE 2008 Por la cuales se modifica y complementa el RUT.
- [2] Corporación CDT de GAS. Principios De Combustión – Curso de Conversión De Equipos Industriales y Uso con Gas Natural. Bucaramanga 2003.
- [3] Donald R. Wulfinhoff. Energy Efficiency Manual 1. Test boiler efficiency on a continuing basis. 1999.
- [4] Baukal, Charles E. Jr. Industrial burners handbook. CRC PRESS. USA 2003. ISBN 0-8493-1386-4
- [5] Fowler Simon. Principles and Basics of Flue Gas Analysis. Madur electronics. 2004.
- [6] Fired Steam Generators”, Performance Test Code 4: 2008, ASME, New York, NY; the U.S. standard since first released in 1998.
- [7] Eoff, David. Understanding Boiler Heat Losses. ASHRAE

Journal. December 2008.

- [8] Institute for Prospective Technological Studies, Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency. EUROPEAN COMISION, June 2008
- [9] Instruction Manual. LANCOM Series II Portable Flue Gas Analyser. Land Combustion instrument. 2001.
- [10] BIPM – JCGM. Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). 1ª Edición en español, 2008.
- [11] TSI Incorporated. Combustion Analysis Basics. An Overview of Measurements, Methods and Calculations Used in Combustion Analysis, 2004 USA.
- [12] Lang, Fred D. P.E. ERRORS IN BOILER EFFICIENCY STANDARDS. Proceedings of the 2009 ASME Power Conference Albuquerque, New Mexico, July 21-23, 2009
- [13] McBride, Bonnie J. Zehe Michael J. and Gordon, Sanford. Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species. Glenn Research Center, NASA 2002.
- [14] <http://www.codata.org/resources/databases/index.html>
- [15] Kosanovic, Beka. System Operation and Improvements – Case Study Center for Energy Efficiency and Renewable Energy. EEUU 2003.
- [16] MAVD. Protocolo Para El Control Y Vigilancia De La Contaminación Atmosférica Generada Por Fuentes Fijas. Versión 1.0 No Aprobada. Julio de 2008.
- [17] Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente. Eficiencia Energética en la Generación y Distribución del Vapor. UPME COLCIENCIAS 2007.
- [18] Australian Greenhouse Office .Department of the Environment and Heritage. Generator Efficiency Standards. December 2006.
- [19] Moir, Bill. Industrial Steam Efficiency for Manufacturing Facilities. Steam Engineering Inc. 2006 USA.
- [20] CIBO Energy Efficiency Handbook Council Of Industrial Boiler Owners (CIBO) 2002.
- [21] Gas Research Institute Method GRI-96/0008.. Determination of Nitrogen Oxides, Carbon Monoxide, and Oxygen Emissions from Natural Gas-Fired Engines, Boilers and Process Heaters Using Portable Analyzers. 1997.
- [22] Francis Wildy. Fired Heater Optimization. Ametek Process Instruments. Pittsburgh, EEUU. 2006.
- [23] Baukal, Charles E. Jr. The John Zink Combustion Handbook. CRC PRESS. USA 2003.
- [24] API Publication 535, Burners for Fired Heaters in General Refinery Services, first edition, July, 1995
- [25] <http://www.bacharachtraining.com>
- [26] [www.habmigern2003.info](http://www.habmigern2003.info)