

Optimización de la combustión utilizando como criterios de evaluación el índice de Wobbe y el número de metano

Combustion optimization using methane number and wobbe index as evaluation criteria

Jaqueline Saavedra

Ph. D. en Ingeniería Química
Líder Plantas Piloto
Instituto Colombiano del Petróleo
Piedecuesta, Colombia
jaqueline.saavedra@ecopetrol.com.co

María Gómez

Ingeniero Químico
Investigador Grupo de Investigación CIDES
Facultad de Ingeniería Química
Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Colombia
mariadelpilargomezolachica@gmail.com

Lourdes Merino

M.Sc. en Ingeniería Química
Investigador Grupo de Investigación CIDES
Facultad de Ingeniería Química
Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Colombia
loumerino2@gmail.com

Viatcheslav Kafarov

Dr. Sc. en Ingeniería Química
Director Grupo de Investigación CIDES
Facultad de Ingeniería Química
Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Colombia
vkafarov@gmail.com

Resumen— 113 corrientes han sido identificadas en un proceso de refinación como contribuyentes a la red de gas combustible utilizadas en hornos y calderas para suministrar energía y vapor a proceso. De acuerdo con el origen de los gases y el tratamiento previo, estas corrientes de gas tienen diferente composición en relación al gas natural. Lo anterior, crea problemas técnicos y estructurales. Basados en esto, se proyecta analizar los flujos de gas combustible provenientes del proceso de refinación, no por sus componentes sino como un gas combustible. La eficiencia de la combustión y la estabilidad de la operación fueron evaluadas con dos parámetros acordes al proceso, sirviendo como criterios para analizar el efecto potencial que se deriva de la composición de los combustibles, en relación a la eficiencia energética y la integridad de los equipos. El principal resultado fue una propuesta de red de combustible.

Palabras Clave— Corrientes, Gas Combustible, Índice de Wobbe, Número de Metano.

Abstract— In an Oil refining process, 113 streams have been identified as contributors for the gas fuel net which is used in furnaces and boilers to supply power and steam to the refining process. According to the origin and the previous treatment of the gases, these gas streams have different compositions that vary from natural gas composition which creates technical and structural problems that can affect not only the equipment but also the refining process. Based on the previous statement, the combustion gas fluxes are analyzed not only by its components but also as a fuel gas. The combustion efficiency and the stability of the operation is evaluated ta-

king into account two parameters in concordance with the process characteristics and then used as criteria for assessing the potential effect derived from the fuel composition in relation to energy efficiency and equipment integrity. The principal result was a proposal for an integral fuel net.

Keywords— Streams, Gas fuel, Wobbe Index, Methane Number.

1. INTRODUCCIÓN

El suministro de vapor y energía en una planta química o petroquímica depende directamente de la composición del combustible utilizado y esta a su vez depende de las corrientes de gases que conforman la red de combustible, las cuales presentan diferentes composiciones según el proceso o área del cual provenga cada corriente [1]. Por tanto, los valores relacionados con la conversión o en el grado de conversión de los productos se ven afectados [1], [2].

Asimismo, las corrientes de gas combustible que se utilizan para combustión, presentan heterogeneidad en cuanto a su composición, creando turbulencias, daños en los equipos y reduciendo la eficiencia energética. Sin embargo, las propiedades de estas corrientes pueden ser aprovecha-

das al adecuar el proceso de combustión, extrayendo el máximo beneficio de estas corrientes de gas [2].

Este problema ha sido analizado desde diferentes enfoques, tales como el análisis por parámetros de las propiedades del gas natural o mezclas de un gas natural y gases de refinería; relacionadas con áreas de aplicación como las centrales eléctricas o el desempeño de motores a gas natural [2]. A su vez, la unión de factores económicos, realza la importancia de este análisis [3], [4]. Procesos recientes aplican la integración de diferentes aspectos como ambientales, de seguridad y eficiencia al análisis estadístico y operacional, así como, el proceso mismo, enmarcado en la implementación de un procedimiento conforme a la normatividad vigente y teniendo como objetivo principal la optimización del proceso de combustión, con miras a mejorar rendimiento general de producción [4].

El presente trabajo se enfoca en la presentación de un método de estudio de las distintas corrientes de gases de combustibles que se encuentran en el proceso de refinación del petróleo. Por lo tanto, se tomarán como base los análisis cromatográficos de gases, realizados a las corrientes combustibles generadas en las diferentes áreas de una refinería; seguidamente, se extrajeron los valores necesarios para el cálculo de los parámetros que servirán de guía para realizar un análisis estadístico, con el cual justificar cada una de las decisiones tomadas dentro del posterior estudio de los aspectos ambientales, de seguridad y energéticos, enmarcados por normatividad vigente.

Debido a lo anterior, el análisis de los resultados obtenidos se realizará teniendo en cuenta las necesidades propias de la industria de refinación del petróleo así como la normatividad propia de cada uno de los aspectos valorados. Las conclusiones que ofrece este estudio permiten la aplicación del método a otras industrias en las cuales los gases combustibles presentan variabilidad en la composición.

2. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

2.1. Método

Inicialmente se procede a realizar un análisis de los datos cromatográficos con el fin de identi-

ficar las corrientes que tienen propiedades combustible y que pueden ser posibles contribuyentes a la red de combustible.

Seguidamente, ya debidamente particularizadas cada una de las corrientes, se procede a realizar la evaluación del primer parámetro método del Número de Metano, con la finalidad de evaluar la resistencia que cada corriente posee ante la autoignición, comparándola con una mezcla combustible de referencia. El cálculo del Número de Metanos se realiza por medio del método de proporción de radios (H/C) [5], presentado a continuación:

$$MN = 1.624 * (406.14 + 508.04 * RHCR - 173.55 * RHCR^2 + 20.17 * RHCR^3) - 119.1 \quad (1)$$

Donde, RHCR representa la relación entre el radio de Hidrogeno y el radio de Carbono que se encuentra dado por:

$$RHCR = \frac{(\% \text{metano} * 4 + \% \text{etano} * 6 + \% \text{propano} * 8 + (\% \text{iso-butano} + \% \text{n-butano}) * 10 + (\% \text{iso-pentano} + \% \text{n-pentano}) * 12 + (\% \text{hexano y largas cadenas de hidrocarburos}) * 14)}{(\% \text{metano} * 1 + \% \text{etano} * 2 + \% \text{propano} * 3 + (\% \text{iso-butano} + \% \text{n-butano}) * 4 + (\% \text{iso-pentano} + \% \text{n-pentano}) * 5 + (\% \text{hexano y largas cadenas de hidrocarburos}) * 6)} \quad (2)$$

Por ende, se puede definir al método del número de metanos, como el porcentaje en volumen de metano, que mezclado con el hidrogeno es igual a una mezcla desconocida, que bajo las mismas condiciones, produce la misma reacción de sonido audible, productor de altas temperaturas y alta presión que degrada los materiales utilizados en los equipos y los corroe, denominada autoignición. Los gases inertes se excluyen dentro de la ecuación del número de metanos, por tal motivo, no se ve afectado el valor del método al ser aplicado [5].

La tendencia a la autoignición es un fenómeno que se presenta principalmente en combustibles para motores de combustión interna, y equipos como las turbinas, esta tendencia ha sido analizada por medio de diferentes escalas de resistencia, como el número de octanos (ON) o el número de metanos (MN), según sea el caso. Al realizar su evaluación por medio del método del número de metanos (MN) se realiza una comparación entre una mezcla de hidrógeno - metano, y un gas combustible; evaluando los daños más importantes en los equipos vinculados al proceso. Es por medio del análisis de los valores adimensionales

resultantes, que se encuentran en un rango en el cual, los límites representan su asociación con cada uno de los integrantes de la mezcla guía; por ejemplo, para nuestro caso de estudio, la corriente evaluada que tenga un valor de 0, significa que tiene una resistencia igual a una mezcla la cual sea de 100% Hidrogeno y para un valor de 100, significa que tiene una resistencia a la autoignición igual a una mezcla la cual sea de 100% metano. Por ende, valores mayores a un número de metano igual a 100, poseen una resistencia aun mayor que una mezcla en la cual solo exista metano, representando este tipo de valores porcentuales altos, un nuevo rango de evaluación como punto inicial de partida una mezcla de 100% de metano.

Con este valor del número de metano para cada corriente se observaron, tanto los rangos en los que se localizan los datos así como información sobre los diferentes efectos potenciales que pueden surgir al momento de la combustión de cada corriente [5]. Posteriormente, se aplica sobre los resultados, el segundo parámetro (Índice de Wobbe), que representa la relación entre el poder calorífico superior y la raíz cuadrada de la densidad relativa; posibilitando a su vez, el análisis del poder calorífico de cada una de las corrientes [6]. Aplicando la fórmula que se define a continuación:

$$w = PCS / \sqrt{d} \quad (3)$$

Dónde:

$W =$ Índice de Wobbe, kWh/m³ (n)

El Índice de Wobbe para una mezcla se puede calcular por medio de la ecuación.

$$w_m = \frac{[PCS]_m}{\sqrt{(d_m)}} = \frac{X_i [PCS]_i}{\sqrt{X_i d_i}} \quad (4)$$

Donde,

$W_m =$ Índice de Wobbe de la mezcla en kWh/m³(n)

$PCS_m =$ poder calorífico superior de la mezcla kWh/m³(n)

$PCS_i =$ poder calorífico superior del componente i, kWh/m³(n).

Los valores resultantes se evalúan con respecto a la Tabla I [6]:

El Índice de Wobbe brinda información sobre la mezcla óptima que se puede quemar esperando la reducción máxima de los aspectos negativos que afectan directamente el proceso, principalmente enfocados en la integración de los aspectos de seguridad y eficiencia [7].

Posteriormente, los resultados obtenidos son evaluados de acuerdo a la incidencia de cada uno de los tres aspectos integrados (ambiental, de seguridad y energéticos); brindándole mayor importancia a los aspectos que sean de mayor interés para la industria a la cual se le está realizando el análisis.

Fundamentados en cada uno de los pasos anteriormente descritos, se procede a analizar tanto la viabilidad de la aplicación de una red de gases combustibles, como un estudio de los aspectos energéticos y de seguridad presentes en las corrientes de gas y que pueden proveer beneficios a la industria evaluada.

3. RESULTADOS

Para este trabajo se analizaron, en total, 113 corrientes de gas combustible, pertenecientes a las diferentes áreas dentro del complejo industrial, y que alimentan el mismo proceso de quema. Seguidamente, se presentan los nombres de cada área, así como, la cantidad de corrientes aportantes; área de gases de campos, de donde provienen 3 corrientes, a su vez, el área de producción dentro de la refinería, es amplia y posee dos sub-áreas aportantes las cuales se presentan a continuación: Cracking, con 13 corrientes y Petroquímica que aporta 10 corrientes; el área de Gases Vendidos a Externos, 3 corrientes; el área de Generación de H2 con 2 corrientes; el área denominada Gas Combustible consumido por la GCB, es la principal aportante desde sus tres sub-áreas: Refinación, con 16 corrientes; Cracking, 20 corrientes y Petroquímica, 21 corrientes. Por último tenemos a las áreas de Servicios industriales con 20 corrientes y varios, 5 corrientes.

Teniendo en cuenta la individualización realizada de las corrientes, se procedió a evaluar cada una por medio de la aplicación del primer parámetro, el número de metanos, utilizando el método de proporción de radios (H/C) [8]. De esta manera, un primer gráfico de control de los números de metano calculados, permitió establecer dos

TABLA I
CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS SEGÚN EL ÍNDICE DE WOBBE (A CONDICIONES NORMALES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA)

FAMILIA	DENOMINACIÓN		W[kWh/m ³]
	Gases manufacturados		6.5-9.0
	Grupo A	Gas de Ciudad	6.5-8.0
PRIMERO	Grupo B	Gas de Coquería	7.0-9.0
	Grupo C	Gases de mezcla Hidrocarburo – Aire	6.5-8.0
		Gas natural	11.0-17.0
SEGUNDO	Grupo H	Alto W	13.5-17.0
	Grupo W	Bajo W	11.0-13.5
TERCERO	Gases licuados del petróleo (GLP)		21.5-26.0

puntos fuera del rango entre 0 y 120 RHCR, como se puede apreciar en la Fig. 1; estos valores, de acuerdo a la teoría de gráficos de control fueron eliminados del análisis.

Posterior a la eliminación de los valores atípicos, la gráfica de control resultante permite apreciar las fluctuaciones que existen dependiendo del área de procedencia, esto se puede observar en la Fig. 2.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos al aplicar el método del número de metanos [8], parámetro utilizado para medir el aspecto de seguridad de las corrientes de gas combustible, se procede a analizar en relación al valor del mismo para el gas natural, gas combustible por excelencia, a cada una de las corrientes para poder definir un rango de trabajo óptimo. La Fig. 3 permite apreciar una que la mayoría de las corrientes poseen un alto número de metano lo cual las hace aptas para transporte y quema sin un alto riesgo de seguridad [9].

Seguidamente, se decide evaluar las corrientes que tengan un número de metanos entre 65 a 120, rango en el cual, basados en la comparación con el gas natural y teniendo en cuenta que la resistencia al autoignición, afecta negativamente el rendimiento del proceso, si no se mantiene el número de metanos en un rango de 80 a 120 y con baja variabilidad. Se puede definir la autoignición como un fenómeno anormal de combustión, que causa un sonido audible y se presenta como una reacción de oxidación violenta, produciendo un aumento inesperado de la temperatura y la presión, degradando los materiales utilizados en los equipos y corroyéndolos [8] [9].

A las corrientes seleccionadas se aplicó la evaluación del Índice de Wobbe, a partir de lo cual se

apreció la alta variabilidad de resultados que pueden afectar de manera negativa la combustión. La Fig. 4 muestra el cálculo de este índice a las corrientes evaluadas.

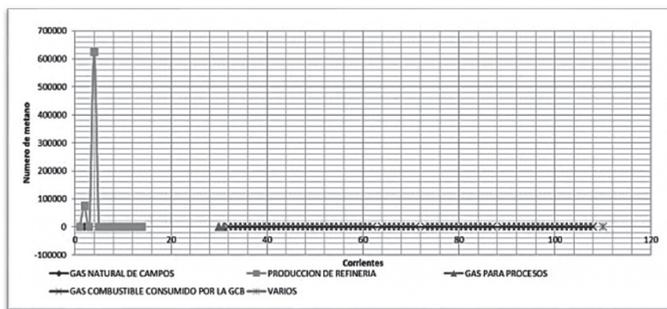
Se eligen las corrientes que tengan un valor del Índice de Wobbe entre 9 y 11 kWh/m³, basados en la medición de este parámetro en el gas natural, y con la finalidad de mantener un rendimiento estable. Por ende, se reduce la cantidad de corrientes que se encuentran en un rango en el cual se cumplen las especificaciones que hemos determinado como óptimas, como se presenta en la Fig. 5.

Los resultados obtenidos nos reiteran la heterogeneidad de las corrientes dentro del complejo industrial, y a su vez, sirven de guía al momento de evaluar diferentes alternativas que se pueden tomar con miras a mantener un proceso estable y viable [10],[11].

Continuando con la metodología presentada, se analizan los resultados obtenidos al evaluar las corrientes por medio de los dos parámetros elegidos encontrando que los valores óptimos para quema, se encuentran dispersos entre las diferentes corrientes y áreas de proceso de la refinería, representando lo anterior, un desafío mayor en relación a la distribución óptima de las corrientes en el proceso de combustión.

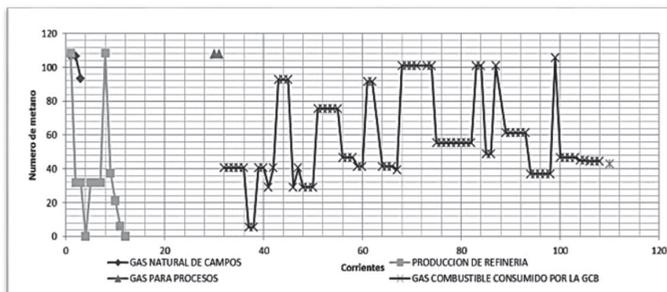
Por ende, analizando las corrientes elegidas presentadas en la Fig. 6, por medio del método propuesto, se evalúan los valores de cada uno de los componentes de cada corriente de gas combustible que se encuentran en el rango de 65 a 120, en referencia al número de metano y a valores entre 9 y 11 kWh/m³ para el índice de wobbe, se obtuvieron, de esta manera, las corrientes que cumplen con los rangos de trabajo denominados

Fig.1. NÚMERO DE METANO POR ÁREA



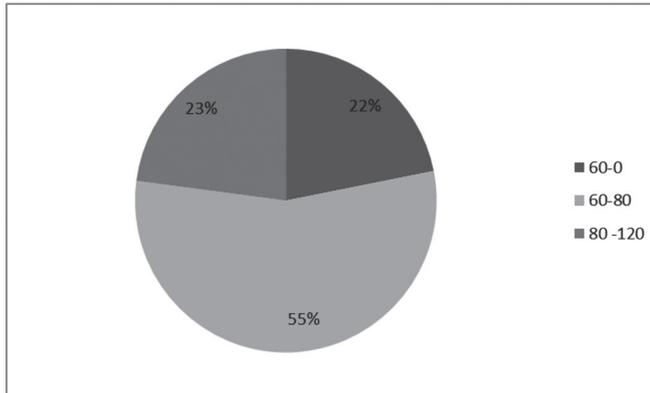
Fuente: autores

Fig.2. NÚMERO DE METANO POR ÁREA (VALORES DENTRO DEL RANGO DE 0 A 120 NM)



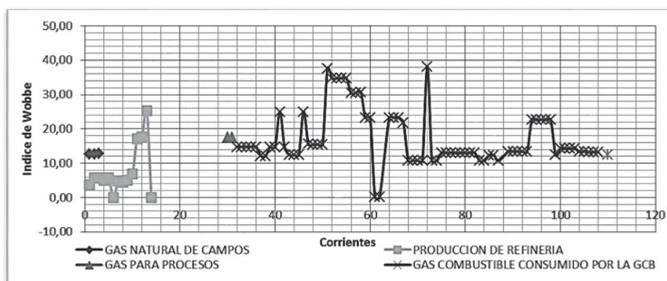
Fuente: autores

Fig.3. NÚMERO DE METANO POR RANGOS



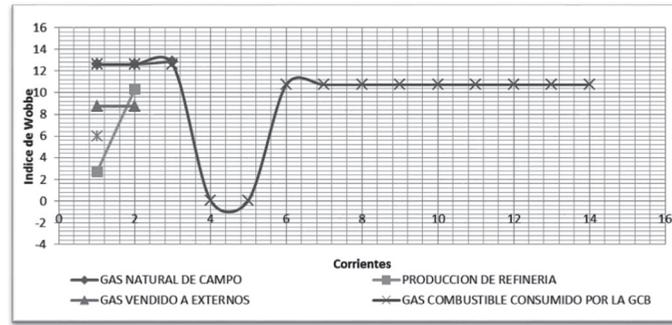
Fuente: autores

Fig. 4. ÍNDICE DE WOBBE GENERAL



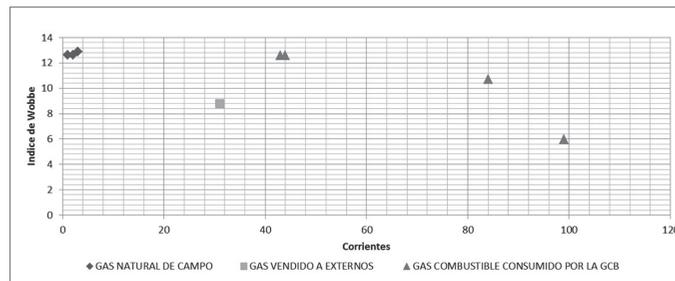
Fuente: autores

Fig. 5. ÍNDICE DE WOBBE EN CORRIENTES ELEGIDAS ANALIZANDO EL NÚMERO DE METANO



Fuente: autores

Fig. 6. CORRIENTES ELEGIDAS



Fuente: autores

como óptimos para los dos parámetros seleccionados. De esta manera, si se quemaran solo estas corrientes “óptimas”, se reducirían, principalmente, los problemas relacionados directamente con los parámetros evaluados, pero a su vez, se generarían cambios en el aspecto energético y de seguridad [10]. Seguidamente, se presentan los valores de la mezcla tipo que se obtuvieron después de la aplicación del procedimiento, en la tabla II [10], [11].

TABLA II
COMPONENTES DE LA MEZCLA TIPO

Componente	Porcentaje en mezcla
Dióxido de Carbono	(0,24-0,30)
C5 y más Pesados	(0,6-0,10)
Etano	(2,75-2,30)
Hidrógeno	(0,0028-0,0033)
Iso-Butano	(0,023-0,029)
Iso-Pentano	(0,078-0,083)
Metano	(90,20-90,32)
N-Butano	(0,030-0,038)

3.1. Discusión de Resultados

Un proceso de combustión de gases puede ser individualizado y adecuado a las necesidades especiales de cada empresa, optimizando el proceso de combustión, reduciendo a su vez las emisiones ambientales y los daños en los equipos utilizados para el proceso como hornos y tuberías; así como, la integración de los aspectos más importantes del proceso [12].

Los resultados obtenidos muestran la heterogeneidad de las corrientes y al aplicar el primer parámetro, método del número de metanos, se puede apreciar que el 70% de las corrientes analizadas, poseen un número de metano, con el cual se puede trabajar sin ocasionar daños sustanciales a los equipos; considerando que estos equipos están principalmente fabricados para quema de gas natural [13].

Tomando como rango al evaluar el número de metano, entre 65 y 120, se obtuvieron 27 corrientes, a las cuales se aplicó el cálculo de índice de Wobbe, tomando como rango valores entre 9 y 11 kWh/m³, el cual se encuentra basado en un poder calorífico entre 33533.051 y 74517.891 kJ/

m³. Habiendo analizado la intercambiabilidad de las mezclas por medio de este procedimiento, fue posible extraer las corrientes que tienen un valor similar al gas natural y que, por ende, pueden ser intercambiadas entre sí, sin afectar la estabilidad de la operación. Como resultado se obtuvieron 8 corrientes, en las cuales se analizaron estadísticamente sus componentes para encontrar cuáles de ellos eran los que afectaban directamente el poder calorífico de la mezcla; encontrándose que los componentes de mayor relevancia fueron el metano (90,26%), el nitrógeno (3,88%) y el etano (2,76%), lo cual, dentro de los resultados obtenidos, muestra un comportamiento similar a lo presentado en la literatura [13].

Como resultado se obtuvo una cantidad reducida de corrientes, las cuales al cumplir con los rangos definidos para cada parámetro, demostraron que no necesitan de otro tipo de tratamiento previo a su quema, relacionados con los problemas principalmente evaluados por los parámetros elegidos. El método del número de metano, parámetro de seguridad, mide la autoignición, brindándonos información sobre posibles daños en equipos y a su vez, la posibilidad de variaciones que se pueden presentar en la composición de la corriente evaluada después de presentarse la detonación inesperada [13]. Con la aplicación del Índice de Wobbe, parámetro de eficiencia, podemos evaluar principalmente la intercambiabilidad de los gases combustibles evaluados, con el fin de mejorar la eficiencia energética. Lo anterior con la finalidad de poder adecuar las corrientes de tal manera que se dé la quema sin que su composición química se convierta en una limitante.

Las implicaciones salidas del análisis realizado, son variadas, ya que los parámetros evaluados se encuentran ligados a dos aspectos importantes para este tipo de industria. El aspecto de seguridad, dentro de un complejo industrial como lo es una refinería, es difícil de evaluar si se mira de forma general, esto debido a la gran cantidad de procesos que se llevan a cabo al mismo tiempo; pero si se parte desde uno de los procesos que revisten mayor cuidado como lo es el transporte y quema de gases combustibles, se pueden diseñar estrategias que faciliten su control, y que a su vez, puedan ser aplicadas en otros procesos dentro de la refinería [14]. Para

nuestro caso de estudio, el daño en los equipos produce posibles focos de incendios, heridas en el personal y altos costos económicos. En relación al aspecto energético, el mantener una estabilidad en el valor del Índice de Wobbe favorece el incremento en la eficiencia térmica, si tenemos en cuenta que se puede representar el consumo térmico por medio de esta evaluación, podemos argumentar que para un rendimiento volumétrico ajustado, el consumo térmico de calor variara proporcionalmente con el valor del Índice de Wobbe del gas combustible suministrado, apreciándose variaciones asociadas directamente con los cambios en la composición del combustible, variaciones en la velocidad del flujo volumétrico en el quemador, cambios en la forma y longitud de la llama, así como una transferencia de calor ineficiente[1], [15].

Basados en lo anteriormente dicho y teniendo en cuenta los resultados obtenidos donde se aprecia la heterogeneidad de las corrientes, aun dentro de sus mismas áreas de procedencia, confirmándose la necesidad de aplicación de un procedimiento de control que integre aspectos energéticos y de seguridad con la finalidad de reducir principalmente los problemas analizados por medio de los parámetros elegidos. Se propone el diseño de una red integral de gases combustibles basada en la mezcla, en proporciones diferentes entre la mezcla tipo y las corrientes dispuestas para quema con el fin de mantener los valores del número de metano y el Índice de Wobbe constantes y dentro de los rangos determinados para cada parámetro[2,15]. Proporcionando un tratamiento previo, diferente, basado en los problemas que pueden ser ocasionados por presentarse fuera de los rangos definidos como óptimos.

4. CONCLUSIONES

La medición del Índice de Wobbe y del Número de Metano puede utilizarse a su vez, como un sistema de prevención ante los efectos negativos derivados de la quema de corrientes de gas combustible heterogéneas.

Basados en los resultados obtenidos, los datos recogidos pueden servir como guía para la creación de un sistema integrado de gestión, con el

cual, implementar, mantener y realizar mejoras continuas basados en las normas OSHAS 18001 e ISO 50001.

Para la optimización del proceso de combustión, es posible la aplicación de una metodología basada en la integración de aspectos energéticos y de seguridad, evaluados por medio de parámetros que midan el principal problema que se presenta, para cada aspecto, en determinada industria.

REFERENCIAS

- [1] D. Montaña, "Determinación de las propiedades de combustión e identificación de problemas de intercambiabilidad de las mezclas de gas natural con otros combustibles de refinería," Tesis de maestría en ingeniería química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2011.
- [2] J. Cortes, J. Hernández, "Validación de la intercambiabilidad de gases en el contexto colombiano: calentadores instantáneos de agua," Especialización en gases combustibles. Universidad de Antioquia. Medellín, 2003.
- [3] A. Álvarez, "Estudio sobre la influencia de la composición química de los principales gases naturales colombianos sobre el rendimiento de la conversión y el desempeño mecánico de los motores a gas en Colombia," Especialización en gases combustibles. Universidad de Antioquia. Medellín, 2003.
- [4] M. Faruque, I. Karimi, C. Matthew, "Preliminary Synthesis of Fuel Gas Networks to Conserve Energy and Preserve the environment," In *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 50(12), pp. 7414 - 7427, 2011.
- [5] Appendix A Proposed Regulation Order Amendments to Sections 2290, 2291, 2292.5 and 2292.6, Title 13, "California code of regulations, regarding the compressed natural gas and liquefied petroleum gas specifications in the alternative fuels for motor vehicle regulations; Air Resources Board, California Environmental Protection Agency," Sacramento, CA, 2002; available at <http://www.arb.ca.gov/regact/cng-lpg/appa.pdf> (Accessed January 11, 2011).
- [6] A. Amell et al, "Tecnología de la combustión de gases y quemadores atmosféricos de premezcla", *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, Medellín, no. 18, Jun. 1999.
- [7] J. Saavedra, L. Meriño, D. Montaña, K. Viatcheslav, "Análisis de mezclas combustibles producidas en procesos de refinación", en V simposio internacional de Biofabricas, I congreso Internacional de Flujos Reactivos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2011.
- [8] M. Malenshek, D. Olsen, "Methane number testing of alternative gaseous fuels," in *Fuel*, vol. 88, pp 650-656, 2009.
- [9] GIE Gas Infrastructure Europe, "GIE position paper on impact of including methane number in the European standard for natural gas," Bruselas, 2012.
- [10] L. Galvan, R. Reyes, C. Guedez, D. De Armas, "Los macroprocesos de la industria petrolera y sus consecuencias ambientales," *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 11, no. 43, pp. 91-97, Puerto Ordaz, Venezuela, 2007.
- [11] A. Jagannath, M. Faruque, M. Al-Fadhli, I. Karimi, D. Allen, "Minimize flaring through integration with fuel gas networks," in *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 51, no. 39, pp. 12630-12641, 2011.
- [12] G. Villafior, G. Morales, J. Velazco, "Variables significativas del proceso de combustión del gas natural," *Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ingeniería. Instituto de Beneficio de Minerales. Instituto de Investigaciones para la Industria Química. Información Tecnológica*, vol. 19, no. 4, pp. 57-62, 2008.
- [13] M. Carlos, "Análisis de la eficiencia de la combustión de gas de refinería en hornos industriales tipo cabina, mediante el estudio de su comportamiento real," *Universidad Industrial de Santander, Tesis de Grado*, 2002.
- [14] Muller, C. Craig, I. Ricker, N. "Modelling validation, and control of an industrial fuel gas blending system," *Journal of Process Control*, 2011.
- [15] C. Acevedo, "Estudio sobre la influencia de la composición química de los principales gases naturales colombianos sobre el rendimiento de la conversión y el desempeño mecánico de los motores a gas en Colombia," Especialización en combustibles Gaseosos. Universidad de Antioquia. Medellín, 2003.