

**DETERMINACIÓN DE UN ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA LOS  
PROCESOS DE COMBUSTIÓN DE LOS GASES DE REFINERÍA**

**OSCAR MAURICIO CALA PARRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
MAESTRÍA EN INGENIERIA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2014**

**DETERMINACIÓN DE UN ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA LOS  
PROCESOS DE COMBUSTIÓN DE LOS GASES DE REFINERÍA**

**OSCAR MAURICIO CALA PARRA**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Magíster en Ingeniería Química**

**Directores:**

**VIATCHESLAV KAFAROV**

**Ph. D. En Ingeniería Química**

**Ph.D. JAQUELINE SAAVEDRA RUEDA**

**Ph. D. En Ingeniería Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
MAESTRÍA EN INGENIERIA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2014**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo a Dios y a mis padres por ser el motor de mi vida, a Colciencias por la financiación de este proyecto a través de la convocatoria “Jóvenes investigadores e innovadores 2011”, a la Universidad Industrial de Santander por su apoyo a través de las becas de sostenimiento, al Instituto Colombiano del petróleo (ICP-Ecopetrol) por su apoyo e información brindada durante la ejecución de esta investigación, a mis directores P.h.D Viatcheslav Kafarov, P.h.D Jaqueline Saavedra, por la confianza brindada y colaboración durante las etapas de este proceso. Especialmente a M.Sc. Lourdes Meriño por ser mi maestra, guía y compañera durante esta investigación, sin duda sin su continua orientación y múltiples consejos nada de esto hubiera sido posible. A mis compañeros del Grupo de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía (CIDES), a mis amigos y todos los que de una u otra forma hicieron posible finalizar esta etapa de mi vida.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	15
<b>1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DE ARTE</b> .....	18
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA RED DE GAS COMBUSTIBLE.....	18
1.2 LA COMBUSTIÓN.....	20
1.2.1 Parámetros de operación que afectan la combustión.....	20
1.2.2 Composición.....	20
1.2.3 Poder calorífico.....	21
1.2.4 Poder calorífico superior (PCS).....	22
1.2.5 Poder calorífico inferior (PCI).....	22
1.2.6 Temperatura adiabática de llama.....	22
1.2.7 Eficiencia del proceso.....	23
1.3 INTERCAMBIABILIDAD DE GASES.....	25
1.3.1 Estudios sobre intercambiabilidad de gases en Colombia.....	29
1.3.2 Problemas asociados a la combustión debido a la intercambiabilidad de gases .....	29
1.3.3 Modos de falla de la combustión .....	30
1.3.4 Generación de contaminantes .....	30
1.3.5 Durabilidad de los intercambiadores de calor (hornos y calderas) y sus componentes .....	32
1.3.6 Cambios en la eficiencia .....	33
1.4 ESTUDIOS SOBRE ÍNDICES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	33

1.5 UTILIZACIÓN DEL GAS DE REFINERÍA.....	35
<b>2. HIPÓTESIS.....</b>	<b>38</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>39</b>
3.1 Objetivo general .....	39
3.2 Objetivos específicos .....	39
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>40</b>
4.1 IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CORRIENTES DE GAS DE REFINERÍA. ....	41
4.1.1 Revisión de antecedentes históricos y selección de componentes a evaluar.....	41
4.1.2 Evaluación de propiedades.....	41
4.2 SIMULACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN .....	42
4.2.1 Reacciones de combustión.....	43
4.3 DESARROLLO DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA MEDIANTE LÓGICA DIFUSA.....	44
4.4 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO PARA EL ÍNDICE DE EFICIENCIA.....	45
4.5 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO.....	46
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>48</b>
5.1 REVISIÓN DE ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y SELECCIÓN DE COMPONENTES A EVALUAR.....	48
5.2 SELECCIÓN DE UNA MEZCLA REPRESENTATIVA DEL GR.....	48
5.2.1 Criterio número 1.....	49
5.2.2 Criterio número 2.....	49
5.2.3 Criterio número 3.....	50

5.2.4 Selección de las mezclas a evaluar .....	51
5.2.5 Análisis estadístico. ....	51
5.2.6 Descripción del algoritmo para determinar las mezclas representativas de GR. ....	52
5.3 EVALUACIÓN DE PROPIEDADES. ....	53
5.3.1 Efecto de la composición del gas combustible (GR) sobre el poder calorífico de la mezcla. ....	54
5.4 SIMULACIÓN DEL PROCESO. ....	55
5.4.1 Efecto de la composición del gas natural sobre la temperatura adiabática de llama y la eficiencia del proceso. ....	57
5.4.2 Simulación del gas de refinería.....	58
5.4.3 Índice de Wobbe.....	58
5.4.4 Influencia de la composición del GR sobre el exceso de aire.....	59
5.4.5 Influencia de la composición del GR sobre la temperatura adiabática de llama. ....	60
5.4.6 Influencia de la composición del GR sobre los productos de combustión. ....	63
5.4.7 Influencia de la composición GR sobre la eficiencia del proceso. ....	63
5.5 ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA MEDIANTE LÓGICA DIFUSA. ....	65
5.6 MODELO MATEMÁTICO DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA....	70
5.7 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA EL ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	73
5.8 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	76
5.9 HERRAMIENTA DE CALCULO Y MONITOREO DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	77

<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	79
<b>7. DIVULGACIÓN DE RESULTADOS (Publicaciones y eventos)</b> .....	81
<b>CITAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	82
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	89
<b>ANEXOS</b> .....	96

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema general de la Red de gas combustible típica de una refinería. .....	19
Figura 2. Metodología utilizada para obtener el índice de eficiencia energética....	40
Figura 3. Simulación del proceso de combustión en Aspen Hysys.....	42
Figura 4. Esquema del sistema de lógica difusa.....	44
Figura 5. Gráfico de caja y bigotes para el CO, CO <sub>2</sub> , I-pentano, O <sub>2</sub> y N <sub>2</sub> .....	50
Figura 6. Poder calorífico inferior de los compuestos del gas de refinería.....	51
Figura 7. Gráfico de caja y bigotes para los compuestos de la mezcla representativa del gas de refinería.....	51
Figura 8. Poder calorífico inferior de las mezclas combustibles de GR. ....	54
Figura 9. Efecto de la composición del gas natural sobre la temperatura adiabática de llama a diferentes excesos de aire.....	57
Figura 10. Efecto de la composición del gas natural sobre la eficiencia del proceso a diferentes excesos de aire. ....	57
Figura 11. Aire teórico requerido por el GR. ....	60
Figura 12. Efecto del exceso de aire sobre la temperatura adiabática de llama. ....	62
Figura 13. Efecto del GR sobre la composición de los productos de combustión. ....	63
Figura 14. Efecto del GR sobre la eficiencia del proceso. ....	64
Figura 15. Comportamiento del índice de eficiencia por medio de lógica difusa en Fuzzy logic Toolbox en Matlab.....	68
Figura 16. Gráfica de contorno del índice de eficiencia vs el índice de Wobbe y la temperatura adiabática de llama.....	68
Figura 17. Clasificación de los gases combustibles según el índice de eficiencia energética.....	76
Figura 18. Pantalla de inicio del software de cálculo del índice de eficiencia energética (IE). ....	78

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Diferencias en la composición del gas natural y el gas de refinería.....	21
Tabla 2. Condiciones de los flujos de entrada al proceso.....	43
Tabla 3. Modelos de regresión lineal múltiple.....	46
Tabla 4. Porcentaje de presencia de los compuestos en el GR .....	49
Tabla 5. Rangos de poder calorífico utilizados para la selección de los grupos. ...	52
Tabla 6. Mezclas combustibles representativas del Gas natural y el gas de refinería.....	53
Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de las mezclas representativas. ....	54
Tabla 8. Composición de los gases naturales utilizados en el caso de estudio.....	56
Tabla 9. Índice de Wobbe de GR.....	59
Tabla 10. Rangos del Índice de Wobbe y temperatura adiabática de llama utilizados para el cálculo del índice de eficiencia energética. ....	65
Tabla 11. Características de las variables a utilizar en lógica difusa. ....	66
Tabla 12. Niveles utilizados por las variables a utilizar en lógica difusa. ....	66
Tabla 13. Reglas difusas utilizadas para el cálculo del índice de eficiencia energética.....	67
Tabla 14. Matriz de datos obtenida mediante lógica difusa a través de Fuzzy logic Toolbox en Matlab. ....	69
Tabla 15. Análisis estadístico de los modelos utilizados.....	70
Tabla 16. Respuesta del índice de eficiencia calculado por los modelos A y B.....	71
Tabla 17. Análisis de varianza para los grupos de variables .....	72
Tabla 18. Constantes del modelo del índice de eficiencia energética.....	73
Tabla 19. Composición del gas A, utilizado para la validación del índice de eficiencia energética. ....	74
Tabla 20 . Resultados de la evaluación del índice de eficiencia energética. ....	74

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA TEMPERATURA ADIABÁTICA DE LLAMA.....	96
ANEXO B. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA (IE).....	99

**TITULO:** DETERMINACIÓN DE UN ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA LOS PROCESOS DE COMBUSTIÓN DE LOS GASES DE REFINERÍA\*

**AUTOR:** OSCAR MAURICIO CALA PARRA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Combustión, intercambiabilidad de gases, gas de refinería, combustible, eficiencia energética, índices.

**RESUMEN:**

Los procesos de combustión que se desarrollan en la industria de la refinación del petróleo utilizan como fuente principal de energía una mezcla de gas natural (GN) y gas de refinería (GR), el cual es recuperado de los distintos procesos y reutilizado como sustituto del gas natural; por lo cual se tendrá un gas cuya composición variará ampliamente dependiendo de su origen, presentando altos contenidos de hidrógeno, etileno, propano y propileno. En el presente estudio se analizó el efecto del cambio de la composición del gas combustible sobre las características del proceso de combustión en hornos de la industria de refinación del petróleo; se evaluó el poder calorífico, el índice de Wobbe (IW) y exceso de oxígeno, para mezclas combustibles de composición variable. Mediante simulación computacional del proceso de combustión se calculó la temperatura adiabática de llama, eficiencia y la composición de los productos de combustión. Se evaluaron mezclas de gases combustibles con poderes caloríficos entre 800-2500 Btu/pe<sup>3</sup> y se compararon con la combustión del gas natural. Se registró un aumento en la temperatura adiabática de llama, aire teórico y emisiones de CO<sub>2</sub>, mientras que la eficiencia disminuyó en función de la composición de hidrógeno.

Utilizando como variables el Índice de Wobbe (IW) y la temperatura adiabática de llama (T); se desarrolló un índice de eficiencia energética (IE) mediante lógica difusa y modelamiento matemático. Dicho índice tiene en cuenta el efecto de la composición del gas combustible y permite tomar decisiones en cuanto al uso del gas de refinería. En donde para valores del IE > 6,5 se presentan los gases que favorecen el proceso de combustión, aumentando la eficiencia y disminuyendo las emisiones de contaminantes.

---

\* Tesis de maestría.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Directores: Ph.D. Viatcheslav Kafarov, Ph.D. Jaqueline Saavedra, M.Sc. Lourdes Meriño.

**TITLE:** DETERMINATION OF ENERGETIC EFFICIENCY INDEX FOR COMBUSTION PROCESS OF THE REFINERY GASES\*

**AUTHOR:** OSCAR MAURICIO CALA PARRA\*\*

**KEYWORDS:** Combustion, Gas Interchangeability, Refinery gas, fuel, energy efficiency, indexes.

**ABSTRACT:**

The combustion processes developed on petroleum refining industry, use as main source of energy a mixture of natural gas (GN) and refinery gas (GR), which is recovered from various processes and reused as replacement from natural gas; whereby there will be a gas whose composition will vary widely depending of its origin, presenting a high content of hydrogen, ethylene, propane and propylene. In the present work the effect of change composition of the fuel on the characteristics of the combustion process in furnaces of the petroleum refining industry was analyzed; lower heating value, Wobbe Index (IW) and air excess was evaluated for fuel mixtures of varying composition. Through computer simulation of the combustion process the adiabatic flame temperature, efficiency and the composition of the combustion products was calculated. Fuel gas mixtures with lower heating value between 800-2500 Btu/ft<sup>3</sup> were evaluated and results were compared with the combustion from natural gas. An increase in the adiabatic flame temperature, air theoretical and CO<sub>2</sub> emissions were recorded, while efficiency decreased depending on the composition of hydrogen.

Using as variables the Wobbe Index (IW) and the adiabatic flame temperature (T); an index of energy efficiency (IE) using fuzzy logic and mathematical modeling was developed. This index takes into account the effect of the composition of the fuel gas and it allows taking decisions on the use of refinery gas. For values of IE > 6.5 the gases that favor the combustion process, increasing the efficiency and lowering the emissions of pollutants are found.

---

\* Master thesis.

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering. Department of Chemical Engineering. Directors: Ph.D. Viatcheslav Kafarov, Ph.D. Jaqueline Saavedra, M.Sc. Lourdes Meriño.

## INTRODUCCIÓN

El agotamiento mundial de los combustibles fósiles, principalmente el petróleo y el gas natural, sumado a las exigencias cada vez más estrictas en cuanto a las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) producidos en la industria petroquímica, principalmente en la quema de combustibles en los procesos de refinación, han llevado a la industria petrolera nacional e internacional a cuestionarse sobre la necesidad de buscar nuevas tecnologías que permitan realizar mejoras o cambios a los procesos de refinación existentes.

Actualmente, los estudios tecnológicos se han centrado en el desarrollo de investigaciones tendientes al uso eficiente de los combustibles y al desarrollo tecnológico en el área de la combustión asociado a la ecoeficiencia de los procesos [1]. Puesto que la energía representa el 40% del costo total de operación de una planta química como una refinería [2], por lo cual la industria petroquímica ha venido implementando estrategias para aumentar la eficiencia energética, entre las que se destacan: el fortalecimiento de la gestión de la energía, el cambio de las fuentes de energía, la recuperación y posterior reutilización de residuos de energía [3].

Los diferentes procesos que se desarrollan en una refinería utilizan como fuente principal de energía gas combustible (gas natural (GN)), el cual es utilizado por los hornos y calderas para la generación de vapor, el calentamiento de corrientes de proceso y la descomposición térmica de las corrientes intermedias en la desfragmentación del petróleo, además en los procesos mencionados anteriormente se producen gases residuales los cuales son mezclados con el gas natural o utilizados directamente como gas combustible para los procesos de combustión, en lo se denomina “intercambiabilidad de gases”. Estos gases son llamados comúnmente “gas de refinería (GR)”, no obstante estos gases de

refinería varían de acuerdo al proceso del cual provengan y a las características del combustible utilizado, presentando una composición que variará ampliamente dependiendo del proceso del cual provenga, con altos contenidos de hidrógeno, etileno, propano y propileno; por lo cual se hace necesaria la evaluación de la intercambiabilidad de dichos gases de refinería y los impactos que generan al realizarse la combustión de los mismos sobre las variables del proceso de combustión tales como el poder calorífico, temperatura, emisiones de contaminantes y eficiencia energética.

Por consiguiente, en este trabajo de investigación se busca evaluar los efectos que genera el uso del gas de refinería que será intercambiado y mezclado con el gas natural, sobre las propiedades del proceso de combustión en hornos de refinería mediante la determinación de un índice de gestión, en este caso aplicado a la eficiencia del proceso. Todo como una estrategia orientada a mejorar la toma de decisiones en cuanto a la intercambiabilidad del gas combustible, obteniendo las condiciones más favorables energéticamente y las condiciones a las cuales se puede hacer un mejor aprovechamiento de los gases de refinería.

Para determinar dicho índice de gestión de eficiencia energética, se inició con una caracterización de los principales gases que conforman el gas de refinería y la red de gas combustible típica de una refinería, en donde se definió una mezcla representativa del GR por medio de un análisis estadístico realizado mediante el software Statgraphics. Posteriormente se realizó una simulación computacional utilizando el software ASPEN-HYSIS, en donde se simularon corrientes de gases naturales colombianos y corrientes de gas de refinería con un poder calorífico entre 800-2500 Btu/pie<sup>3</sup>. Se evaluó el efecto que genera la composición de las mezclas de gas combustible sobre las propiedades de combustión tales como el exceso de oxígeno, temperatura adiabática de llama, índice de Wobbe, emisiones de contaminantes y eficiencia del proceso.

Seguidamente, se encontraron los rangos de trabajo tanto para el gas natural como para el gas de refinería y se procedió a la construcción del índice de eficiencia energética mediante la aplicación de lógica difusa. Posteriormente, se utilizaron técnicas numéricas para determinar un modelo matemático que permitió calcular el índice de eficiencia en función de las variables de proceso (índice de Wobbe y temperatura adiabática de llama).

Finalmente se realizó su respectiva validación, para la cual se utilizaron monitoreos realizados por el Instituto Colombiano del Petróleo a hornos y calderas de la refinería de Cartagena. Adicionalmente, se desarrolló un software que permite calcular el índice de eficiencia energética de manera simple y rápida en función de la composición o el poder calorífico del gas combustible.

Además este índice de eficiencia energética permitirá hacer seguimiento, evaluación y monitoreo de los gases de refinería con el fin de obtener un mejor aprovechamiento de los gases combustibles y del proceso de combustión.

## **1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DE ARTE**

En este capítulo se presentan el estado del arte y las bases conceptuales que permiten abordar la investigación planteada, se realiza una descripción de la red de gas combustible, el proceso de combustión y sus parámetros, la intercambiabilidad de gases y sus implicaciones, así como el uso del gas de refinería y la evaluación de índices de eficiencia energética aplicados en otros sectores industriales.

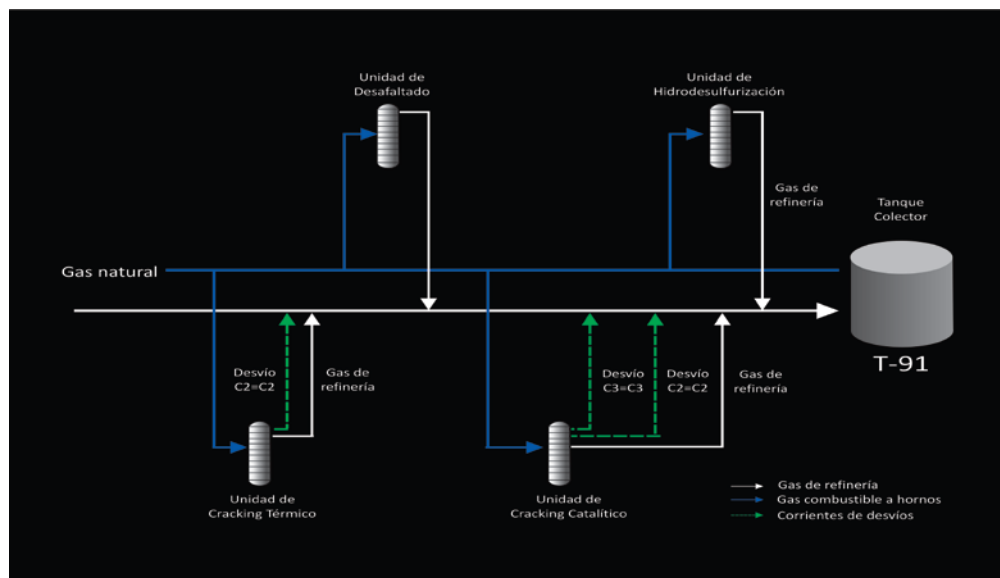
### **1.1 DESCRIPCIÓN DE LA RED DE GAS COMBUSTIBLE.**

Actualmente los procesos de combustión que se desarrollan en una refinería utilizan gas combustible el cual es usado para proporcionar energía a los equipos de combustión tales como hornos y calderas, los cuales consumen en promedio 60 MBTU/D de gas combustible [4]. Sin embargo, este gas combustible es una mezcla de gas natural y diversas corrientes de gas que se generan en el proceso de refinación (gas de refinería) y deben ser usados a medida que se producen ya que se generaría altos costos para su almacenamiento. Dichos gases presentan composición variable pues dependen del tipo de proceso del que provenga y las características del combustible utilizado. Existen corrientes de muy alto poder calorífico (etanos, propanos y butanos) o de muy bajo poder calorífico (hidrógeno y metano) derivados del proceso de refinación que pueden llegar a formar parte del gas combustible.

Generalmente, en una refinería los procesos de combustión utilizan gas natural y gases de refinería (gas de tratamiento con amina, de hidrógeno y gas de la cima de la recuperadora (absorbedora) de etano-etileno) provenientes de la planta de craqueo térmico y de la desmetilizadora de fondos de vacío. En algunas ocasiones se utilizan gases que no cumplen las especificaciones del producto final o superan la capacidad de almacenamiento de la refinería, estos gases son utilizados como

gas combustible y son denominados como: desvíos de propano-propileno y desvíos de etano-etileno. Dichos gases son enviados a un colector donde están en contacto directo y luego son enviados a la red de gas combustible y quemados en los hornos y calderas.

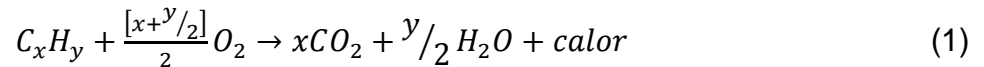
No obstante a estos gases de refinería diferentes al gas natural, es necesario hacerles una evaluación sobre su intercambiabilidad y los impactos que generan al utilizarlos como combustible, pues estas mezclas no son homogéneas debido a la variación de la composición del combustible, afectando directamente el poder calorífico de la mezcla combustible; por lo cual se generan perturbaciones que modifican el grado de conversión deseada, permiten la formación de coque en la superficie interna de los tubos de los hornos y calderas, afectando, la eficiencia del equipo, daños en la estructura por corrosión, emisiones de contaminantes y aumentan los costos operacionales pues los equipos de combustión de una refinería presentan parámetros y condiciones de operación que son susceptibles al cambio en la composición del combustible para el que fueron diseñados [4]. La Figura 1 presenta un esquema general la red de gas combustible típica de una refinería.



**Figura 1.** Esquema general de la red de gas combustible típica de una refinería.

## 1.2 LA COMBUSTIÓN.

La combustión es uno de los procesos unitarios más estudiados a lo largo del tiempo y se ha convertido en uno de los procesos claves para el desarrollo de la humanidad, debido a su alto impacto como mecanismo de reacción de los combustibles en energía química (en forma de calor y luz). Los combustibles en general pueden clasificarse como sólidos (madera, carbón, turba, etc), líquidos (aceite combustible para motores (acpm), gasolina, queroseno, diesel etc) y gaseosos (gas natural, propano, butano, gas licuado del petróleo (GLP), etc). A continuación se presenta la ecuación general para una reacción de combustión de un hidrocarburo.



De esta ecuación química se deduce inmediatamente que el producto de la combustión de sustancias de este tipo, es una mezcla de gases (humos) en cuya composición entran a formar parte de manera importante el anhídrido carbónico y el agua (generalmente en forma de vapor), así como, en menores proporciones, anhídridos sulfurosos y óxidos de nitrógeno.

### 1.2.1 Parámetros de operación que afectan la combustión.

### 1.2.2 Composición.

La composición de un combustible es fundamental para poder determinar los parámetros estequiométricos característicos de la reacción de combustión. Además establece si el mismo es apto o no para el uso que se requiere en función de la presencia de componentes que puedan ser nocivos o contaminantes. Los componentes más habituales en un combustible gaseoso son: hidrocarburos, de fórmula  $C_xH_y$ , dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, dióxido de azufre y vapor de agua. En la Tabla 1 se muestran composiciones representativas de un gas natural y un gas de refinería. En donde

se observan diferencias significativas en cuando a la composición, principalmente del metano. Un aumento en la composición del etano, propano y butano y la presencia de compuestos como etileno, H<sub>2</sub>S, hidrógeno y propileno, lo que demuestra que el gas de refinería difiere totalmente en composición al gas natural.

**Tabla 1.** Diferencias en la composición del gas natural y el gas de refinería.

GAS NATURAL		GAS DE REFINERÍA	
CO <sub>2</sub>	0,020	CO <sub>2</sub>	1,530
Etano	0,840	Etano	14,600
Etileno	0,060	Etileno	11,580
H <sub>2</sub> S	0,000	H <sub>2</sub> S	0,350
Hidrógeno	0,000	Hidrógeno	16,860
Iso-Butano	0,020	Iso-Butano	0,390
Iso-Pentano	0,020	Iso-Pentano	0,250
Metano	97,080	Metano	41,290
CO	0,000	CO	1,210
n-Butano	0,000	n-Butano	0,070
Nitrógeno	1,700	Nitrógeno	3,610
Oxígeno	0,000	Oxígeno	0,000
Propano	0,180	Propano	1,610
Propileno	0,060	Propileno	6,640

Fuente: Ecopetrol

### 1.2.3 Poder calorífico.

El poder calorífico es la variable más importante del proceso, pues depende directamente de la composición y mide el contenido energético por unidad de masa o unidad volumen del combustible desprendido en una reacción de combustión. Para mezclas gaseosas se define como:

$$PC = \sum y_i PC_i \quad (2)$$

Donde  $y_i$  es la fracción molar del componente  $i$  y  $PC_i$  es el poder calorífico del componente  $i$ . La magnitud del poder calorífico puede variar según como se mida. Según la forma de medir se utiliza la expresión poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI) [5].

#### **1.2.4 Poder calorífico superior (PCS).**

Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de volumen de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado y se contabiliza, por consiguiente, el calor desprendido en este cambio de fase.

#### **1.2.5 Poder calorífico inferior (PCI).**

Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de volumen de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua generado en la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor. Es el valor que interesa en los usos industriales, por ejemplo hornos o turbinas, porque los gases de combustión que salen por la chimenea están a temperaturas elevadas, y el agua en fase vapor no condensa. También es llamado poder calorífico neto, ya que al poder calorífico superior se resta el calor latente de evaporación.

#### **1.2.6 Temperatura adiabática de llama.**

La temperatura alcanzada cuando se quema un combustible en aire u oxígeno sin ganancia o pérdida de calor se denomina temperatura teórica de llama o temperatura adiabática de llama, la cual es la máxima temperatura que pueden alcanzar los productos de combustión, es decir aquella que se obtiene si todo el calor generado durante el proceso se utilizará para calentar los productos o asumiendo un proceso adiabático. De igual manera la máxima temperatura adiabática de llama se alcanza cuando se quema el combustible con la cantidad teóricamente necesaria de oxígeno. Debido a la necesidad de emplear un exceso

de aire para asegurar la combustión completa, las temperaturas adiabáticas de llama de las combustiones reales son siempre menores que los valores máximos. Las ecuaciones para el cálculo de la temperatura adiabática de llama se presentan en el Anexo A.

### 1.2.7 Eficiencia del proceso.

La eficiencia de combustión en hornos es la medida del calor liberado en la llama que es absorbido por el fluido a calentar, se calcula a partir de las pérdidas de calor en la chimenea y la energía que libera el combustible utilizado. La eficiencia ha sido una de las variables más importantes a la hora de realizar estudios sobre los procesos que se dan en la industria química y petroquímica en general.

La evaluación de la eficiencia de la combustión es una herramienta exitosa en el control y monitoreo de los procesos petroquímicos, en donde se debe considerar que los modelos presentan limitaciones pues hay muchas variables que influyen en el proceso, de esa forma es importante encontrar las variables que realmente se deben tener en cuenta según el caso de estudio y así mejorar los procesos de operación de los hornos. A continuación se presentarán algunos modelos para el cálculo de la eficiencia térmica en hornos.

Hsieh [6] utilizó el modelo de entradas y salidas (indirecto) descrito en la norma ASME PTC 4.1 [7], el cual es considerado uno de los modelos más generales para el cálculo de la eficiencia térmica en hornos y se define como:

$$\eta = \frac{\text{calor absorbido por el proceso}}{\text{calor suministrado por el combustible a la entrada}} * 100 \quad (3)$$

$$\eta = \frac{PCI - Q_{chimenea}}{PCI} * 100 \quad (4)$$

Donde PCI es el poder calorífico inferior del combustible y el  $Q_{chimenea}$  es el calor perdido en chimenea.

Serrano y Carranza [8], presentan un modelo teniendo en cuenta el poder calorífico superior del combustible a la entrada del proceso, además la eficiencia del horno está asociada a la energía química que es posible ser transformada en calentamiento de los productos de combustión.

$$\eta = \frac{PCS - (H_{prod} - H_{Reac})}{PCS} * 100 \quad (5)$$

Donde PCS es el poder calorífico superior del combustible,  $H_{prod}$  es la entalpia de los productos y  $H_{reac}$  es la entalpia de los reactivos.

Meza [9], analiza la eficiencia en la combustión de gas de refinería en hornos tipo cabina, teniendo en cuenta el exceso de aire y las temperaturas de chimenea y adiabática de llama.

$$\eta = 97 - \left( 100 * \frac{21}{21 - \%exc} * \frac{\frac{(T_{chim} - 32)}{1,8}}{T_{adia}} \right) \quad (6)$$

En donde  $T_{chim}$  es la temperatura a la salida de la chimenea (°F),  $T_{adia}$  es la temperatura adiabática de llama (°C) y  $\%exc$  es el porcentaje de exceso de aire.

Un modelo final tiene en cuenta las pérdidas de calor en las paredes del horno (un 2% es considerado un valor aceptable en el diseño) y las pérdidas en los gases producidos. Además se tiene en cuenta el exceso de aire y la temperatura del gas a la salida.

$$\eta = 0,98 - 9,25 * 10^{-5} T_{gas}^{1,128} \left( 1 + \frac{exc_{air}}{100} \right)^{0,748} \quad (7)$$

En donde  $exc_{air}$  es el porcentaje de exceso de aire y  $T_{stack}$  es la temperatura a la salida de la chimenea (°F).

En cuanto al análisis de los modelos se observa, que estos varían en cuanto a su complejidad y número de variables, en donde el modelo (4) es más simple que el modelo (5) pues no requiere conocimiento de datos termodinámicos, sin embargo estos modelos no tienen en cuenta las pérdidas de calor por radiación y convección que se presenta en las paredes de la cámara de combustión. Los modelos (6) y (7) tienen en cuenta pérdidas de calor del 3 y 2% respectivamente, pero aumentan en cuanto a su complejidad, requiriendo de un número mayor de variables lo que dificulta el cálculo de la eficiencia. En conclusión, tenemos una amplia gama de modelos por lo cual es conveniente hacer una buena elección del modelo de eficiencia que esté de acuerdo a las necesidades y variables que se manejen del proceso de combustión.

### **1.3 INTERCAMBIABILIDAD DE GASES.**

En el caso de la combustión de combustibles gaseosos, existe una amplia diversidad de compuestos que pueden ser utilizados en procesos de combustión dependiendo de la fuente de origen y su disponibilidad, desde el año 1900 [10-12], se han realizado estudios sobre los efectos que el cambio de la fuente del combustible puede generar en los quemadores y la eficiencia del proceso de combustión; en general estos estudios se han centrado en el desarrollo de índices que permitan diferenciar los combustibles y se han probado en diferentes equipos con combustibles de composición variable.

De esta manera ha surgido el término de intercambiabilidad de gases el cual hace referencia a la posibilidad de reemplazar un combustible por otro sin que se afecten las características de operación del aparato doméstico, comercial o industrial. Esta definición implica que para alcanzar una intercambiabilidad perfecta, los gases deben tener composición química idéntica, argumento que en la práctica resulta imposible. A nivel industrial no se exige una intercambiabilidad perfecta, si no que los artefactos donde se lleve a cabo la combustión operen dentro de los límites permisibles de operación, dicho de otra manera, "un gas se

dice intercambiable con otro de referencia, si se asegura el funcionamiento satisfactorio de los aparatos de uso térmico que fueron ajustados para el gas de referencia [13].

Los índices que se han desarrollado para estudiar la intercambiabilidad de gases permiten comparar cuantitativamente la variación relativa de las características físicas de la llama del quemador, basándose en las propiedades del gas, tales como el poder calorífico y el peso específico.

Los estudios de intercambiabilidad de gases conocidos, han basado sus criterios en las propiedades físico-químicas del gas asociadas al cálculo de magnitudes llamadas “índices de intercambiabilidad”. A continuación se presentarán los trabajos más relevantes que se han presentado ante la comunidad científica sobre la intercambiabilidad.

Los primeros estudios fueron desarrollados en 1920 por el físico italiano Goffredo Wobbe [14] quien origino “el Índice de Wobbe” (poder calorífico dividido entre la raíz cuadrada de la gravedad específica), el cual describe la habilidad del gas para liberar calor al quemador como una función de su densidad. El índice de Wobbe es calculado mediante la ecuación (8) y ha sido considerado el parámetro más eficiente para describir la intercambiabilidad de un amplio rango de gases [15], además se reconoce como un buen indicador de rendimiento similar para gases de una composición similar [16, 17].

$$IW = \frac{PCI}{\sqrt{d_r}} \quad (8)$$

Donde  $d_r$  es la densidad relativa del gas y PCI es el poder calorífico inferior del combustible.

En 1932, la Asociación Americana de Gases A.G.A [18], realizó un amplio estudio sobre la intercambiabilidad de los gases manufacturados y mezclas de gases combustibles, cuyos poderes caloríficos eran menores a los 700 Btu/Pie<sup>3</sup>. Se

realizaron aproximadamente unas 175000 pruebas, para unas 250 mezclas de gases.

En 1940 A.G.A. presentó el boletín número 10 [19], en donde se encontró que las características de diseño y operación de un quemador de gas atmosférico afectan las características de la llama. El trabajo realizado estudió la fuente del combustible, el aire primario, el tamaño de los orificios del quemador, los acabados de la superficie y el lugar donde se desarrollaba la combustión.

En 1946 A.G.A. publicó el boletín número 36 [20], cuyo objetivo principal fue el desarrollo de un método que pudiera predecir con confianza qué gases podrían sustituir al gas natural o las mezclas de gases de alto poder calorífico (superior a los 800 BTU/Pie<sup>3</sup>). Además se desarrollaron 3 índices para describir adecuadamente el rendimiento de la llama del quemador, estos índices fueron: el índice de elevación, el índice de retroceso de llama y el índice de puntas amarilla.

En 1950 A.G.A. presenta el boletín número 60 [21], cuyo objetivo es analizar el comportamiento de la llama de manera visual, además se incluye un sistema numérico para ajustar la llama denominado "Códigos de clasificación de llama".

En 1957, Delbourg en Francia utiliza un índice de Wobbe modificado con un coeficiente de descarga del orificio, para definir un área de intercambio y establecer el método de Delbourg [22], el cual es un método gráfico que se basa en definir el área de intercambiabilidad entre gases de una misma familia, para ello se necesita conocer la composición del gas sustituto y calcular los índices de intercambiabilidad (índice de Wobbe y potencial de combustión) para ubicarse en la gráfica. Si el punto se encuentra en el interior de la gráfica y si los índices son inferiores a los valores límites, entonces el gas es considerado como intercambiable con el gas de referencia. En el caso contrario, es necesario alterar la composición del gas sustituto para volverlo intercambiable.

En el Reino Unido, Gilbert y Prigg [23] desarrollan un método que utiliza el número de Wobbe en función de la velocidad de la llama al cual llaman Factor de Weaver [24]. Mientras que en Estados Unidos se utilizan los valores numéricos del índice de Wobbe, en Europa se utilizan ampliamente los métodos gráficos para determinar la intercambiabilidad de gases.

En 1982, Griffiths *et al* [25], presentan un informe en el que proponen rangos de ajustes y límites para la utilización de gases de acuerdo con el rendimiento para que los equipos de combustión funcionen satisfactoriamente.

En 1989 Steinmetz [26, 27], detalla cómo los países de Europa Occidental adoptaron las pruebas a principios de 1970 para un rendimiento basado en dispositivos de ajuste y limitar la composición del gas, Steinmetz compara los resultados de la utilización de algunos métodos desarrollados en Europa y los Estados Unidos que relacionan el funcionamiento de los equipos con la composición del gas combustible.

En la década de los 90 los estudios de intercambiabilidad se centraron en las aplicaciones para gas natural domiciliario como lo demuestran los trabajos de La Asociación Americana del Gas (AGA) [28], Estrada Jr. A.B [29], y Halchuk [30, 31], más adelante en 2001, Halchuck publica su trabajo en el cual describe la incidencia de la calidad del gas para diferentes aplicaciones. De igual manera Johnson *et al* [32], del Instituto para la investigación del gas, en 2003, publican los test de evaluación de los rangos de intercambiabilidad del gas natural y el gas licuado de petróleo vaporizado.

En los últimos años, sobresale el trabajo realizado por Muller *et al*, en 2011 [33], quienes modelaron, validaron y controlaron un sistema industrial de mezclado de gas combustible, y concluyeron que las correlaciones entre los datos de las simulaciones y los de planta, indican que la hipótesis clave, de gases ideales y mezclado uniforme, son razonables.

### **1.3.1 Estudios sobre intercambiabilidad de gases en Colombia.**

En el contexto colombiano los primeros estudios sobre intercambiabilidad de gases se concentran en el sector del transporte vehicular y hallaron el rendimiento de la conversión y el desempeño mecánico de los motores a gas usados en Colombia, debido a la necesidad de dar respuesta a los problemas derivados del programa de reconversión del parque automotriz en 1999 [34].

Cortés y Hernández [35] evaluaron la intercambiabilidad con los gases naturales Guajira y Cusiana y se validó en artefactos de calentamiento de agua, quienes utilizaron en su investigación el método de Dutton y el método de Delbourg, y concluyeron que de acuerdo a las propiedades de combustión e índices de intercambiabilidad dichos gases no son intercambiables.

En julio de 2011, Montaña [36] presenta los problemas de intercambiabilidad de las mezclas de gas natural con gas de refinería del complejo de Barrancabermeja (Ecopetrol), donde evidencia que las mezclas de gases combustibles que se presentan cuando ocurren anomalías en los procesos de refinación, no son intercambiables, Además concluye que cuando las mezclas superan el 6% de composición de Etano- Etileno y 6% de Propano-Propileno, el Índice de Wobbe tiene un comportamiento inestable.

### **1.3.2 Problemas asociados a la combustión debido a la intercambiabilidad de gases**

Durante las investigaciones asociadas al uso de gases combustibles se han encontrado algunos problemas comunes de la combustión, afines con la intercambiabilidad de gases, relacionados con seguridad, fiabilidad de resultados y durabilidad de los aparatos e equipos [37, 38].

*Los asuntos de seguridad de la combustión,* incluyen control de la generación de polución (CO) en aparatos y equipos, sobrecalentamiento de las superficies de los aparatos, y mantenimiento de espacios libres para los materiales combustibles,

riesgos de incendio debido a llamas extendidas, y sobrepresión debido a la ignición retardada.

*Los problemas de la fiabilidad del desempeño*, incluyen estabilidad de llama pobre, que conllevan a cortes debido a la activación de los dispositivos de seguridad en los sobrecalentamientos o empobrecimientos de la llama, escapes de llama o retroceso desde la cabeza del quemador. También incluyen eficiencia reducida debido a los cambios de velocidad de entrada y a los cambios de la altura y forma de la llama relacionados con el intercambio de calor en la superficie, alteración de la capacidad de los equipos y reducida capacidad.

*Los problemas de durabilidad*, incluyen la degradación térmica, corrosión a alta temperatura, fatiga y deformación de los componentes de los equipos, incluyendo los de intercambio de calor, y ensuciamiento debido a la producción de hollín. Pueden conllevar a la declinación progresiva del desempeño de la confiabilidad y la seguridad.

### **1.3.3 Modos de falla de la combustión**

Los modos de falla de la combustión específica están asociados con la mayoría de los problemas anteriores y están relacionados con fenómenos de combustión observables en equipos y aparatos, A continuación se enumeran algunas de estas fallas [37].

### **1.3.4 Generación de contaminantes**

Los contaminantes asociados con los problemas de combustión y con la intercambiabilidad de gases incluyen elevada producción de CO, hollín y NOx.

La generación de CO es una preocupación porque en grandes dosis es un veneno agudo hipóxico y es un problema para los equipos no venteados, o venteados que trabajan con fallas de aireación.

La producción de CO no es evaluada directamente por los índices de intercambiabilidad de gases, con la excepción del Índice Incompleto de Combustión de Weaver [24], el cual permite el desarrollo de límites de índices para desempeño aceptables basados en un cambio de gas combustible. La causa más común del incremento de la producción de CO es la insuficiencia de aire secundario para completar la combustión.

La producción de hollín es más importante en las emisiones de los equipos como una fuente de ensuciamiento de la combustión con el tiempo y disminuye el desempeño de las emisiones totales. La producción de hollín es representada por una serie compleja de reacciones que conllevan a la producción de carbón elemental y sólidos carbonáceos, los cuales pueden no ser visibles bajo circunstancias ordinarias. La producción de hollín es principalmente una función de la combustión a elevadas temperaturas y escasez de oxígeno. La predicción de la formación de hollín es deseable porque la formación y deposición de hollín cambia con el tiempo las características de los equipos de combustión. Como consecuencia de lo anterior, un equipo con llama humeante puede en un punto cercano de su historia de operación no exhibir problemas operacionales. Sin embargo, con el tiempo, la acumulación de hollín y suciedad en las cámaras de combustión, sistemas de venteos y componentes pueden llevar a condiciones operativas peligrosas.

El hollín causado por cambios en el suministro de gas es direccionado a través de varios medios. En el Reino Unido, el Índice de Hollín DUTTON es utilizado para describir las tendencias de los gases para desarrollar hollín. En los Estados Unidos, el Índice de las llamas de puntas amarillas ha sido usado empíricamente para evaluar las llamas que pueden desarrollar hollín.

Las producción de NO<sub>x</sub>, no son caracterizadas directamente como una forma de falla de la combustión. Sin embargo, el desarrollo de aplicaciones de bajas emisiones de NO<sub>x</sub>, ha llevado a incrementar la preocupación acerca de la

sensibilidad al desempeño de NOx de los equipos en respuesta a los cambios del suministro de gas. A través del uso final, la preocupación de las emisiones de NOx, están dominadas por el cumplimiento regulatorio de las aplicaciones de combustión con los límites de emisión de calidad del aire del ambiente.

El Departamento de Industria y Comercio del Reino Unido, (DTI), ha investigado los problemas de la intercambiabilidad de gases entre los años 2003-2005 [39]. El reporte que cubre pruebas de intercambiabilidad de gases de 20 aplicaciones, encontró que mientras el NOx total se incrementó con el aumento del Índice de Wobbe en el gas de suministro, los instrumentos produjeron resultados inconsistentes para la fracción de NO<sub>2</sub> del total de NOx. En algunas aplicaciones, el incremento fue dominado por el NO, una especie altamente reactiva que interactúa con elementos constructores y decae rápidamente. En otras aplicaciones, inclusive en las no aireadas, el NO<sub>2</sub> domina el incremento.

### **1.3.5 Durabilidad de los intercambiadores de calor (hornos y calderas) y sus componentes**

El sobrecalentamiento de los intercambiadores de calor y sus componentes, incluyendo los controles, han sido asociados al sobrefuego de los equipos debido a la introducción de un gas con un valor muy alto de Número de Wobbe. No hay datos disponibles sobre esto y las mediciones del intercambiador de calor y otras medidas de la temperatura de superficie en las pruebas de intercambiabilidad de gas hechas por Sempra Utilities/Southern California Gas Company [15, 37], no lo indican, para los gases analizados.

Sin embargo, las temperaturas elevadas están asociadas con el número de Wobbe de los gases, y la continua operación de los equipos con gases de poder calorífico más alto de lo normal, además sostienen que los daños en los intercambiadores de calor se presentan por deformación y corrosión acelerada.

### **1.3.6 Cambios en la eficiencia**

Se ha sugerido que los cambios composicionales del gas pueden afectar la eficiencia del horno. En la mayoría de los casos, esto debería ser un impacto secundario del cambio del gas suministrado, puesto que los cambios en el calor útil tienden a ser proporcionales al flujo de entrada de gas, y los cambios razonables en composición de los gases combustibles no conducirán al venteo o a la no quema del gas. Por lo que la eficiencia térmica, (energía calorífica saliendo dividido por la energía calorífica entrando), debería permanecer relativamente constante.

Los efectos de segundo orden sobre la eficiencia pueden ser asociados con llamas interactuando ineficientemente con superficies de intercambiadores de calor y otras influencias de cambio de longitud y forma de llama. Una entrada reducida debido a la introducción de un gas con un muy bajo Número de Wobbe puede producir una llama muy corta y una transferencia de calor ineficiente.

Las llamas frías de un gas de bajo Wobbe pueden incluso contribuir a elevar la producción de CO, debido a la insuficiente temperatura en la zona de reacción que promueva la oxidación completa. Gases con muy alto Wobbe impiden el intercambio de calor en la zona exterior y producen una combustión incompleta.

## **1.4 ESTUDIOS SOBRE ÍNDICES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.**

En cuanto a las relaciones del uso eficiente de la energía y el desarrollo sostenible, se han realizado algunos estudios donde se han producido índices en términos de seguridad energética, precio del combustible e impacto económico.

De esta manera surgen los diagramas de Sankey [40], los cuales proporcionan de una manera gráfica información muy valiosa sobre los flujos de energía, las emisiones de CO<sub>2</sub> y los flujos económicos asociados al sector energético.

Otro índice el cual es considerado uno de los más importantes para la industria es el índice de intensidad energética de refinación más conocido como el índice de Solomon [41], el cual mide la eficiencia de una refinería en cuanto al consumo energético, gastos de mantenimiento, costos operativos entre otros. Además es utilizado para comparar diferentes refinerías, si está entre 90-92 la refinería es eficiente.

Un estudio de 2003 [42] realizado en Chile establece una relación entre la eficiencia energética y la eficiencia económica, en donde se desarrollaron unos indicadores con el objeto de dar seguimiento a los cambios en la eficiencia con que los países usan la energía. En este trabajo se utilizaron dos tipos de índices: El índice de intensidad energética (IE) que se define como la razón entre el consumo de energía (Tcal o toneladas de petróleo equivalente) y los indicadores de la actividad económica, normalmente el valor agregado de la rama a evaluar (va), y el índice técnico-económico denominado como consumo específico que relaciona la energía consumida con indicadores de la actividad.

En 2010 la cátedra BP de la Universidad Pontificia de Comillas en España [43] presenta un informe sobre la energía y la sostenibilidad de ese país, en donde se clasifican tres tipos de indicadores; el primero se basa en las variables que condicionan el consumo de energía a nivel global (crecimiento de la población, precio recursos energéticos y las reservas de combustibles agotables), el segundo se basa en las variables a nivel local (la población, la actividad económica, la construcción de infraestructuras, y el clima) y el último indicador se basa en el consumo de energía agregado por sectores y las emisiones de CO<sub>2</sub> que generan el sector energético. Estos índices fueron aplicados en los sectores: Transporte, Industrial, Eléctrico y lo correspondiente al gasto de energía proveniente de los combustibles fósiles.

En Colombia, Ecopetrol también ha implementado índices buscando optimizar el consumo de energía requerido para la generación de vapor y el consumo de

energía eléctrica. En donde desarrollaron el indicador de gestión energética (IGE), el cual mide la relación del consumo de energía en barriles de petróleo equivalentes para procesar un barril de petróleo. La intención de este indicador es disminuir el porcentaje en el consumo de energía, lo cual refleja la gestión. Al optimizar eficiencias se consigue la disminución de los consumos y a su vez los costos [44].

En general los indicadores o índices, tienen como objetivo asegurar la sostenibilidad de la disminución de consumos y costos operacionales energéticos, de tal manera que se pueda optimizar y monitorear el uso de la energía en los diferentes procesos industriales, constituyéndose en una herramienta útil para mejorar la eficiencia de los procesos.

### **1.5 UTILIZACIÓN DEL GAS DE REFINERÍA.**

Recientemente los investigadores se han centrado en el gas de refinería y han estudiado este cambio de combustible como una manera de reducir el costo de la energía, Hsieh analizó la influencia de utilizar un gas de refinería rico en hidrógeno (50-80% mol) en conjunto con aceite combustible en una caldera de media presión, donde se encontró que al ajustar la relación aceite combustible/gas de refinería de 5:1 a 1.5:1, se presenta una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> del 16,4 y 8,2% respectivamente [45], otros estudios se enfocan en la posibilidad de reemplazar el gas natural con el gas de refinería rico en hidrógeno, en donde se analizan las emisiones de NO y CO<sub>2</sub> utilizando diferentes relaciones combustible/gas de refinería rico en hidrógeno en calderas de media y alta presión, cuyos resultados muestran que se puede ahorrar costos en el combustible y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero utilizando el GR [46-48], todas estas investigaciones se basan en el hecho de que el hidrógeno es catalogado como un combustible limpio por su poder calorífico sin la generación de contaminantes o residuos [49], sin embargo no es posible reemplazar totalmente el gas natural con el gas enriquecido en hidrógeno, debido

a su rápida velocidad de reacción, alta inflamabilidad, baja densidad de energía volumétrica y la alta dificultad que se presenta en el almacenamiento [50]. Otro parámetro a analizar con el GR es el exceso de aire, pues afecta tanto a la eficiencia térmica como a los impactos ambientales generados en los hornos [51]. Cuando el exceso de aire es elevado, se incrementa la concentración de  $O_2$  en el área de combustión que conlleva a un aumento de la temperatura de llama, y por tanto una caída de temperatura en el área de radiación (Zona de reacción) que disminuye la eficiencia del horno [52]. La alta temperatura de llama junto con combustión turbulenta en el horno, causa la reacción del oxígeno con el nitrógeno formando  $NO$  (óxido nítrico) y  $NO_2$  (Dióxido de nitrógeno) [53]. De igual forma al emplear bajos excesos de aire se obtiene un incremento en la eficiencia térmica y también una disminución en el consumo de combustible, pero se corre el riesgo de tener mezclas poco íntimas de aire y combustible que pueden ocasionar combustión incompleta [8], por lo cual es necesario determinar el valor óptimo de aire a utilizar en todo proceso combustión.

Sin embargo, las investigaciones mencionadas anteriormente utilizan GR con alto contenido de hidrógeno (50-80%), pero en los procesos petroquímicos dichos gases se producen en menor cantidad, por lo cual este estudio se enfoca en simular varias corrientes de GR con diferentes composiciones, las cuales son recuperadas y alimentadas a un horno de combustión, con el objetivo de evaluar la influencia de usar el GR sobre las propiedades fisicoquímicas de los productos de la combustión, analizando el efecto que dichos gases presentan al ser intercambiados con el gas natural y como este fenómeno afecta los procesos de combustión en los hornos. De esa forma se obtendrá un índice de eficiencia energética que permita hacer seguimiento y monitoreo para el aprovechamiento de los gases combustibles, todo como una estrategia orientada a mejorar la toma de decisiones en cuanto a la intercambiabilidad del gas combustible, obteniendo las condiciones más favorables energéticamente y las condiciones a las cuales se

puede hacer un mejor aprovechamiento de los gases de refinería. Estos resultados de investigación serán aplicables a cualquier industria de refinación.

## **2. HIPÓTESIS.**

Es posible desarrollar un índice de gestión de eficiencia energética para los procesos de combustión, siempre y cuando se logre asociar el efecto de la variación de la composición del gas combustible sobre las propiedades fisicoquímicas con la intercambiabilidad de éstos. Que permita medir, evaluar y monitorear los procesos de combustión; fundamentados en el cumplimiento de la norma internacional de Sistemas de Gestión de la Energía NTC-ISO 50001.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar un índice de gestión para los procesos de combustión de los gases de refinería, que correlacione la eficiencia energética con la composición de acuerdo a las restricciones ambientales y condiciones de proceso.

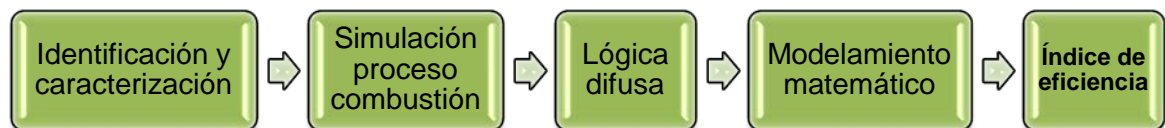
#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Caracterizar físico-químicamente las corrientes que componen la red de gas combustible y seleccionar las posibles mezclas para el caso de estudio.
2. Evaluar el comportamiento de las mezclas de gas en el proceso de combustión mediante la simulación de la combustión de mezclas seleccionadas del gas de refinería.
3. Evaluar la eficiencia energética del proceso de combustión mediante el análisis experimental del comportamiento de las mezclas seleccionadas de gas combustibles, en una cámara de combustión instrumentada de laboratorio.
4. Establecer una correlación entre la eficiencia energética y la composición de gas de refinería de acuerdo a las restricciones ambientales y condiciones de proceso.
5. Seleccionar herramientas de gestión basados en la norma NTC-ISO 50001, que permitan hacer la medición y seguimiento de la eficiencia energética de acuerdo al índice obtenido para los procesos de combustión de los gases de refinería.

## 4. METODOLOGÍA

Con el propósito de encontrar un índice de gestión de eficiencia energética para los procesos de combustión que asocie el efecto de la variación en la composición del gas combustible sobre las propiedades fisicoquímicas con la intercambiabilidad de estos, y teniendo en cuenta las restricciones ambientales y las condiciones de proceso, se estudiaron en primera instancia las variables que afectan el proceso de combustión, seguido de una simulación que permitió establecer los rangos en los cuales trabaja el GN y el GR.

Mediante los resultados obtenidos se obtuvo el índice de eficiencia energética mediante la aplicación de la lógica difusa, posteriormente se utilizaron técnicas numéricas para determinar un modelo matemático, que fue validado comparando los resultados obtenidos de las correlaciones con los resultados de pruebas de combustión realizadas por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP-ECOPETROL), finalmente se desarrolló una herramienta para el cálculo rápido del índice de eficiencia energética. La Figura 2 presenta las etapas de la metodología utilizada.



**Figura 2.** Metodología utilizada para obtener el índice de eficiencia energética.

## **4.1 IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CORRIENTES DE GAS DE REFINERÍA.**

### **4.1.1 Revisión de antecedentes históricos y selección de componentes a evaluar.**

El primer paso para realizar la caracterización de los gases de refinería consistió en la selección de los componentes presentes en el GR, para ello se realizó la revisión de los datos históricos de aproximadamente 150 cromatografías pertenecientes a corrientes de GR provenientes de distintas unidades de una refinería durante un periodo de dos años. Posteriormente se procedió a seleccionar una mezcla representativa del GR, mediante un análisis estadístico realizado por el software Statgraphics, utilizando como criterio base el PCI.

### **4.1.2 Evaluación de propiedades**

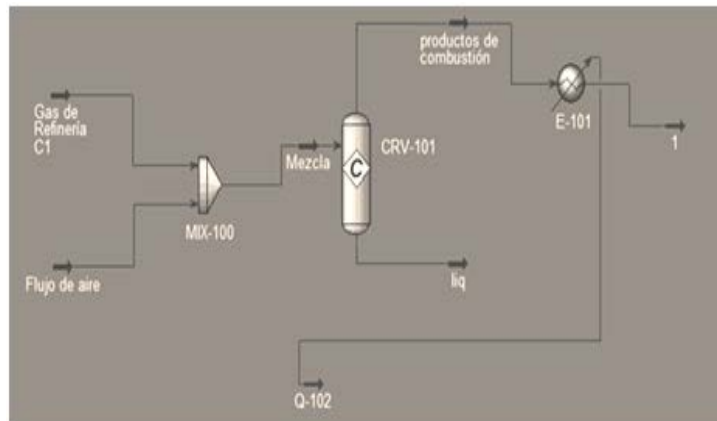
La composición del gas combustible genera impactos significativos sobre la operación y la vida útil de los equipos de combustión (hornos y calderas), pues puede variar de tal forma que modifica el poder calorífico de la mezcla de combustible presentándose un amplio rango que va desde 800-2500 Btu/pie<sup>3</sup>. Para medir el efecto de la composición sobre el proceso de combustión, se estudiaron algunas variables influyentes en el proceso tales como: el poder calorífico inferior, el índice de Wobbe, la temperatura adiabática de llama, exceso de aire, composición de los productos de combustión y la eficiencia del proceso. Todo esto como una herramienta en la toma de decisiones en cuanto al uso del gas de refinería.

Para el cálculo de las propiedades fisicoquímicas de las corrientes de GN, GR y aire se utilizó el software ASPEN HYSYS 2006.5.

## 4.2 SIMULACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

La simulación del proceso de combustión se realizó mediante modelos químicos y termodinámicos usando el software comercial Aspen Hysys 2006.5; se seleccionó la ecuación de estado de Peng Robinson pues es el paquete de fluidos recomendado para aplicaciones en el gas, petróleo y petroquímica, ya que se garantiza la precisión de la misma para una gran variedad de sistemas en un amplio rango de condiciones con alto grado de eficiencia y confiabilidad.

Se utilizó como cámara de combustión un reactor de conversión tipo “batch”. La Figura 3 muestra el esquema utilizado para la simulación.



**Figura 3.** Simulación del proceso de combustión en Aspen Hysys.

En la primera etapa las corrientes de gas combustible (GR o GN) y aire son llevadas a un mezclador con el fin de asegurar una correcta mezcla aire-combustible, entonces la mezcla es enviada al reactor de conversión que se encuentra a presión atmosférica, inicialmente los productos de combustión salen a condiciones adiabáticas, con el fin de obtener la temperatura adiabática de llama, posteriormente es retirado el calor necesario para mantener la temperatura de salida del proceso a 320°C (temperatura promedio de chimenea en la refinería de Barrancabermeja) y de esa manera obtener los productos de combustión a la temperatura de chimenea. Las condiciones de proceso de las corrientes de entrada son mostradas en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Condiciones de los flujos de entrada al proceso

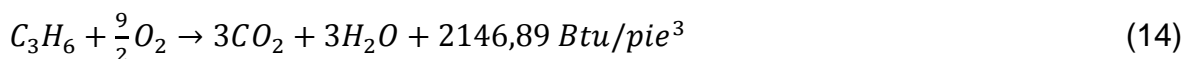
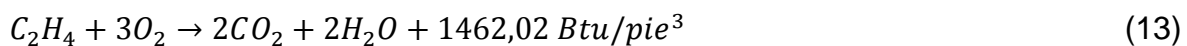
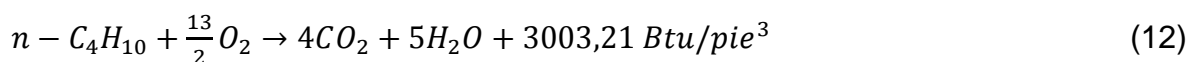
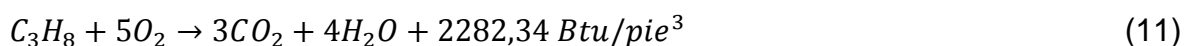
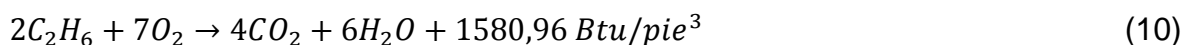
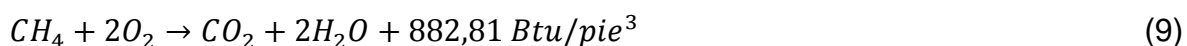
Corriente	Temperatura [°C]	Presión [kPa]
Combustible	32,22	101,4
Aire	32,22	101,4

Fuente: El autor.

Se utilizó un flujo de gas combustible de 1 kmol/h y el flujo de aire fue variado de acuerdo al exceso de oxígeno (%O<sub>2</sub>) desde n=0 %, mínimo o estequiométrico, hasta n=10%, máximo valor reportado en la literatura [6, 47, 52].

#### 4.2.1 Reacciones de combustión.

A continuación se muestran las reacciones linealmente independientes que se dan en el reactor de conversión con su respectivo calor de combustión, para los compuestos más representativos del gas combustible.



Las reacciones y calores de reacción fueron tomadas del manual del ingeniero químico [54].

### 4.3 DESARROLLO DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA MEDIANTE LÓGICA DIFUSA.

Para el desarrollo del índice de eficiencia energética (IE), se utilizó lógica difusa, una metodología de la inteligencia artificial que proporciona una manera simple y elegante de obtener una conclusión a partir de información de entrada incierta, ambigua, incompleta o con alto grado de imprecisión, además de ser muy efectivo en los procesos de toma de decisiones multicriterio [55].

Para la resolución del IE a través de lógica difusa se utilizó un arreglo de tipo Mamdani, se seleccionaron las variables de entrada, las cuales se establecieron de acuerdo al análisis de las propiedades del proceso de combustión del gas natural y el gas de refinería, teniendo en cuenta el efecto que se genera al variar la composición; para cada variable se estableció un rango que se obtuvo de las simulaciones del proceso de combustión realizadas previamente y comprende el gas natural y los gases de refinería estudiados. Finalmente, se procedió a establecer el indicador de eficiencia energética (IE) como la variable de salida, en donde se le dio una función de membresía con 3 niveles a cada una de las variables (entrada y salida), adicionalmente se crearon las reglas difusas para evaluar el comportamiento del índice de eficiencia energética. La Figura 4 representa un esquema general que describe el comportamiento del sistema difuso [56].



Figura 4. Esquema del sistema de lógica difusa.

La construcción del IE por medio de lógica difusa se realizó a través de la herramienta fuzzy logic toolBox perteneciente al software MATLAB 6.5, que facilitó la evaluación del sistema difuso.

#### **4.4 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO PARA EL ÍNDICE DE EFICIENCIA.**

Para el desarrollo de las correlaciones matemáticas necesarias para obtener el índice de eficiencia energética (IE), se partió de un modelo de regresión lineal generalizado de la forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad (16)$$

Donde Y representa la matriz de los datos calculados, mediante la aplicación de la lógica difusa para el índice de eficiencia energética,  $X_1$  representa la matriz de la variable número 1 y  $X_2$  la matriz de la variable número 2 utilizadas durante los ensayos del proceso de combustión. Donde los términos  $\beta_0$  a  $\beta_k$  son parámetros desconocidos y que se calculan mediante el método de mínimos cuadrados.

Para elegir el modelo más adecuado que tenga en cuenta el efecto simultáneo de las variables más influyentes del proceso de combustión sobre el índice de eficiencia energética, se seleccionaron modelos fácilmente linealizables con interacción de variables de primer y segundo grado, así como modelos asintóticos, los modelos se presentan en la Tabla 3 [57].

La construcción del modelo matemático se realizó a través de Microsoft Excel en conjunto con el software MATLAB 6.5, que facilitó la evaluación rápida de los sistemas de ecuaciones.

**Tabla 3.** Modelos de regresión lineal múltiple.

<b>Tipo de modelo</b>	<b>Modelo</b>	<b>Ecuación</b>
<b>Lineal</b>	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$	17
<b>Con interacción de variables</b>	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 X_1 X_2$	18
<b>Con asíntotas simples</b>	$Y = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{X_1} + \beta_2 \frac{1}{X_2}$	19
<b>Asíntotas con interacción</b>	$Y = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{X_1} + \beta_2 \frac{1}{X_2} + \beta_3 \frac{1}{X_1^2} + \beta_4 \frac{1}{X_2^2} + \beta_5 \frac{1}{X_1 X_2}$	20

Fuente: El autor.

Para elegir el modelo más adecuado se procedió a realizar un análisis estadístico de los coeficientes generados en Matlab, en donde se utilizaron los siguientes criterios: el valor cuadrado del coeficiente de correlación “R<sup>2</sup>”, la prueba estadística “P”, el cual evalúa si es o no estadísticamente significativa la mejora que experimenta el sumatorio de residuales al cuadrado al pasar de una ecuación de menos parámetros a otra de más, con un nivel de confianza del 95%; de esa forma si P < 0,05 se acepta el valor del nuevo modelo y si P > 0,05 se sigue con el modelo inicial [58] y la comparación entre los datos generados por el modelo y los obtenidos durante las pruebas de combustión.

#### **4.5 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO.**

La validación del modelo matemático encontrado para el índice de eficiencia energética se realizó con resultados experimentales obtenidos mediante monitoreos realizados por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) a hornos de la

refinería de Cartagena, en donde se evaluaron dos gases combustibles de refinería (Gas A y Gas B), en el caso del gas A fue suministrada la composición molar del combustible, mientras que para el gas B fue suministrado el poder calorífico del gas. Se realizó la evaluación del índice de eficiencia energética para cada uno de los gases y los resultados se compararon con los datos suministrados por los monitoreos.

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **5.1 REVISIÓN DE ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y SELECCIÓN DE COMPONENTES A EVALUAR.**

El primer paso para realizar la simulación del proceso de combustión consistió en la selección de los componentes presentes en el gas de refinería, para ello se realizó la revisión de los datos históricos de aproximadamente 150 cromatografías pertenecientes a corrientes de GR provenientes de distintas unidades de la refinería de Barrancabermeja. Inicialmente se encontraron 16 compuestos (metano, etano, propano, n-butano, l-butano, l-pentano, etileno, propileno, butileno, acetileno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrógeno, oxígeno, Hidrógeno y H<sub>2</sub>S) presentes en el GR, luego de la revisión de históricos.

### **5.2 SELECCIÓN DE UNA MEZCLA REPRESENTATIVA DEL GR.**

Para obtener una mezcla representativa del GR, se procedió a disminuir el número de componentes utilizando como base el poder calorífico inferior (PCI) y se realizó un análisis estadístico de las cromatografías históricas. Para ello se utilizó el software Statgraphics Centuriun XV.II. Los resultados estadísticos permitieron descartar algunos componentes del GR (l-pentano, butileno, acetileno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno) de las mezclas a evaluar. Los criterios utilizados para descartar dichos compuestos fueron:

- 1.** Los compuestos que no se encuentran presentes en la mayoría de las corrientes.
- 2.** Encontrar aquellos compuestos cuyo aporte en concentración a las corrientes es muy bajo (< 1%).
- 3.** Los compuestos que no aportan significativamente al poder calorífico de las mezclas.

### 5.2.1 Criterio número 1.

La Tabla 4 muestra los resultados del primer criterio, en donde se calculó el porcentaje de presencia de un compuesto en el GR, para ello se dividió el número de veces que está presente el compuesto en las corrientes entre el número total de corrientes. De la Tabla se observa que el butileno y el acetileno presentan porcentajes del 0,2 y 2,25 % respectivamente, lo cual representa un porcentaje muy bajo comparado con los demás compuestos los cuales presentan porcentajes superiores al 20%, por tal motivo dichos compuestos fueron descartados de la mezcla representativa.

**Tabla 4.** Porcentaje de presencia de los compuestos en el GR

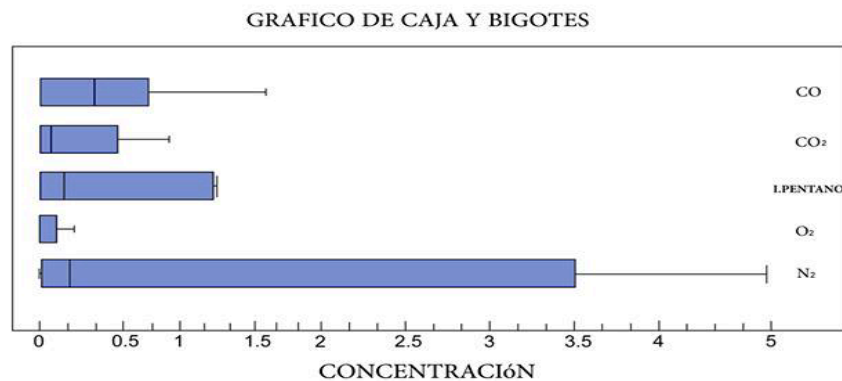
<b>Compuesto</b>	<b>Porcentaje en GR</b>	<b>Compuesto</b>	<b>Porcentaje en GR</b>
Metano	92,30	Butileno	0,2
Etano	92,30	Acetileno	2,25
Propano	82,05	CO	56,41
n-butano	71,79	CO <sub>2</sub>	53,84
I-butano	74,71	Nitrógeno	76,92
I-pentano	66,66	Oxígeno	35,99
Etileno	76,92	Hidrógeno	71,79
Propileno	71,79	H <sub>2</sub> S	20,51

Fuente: El autor.

### 5.2.2 Criterio número 2.

La Figura 5 muestra los resultados del segundo criterio, en el cual se muestra el diagrama de caja y bigotes para los siguientes compuestos: nitrógeno, oxígeno, I-pentano, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Dicho gráfico muestra el rango en el cual oscila la concentración de cada compuesto del GR y la zona en la cual se presenta la mayor densidad de datos. Los resultados mostraron que los compuestos: oxígeno, I-pentano, monóxido de carbono y dióxido de carbono

presentan la mayor densidad de datos a concentraciones menores al 1%, por lo cual no se consideran significativos comparados con los demás compuestos del GR, por consiguiente dichos compuestos fueron descartados de la mezcla representativa.



**Figura 5.** Gráfico de caja y bigotes para el CO, CO<sub>2</sub>, l-pentano, O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>.

### 5.2.3 Criterio número 3.

Para el criterio final se tuvieron en cuenta las contribuciones de los compuestos al PCI de la mezcla. La Figura 6 presenta el PCI de cada compuesto, en donde se observa que el nitrógeno tiene un PCI de cero, ya que es un componente no combustible y por ello no aporta calor a la reacción. Por tal motivo dicho compuesto fue eliminado de la mezcla representativa. En el caso de los compuestos: n-butano y l-butano se procedió a seleccionar un solo compuesto representativo de esta familia de gases, pues presentan el mismo PCI y la misma reacción de combustión.

Finalmente la mezcla representativa de GR a evaluar, consta de 8 compuestos (metano, etano, propano, n-butano, etileno, propileno, hidrógeno y H<sub>2</sub>S), los cuales son los más influyentes en el proceso de combustión del GR.

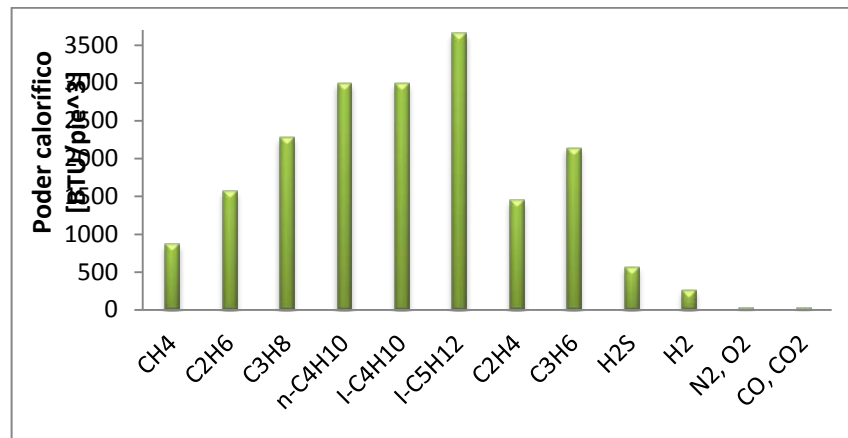


Figura 6. Poder calorífico inferior de los compuestos del gas de refinería.

### 5.2.4 Selección de las mezclas a evaluar

Para la selección de las mezclas a evaluar se partió de la mezcla representativa (8 compuestos), se realizó el análisis estadístico y se utilizó un algoritmo para obtener la composición de cada componente.

### 5.2.5 Análisis estadístico.

El análisis estadístico suministrado por Statgraphics Centurion XV.II, permitió establecer mediante un diagrama de caja y bigotes el rango en el cual oscila la composición de cada compuesto del GR, el cual es mostrado en la Figura 7. Dicho rango permitió establecer el límite inferior y superior (concentración molar) para cada uno de los compuesto representativos.

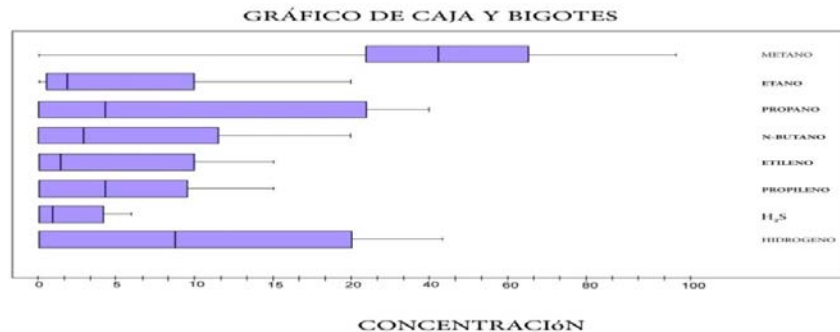


Figura 7. Gráfico de caja y bigotes para los compuestos de la mezcla representativa del gas de refinería.

### 5.2.6 Descripción del algoritmo para determinar las mezclas representativas de GR.

Para obtener la composición de las mezclas representativas se utilizó un algoritmo en donde se varió la composición de cada compuesto desde su límite inferior hasta su límite superior basados en la Figura 7. En donde se encontraron aproximadamente 10200 combinaciones. Posteriormente se tuvieron en cuenta los siguientes criterios.

El poder calorífico inferior, en un rango entre 800-2500 Btu/pie<sup>3</sup>, ecuación (21).

$$PCI = \sum y_i PCI_i \quad (21)$$

La ecuación de normalización, Ecuación (22).

$$\sum y_i = 1 \quad (22)$$

En este caso se encontraron 281 mezclas que satisfacen los criterio, además los resultados permitieron establecer 4 grupos intermedios de acuerdo al rango de PCI establecido previamente, donde no se presentaron mezclas con PCI por encima de 1850 Btu/pie<sup>3</sup>. Los resultados de los grupos se muestran en la Tabla 5. De cada grupo se seleccionó una mezcla representativa de GR, las cuales son mostradas en la Tabla 6.

**Tabla 5.** Rangos de poder calorífico utilizados para la selección de los grupos.

Rango	PCI [BTU/pie <sup>3</sup> ]
Bajo	800-1000
Medio	1000-1400
Medio-Alto	1400-1700
Alto	1700-1850

Fuente: El autor.

**Tabla 6.** Mezclas combustibles representativas del Gas natural y el gas de refinería.

Tipo gas	GN	C1	C2	C3	C4
CH <sub>4</sub>	97	55	70	25	35
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1	10	0	8	3
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	0	16	25	35
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0	4	5	10	12
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,5	5	3	10	7
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0,5	2	0	5	8
H <sub>2</sub> S	0	4	1	2	0
H <sub>2</sub>	0	20	5	15	0
PCI	<b>903</b>	<b>955</b>	<b>1200</b>	<b>1530</b>	<b>1800</b>

Fuente: El autor.

Finalmente se obtuvieron 4 mezclas representativas del GR (C1, C2, C3 y C4) y una de GN, las cuales abarcan los rangos de composición que se presentan en una refinería, dichas mezclas constituyen el inicio de esta investigación.

### 5.3 EVALUACIÓN DE PROPIEDADES.

Inicialmente la caracterización fisicoquímica de los gases de refinería implicó determinar algunas propiedades como: el peso molecular, densidad, densidad relativa y el poder calorífico de las mezclas representativas. La Tabla 7 presenta las propiedades fisicoquímicas que se calcularon inicialmente.

En la Tabla 7 se observa que las propiedades tales como la densidad, densidad relativa y viscosidad aumentan para los casos del GR respecto al GN, por lo cual el gas combustible tendrá condiciones diferentes a las establecidas en el diseño de los equipos, debido al efecto que genera la variación en la composición. En el caso de la densidad, ésta afecta de manera directa la densidad relativa que a su vez afectará el Índice de Wobbe y las condiciones de intercambiabilidad.

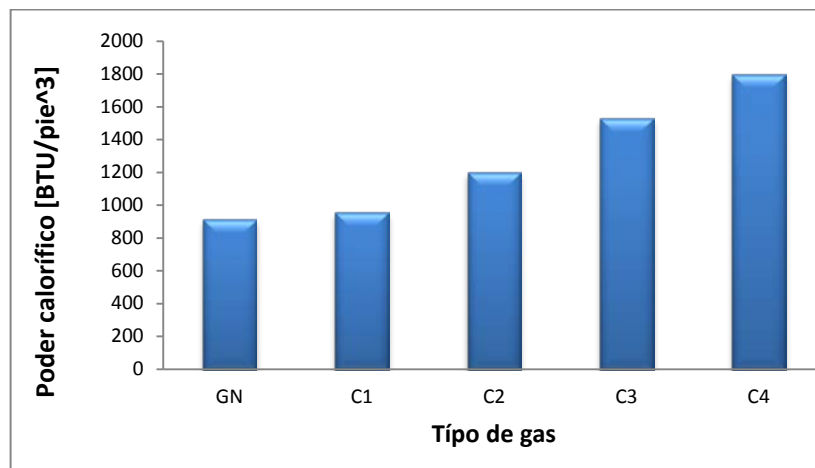
**Tabla 7.** Propiedades fisicoquímicas de las mezclas representativas.

Gas	Propiedad fisicoquímica			
	Peso Molecular	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Densidad relativa	Viscosidad [cP]
GN	16,6539	0,6662	0,5152	1,15E-02
C1	18,166	0,7269	0,5622	1,18E-02
C2	22,4749	0,9007	0,6966	1,12E-02
C3	29,1462	1,1711	0,9057	1,07E-02
C4	34,2561	1,3803	1,0675	9,76E-03

Fuente: El autor.

### 5.3.1 Efecto de la composición del gas combustible (GR) sobre el poder calorífico de la mezcla.

La Figura 8 muestra la variación del poder calorífico inferior que se presenta al utilizar los 4 tipos de GR a estudiar, calculados mediante la ecuación (2). Se utilizó un rango de PCI entre [800-2000 BTU/pie<sup>3</sup>].



**Figura 8.** Poder calorífico inferior de las mezclas combustibles de GR.

El poder calorífico de un combustible depende netamente de su composición, afecta el rendimiento del horno, incluyendo las características de la combustión (longitud de la llama, estabilidad de la llama y temperatura), eficiencia térmica y las emisiones, Por lo tanto es un parámetro de vital importancia en el estudio de la combustión [59]. Como se observa en la Figura 8, se puede tener un amplio rango en el poder calorífico del GR, donde el GN oscila entre 850-1000 Btu/pe<sup>3</sup>, así mismo encontramos GR con PCI entre los 1000-1500 Btu/pe<sup>3</sup>, los cuales presentan alto contenido de metano pero se incrementan hidrocarburos como el etano, etileno e hidrógeno. También se encuentran GR con PCI superior a los 1500 Btu/pe<sup>3</sup>, en los cual se presenta bajo contenido de metano, pero se tienen altas concentraciones de propano y butano. De esa forma, se tiene una amplia gama de GR, el cual es utilizado como combustible en las refinerías, de esa manera se hace importante validarlos teniendo en cuenta su intercambiabilidad y los impactos que generan al utilizarse como combustibles.

#### **5.4 SIMULACIÓN DEL PROCESO.**

Cuando se realiza el estudio de la combustión del gas de refinería, se debe tener en cuenta, como primera medida las condiciones en las cuales se lleva a cabo el proceso utilizando como combustible el gas natural y los impactos que genera en las principales variables del proceso de combustión (temperatura adiabática de llama, % exceso de aire, Índice de Wobbe, eficiencia y emisiones de CO<sub>2</sub>), Por tal motivo, se realizó la simulación de 5 corrientes reales de GN con un intervalo de metano entre 90-98%. La Tabla 8 presenta la composición de los gases naturales analizados.

En la Tabla 8 se observa que el gas natural no contiene compuestos como el Hidrógeno, H<sub>2</sub>S y CO, los cuales son comúnmente encontrados en el GR. De la misma forma compuestos como el etileno, iso-butano, iso-pentano, n-butano, oxígeno, propano y propileno no superan el 1% en composición, mientras que en el GR se puede encontrar hasta un 10 % o superior como el caso del propano. En

cuanto al PCI prácticamente no se observan fluctuaciones pues la variación es muy poca (857-896 BTU/pie<sup>3</sup>), por lo cual se favorece el proceso de combustión, en cuando el Índice de Wobbe se da la misma tendencia (1195-1211 BTU/pie<sup>3</sup>) pues este depende directamente del poder calorífico. Así, de acuerdo a los resultados anteriores se estableció un rango de trabajo para el gas natural en este caso IW [1100-1300 Btu/pie<sup>3</sup>].

**Tabla 8.** Composición de los gases naturales utilizados en el caso de estudio.

	<b>GN1</b>	<b>GN2</b>	<b>GN3</b>	<b>GN4</b>	<b>GN5</b>
CO <sub>2</sub>	0,820	0,710	0,060	0,020	0,000
Etano	6,030	5,150	0,650	0,840	0,400
Etileno	0,003	0,240	0,040	0,060	0,000
H <sub>2</sub> S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Hidrógeno	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Iso-Butano	0,060	0,030	0,040	0,020	0,010
Iso-Pentano	0,143	0,080	0,020	0,020	0,110
Metano	90,663	92,700	93,310	97,080	98,300
CO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N-Butano	0,113	0,060	0,000	0,000	0,000
Nitrógeno	1,430	0,600	3,100	1,700	1,200
Oxígeno	0,245	0,000	0,000	0,000	0,000
Propano	0,475	0,430	0,234	0,180	0,060
Propileno	0,005	0,000	2,550	0,060	0,020
<b>PCI</b>	<b>894,76</b>	<b>896,33</b>	<b>874,46</b>	<b>857,26</b>	<b>859,57</b>
<b>Índice</b>					
<b>Wobbe</b>	<b>1211,75</b>	<b>1226,73</b>	<b>1195,79</b>	<b>1201,01</b>	<b>1209,66</b>
<b>[BTU/pie<sup>3</sup>]</b>					

Fuente: Ecopetrol.

#### 5.4.1 Efecto de la composición del gas natural sobre la temperatura adiabática de llama y la eficiencia del proceso.

En las Figuras 9 y 10, se muestra la variación de la temperatura adiabática de llama y la eficiencia en función del exceso de aire para cada uno de los gases naturales de estudio.

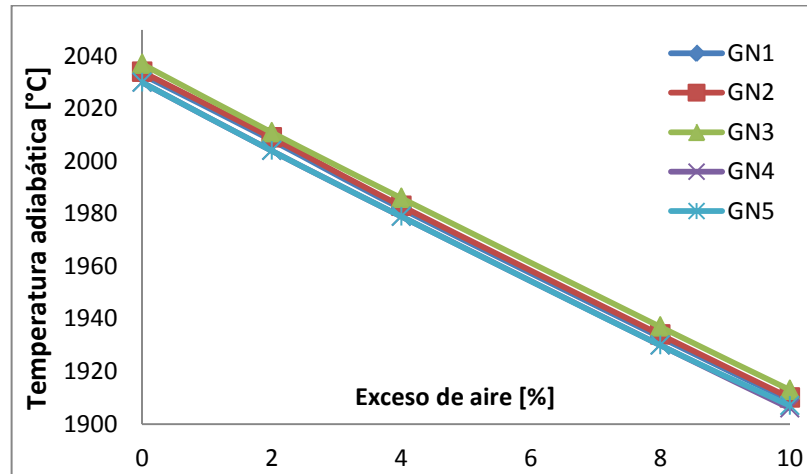


Figura 9. Efecto de la composición del gas natural sobre la temperatura adiabática de llama a diferentes excesos de aire.

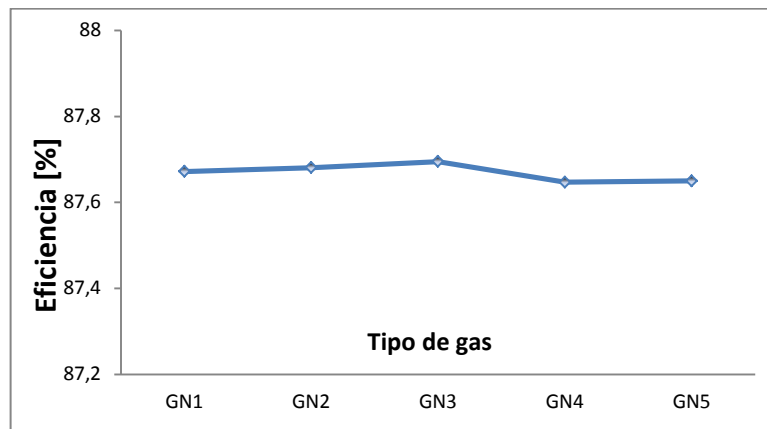


Figura 10. Efecto de la composición del gas natural sobre la eficiencia del proceso a diferentes excesos de aire.

En la Figura 9 se observa que la temperatura adiabática de llama a un exceso de aire constante prácticamente no varía al utilizar los diferentes gases naturales a

pesar de la diferencia en sus concentraciones, por lo que no se presentarán fluctuaciones y se favorecerá el proceso de combustión. De igual manera se observa que la temperatura está comprendida entre 1900 y 2040 °C para un exceso máximo de aire del 10%, de esa forma se estableció un rango de temperatura para el gas natural de [1900-2040 °C].

De la misma forma en la Figura 10 se observa que la eficiencia del proceso al utilizar los diferentes gases naturales es prácticamente constante pues está comprendida entre 87,6 y 87,7%, debido a que las principales variables que afectan la eficiencia como el poder calorífico, índice de Wobbe y temperatura adiabática de llama no presentan fluctuaciones ni diferencias apreciables al variar el gas natural. Los resultados obtenidos hasta ahora para el gas natural conducen a identificar los intervalos en los cuales trabaja el gas natural y las condiciones que debe emular el gas de refinería para considerarse intercambiable o bien un buen combustible para los procesos petroquímicos que se desarrollan en las refinerías.

#### **5.4.2 Simulación del gas de refinería.**

Para identificar los intervalos y condiciones en los cuales trabaja el GR, se realizó la simulación del gas de refinería, para ello se tomaron 4 corrientes representativas de GR obtenidas previamente, con PCI entre 800Btu/ft<sup>3</sup> y 2000 Btu/ft<sup>3</sup> (C1, C2, C3 y C4) y una corriente de gas natural típico Colombiano, (Tabla 6). En donde se analizan los efectos de la composición del gas combustible sobre las características de la combustión, evaluando: índice de wobbe, aire teórico, temperatura adiabática de llama, eficiencia, concentración de CO<sub>2</sub> y vapor de agua.

#### **5.4.3 Índice de Wobbe**

El índice de Wobbe se calculó por medio de la ecuación (8). Ya que dicho índice tiene en cuenta el efecto de la composición y el PCI. Se puede tener dos combustibles con diferentes composiciones, y PCIs, que puedan tener el mismo

valor en el IW, por tanto presentarían características similares para la combustión y de esa manera se considerarían intercambiables.

En la Tabla 9 se observa que el GN y C1 presentan prácticamente el mismo índice de Wobbe, por lo cual se considerarían intercambiables, en el caso de C2, C3 y C4, sus IW difieren totalmente respecto al del GN por lo no se deben considerar como sustitutos del GN. Sin embargo, dichos gases son utilizados comúnmente en las refinerías, por consiguiente se analizará el efecto de dicho gases sobre la combustión. De igual forma se observa que el IW para el GR varía entre 1202-1644 Btu/pie<sup>3</sup>, por lo que se procedió a establecer un rango de trabajo para el índice de Wobbe del gas de refinería, en este caso el IW debe estar entre [1300-1800 Btu/pie<sup>3</sup>].

**Tabla 9.** Índice de Wobbe de GR.

<b>Gas</b>	<b>IW [Btu/pie3]</b>
GN	1271,9
C1	1273,7
C2	1437,7
C3	1607,6
C4	1742,4

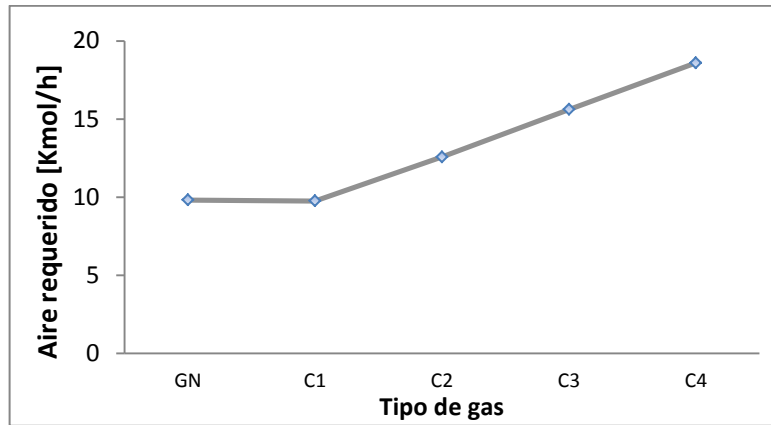
Fuente: El autor.

#### **5.4.4 Influencia de la composición del GR sobre el exceso de aire.**

La cantidad de aire teórico necesario para garantizar la combustión completa para el GN y el GR es calculado mediante la ecuación (23).

$$A_0 = \frac{1}{0,21} (2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} + 3C_2H_4 + 4,5C_3H_6 + 0,5H_2) \quad (23)$$

Donde CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> y H<sub>2</sub>, son la fracción molar de cada compuesto en el gas combustible.



**Figura 11.** Aire teórico requerido por el GR.

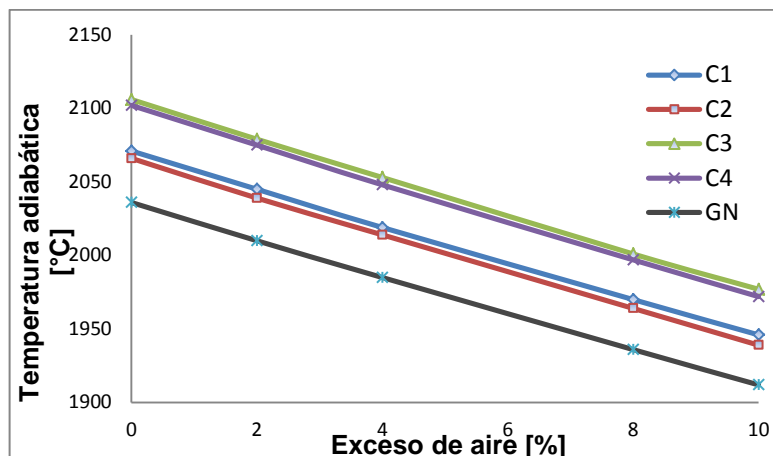
En la Figura 11 se observa que para 1 kmol de GN es necesario suministrar 9,82 kmol de aire, al realizar el cambio de combustible se observa que C1 requiere una cantidad menor al GN (1%), debido a la adición de (20%), tal como reporta Lee C.H *et al* [51], pues dicho componente disminuye la cantidad de aire ya que requiere 0,5 mol de oxígeno por mol de combustible, mientras que para C2, C3 y C4 se presenta un aumento del 28, 59 y 89% en la cantidad de aire, respecto al GN, dicho aumento se presenta porque estos gases poseen la mayores concentraciones de propano, butano y propileno, que de hidrógeno acuerdo a las reacciones de combustión (11,12,14), necesitan mayor cantidad de moles de oxígeno por mol de combustible (5 para el propano, 6,5 para el butano y 4,5 para el propileno) para asegurar la combustión completa comparado con el metano (principal componente del GN) que solo necesita 2 mol de oxígeno. Por tanto la presencia de hidrocarburos de alto peso molecular en el GR, incrementa la cantidad de aire requerido para la combustión y de ese modo, se corre el riesgo de presentarse combustión incompleta.

#### **5.4.5 Influencia de la composición del GR sobre la temperatura adiabática de llama.**

La Figura 12 muestra la variación de la temperatura adiabática de llama en función del exceso de aire para cada clase de GR y para el GN. Se observa que la

máxima temperatura se obtiene para 0% de exceso de aire, la cual corresponde a la condición estequiométrica para cada uno de los gases, tal como se reporta en la literatura [60]. De igual forma, se observa que a un mismo exceso de aire (0%) la temperatura adiabática del GN es de 2036 °C, al usar el GR se obtienen temperaturas adiabáticas superiores que van desde 2066 hasta 2106 °C. Estas altas temperaturas, hacen que en la zona de reacción se presente combustión a alta temperatura (>1300 °C), la cual favorece los mecanismos de formación del NOx térmico, pues a estas temperaturas, el NOx es iniciado principalmente por la formación de tres radicales libres: nitrógeno, oxígeno y OH, quienes provienen de la oxidación del nitrógeno circundante bajo el calor liberado durante la combustión, y reaccionan con las moléculas presentes en el aire, llevando a una rápida formación de NOx [46], además se debe tener en cuenta que las emisiones de NOx aumentan exponencialmente con la temperatura [46]. De igual forma se ha encontrado que las altas temperaturas influyen sobre la vida útil de los hornos, Ul-Hamid *et al*, mostraron que al exponer el material excesivamente a altas temperaturas (superiores a 900 °C), se presentan grietas en la superficie de los tubos como resultado de la aceleración de la carburación por la temperatura [61]. Así mismo se ha encontrado que en los procesos petroquímicos la causa principal de las fallas en los tubos se presenta por corrosión a alta temperatura, pues se genera: oxidación, sulfidación, carburación y formación de polvo metálico [62].

Los resultados también muestran que la temperatura no aumenta directamente con el poder calorífico del gas, pues la máxima temperatura adiabática se obtiene al utilizar C3 [1530 BTU/pie<sup>3</sup>].



**Figura 12.** Efecto del exceso de aire sobre la temperatura adiabática de llama.

En la Figura 12 también se observa que al aumentar el exceso de aire, la temperatura adiabática de llama disminuye linealmente a una razón de 12,37 °C por unidad de aire, por lo tanto el exceso de aire a utilizar no debe ser alto (> 10%) pues disminuye drásticamente la temperatura causando una disminución en la eficiencia del proceso [8], este resultado es similar al reportado por Nabi [63], quien afirma que para motores de combustión, al incrementar el contenido de aire en el combustible se disminuye linealmente la temperatura adiabática de llama, logrando así una disminución en las emisiones de NO<sub>x</sub>. De ese modo el exceso de aire debe ser mínimo pero se debe asegurar combustión completa.

Los resultados muestran que el uso del gas de refinería ocasiona un aumento considerable en la temperatura adiabática de llama que a su vez conlleva a un incremento súbito en los gases de combustión que obligará a un reajuste de los parámetros de la combustión para mantener la eficiencia, configuración de llama y la temperatura de proceso. Finalmente se estableció un rango de trabajo para el gas de refinería T [2040-2150 °C].

#### 5.4.6 Influencia de la composición del GR sobre los productos de combustión.

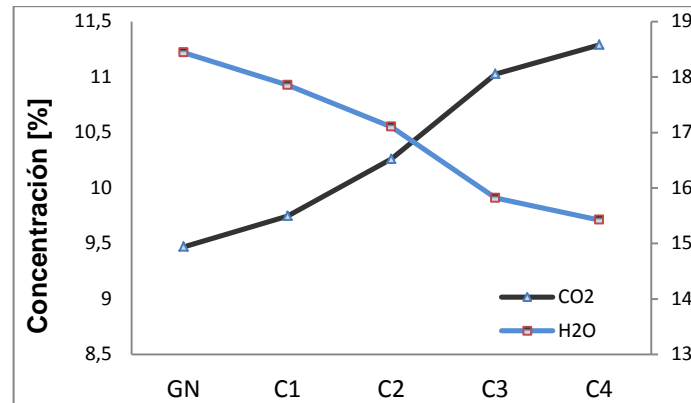


Figura 13. Efecto del GR sobre la composición de los productos de combustión.

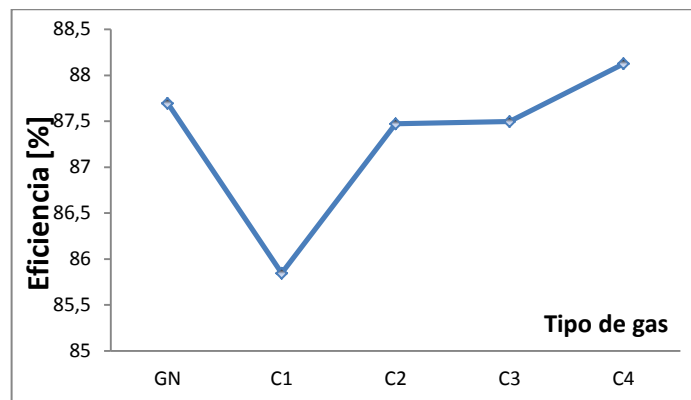
En la Figura 13 se muestra la cantidad de  $\text{CO}_2$  y vapor de agua generado por la combustión completa de los gases estudiados (GN y GR) para un exceso de aire del 2%. Se observa que la concentración molar de  $\text{CO}_2$  aumenta al utilizar el gas de refinería, desde 9,4% hasta 11,3% respecto al GN, lo cual significa un aumento en la generación de emisiones de gases de efecto invernadero. Este aumento en la concentración de  $\text{CO}_2$  se presenta debido al alto contenido de propano y butano en el GR, pues dichos hidrocarburos emiten más  $\text{CO}_2$  que el metano, tal como muestran las reacciones de combustión (9-15), por tanto a mayor contenido de propano y butano en el GR se generarán mayores emisiones de  $\text{CO}_2$ , convirtiéndose en una desventaja ambiental.

#### 5.4.7 Influencia de la composición GR sobre la eficiencia del proceso.

En la Figura 14 se muestra la variación de la eficiencia del proceso de combustión en función del tipo de gas (GR y GN) utilizado, para un exceso de aire del 2%. Se observa que la eficiencia disminuye respecto al GN para los gases C1, C2 y C3, donde C1 presenta una disminución significativa del 2%, atribuido a la presencia de hidrógeno en el combustible, Resultado similar al reportado por Lee [51] quien encontró que al sustituir gradualmente el GN por un gas de refinería con un

contenido de hidrógeno del 60%, la eficiencia disminuía a medida que se aumentaba el contenido de GR (0-100%), desde 91.4% hasta 90.9%, adicionalmente el incremento en el contenido de hidrógeno en el combustible aumenta la tasa de combustión de los hidrocarburos y por lo tanto reduce el tiempo total de retención del combustible en el horno [64]. Esto se traduce en una menor absorción de calor en el horno, más lenta transferencia de calor en la zona de radiación, longitud de llama más corta y el aumento de la temperatura adiabática de llama.

En el caso de C2 y C3, la disminución de la eficiencia es muy baja, por lo cual dichos gases no generarían impactos negativos sobre ésta. Finalmente en el caso de C4 se logra un aumento del 0,4 %, debido a la presencia de hidrocarburos de alto poder calorífico (propano y butano) y a la ausencia de hidrógeno, sin embargo tanto el propano como el butano presentan altos poderes caloríficos por lo que altas concentraciones de dichos combustibles generarían altas temperaturas adiabáticas de llama, generando combustión a alta temperatura y los problemas que se describieron anteriormente.



**Figura 14.** Efecto del GR sobre la eficiencia del proceso.

Al finalizar el análisis del comportamiento de las propiedades de combustión del gas natural y el gas de refinería se encontró que efectivamente se presentan cambios significativos al utilizar el GR producto de la variación en la composición.

De igual forma los resultados obtenidos a través de la simulación, conducen a identificar las variables de influencia más relevantes en el proceso de combustión del GR, donde se encontraron los rangos de trabajo del GN y el GR para las variables más influyentes en el proceso, en este caso el índice de Wobbe y la temperatura adiabática de llama. El índice de Wobbe se seleccionó porque tiene en cuenta el poder calorífico de la mezcla combustible, que a su vez depende netamente de la composición y es considerado el criterio universal de intercambiabilidad, mientras que la temperatura adiabática de llama, afecta la eficiencia, las emisiones de gases contaminantes y es considerado un parámetro de integridad de equipo, pues el control de esta determina el daño en los equipos [56]. Finalmente con estas variables de influencia se procedió a plantear una aproximación que prediga el comportamiento del GR en los procesos de combustión a través de un índice de eficiencia energética. La Tabla 10 muestra los rangos de trabajo obtenidos para el gas natural y el gas de refinería.

**Tabla 10.** Rangos del Índice de Wobbe y temperatura adiabática de llama utilizados para el cálculo del índice de eficiencia energética.

<b>Tipo de gas</b>	<b>Gas natural</b>	<b>Gas de Refinería</b>
<b>Índice de Wobbe [BTU/pe<sup>3</sup>]</b>	1100-1300	1300-1800
<b>Temperatura adiabática de llama [°C]</b>	1900-2040	2040-2150

Fuente: El autor.

## **5.5 ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA MEDIANTE LÓGICA DIFUSA.**

De acuerdo al sistema difuso utilizado para las variables de entrada (Índice de Wobbe y Temperatura adiabática de llama), se definieron las funciones de membresía con sus respectivos niveles: bajo, medio y alto, representando el estado de cada componente y su impacto sobre el índice de eficiencia energética. En donde los niveles bueno para el índice de Wobbe y normal para la temperatura

adiabática de llama emulan al gas natural o las mezclas combustibles con composición similar a este. De la misma, forma los niveles regular y alta emulan las mezclas combustibles de gas de refinería que presentan condiciones intermedias y podrían ser usadas como sustituto del gas natural, por último los niveles bajo y muy alta, representan las mezclas que poseen las condiciones menos favorables para el proceso de combustión, pues no se consideran intercambiables con el gas natural o generarán temperaturas demasiado elevadas y por consiguiente los problemas asociados a dicho fenómeno. La Tabla 11 muestra las características de cada variable mientras que la Tabla 12 presenta los niveles utilizados para cada función.

**Tabla 11.** Características de las variables a utilizar en lógica difusa.

<b>VARIABLE</b>	<b>TIPO</b>	<b>RANGO</b>	<b>FUNCIÓN DE MEMBRESIA</b>
<b>Índice de Wobbe [BTU/pie<sup>3</sup>]</b>	Entrada	1100-1800	Gauss
<b>Temperatura [°C]</b>	Entrada	1900-2150	Trapezoidal
<b>Índice de eficiencia</b>	Salida	0-10	Trapezoidal

Fuente: El autor.

**Tabla 12.** Niveles utilizados por las variables a utilizar en lógica difusa.

<b>Índice de Wobbe</b>	Bueno 1100-1300	Regular 1300-1500	Bajo 1500-1800
<b>Temperatura</b>	Normal 1900-2040	Alta 2040-2100	Muy alta 2100-2150
<b>Índice de eficiencia</b>	Bueno 7-10	Medio 5-7	Bajo 0-5

Fuente: El autor.

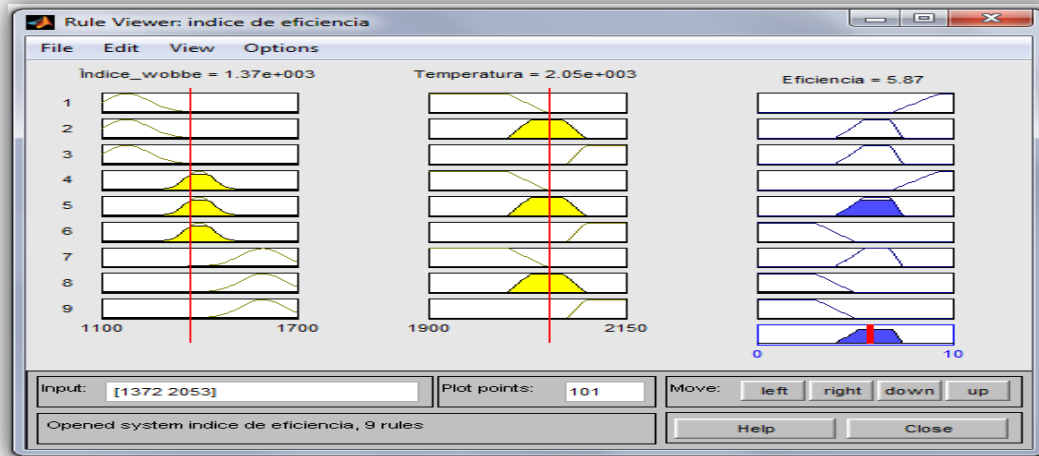
Las funciones de membresía fueron seleccionadas de acuerdo al grado de pertenencia deseado, en donde se seleccionó la función trapezoidal para la temperatura ya que esta presenta un comportamiento lineal en los GR analizados, mientras que en el caso del índice de Wobbe se seleccionó una función de gauss, ya que este presenta un comportamiento exponencial.

Luego de introducir cada una de las variables con sus respectivas características se adicionaron un total de 9 reglas difusas las cuales permiten definir el sistema y tienen en cuentas todas las interacciones posibles entre las variables de entrada y su efecto sobre el índice de eficiencia. La Tabla 13 presenta las reglas utilizadas para el cálculo de índice de eficiencia energética mientras que la Figura 15 presenta los resultados del comportamiento del sistema ante cualquier cambio en las variables de entrada y su efecto sobre el índice de eficiencia.

**Tabla 13.** Reglas difusas utilizadas para el cálculo del índice de eficiencia energética.

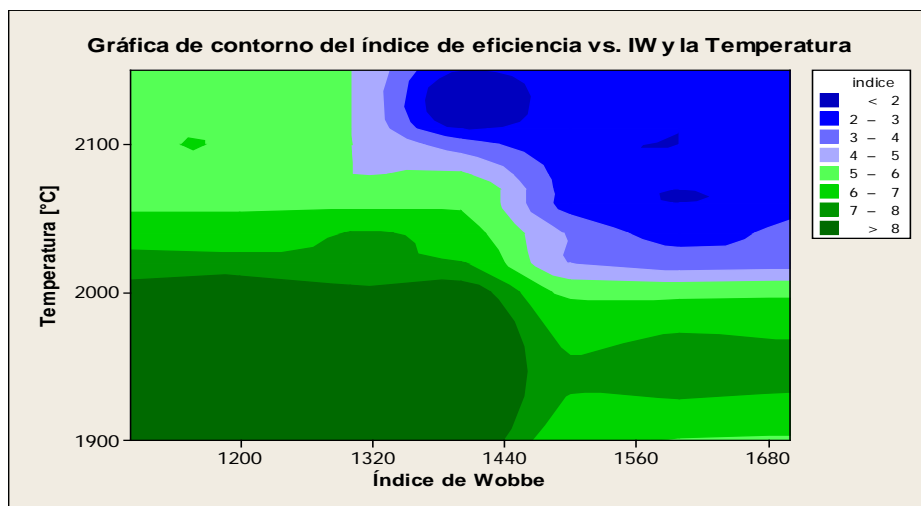
<b>Regla</b>		<b>Índice de Wobbe</b>		<b>Temperatura</b>	<b>Índice de eficiencia energética</b>
<b>1</b>	Si	Bueno	Y	Normal	Bueno
<b>2</b>	Si	Bueno	Y	Alta	Regular
<b>3</b>	Si	Bueno	Y	Muy Alta	Bajo
<b>4</b>	Si	Regular	Y	Normal	Bueno
<b>5</b>	Si	Regular	Y	Alta	Regular
<b>6</b>	Si	Regular	Y	Muy Alta	Bajo
<b>7</b>	Si	Malo	Y	Normal	Regular
<b>8</b>	Si	Malo	Y	Alta	Bajo
<b>9</b>	Si	Malo	Y	Muy Alta	Bajo

Fuente: El autor.



**Figura 15.** Comportamiento del índice de eficiencia por medio de lógica difusa en Fuzzy logic Toolbox en Matlab.

A partir de la lógica difusa se obtuvo una matriz de datos para el índice de eficiencia en función de las variables de entrada y una gráfica de contorno, en donde  $X_1$  representa el índice de Wobbe y  $X_2$  la temperatura adiabática de llama. La Tabla 14 presenta la matriz de datos obtenida mediante lógica difusa mientras que la Figura 16 presenta la gráfica de contorno del índice de eficiencia en función de las variables de entrada.



**Figura 16.** Gráfica de contorno del índice de eficiencia vs el índice de Wobbe y la temperatura adiabática de llama.

**Tabla 14.** Matriz de datos obtenida mediante lógica difusa a través de Fuzzy logic Toolbox en Matlab.

<b>X<sub>1</sub></b>	<b>X<sub>2</sub></b>	<b>IE</b>	<b>X<sub>1</sub></b>	<b>X<sub>2</sub></b>	<b>IE</b>
1100	1900	9,71	1400	2070	4,82
1100	2000	8,5	1400	2100	3,48
1100	2040	6,75	1400	2150	2,01
1100	2100	5,85	1500	1900	6,23
1100	2150	5,85	1500	2000	5,76
1200	1900	8,95	1500	2040	3,86
1200	2000	8,95	1500	2100	2,29
1200	2040	6,45	1500	2150	2,29
1200	2100	5,9	1600	1900	5,92
1200	2150	5,92	1600	2000	5,67
1300	1900	8,62	1600	2040	2,58
1300	2000	8,18	1600	2100	2,00
1300	2040	7,02	1600	2150	2,00
1300	2100	5,01	1700	1900	5,81
1300	2150	5,01	1700	2000	3,87
1400	1900	8,9	1700	2040	3,59
1400	2000	8,59	1700	2100	2,33
1400	2040	6,46	1700	2150	0,60

Fuente: El autor.

En la Figura 16 se observa que los máximos valores del IE (>8) se presentan en la zona de índice de Wobbe menor de 1440 BTU/pie<sup>3</sup> y temperatura menor a 2040 °C, la cual corresponde al rango en el cual se encuentra el gas natural y los gases que pueden presentar un comportamiento en la combustión similar al del gas natural, de igual forma se presenta una zona azul en la cual el IE es menor de 4 y se presenta a índices de Wobbe y temperatura elevados, por lo que los gases con un IE en esta zona no son aptos para ser utilizados como combustible pues no

satisfacen las condiciones de operación o generan efectos negativos al proceso de combustión, finalmente se encuentra una zona intermedia con IE entre 5 y 7, en la cual se encuentran los gases que satisfacen una de las condiciones establecidas ya sea el Índice de Wobbe o la temperatura adiabática de llama, de esa forma estos gases podrían usarse como combustible pues presentarían un comportamiento aceptable en la combustión. Una vez establecidos los valores numéricos del Índice de eficiencia energética se procedió a encontrar un modelo matemático que correlacione correctamente los datos y permita calcular el IE en función del índice de Wobbe y la temperatura.

## 5.6 MODELO MATEMÁTICO DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.

De acuerdo a los modelos estudiados y dados por las ecuaciones 17-20. En la Tabla 15, se muestran los resultados obtenidos para el valor cuadrado del coeficiente de correlación “R<sup>2</sup>” y la prueba estadística “P”, para cada uno de los modelos. Estos resultados fueron obtenidos mediante Matlab utilizando el método de regresión lineal múltiple.

**Tabla 15.** Análisis estadístico de los modelos utilizados.

<b>Tipo de modelo</b>	<b>Ecuación</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Valor “P”</b>
<b>Lineal</b>	17	0,8144	0,000
<b>Con interacción de variables</b>	18	0,8172	0,000
<b>Con asíntotas simples</b>	19	0,7961	0,000
<b>Asíntotas con interacción</b>	20	0,6662	0,000

Fuente: El autor.

Se observa que los modelos correspondientes a las ecuaciones 19 y 20 presentaron coeficientes de correlación  $R^2 < 0,800$  por lo cual los modelos asintóticos fueron descartados pues no alcanzan una correlación aceptable, mientras que los modelos correspondientes a las ecuaciones 17 y 18 fueron los que presentaron mayor grado de correlación ( $R^2$ ) y cumple con el vapor P el cual es menor de 0,05, además no se observa un cambio significativo entre aplicar uno u otro modelo pues los valores de  $R^2$  son muy similares, 0,8144 y 0,8172, respectivamente, por lo que se procedió a comparar los datos generados por los modelos lineal y cuadrático con interacción de variables con una serie de datos obtenidos del índice de eficiencia energética durante las pruebas de combustión. Los resultados se muestran en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Respuesta del índice de eficiencia calculado por los modelos A y B.

$X_1$	$X_2$	IE	Y cal.	
			Modelo A	Modelo B
1100	1900	9,71	10,15	9,71
1200	2000	8,95	7,47	7,43
1300	2040	7,02	5,95	6,03
1400	2070	4,82	4,64	4,75
1500	2100	2,29	3,33	3,35
1600	2110	2	2,41	2,32

Fuente: El autor.

De la Tabla 16 se puede observar que el modelo que mejor correlaciona los datos del índice de eficiencia energética es el modelo cuadrático con interacción de variables, Ecuación (18), pues presenta buena concordancia entre los datos presentados por lógica difusa y los calculados por dicho modelo, a diferencia del modelo lineal el cual presenta menor concordancia de datos. Es importante tener en cuenta que en las zonas de alto  $X_1$  ( $>1500$ ) y  $X_2$  ( $>2100$ ), se presenta una diferencia significativa en los datos calculados por el modelo, sin embargo dicha

diferencia no afecta el modelo pues para esas zonas el índice debe ser menor a 3,5 pues estas condiciones se presentan en gases no aptos para ser usados como combustible, por tanto no representan un error en el modelo (18) y puede ser aplicado correctamente en estas zonas.

Por otro lado, con el fin de obtener un modelo más compacto (con menor cantidad de términos), sin alterar en gran medida su nivel de correlación, se aplicó el criterio de reducción de términos mediante un análisis de varianza de cada uno de los términos del modelo obtenido. El grado de significancia de cada variable se representa por su valor P Si el valor P es menor a 0,05, la variable influye en la respuesta Y. La Tabla 17 muestra el análisis de varianza para cada una de las variables.

**Tabla 17.** Análisis de varianza para los grupos de variables

Variable	Valor P
$X_1$	0,04035289
$X_2$	0,01652348
$X_1^2$	0,00002065
$X_2^2$	0,00023688
$X_1 * X_2$	0,00013773

Fuente: El autor.

Los grupos de variables lineales ( $X_1$  y  $X_2$ ) contribuyen fuertemente al modelo pues los valores de p son menores de 0,05, además se encontró que para el modelo es más relevante la variable  $X_2$  (temperatura adiabática de llama) que la variable  $X_1$  (índice de Wobbe). Entre los grupos cuadráticos de variables ( $X_1^2$ ,  $X_2^2$ ,  $X_1 * X_2$ ) se presentan contribuciones menores de 0,05, siendo la menos relevante  $X_2^2$  (temperatura adiabática de llama)<sup>2</sup>. Por tanto, todos los términos del modelo son influyentes en la variable respuesta, y no se puede ignorar el efecto de ningún grupo de variables escogido para el modelo.

Finalmente el modelo para el Índice de eficiencia energética es:

$$IE = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 X_1 X_2 \quad (24)$$

Donde  $X_1$  y  $X_2$  son el índice de Wobbe [BTU/pie<sup>3</sup>] y la Temperatura adiabática de llama [°C] respectivamente. Los valores  $\beta_0$  a  $\beta_5$  se encuentran en la Tabla 18, finalmente si  $X_1 = IW$  y  $X_2 = T$ , la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$IE = \beta_0 + \beta_1 * IW + \beta_2 * T + \beta_3 * IW^2 + \beta_4 * T^2 + \beta_5 * IW * T \quad (25)$$

**Tabla 18.** Constantes del modelo del índice de eficiencia energética.

$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$
12,637	0,01165	0,00957	-2,01E-06	-4,98E-06	-6,47E-06

Fuente: El autor.

Después de obtener las correlaciones matemáticas para el Índice de eficiencia energética procedió a realizar la respectiva validaron mediante monitoreos suministrados por el Instituto Colombiano del Petróleo, en donde el índice de eficiencia energética fue calculado mediante la ecuación (25).

## 5.7 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA EL ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.

La Tabla 19 presenta la composición del gas A utilizado para la validación del modelo del índice de eficiencia energético, la cual evidencia alto contenido de hidrógeno, propano y etileno, y por el contrario presenta bajo contenido de metano. Por otro lado, Ecopetrol reportó que los días que utilizó dicho gas se presentó disminución en la eficiencia en la transferencia de calor lo cual no permitió satisfacer plenamente los requerimientos energéticos para una carga determinada de proceso [65]. En el caso del gas B se suministró el poder calorífico del

combustible, en este caso PCI = 1054,775 Btu/pie<sup>3</sup>, donde se reportó el uso de la unidad de cracking y crudos durante esos días [66].

**Tabla 19.** Composición del gas A, utilizado para la validación del índice de eficiencia energética.

<b>Gas A</b>	
Metano	29,17
Etano	0
Propano	8,44
Butano	1,26
Pentano	1,14
Etileno	8,77
Propileno	8,09
Hidrógeno	41,29
Nitrógeno	1,84

Fuente: Ecopetrol.

Para el cálculo del IW se utilizó, la ecuación (8), mientras que la temperatura adiabática de llama se calculó para un exceso de aire del 2%, valor reportado en el monitoreo. Los resultados se presentan en la Tabla 20.

**Tabla 20 .** Resultados de la evaluación del índice de eficiencia energética.

<b>Gas</b>	<b>PCI [Btu/pie<sup>3</sup>]</b>	<b>IW [Btu/pie<sup>3</sup>]</b>	<b>T adiabática [°C]</b>	<b>IE</b>
A	911,82	1251,18	2095	5,31
B	1054,77	1343,307	2040	5,74

Fuente: El autor.

En la Tabla 20 se observa que el gas A presenta un PCI similar al del GN, además presenta alta temperatura adiabática de llama, por lo cual se obtiene un IE de 5,31. En el caso del gas B, este presenta un PCI más alto que el del GN, pero una temperatura adiabática de llama que se encuentra dentro del rango de operación

del GN, obteniendo de esa forma un IE de 5,74. Dichos gases se encuentran en el rango de gases permisibles con ajustes para el proceso de combustión, sin embargo se hace necesario ajustar los parámetros de combustión (composición, exceso de aire) con miras a incrementar el IE y obtener de esa manera un gas adecuado para el proceso de combustión.

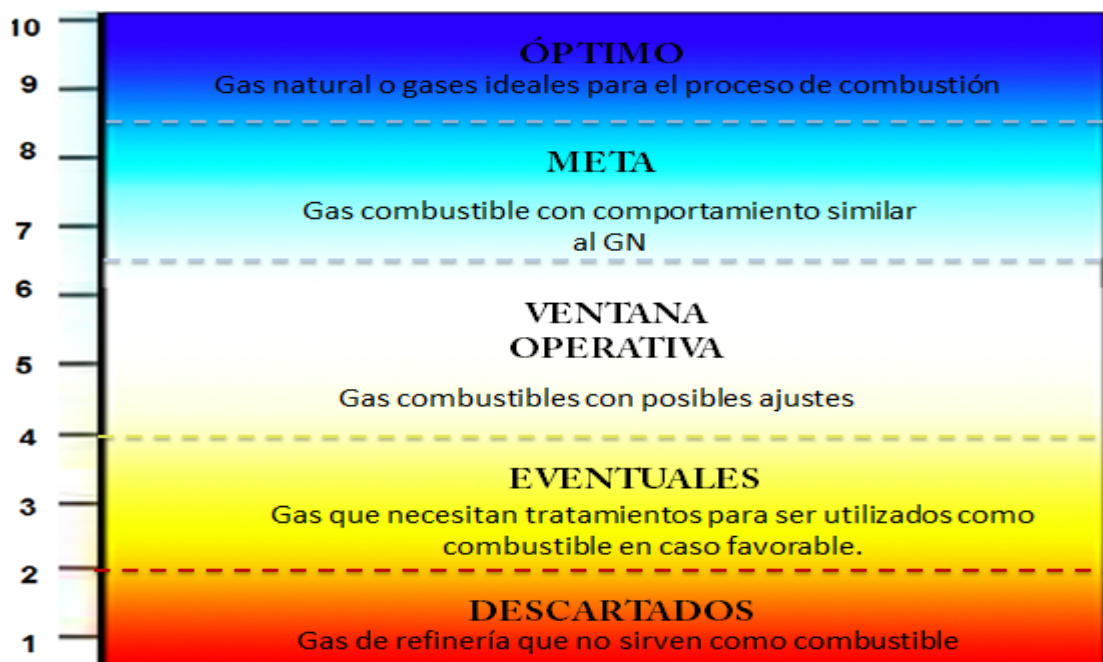
De esa forma, se plantean dos alternativas de solución: la primera alternativa consiste en aumentar el exceso de aire hasta el límite máximo encontrado en los monitoreos en este caso 4%. De ese modo el nuevo IE para el gas A es 5,8 y para el gas B 6,25, lo cual representa una mejora al proceso de combustión y favorecerá el desempeño de dicho gas combustible.

La segunda alternativa consiste en retirar la corriente más perjudicial para el proceso, en este caso el aporte de hidrógeno, esperando de esa forma un descenso en la temperatura adiabática de llama y el respectivo aumento en la eficiencia del proceso, sin embargo no fue posible evaluar dicha alternativa pues no fueron suministrados los datos de la nueva composición en el caso del gas A. En el caso del Gas B, dicha alternativa no se pudo implementar ya que no se conoce la composición del gas combustible.

Se observa que el uso de las correlaciones matemáticas permite la predicción del índice de eficiencia energética (IE) durante el proceso de combustión del gas de refinería, de la misma forma el IE depende fuertemente del índice de Wobbe y la temperatura adiabática de llama, las cuales están ligadas a la intercambiabilidad de gases y la eficiencia del proceso, de tal forma que es posible evaluar el comportamiento del gas de refinería y tomar alternativas de solución con miras a aumentar el valor del IE y favorecer los procesos de combustión que se dan en hornos y calderas en la industria de la refinación del petróleo.

## 5.8 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.

El análisis del índice de eficiencia energética está basado en un escala de 0 a 10, en donde 10 representa el máximo valor y corresponderá a los gases combustible que tendrían el máximo desempeño en el proceso de combustión (idealidad). De la misma forma 0 correspondería a los gases que no tienen contenido energético y no aportan al proceso de combustión. De tal forma se establecieron 5 zonas de clasificación de los gases combustibles de acuerdo al índice de eficiencia energética, las cuales son mostradas en la Figura 17.



**Figura 17.** Clasificación de los gases combustibles según el índice de eficiencia energética.

En la Figura 17 se observan 5 zonas de clasificación de los gases combustibles, en donde los gases considerados aptos para el proceso de combustión se encuentran a partir de un IE de 6,5. Los gases en este rango pueden ser utilizados como combustible pues presentan comportamiento o características similares a las del gas natural, además a medida que el índice se acerca a 8 encontramos al

GN y los gases que presentarían un comportamiento óptimo en el proceso de combustión, donde se minimizan las emisiones de contaminantes, la corrosión a alta temperatura y se mantiene la eficiencia del proceso. Los gases con un IE superior a 8 presentan el mejor desempeño porque son similares al GN y satisfacen las condiciones de diseño de los equipos de combustión.

Los gases que tienen un IE comprendido entre 4 y 6,5, pertenecen a la zona denominada: ventana operativa pues dichos gases en primera instancia no cumplen las denominación de gas combustible, sin embargo se pueden hacer ajustes en los parámetros de combustión tales como: el aumento del exceso de aire, retiro parcial o total de una corriente que contenga gases nocivos (Hidrógeno, propano, propileno, butano) para el proceso. De tal forma que se alcancen valores del IE cercanos a 6,5, valor que corresponde a la meta en el proceso de combustión del gas de refinería.

En última instancia se presentan dos zonas para los gases combustibles con un IE menor de 4, en donde los gases que se encuentran por debajo de un IE de 2 son totalmente descartados del proceso de combustión pues no aportan energía al proceso de combustión o sus características se encuentran por encima de los límites permitidos de temperatura o índice de Wobbe, lo cual generaría daños al proceso de combustión, por otra parte los gases en la zona comprendida entre 2 y 4, se clasificaron como eventuales pues pueden ser tratados y transformados en gases combustibles si los ajustes en las variables del proceso (exceso de aire, composición) permiten aumentar el índice de eficiencia energética hasta un valor aceptable, si no es posible el gas es descartado.

## **5.9 HERRAMIENTA DE CALCULO Y MONITOREO DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.**

Con el fin de poder realizar un seguimiento al índice de eficiencia energética se entrega una herramienta de cálculo que consiste en un archivo ejecutable el cual permite calcular el (IE) mediante dos alternativas: la primera alternativa está en

función de la composición del gas combustible mientras que la segunda alternativa está en función del poder calorífico y la densidad del gas combustible. La Figura 18 presenta la pantalla de inicio del software que permite calcular el índice de eficiencia energética.

ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

**CÁLCULO DE ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Paso 1: Seleccione uno de las siguientes formas de cálculo:

Cálculo con valores de Gases  Cálculo con valores del Poder Calorífico (PCI)

Paso 2: Introduzca la composición del gas combustible fracción molar:

METANO (CH <sub>4</sub> )	<input type="text"/>	PODER CALORÍFICO (PCI)	<input type="text"/>
ETANO (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	<input type="text"/>	DENSIDAD DE LA MEZCLA	<input type="text"/>
PROPANO (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	<input type="text"/>		
BUTANO (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	<input type="text"/>		
ETILENO (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	<input type="text"/>		
PROPILENO (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	<input type="text"/>		
SULFURO DE HIDROGENO (H <sub>2</sub> S)	<input type="text"/>		
HIDROGENO (H <sub>2</sub> )	<input type="text"/>		
% DE EXCESO DE AIRE	<input type="text"/>		

El resultado es:

**Figura 18.** Pantalla de inicio del software de cálculo del índice de eficiencia energética (IE).

La herramienta desarrollada permite medir el IE de forma fácil y rápida, donde el resultado, permitirá decidir qué si el gas es apto o no para el proceso de combustión y que variables (exceso de aire, composición) se pueden ajustar para mejorar el valor del IE, de tal manera que facilitará el análisis del gas combustible y la toma de decisiones en cuanto al uso del gas de refinería en los procesos de combustión de la industria petroquímica. El Anexo B presenta la descripción del software de evaluación del índice de eficiencia energética.

## 6. CONCLUSIONES

El estudio del proceso de combustión del gas de refinería, realizado mediante la simulación de las mezclas combustibles representativas en Aspen Hysys permitió valorar las características de la combustión, mediante la variación de la composición del combustible, permitiendo establecer las variables que afectan la combustión. De esa manera se encontró un modelo para calcular un índice de eficiencia energética el cual permite evaluar el comportamiento de los gases combustibles (gas natural, gas de refinería) en el proceso de combustión.

El índice de eficiencia energética (IE) se correlacionó con los parámetros de operación (IW y Temperatura adiabática de llama) mediante lógica difusa, regresiones y análisis de varianza. Donde el modelo cuadrático con interacción de variables presentó mejor correlación y ajuste de datos. El modelo obtenido da confiabilidad en cuanto a la toma de decisiones en el proceso de combustión, pues permite trabajar en un amplio rango de composición del GR, y constituye una herramienta útil para mejorar los procesos de combustión.

Es viable realizar el proceso de combustión con gases de refinería con un índice de eficiencia energética  $\geq 6,5$ , pues para este valor encontramos rangos de temperaturas e índice de Wobbe que no generan perturbaciones y problemas en el horno. Lo anterior indica que para estos valores del IE se consigue un mejor aprovechamiento de la energía calórica que permitirá mantener la eficiencia del proceso.

En cuanto al análisis de las características del proceso de combustión se encontró que la presencia de hidrocarburos de alto peso molecular en el GR, incrementa la cantidad de aire a utilizar para asegurar la combustión completa y aumenta las emisiones de CO<sub>2</sub> convirtiéndose en una desventaja ambiental.

Igualmente el GR aumenta la temperatura adiabática de llama, causando de esa forma un aumento en las emisiones de NOx y de igual forma favorece los mecanismos de falla por corrosión a alta temperatura, sin embargo no se encontró una relación directa entre la temperatura y el PCI del GR.

Así mismo, se encontró que las mezclas combustibles evaluadas presentan una variabilidad en la eficiencia del proceso respecto al GN, disminuyendo hasta un 2% con el aumento en la concentración de hidrógeno, por lo tanto no se recomienda el uso de altas concentraciones de hidrógeno en la red de gas combustible.

Finalmente los resultados de este estudio ponen en evidencia la variabilidad en la temperatura adiabática, eficiencia y emisiones que se presenta al utilizar el GR como combustible, sin embargo es posible encontrar rangos de composición en los cuales se pueda hacer un mejor uso del GR, que maximice el uso de energía y minimice la generación de contaminantes.

## 7. DIVULGACIÓN DE RESULTADOS (Publicaciones y eventos)

### Publicaciones

- “Efecto de la composición del gas de refinería sobre las características del proceso de combustión”. O. M. Cala, L. Meriño, V. Kafarov, J. Saavedra. Artículo en vía de publicación en “Revista de Ingenierías de la universidad de Medellín (A2)”.
- “Evaluation of Combustion Models for Efficiency of Refinery Furnaces”. O. M. Cala, L. Meriño, V. Kafarov, J. Saavedra. Artículo en vía de publicación en “Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería (A1)”.

### Eventos científicos.

- “Efecto del uso del gas de refinería sobre la eficiencia energética y las emisiones de dióxido de carbono en el proceso de combustión”. O. M. Cala, L. Meriño, V. Kafarov, J. Saavedra. Presentado en la modalidad Ponencia en “13 Seminario Internacional del Medio Ambiente y Desarrollo sostenible (SIMADS 2013)”, Bucaramanga, Colombia, Noviembre de 2013.
- “Simulation of Refinery Gas Composition Effect on Physicochemical Properties of Combustion Products”. Presentado en la modalidad Ponencia en “Fourteenth International Conference on Numerical Combustion (NC13)”. San Antonio, Texas, USA, Abril de 2013.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Internacional Energy Agency. (2010). Perspectivas sobre tecnologías energéticas: Escenarios y estrategias hasta el año 2050.
2. Zargarzadeh, M., Karimi, I.A., Alfadala, H E. (2007). Olexan A tool for online exergy analysis. in 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Romania.
3. Lunghi, P. and R. Burzacca. (2004). Energy recovery from industrial waste of a confectionery plant by means of BIGFC plant. Energy. 29(12–15): p. 2601-2617.
4. ECOPETROL. (2010). Información técnica de la Refinería de Barrancabermeja. Barrancabermeja”.
5. Rolle, K.C. (2006). Termodinámica. Vol. 6 Edición. México: Pearson education.
6. Hsieh, S.-C. and C.-J.G. Jou. (2009) Using hydrogen-rich multifuel to improve energy efficiency and reduce CO<sub>2</sub> emission for high-energy furnace. Environmental Progress & Sustainable Energy. 28(1): p. 83-88.
7. ASME PTC 4.1. (2008). “Fired Steam Generators, Performance Test Code 4”. New York, USA.
8. Serrano, J.C., Carranza, Y.A. (2005). Análisis teórico de la combustión en quemadores de gas natural. Scientia et Technica. 3(29): p. 139-143.
9. Meza, C.A. (2002). Análisis de la eficiencia en la combustión de gas de refinería en hornos industriales tipo cabina, mediante estudio de su comportamiento real. Escuela de ingeniería química. Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga.
10. Johnson, F., Rue, D.M. (2003). Gas Interchangeability Tests--Evaluating the Range of Interchangeability of Vaporized LNG and Natural Gas. Gas Research Institute. Des Plaines

11. American Gas Association. (2006). White Paper on Natural Gas Interchangeability And Non-Combustion End Use. Appendix H Research Recommendations.
12. Coward, H.F., Greenwald, H.P. (1996). Propagation of Flame in Mixtures of Natural Gas and Air. Washington DC, D.o. Commerce, Editor.
13. AMELL, A. (1996). Tecnología de la Combustión de Gases y Quemadores Atmosféricos de Premezcla. Universidad de Antioquia: Medellín, Colombia.
14. Wobbe, G. A new definition of the Quality of gas. Ind.Gas Acquadolli.
15. American Gas Association. (2005). White Paper on Natural Gas Interchangeability And Non-Combustion End Use. Natural gas Council interchangeability Task group.
16. Williams, T. (2007). Meeting the Challenges Gas Interchangeability Matters. Principal Consultant. Advantica Ltd. USA.
17. Rosal, R., Scipio, S. Interchangeability And Wobbe Index Used As Quality Parameter For Liquefied Natural Gas.
18. American Gas Association. Gas Engineers Handbook. in Segler, C. George, Editor-in-Chief: The Industrial Press: New York.
19. American Gas Association Laboratories. (1940). Research in Fundamentals of Atmospheric Gas Burner Design (Research Bulletin 10)". Cleveland, Ohio.
20. American Gas Association Laboratories. (1946). Interchangeability of Other Fuel Gases with Natural Gases, Research Bulletin Number 36. in AGA Committee on Mixed Gas Research, Joint Committee of Natural Gas Department and Technical Section. Cleveland, Ohio.
21. American Gas Association. (1950). "Interchangeability of Various Fuel Gases with Manufactured Gases". AGA Research Bulletin No. 60.
22. Delbourg, P., Schneck, H. (1957). "Interchangeability of Gases", in the 47th Congress of l'Industrie du Gaz. Paris. p. 756-834.
23. Gilbert, T.M., Warner C.W. (1955). "Why---and Where? Natural Gas Stabilization," in Gas Age.

24. Weaver, E.R. (1951). Formulas and Graphs for Representing the Interchangeability of Fuel Gases,”. Journal of Research of the National Bureau of Standards. 46(3).
25. Griffiths, J.C., Connelly, S.M., Remer, R.B. (1982). Effect of Fuel Gas Composition on Appliance Performance”, , in Gas Research Institute – GRI.
26. Steinmetz, G.F. (1989). Revolutionary path towards compatible requirement between gas appliance performance and natural gas quality, in Gas quality and measurement. Conference proceeding, Institute of gas technology. 1989.
27. Steinmetz G.F. (1988). The Case for Compatible Standards Between Gas Appliance Performance and Natural Gas Quality. in Spring National Meeting, American Institute of Chemical Engineers. New Orleans.
28. American Gas Association. (1994). Interchangeability, Chapter 2, Utilization: Book U-1, Residential/Commercial, Gas Engineering and Operations Series. Arlington, Texas, USA.
29. Estrada, J.A.B. (1996). The Effect of Gas Composition on Residential Appliance Burner Performance. in Natural Gas Quality & Energy Measurement, Institute of Gas Technology. Clearwater, Florida, USA.
30. Halchuk R.A. (1996). Btu Stabilization: To Air Is Natural,” in Natural Gas Quality & Energy Measurement, Institute of Gas Technology. Clearwater, Florida, USA.
31. Halchuk, R.A. (2001). Gas Quality Specification and Interchangeability for End Use Applications. in Operations Conference, American Gas Association. Dallas, Texas, USA.
32. Johnson, F., Rue, D.M. (2003). Gas Interchangeability Tests--Evaluating the Range of Interchangeability of Vaporized LNG and Natural Gas,” in Gas Research Institute. Des Plaines.
33. Muller, C.J., Craig, I.K., Ricker, N.L. (2011). Modelling, validation, and control of an industrial fuel gas blending system. Journal of Process Control. 21: p. 852-860.

34. Acevedo, C.A. (2003). 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”, in Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica. Universidad de Antioquia: Medellín.
35. Cortés, J.H., Hernández, J.A. (2003). Validación de la intercambiabilidad de gases en el contexto colombiano: Calentadores Instantáneos de Agua. in Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica. Universidad de Antioquia: Medellín.
36. Montaña, D. (2011). Determinación de las propiedades de combustión e identificación de problemas de intercambiabilidad de las mezclas de gas natural con otros combustibles de refinería. Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga, Colombia.
37. Williams, T. (2006). Technical Background and Issues of Gas Interchangeability. in Prepared for: Buiding Energy Codes and Standards Committee American Gas Association.
38. Josten, M. (2009). Programme Committee D1: Lng Quality & Interchangeability2006-2009”. in Triennium Work Report.
39. Williams, T. (2005). Assessment of changes to the perfomance of gas appliances in relation to variation in gas quality”. p. 87.
40. Kavga, A., Alexopoulos, G., Bontozoglou, V. (2012). Experimental Investigation of the Energy Needs for a Conventionally and an Infrared-Heated Greenhouse. Advances in Mechanical Engineering. 2012: p. 16.
41. Centro Mario Molina. (2007). Formulación de lineamientos de politica en material de eficiencia energética en sectores claves de la economía mexicana para el programa especial de cambio climático. in preparado para el Instituto Nacional de Ecología. México.
42. Sociedad Alemana para la cooperación técnica, G.T.Z. (2003). Estudio de las Relaciones entre la Eficiencia Energética y el Desarrollo Económico. in Programa de Estudios e Investigaciones en Energía. Santiago, Chile.

43. López-Peña, A., Danesin, A., Linares, P. (2010). Observatorio de Energía y Sostenibilidad en España. Informe basado en indicadores. Edición 2010”, in Cátedra BP de energía y sostenibilidad. Madrid.
44. Torres, M.A. (2012). Modelo de optimización energética. Estrategia de generación de energía en GRB. in Semana técnica de uso racional de la energía.
45. Hsieh, S.-C. and C.-J.G. Jou. (2007). Reduction of greenhouse gas emission on a medium-pressure boiler using hydrogen-rich fuel control. *Applied Thermal Engineering*. 27(17–18): p. 2924-2928.
46. Lee, C., Jou, C.J.G., Tai, H.S., Wang, CH., Hsieh, S.C., Wang, H.P. (2006). Reduction of nitrogen oxides emissions of a medium-pressure boiler through fuel control. *Aerosol Air Qual Res*. 6(2): p. 123–33.
47. Jou, C.J.G., Lee, C.L., Tsai, C.H., Wang, H.P. (2008). Reduction of energy cost and CO<sub>2</sub> emission for the boilers in a full-scale refinery plant by adding waste hydrogen-rich fuel gas. *Energy Fuels*. 22(1): p. 564–9.
48. Jou, C.J.G., Lee, C.L., Tsai, C.H., Wang, H.P. (2008). Enhancing the performance of a high-pressure cogeneration boiler with waste hydrogen-rich fuel”. . *International journal of Hydrogen Energy*. 33: p. 5806–10.
49. Mastral, A.M., et al. (2002). Study of the viability of the process for hydrogen recovery from old tyre oils. *Fuel Processing Technology*. 75(3): p. 185-199.
50. Jou, C.-J.G., et al. (2007). Reduction of Energy Cost and CO<sub>2</sub> Emission for the Boilers in a Full-Scale Refinery Plant by Adding Waste Hydrogen-Rich Fuel Gas. *Energy & Fuels*. 22(1): p. 564-569.
51. Lee, C.-L., et al. (2010). Improving cost-effectiveness for the furnace in a full-scale refinery plant with reuse of waste tail gas fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 35(4): p. 1797-1802.
52. Rogaume, T., et al. (2002). The effects of different airflows on the formation of pollutants during waste incineration. *Fuel*. 81(17): p. 2277-2288.
53. Wildy, F. Fired heater optimization. in *Technical sales support manager, AMETEK process instruments: Pittsburgh, USA*.

54. Perry, R.H. Perry Manual del ingeniero químico. 6 edición ed, ed. McGraw-Hill. Vol. 1.
55. Herrera, M.F., Osorio, J.C. (2006). Modelo para la gestión de proveedores utilizando AHP difuso. Estudios gerenciales. 22(99): p. 69-88.
56. Saavedra, J., Merino, L., Kafarov, V. (2013). Computer aided evaluation of eco-efficiency of refinery combustion processes. Chemical Engineering Transactions. 32: p. 217-222.
57. Khuri, A.I., Cornell, J.A. (1987). Statistics: Textbooks and monographs. New York: Marcel Dekker.
58. Montgomery, D.C., Runger, G. C. (2002). Applied Statistics and Probability for Engineers. Tercera Edición, ed. Editorial John Wiley & Sons.
59. Ko, Y.-C. and T.-H. Lin. (2003). Emissions and efficiency of a domestic gas stove burning natural gases with various compositions. Energy Conversion and Management. 44(19): p. 3001-3014.
60. Law, C.K., A. Makino, and T.F. Lu. (2006). On the off-stoichiometric peaking of adiabatic flame temperature. Combustion and Flame. 145(4): p. 808-819.
61. Ul-Hamid, A., et al. (2006). Failure analysis of furnace radiant tubes exposed to excessive temperature. Engineering Failure Analysis. 13(6): p. 1005-1021.
62. Serna, J. (2004). Oxidación, carburación y sulfidación de aleaciones ferríticas Fe-9Cr-1Mo modificadas en ambientes con hidrocarburos a temperaturas entre 550 y 750°C. Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander.: Bucaramanga, Colombia.
63. Nabi, M.N. (2010). Theoretical investigation of engine thermal efficiency, adiabatic flame temperature, NOx emission and combustion-related parameters for different oxygenated fuels. Applied Thermal Engineering. 30(8–9): p. 839-844.
64. Choudhuri, A.R. and S.R. Gollahalli. (2003). Characteristics of hydrogen–hydrocarbon composite fuel turbulent jet flames. International Journal of Hydrogen Energy. 28(4): p. 445-454.

65. Saavedra, J., Bernal, W.J. (2013). Monitoreo de gases de combustión de los hornos de la planta de crudos y viscorreductora de la refinería de cartagena. Instituto Colombiano del Petróleo,: Piedecuesta, Santander, Colombia.
66. Saavedra, J., Bernal, W.J. (2013). Informe sobre las corridas de eficiencia realizadas a las calderas de la unidad USI de la refinería de Cartagena. Instituto Colombiano del Petróleo: Piedecuesta, Santander, Colombia.

## BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, C.A. (2003). 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”, in Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica. Universidad de Antioquia: Medellín.

AMELL, A. (1996). Tecnología de la Combustión de Gases y Quemadores Atmosféricos de Premezcla. Universidad de Antioquia: Medellín, Colombia.

American Gas Association. Gas Engineers Handbook. in Segler, C. George, Editor-in-Chief: The Industrial Press: New York.

American Gas Association. (1994). Interchangeability, Chapter 2, Utilization: Book U-1, Residential/Commercial, Gas Engineering and Operations Series. Arlington, Texas, USA.

American Gas Association Laboratories. (1946). Interchangeability of Other Fuel Gases with Natural Gases, Research Bulletin Number 36. in AGA Committee on Mixed Gas Research, Joint Committee of Natural Gas Department and Technical Section. Cleveland, Ohio.

American Gas Association. (1950). “Interchangeability of Various Fuel Gases with Manufactured Gases”. AGA Research Bulletin No. 60.

American Gas Association Laboratories. (1940). Research in Fundamentals of Atmospheric Gas Burner Design (Research Bulletin 10)”. Cleveland, Ohio.

American Gas Association. (2006). White Paper on Natural Gas Interchangeability And Non-Combustion End Use. Appendix H Research Recommendations.

American Gas Association. (2005). White Paper on Natural Gas Interchangeability And Non-Combustion End Use. Natural gas Council interchangeability Task group.

ASME PTC 4.1. (2008). "Fired Steam Generators, Performance Test Code 4". New York, USA.

Centro Mario Molina. (2007). Formulación de lineamientos de política en material de eficiencia energética en sectores claves de la economía mexicana para el programa especial de cambio climático. in preparado para el Instituto Nacional de Ecología. México.

Choudhuri, A.R. and S.R. Gollahalli. (2003). Characteristics of hydrogen-hydrocarbon composite fuel turbulent jet flames. *International Journal of Hydrogen Energy*. 28(4): p. 445-454.

Cortés, J.H., Hernández, J.A. (2003). Validación de la intercambiabilidad de gases en el contexto colombiano: Calentadores Instantáneos de Agua. in Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica. Universidad de Antioquia: Medellín.

Coward, H.F., Greenwald, H.P. (1996). Propagation of Flame in Mixtures of Natural Gas and Air. Washington DC, D.o. Commerce, Editor.

Delbourg, P., Schneck, H. (1957). "Interchangeability of Gases", in the 47th Congress of l'Industrie du Gaz. Paris. p. 756-834.

ECOPETROL. (2010). Información técnica de la Refinería de Barrancabermeja. Barrancabermeja".

Estrada, J.A.B. (1996). The Effect of Gas Composition on Residential Appliance Burner Performance. in *Natural Gas Quality & Energy Measurement*, Institute of Gas Technology. Clearwater, Florida, USA.

Gilbert, T.M., Warner C.W. (1955). "Why---and Where? Natural Gas Stabilization," in *Gas Age*.

Griffiths, J.C., Connelly, S.M., Remer, R.B. (1982). Effect of Fuel Gas Composition on Appliance Performance”, , in Gas Research Institute – GRI.

Halchuk R.A. (1996). Btu Stabilization: To Air Is Natural, in Natural Gas Quality & Energy Measurement, Institute of Gas Technology. Clearwater, Florida, USA.

Halchuk, R.A. (2001). Gas Quality Specification and Interchangeability for End Use Applications. in Operations Conference, American Gas Association. Dallas, Texas, USA.

Herrera, M.F., Osorio, J.C. (2006). Modelo para la gestión de proveedores utilizando AHP difuso. Estudios gerenciales. 22(99): p. 69-88.

Hsieh, S.-C. and C.-J.G. Jou. (2007). Reduction of greenhouse gas emission on a medium-pressure boiler using hydrogen-rich fuel control. Applied Thermal Engineering. 27(17–18): p. 2924-2928.

Hsieh, S.-C. and C.-J.G. Jou. (2009) Using hydrogen-rich multifuel to improve energy efficiency and reduce CO<sub>2</sub> emission for high-energy furnace. Environmental Progress & Sustainable Energy. 28(1): p. 83-88.

Internacional Energy Agency. (2010). Perspectivas sobre tecnologías energéticas: Escenarios y estrategias hasta el año 2050.

Johnson, F., Rue, D.M. (2003). Gas Interchangeability Tests--Evaluating the Range of Interchangeability of Vaporized LNG and Natural Gas,” in Gas Research Institute. Des Plaines.

Josten, M. (2009). Programme Committee D1: Lng Quality & Interchangeability2006-2009. in Triennium Work Report.

Jou, C.J.G., Lee, C.L., Tsai, C.H., Wang, H.P. (2008). Enhancing the performance of a high-pressure cogeneration boiler with waste hydrogen-rich fuel”. . International journal of Hydrogen Energy. 33: p. 5806–10.

Jou, C.J.G., Lee, C.L., Tsai, C.H., Wang, H.P. (2008). Reduction of energy cost and CO<sub>2</sub> emission for the boilers in a full-scale refinery plant by adding waste hydrogen-rich fuel gas. *Energy Fuels*. 22(1): p. 564–9.

Kavga, A., Alexopoulos, G., Bontozoglou, V. (2012). Experimental Investigation of the Energy Needs for a Conventionally and an Infrared-Heated Greenhouse. *Advances in Mechanical Engineering*. 2012: p. 16.

Khuri, A.I., Cornell, J.A. (1987). *Statistics: Textbooks and monographs*. New York: Marcel Dekker.

Ko, Y.-C. and T.-H. Lin. (2003). Emissions and efficiency of a domestic gas stove burning natural gases with various compositions. *Energy Conversion and Management*. 44(19): p. 3001-3014.

Law, C.K., A. Makino, and T.F. Lu. (2006). On the off-stoichiometric peaking of adiabatic flame temperature. *Combustion and Flame*. 145(4): p. 808-819.

Lee, C.-L., et al. (2010). Improving cost-effectiveness for the furnace in a full-scale refinery plant with reuse of waste tail gas fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 35(4): p. 1797-1802.

Lee, C., Jou, C.J.G., Tai, H.S., Wang, C.H., Hsieh, S.C., Wang, H.P. (2006). Reduction of nitrogen oxides emissions of a medium-pressure boiler through fuel control. *Aerosol Air Qual Res*. 6(2): p. 123–33.

López-Peña, A., Danesin, A., Linares, P. (2010). *Observatorio de Energía y Sostenibilidad en España. Informe basado en indicadores. Edición 2010*”, in Cátedra BP de energía y sostenibilidad. Madrid.

Lunghi, P. and R. Burzacca. (2004). Energy recovery from industrial waste of a confectionery plant by means of BIGFC plant. *Energy*. 29(12–15): p. 2601-2617.

Mastral, A.M., et al. (2002). Study of the viability of the process for hydrogen recovery from old tyre oils. *Fuel Processing Technology*. 75(3): p. 185-199.

Meza, C.A. (2002). Análisis de la eficiencia en la combustión de gas de refinería en hornos industriales tipo cabina, mediante estudio de su comportamiento real. Escuela de ingeniería química. Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga.

Montaña, D. (2011). Determinación de las propiedades de combustión e identificación de problemas de intercambiabilidad de las mezclas de gas natural con otros combustibles de refinería. Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga, Colombia.

Montgomery, D.C., Runger, G. C. (2002). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Tercera Edición, ed. Editorial John Wiley & Sons.

Muller, C.J., Craig, I.K., Ricker, N.L. (2011). Modelling, validation, and control of an industrial fuel gas blending system. *Journal of Process Control*. 21: p. 852-860.

Nabi, M.N. (2010). Theoretical investigation of engine thermal efficiency, adiabatic flame temperature, NOx emission and combustion-related parameters for different oxygenated fuels. *Applied Thermal Engineering*. 30(8–9): p. 839-844.

Perry, R.H. *Perry Manual del ingeniero químico*. 6 edición ed, ed. McGraw-Hill. Vol. 1.

Rogaume, T., et al. (2002). The effects of different airflows on the formation of pollutants during waste incineration. *Fuel*. 81(17): p. 2277-2288.

Rolle, K.C. (2006). *Termodinámica*. Vol. 6 Edición. México: Pearson education.

Serrano, J.C., Carranza, Y.A. (2005). Análisis teórico de la combustión en quemadores de gas natural. *Scientia et Technica*. 3(29): p. 139-143.

Rosal, R., Scipio, S. Interchangeability And Wobbe Index Used As Quality Parameter For Liquefied Natural Gas.

Saavedra, J., Merino, L., Kafarov, V. (2013). Computer aided evaluation of eco-efficiency of refinery combustion processes. Chemical Engineering Transactions. 32: p. 217-222.

Saavedra, J., Bernal, W.J. (2013). Informe sobre las corridas de eficiencia realizadas a las calderas de la unidad USI de la refinería de Cartagena. Instituto Colombiano del Petróleo: Piedecuesta, Santander, Colombia.

Saavedra, J., Bernal, W.J. (2013). Monitoreo de gases de combustión de los hornos de la planta de crudos y viscorreductora de la refinería de cartagena. Instituto Colombiano del Petróleo,,: Piedecuesta, Santander, Colombia.

Serna, J. (2004). Oxidación, carburación y sulfidación de aleaciones ferríticas Fe-9Cr-1Mo modificadas en ambientes con hidrocarburos a temperaturas entre 550 y 750°C. Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander.: Bucaramanga, Colombia.

Sociedad Alemana para la cooperación técnica, G.T.Z. (2003). Estudio de las Relaciones entre la Eficiencia Energética y el Desarrollo Económico. in Programa de Estudios e Investigaciones en Energía. Santiago, Chile.

Steinmetz, G.F. (1989). Revolutionary path towards compatible requirement between gas appliance performance and natural gas quality, in Gas quality and measurement. Conference proceeding, Institute of gas technology. 1989.

Steinmetz G.F. (1988). The Case for Compatible Standards Between Gas Appliance Performance and Natural Gas Quality. in Spring National Meeting, American Institute of Chemical Engineers. New Orleans.

Torres, M.A. (2012). Modelo de optimización energética. Estrategia de generación de energía en GRB. in Semana técnica de uso racional de la energía.

Ul-Hamid, A., et al. (2006). Failure analysis of furnace radiant tubes exposed to excessive temperature. *Engineering Failure Analysis*. 13(6): p. 1005-1021.

Weaver, E.R. (1951). Formulas and Graphs for Representing the Interchangeability of Fuel Gases,". *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 46(3).

Wildy, F. Fired heater optimization. in *Technical sales support manager, AMETEK process instruments: Pittsburgh, USA*.

Williams, T. (2005). Assessment of changes to the performance of gas appliances in relation to variation in gas quality". p. 87.

Williams, T. (2007). Meeting the Challenges Gas Interchangeability Matters. Principal Consultant. Advantica Ltd. USA.

Williams, T. (2006). Technical Background and Issues of Gas Interchangeability. in Prepared for: Building Energy Codes and Standards Committee American Gas Association.

Wobbe, G. A new definition of the Quality of gas. *Ind.Gas Acquadolli*.

Zargarzadeh, M., Karimi, I.A., Alfadala, H E. (2007). Olexan A tool for online exergy analysis. in 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Romania.

## ANEXOS

### ANEXO A. ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA TEMPERATURA ADIABÁTICA DE LLAMA

En el numeral 1.2.6, ya se dio la definición de la temperatura adiabática de llama de un combustible. Para calcularla se debe calcular la temperatura que alcanzan los productos, asumiendo un proceso adiabático en donde del balance de energía tenemos:

$$Q_{transferido} = \Delta H_{reacción} \quad (A1)$$

Donde  $Q_{transferido}$  es el calor transferido durante el proceso, sin embargo como tenemos un proceso adiabático  $Q_{transferido} = 0$ ,  $\Delta H_{reacción}$  es el cambio en la entalpia durante la reacción.

Considerando que la reacción ocurre isobáricamente en tres etapas: en donde los reactivos ingresan a temperatura  $T_1$ , y los productos salen a una temperatura  $T_2$ .

**Etapa 1:** Reactivos ( $T_1, P$ )  $\rightarrow$  ( $25^\circ\text{C}, P$ ).

$$\Delta H_1 = \sum_{\text{Reactivos}}^k n \int_{T_1}^{298} C_p dT \quad (A2)$$

**Etapa 2:** Reactivos ( $25^\circ\text{C}, P$ )  $\rightarrow$  Productos ( $25^\circ\text{C}, P$ ).

$$\Delta H_2 = \Delta H_{25^\circ\text{C}}^\circ = \sum \Delta H_f^\circ \text{Productos} - \sum \Delta H_f^\circ \text{Reactivos} \quad (A3)$$

**Etapa 3:** Productos ( $25^\circ\text{C}, P$ )  $\rightarrow$  Productos ( $T_2, P$ ).

$$\Delta H_3 = \sum_{\text{Productos}}^k n \int_{298}^{T_2} C_p dT \quad (A4)$$

Donde  $\Delta H^\circ_{25^\circ\text{C}}$  es el calor de combustión,  $n$  es el número de moles de cada uno de los compuestos involucrados en las reacciones de combustión

Remplazando las ecuaciones (A2), (A3) y (A4) en la ecuación (A1) tenemos:

$$\Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 = 0 \quad (A5)$$

Finalmente se determina  $T_2$  de la integración por un método iterativo y corresponderá a la temperatura adiabática de llama.

Los calores específicos de los gases a presión constante, son estimados mediante los polinomios presentados en el manual del ingeniero químico [54] y son mostrados en la Tabla A1.

**Tabla A1.** Capacidades caloríficas  $C_p$  de los gases involucrados en el proceso de combustión.

Compuesto	A	B	C	D
<b>Metano</b>	19,25	0,05213	1,20E-05	-1,13E-08
<b>Etano</b>	5,409	0,1781	-6,94E-05	8,71E-09
<b>Propano</b>	-4,224	0,3063	-1,59E-04	3,22E-08
<b>Butano</b>	9,487	0,3313	-1,11E-04	-2,82E-09
<b>Etileno</b>	3,806	0,1566	-8,35E-05	1,76E-08
<b>Propileno</b>	3,71	0,2345	-1,16E-04	2,21E-08
<b>Hidrógeno</b>	27,14	0,0093	-1,38E-05	7,65E-09
<b>H<sub>2</sub>S</b>	31,94	0,001436	2,43E-05	-1,18E-08
<b>Oxígeno</b>	29,1	0,01158	-6,08E-06	1,31E-08
<b>Nitrógeno</b>	31,15	-1,36E-04	2,68E-05	-1,17E-08
<b>CO<sub>2</sub></b>	19,8	0,07344	-5,60E-05	1,71E-08

---

<b>H<sub>2</sub>O</b>	32,24	0,01924	1,06E-05	-3,60E-09
-----------------------	-------	---------	----------	-----------

---

Donde la expresión para el polinomio está dada por  $C_p = A + B * T + C * T^2 + D * T^3$ , Cp está en J/mol K y T está en K.

## **ANEXO B. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA (IE).**

Para el computo del índice de eficiencia energética (IE), se desarrolló el software denominado “Cálculo del índice de eficiencia energética”, en cual permite calcular el IE mediante los siguientes pasos.

### **Paso 1.**

En el primer paso el usuario debe seleccionar la opción de cálculo que más le convenga de acuerdo a los datos del gas combustible que disponga. La opción 1 consiste en el cálculo con los valores del gas combustible en este caso la composición molar y el exceso de aire a utilizar en la reacción de combustión. La opción 2 consiste en el cálculo con los valores del poder calorífico, en tal caso el usuario debe introducir el poder calorífico del gas combustible en (Btu/pe<sup>3</sup>), la densidad de la mezcla en (Kg/m<sup>3</sup>) y el exceso de aire a utilizar en la reacción de combustión.

### **Paso 2.**

Una vez seleccionada la opción que más convenga según el caso, se procede a llenar los datos requeridos según la opción. En el caso de la opción 1, todos los campos deben ser suministrados, en caso tal que un componente no esté presente en la mezcla, se debe anotar el valor de 0.

### **Paso 3.**

El último paso consiste en el cálculo del índice de eficiencia energética, en este paso el usuario debe presionar el botón calcular, el cual se encuentra en la parte inferior derecha. Inmediatamente el programa desplegará una ventana con el valor del índice de Wobbe (IW), la temperatura adiabática de llama (T) y el índice de eficiencia energética.