

**DISEÑO DE LA LOGÍSTICA PARA EL APROVECHAMIENTO ÓPTIMO DE LOS
GASES DE REFINERÍA TENIENDO EN CUENTA ASPECTOS ENERGÉTICOS,
AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD**

MARÍA DEL PILAR GÓMEZ OLACHICA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRIA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2015

**DISEÑO DE LA LOGÍSTICA PARA EL APROVECHAMIENTO ÓPTIMO DE LOS
GASES DE REFINERÍA TENIENDO EN CUENTA ASPECTOS ENERGÉTICOS,
AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD**

MARÍA DEL PILAR GÓMEZ OLACHICA

**Trabajo de grado para optar al título de:
Magister en Ingeniería Química**

Directores:

VIATCHESLAV KAFAROV

Ph. D. En Ingeniería Química

JAQUELINE SAAVEDRA RUEDA

Ph. D. En Ingeniería Química

LOURDES MERIÑO STAND

M. Sc. En Ingeniería Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRIA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2015

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios todo poderoso, a Santa María Virgen Madre, a mis abuelos Félix Antonio Gómez, Rebeca González y Eva Moreno de Olachica por su guía desde el cielo. A mis padres Sigifredo Gómez y Lucila Olachica, por su cuidado y apoyo incondicional, a mi hermano Diego Fernando por sus consejos, a mi novio y futuro esposo Jorge Eliecer Rojas por su amor, fe y compañía en los buenos y malos momentos; mi familia la base de mi vida.

Sinceros agradecimientos a la Universidad Industrial de Santander por su ayuda a través del programa de becas de sostenimiento, al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP Ecopetrol), por su apoyo e información brindada a lo largo de la realización de esta investigación.

A mis directores P.h.D. Viatcheslav Kafarov, P.h.D. Jaqueline Saavedra, por su confianza, y enseñanzas, y M.Sc. Lourdes Meriño por guía; sus conocimientos, orientación y motivación las cuales han sido fundamentales para mi formación como investigadora.

A mis compañeros del Grupo de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía (CIDES), a mis amigos y a todos los que de una u otra forma hicieron posible este gran logro.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2. ESTADO DEL ARTE	20
2.1. ESTUDIOS SOBRE INTERCAMBIABILIDAD	20
2.2. RED DE GASES COMBUSTIBLES	22
2.3. INTEGRACIÓN DE ASPECTOS PARA LA SOSTENIBILIDAD	24
3. FUNDAMENTOS.....	26
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS	26
3.1.1. Índice de Wobbe	27
3.1.2. Número de metano.....	30
3.1.3. Medición de las emisiones de CO ₂ al medio ambiente	32
3.2. INTERCAMBIABILIDAD DE GASES	34
3.3. SISTEMAS INTEGRADOS DE GESTIÓN	35
3.3.1. Aspecto de seguridad	36
3.3.2. Aspecto energético.....	38
3.3.3. Aspecto Ambiental.....	39
4. OBJETIVOS.....	41
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	41
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	41
5. METODOLOGÍA.....	42
5.1. DELIMITACIÓN DEL PROCESO DE QUEMA.....	44
5.1.1. Identificación de las corrientes aportantes al proceso de combustión.....	44
5.1.2. Identificación de los compuestos aportantes al proceso de combustión...	44
5.2. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS.....	45
5.2.1. Determinación de los efectos por cada aspecto que genera mayores problemas por aspecto	45
5.2.2. Determinación del método de medición (parámetro) por cada aspecto (Ambiental, energético y seguridad) de cada efecto	45

5.2.3.	Aplicación de cada parámetro por corriente de gas combustible	46
5.3.	CORRIENTE GUIA	47
5.3.1.	Determinación de los rangos eficientes por parámetro para los gases naturales	47
5.3.2.	Determinación de las corrientes aportantes representativas	48
5.3.3.	Elección del gas natural o corriente de gas combustible como corriente guía	48
5.4.	COMBUSTIÓN DE MEZCLAS TIPO.....	50
5.4.1.	Mezclas tipo.....	50
5.4.2.	Aplicación de cada parámetro por mezcla tipo evaluada.....	50
5.4.3.	Combustión de mezclas tipo.....	51
5.5.	REDES DE GASES	51
6.	RESULTADOS	53
6.1.	DELIMITACIÓN DEL PROCESO DE QUEMA.....	53
6.1.1.	Gases de campos (3 Corrientes)	55
6.1.2.	Producción de refinería.....	56
6.1.2.1.	Cracking (8 corrientes).....	56
6.1.2.2.	Petroquímica (5 Corrientes)	58
6.1.3.	Gas para procesos	59
6.1.3.1.	Generación de H ₂ (2 corrientes).....	59
6.1.4.	Gas combustible consumido por la refinería.....	61
6.1.4.1.	Refinación (16 Corrientes).....	61
6.1.4.2.	Cracking (19 Corrientes).....	62
6.1.4.3.	Petroquímica (21 Corrientes).....	64
6.1.5.	Servicios industriales (20 corrientes).....	66
6.2.	DEFINICIÓN DE PARÁMETROS.....	67
6.3.	CORRIENTE GUIA	73
6.3.1.	Mezcla de corrientes aportantes representativas.....	73
6.3.2.	Comparación de la mezcla de corrientes aportantes representativas y la corriente guía	

6.4.	ANALISIS DE LA COMBUSTION DE MEZCLAS TIPO.....	84
6.4.1.	Determinación de las mezclas tipo	84
6.4.2.	Resultados de la combustión de mezclas tipo y comparación con datos de campo	84
6.5.	DISTRIBUCION DE LA REDES DE GASES.....	87
6.6.	IMPLEMENTACIÓN DESARROLLO SOFTWARE	89
6.7.	ANALISIS DEL PROGRAMA	102
6.7.1.	Comparación del parámetro ambiental.....	103
6.7.2.	Comparación del parámetro energético.....	104
6.7.3.	Comparación del parámetro de seguridad	105
6.7.4.	Variación del parámetro ambiental	106
6.7.5.	Variación del parámetro energético.....	106
6.7.6.	Variación del parámetro de seguridad	107
6.7.7.	Evaluación de la de aplicación de la red de gases combustibles.....	107
7.	CONCLUSIONES	111
8.	RECOMENDACIONES	113
9.	DIVULGACIÓN DE RESULTADOS (Publicaciones y eventos)	114
	BIBLIOGRAFÍA.....	115
	ANEXOS.....	123



LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Clasificación de los combustibles gaseosos según el índice de Wobbe (a condiciones normales de presión y temperatura).....	28
Tabla 2 Método de medición (parámetro) por aspecto evaluado.....	46
Tabla 3 Composición del gas natural utilizado en caso de estudio (corriente 3) ...	49
Tabla 4 Corrientes organizadas por área de procedencia	54
Tabla 5 Resultados de aplicación del parámetro de seguridad	68
Tabla 6 Resultados de la aplicación del parámetro energético.....	70
Tabla 7 Resultados de la aplicación del parámetro ambiental.....	72
Tabla 8 Corrientes que cumplen y no cumplen con los 3 rangos definidos como óptimos para cada uno de los 3 parámetros evaluados.....	74
Tabla 9 Corrientes que cumplen con el rango óptimo para el parámetro de seguridad.....	76
Tabla 10 Corrientes que cumplen con el rango óptimo para el parámetro energético	78
Tabla 11 Corrientes que cumplen con el rango óptimo para el parámetro ambiental	80
Tabla 12 Comparación de los valores obtenidos con los valores del monitoreo....	85
Tabla 13 Mezcla tipo elegida	86
Tabla 14 Comparación del parámetro ambiental tabulado (tabla 7) y el programado	103
Tabla 15 Comparación del parámetro energético tabulado (tabla 6) y el programado.....	104
Tabla 16 Comparación del parámetro de seguridad tabulado (tabla 5) y el programado.....	105

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Metodología general del proyecto.....	42
Figura 2 Mapa conceptual de la metodología general del proyecto.....	43
Figura 3 Variación de etano entre corrientes de gases de campos	55
Figura 4 Variación de etano entre corrientes del área de producción sub área cracking	56
Figura 5 Variación de hidrogeno entre corrientes del área de producción sub área cracking	57
Figura 6 Variación de propano entre corrientes del área de producción sub área cracking	57
Figura 7 Variación de etano entre corrientes del área de producción sub área petroquímica	58
Figura 8 Variación de hidrogeno entre corrientes del área de producción sub área petroquímica	59
Figura 9 Variación de metano entre corrientes del área de procesos sub área de generación de H ₂	60
Figura 10 Variación de nitrógeno entre corrientes del área de procesos sub área de generación de H ₂	60
Figura 11 Variación de metano entre corrientes del área gas combustible consumido por la refinería sub área de refinación	61
Figura 12 Variación de etano entre corrientes del área gas combustible consumido por la refinería sub área de refinación	62
Figura 13 Variación de metano entre corrientes del área gas combustible consumido por la refinería sub área de cracking	63
Figura 14 Variación de Iso-Butano entre corrientes del área gas combustible consumido por la refinería sub área de cracking	63
Figura 15 Variación de etano entre corrientes del área gas combustible consumido por la refinería sub área de cracking.....	64

Figura 16 Variación de etano entre corrientes del área gas combustible consumido por la refinería sub área de petroquímica	65
Figura 17 Variación de nitrógeno entre corrientes del área gas combustible consumido por la refinería sub área de petroquímica	65
Figura 18 Variación de etano entre corrientes del área de servicios industriales ..	66
Figura 19 Variación de propileno entre corrientes del área de servicios industriales	67
Figura 20 Resultados de la aplicación del parámetro de seguridad por área	69
Figura 21 Resultados de la aplicación del parámetro energético por área	71
Figura 22 Resultados de la aplicación del parámetro ambiental por área	73
Figura 23 Resultados de la determinación de las corrientes aportantes representativas	75
Figura 24 Porcentaje de corrientes que cumplen con el rango óptimo definido para el parámetro de seguridad	77
Figura 25 Porcentaje de corrientes que cumplen con el rango óptimo definido para el parámetro energético	79
Figura 26 Porcentaje de corrientes que cumplen con el rango óptimo definido para el parámetro de seguridad	81
Figura 27 Porcentaje de corrientes que cumplen y no cumplen con los tres rangos determinados como óptimos	82
Figura 28 Resultados de la comparación de las mezclas representativas y la corriente guía	83
Figura 29 Clasificación de las corrientes pertenecientes al proceso de quema.....	87
Figura 30 Corrientes pertenecientes al proceso de quema ordenadas en relación a la mezcla tipo	89
Figura 31 Diagrama de flujo del programa desarrollado en base a la metodología propuesta.....	90
Figura 32 Variables requeridas para la evaluación de los parámetros	92
Figura 33 Corrientes cargadas al programa de diseño de la red de gases combustibles	93

Figura 34 Evaluación de parámetros por medio del programa	95
Figura 35 Evaluación de la mezcla de gases combustibles	97
Figura 36 Fragmento de código fuente, clase combustión.	98
Figura 37 Comparación de las mezclas tipo con rangos de campo	99
Figura 38 Distribución de las corrientes en relación a la mezcla tipo.....	101
Figura 39 Representación gráfica del proceso análisis realizado basado el ciclo de mejoramiento conocida como Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA).....	110



LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A Herramienta software para el diseño de la logística de una red de gases combustibles asociada a un proceso de quema en la industria del refino (Guía para su uso).....	123
--	-----

TITULO: DISEÑO DE LA LOGÍSTICA PARA EL APROVECHAMIENTO ÓPTIMO DE LOS GASES DE REFINERÍA TENIENDO EN CUENTA ASPECTOS ENERGÉTICOS, AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD *

AUTOR: MARÍA DEL PILAR GÓMEZ OLACHICA†

PALABRAS CLAVES: Combustión, Intercambiabilidad de Gases, Seguridad Industrial, Medio Ambiente, Eficiencia Energética.

DESCRIPCIÓN:

El alto poder calorífico hace de los gases combustibles, tanto, gas natural (GN) como gases de refinería (GR) al igual que sus mezclas, un recurso de gran importancia para la industrial como fuente de energía. Pero las altas perturbaciones generadas por la variación de la composición de cada gas y la imposibilidad de depender de un solo tipo de gas combustible, generan grandes alteraciones del poder calorífico al momento de quema en horno, afectando principalmente los aspectos de Seguridad, Ambiental y Energético.

Dentro de una refinería, porcentajes altos de corrientes de gases combustibles provenientes de diferentes procesos de refino que se unen sin discriminación en un mismo horno para quema, presentándose problemas de combustión detonante no controlada, emisiones de CO₂ por horno al medio ambiente y una alta variación del poder calorífico. En el presente estudio se analizaron los problemas antes mencionados utilizando como parámetros; el Número de Metano (NM), la Medición de las emisiones de CO₂ al Medio Ambiente y el Índice de Wobbe (IW), mediante el diseño de una red de gases combustibles a partir del análisis de un proceso de quema determinado, con una cantidad fija de compuestos comunes a las corrientes evaluadas, utilizando como guía los rangos propios del Gas Natural para cada parámetro en un horno en particular. Mediante el uso del entorno de desarrollo software Visual Studio Ultimate 2012, se simuló el diseño de una red de gases combustible donde se analizó el proceso de combustión teórico y se comparó con datos de campo, para obtener un sistema de clasificación de corrientes donde sus mezclas se encuentren en un rango constante para cada parámetro y se mantengan controlado cada problema.

*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: LOGISTICS DESIGN FOR OPTIMUM UTILIZATION OF THE REFINERY GASES
CONSIDERING ASPECTS ENERGY, ENVIRONMENTAL AND SAFETY.‡**

AUTHOR: MARÍA DEL PILAR GÓMEZ OLACHICA§

**KEYWORDS: Combustion, Gas Interchangeability, Industrial Security, Environment,
Energy efficiency.**

DESCRIPTION:

The high calorific value make of fuel gases, as well as much, natural gas (NG) as refinery gases (GR) or mixtures thereof, a resource of great importance for the industry as a source of energy. But high perturbations generated by the variation in the composition of each gas and the inability to rely on a single type of fuel gas, generate significant calorific power alterations when burning, affecting mainly the aspects of Safety, Environment and Energy.

In a refinery, higher percents of gas fuel streams derived from refining processes that come together without discrimination in the same furnace to burn, generates different problems as the knock resistance, furnace CO₂ emissions to the environment and high variation calorific value. In the present study the aforementioned problems using as parameters were analyzed; Methane Number (NM), the measurement of CO₂ emissions to the environment and Wobbe index (IW), by designing a network of fuel gases from the analysis of a particular burning process with an amount fixed of common compounds evaluated, using as a guide natural gas ranges for each parameter in a particular oven.

Using the development environment Visual Studio Ultimate 2012 software, the design of a fuel gas network where the theoretical combustion process was analyzed and compared with field data to obtain a classification system was simulated currents where mixtures they are in a constant range for each parameter and maintaining controlled each problem.

‡ 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

Los gases combustibles son de gran importancia para diversas industrias debido a su elevado poder calorífico, lo cual los convierte en una de las principales fuentes de energía. La composición de estos gases determina la homogeneidad de las mezclas, sin embargo, ello genera perturbaciones que modifican el grado de conversión necesaria permitiendo altas variaciones del poder calorífico, lo cual afecta la eficiencia de los equipos, la seguridad de la operación y sus operarios y aumenta la emisión de contaminantes, aspectos propios de cada proceso e industria que se encuentran sujetos a normativas y leyes.

En virtud de lo anterior, la investigación realizada se estableció con el objetivo principal de diseñar una logística para el aprovechamiento óptimo de los gases de refinería, teniendo en cuenta aspectos energéticos, ambientales y de seguridad, propios de la industria de los hidrocarburos.

Así las cosas, con fin de alcanzar el anterior objetivo, se procedió en el primer capítulo a describir el problema principal, el cual se encuentra enfocado en la aplicación de la metodología propuesta en el caso de estudio. En segundo lugar, se presentó el estado del arte a través de un enfoque global sobre la posibilidad de integrar diferentes aspectos, propios de cada tipo de proceso, con la finalidad de mejorar la intercambiabilidad de las corrientes de gases combustibles de manera regulada, constante y eficiente. En el tercer capítulo se muestran conceptos básicos, como son, la clasificación de los gases combustibles, la intercambiabilidad de los mismos y los conceptos que engloban el caso estudiado, a su vez, se describen los parámetros utilizados para la evaluación de las corrientes de gas combustible. En el capítulo cuarto, se exponen el objetivo



general y los objetivos específicos del presente trabajo. En el quinto, se presenta la metodología aplicada desde la identificación y caracterización de las corrientes pertenecientes al proceso de quema (específico e interno) en la refinería evaluada; se muestra también la simulación del caso estudiado, teniendo en cuenta los diferentes aspectos que lo caracterizan y su posterior ajuste basado en datos de campo; así mismo, se trabaja la optimización enfocada en los aspectos evaluados integrados, y la logística de las corrientes provenientes de cada área de proceso, donde se evalúa la factibilidad de la aplicación de una red de gases combustibles. El sexto, está dedicado a los resultados obtenidos y a la evaluación normativa de cada uno de los aspectos analizados. Para finalizar, en el capítulo séptimo se proponen las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El gas combustible representa una fuente importante de energía para las industrias, en especial, para la de los hidrocarburos, y aunque en su mayoría los componentes son similares, la mezcla de estos entre sí, unión de gases naturales y gases de refinería, se ve afectada por diferentes factores y, entre estos, por los pre-tratamientos realizados. Por lo tanto, teniendo en cuenta que la heterogeneidad de las mezclas de gases combustibles representa una problemática que envuelve una variación de diferentes aspectos del proceso de quema en refinería, resulta necesario desarrollar alternativas prácticas para mejorar el uso de estas corrientes, de tal manera que se pueda abordar la variabilidad de sus componentes, sus propiedades y los posibles cambios que surjan debido al proceso de quema; con el fin de obtener un diseño logístico óptimo en donde sea posible asociar problemas de combustión detonante no controlada, emisiones de CO₂ por horno al medio ambiente y la alta variación del poder calorífico durante el proceso de quema, principales problemas que afectan a la refinería evaluada.

Teniendo en cuenta que la heterogeneidad de las mezclas de gases combustibles puede ser juzgada con base en el aspecto energético relacionándolo con la alta variación del poder calorífico durante el proceso de quema, al no tratarse de un hecho aislado, resulta necesaria la integración de otros aspectos que de igual forma se ven afectados, como el aspecto ambiental por un aumento en las emisiones de CO₂ por horno al medio ambiente, y el aspecto de seguridad debido a la combustión detonante no controlada, en busca de la sostenibilidad y eficiencia del proceso. En consecuencia, pueden ser analizadas cada una de las corrientes asociadas a un proceso de quema determinado, al relacionar una propiedad principal de cada corriente, con un método de medición denominado parámetro

que analice el grado de intercambiabilidad entre las corrientes evaluadas, en busca de reducir los efectos adversos presentados durante el proceso de quema.



2. ESTADO DEL ARTE

2.1. ESTUDIOS SOBRE INTERCAMBIABILIDAD

Teniendo en cuenta que cada gas combustible se ve representado de acuerdo a sus propiedades (composición, contaminantes, gravedad específica, temperatura) [1], la variación de las mismas afecta tanto su desempeño como el de mezclas entre gases naturales, gases naturales y gases de refinería, y gases de refinería, los equipos utilizados (turbinas a gas, calderas, horno) y las características propias del proceso evaluado [2]. Es por ello, que el asociar las principales propiedades de los gases combustibles pertenecientes a un proceso de combustión determinado es una manera eficaz para reducir fenómenos como la heterogeneidad en mezclas de gases, daños en hornos, reducción de la eficiencia energética, así como cambios en las emisiones del proceso [3].

Por su parte, la evaluación de un proceso de combustión dentro de cualquier sector de la industria del gas presenta una sinergia entre los diferentes aspectos de la empresa estudiada, es por ello que cualquier ineficiencia crea inconvenientes que afectan a toda la industria [4]. Como resultado se hace necesario el análisis exhaustivo de los efectos derivados de cada problema para contar siempre con procesos de quema integrales y sostenibles [5].

Ahora bien, se asocia el análisis de las características de los gases combustibles con los principales problemas que se presentan, se logra definir un parámetro o indicador con el cual se puede evaluar la incidencia del daño dentro del proceso general. Así mismo, es posible desarrollar diferentes métodos que dependerán

principalmente para su aplicación del tipo de proceso estudiado [6] y, a su vez, de los aspectos más significativos que se vean afectados por la ineficiencia del proceso de combustión.

Debido a lo anterior, es necesario el análisis de las posibilidades de control, tanto de los factores que afectan a la mezcla, como a la intercambiabilidad de los gases dentro del proceso, con la finalidad de mantener un proceso de quema estable en el que no se reduzca su eficiencia [4,7].

Para lograr una ubicación más precisa dentro del contexto evaluado, se presenta a continuación una pequeña reseña de la evolución del concepto de intercambiabilidad. Para empezar se puede afirmar que los primeros estudios realizados en los años cuarenta por parte de la Asociación Americana de Gas (AGA), se enfocaron en la creación de índices orientados en la descripción del comportamiento de la llama de gas, basados en la evaluación del poder calorífico [8]. Posteriormente, se crearon nuevos índices basados en factores como las puntas amarillas, utilizando para el análisis gas natural y gases suplementarios, recreando mezclas de poderes caloríficos mayores al gas natural [9]. En los años cincuenta, se comenzaron a incluir factores como la velocidad de llama y la combustión incompleta. A su vez, se han realizado ajustes y limitaciones dentro de la composición, se hallaron rangos de intercambiabilidad para el gas natural y el gas licuado de petróleo vaporizado, y se extendieron los análisis al gas domiciliario [10]. Finalmente, se han extendido los estudios a otros sectores, como es el caso del sector vehicular y, se comenzó a implementar en diferentes partes del mundo, por ejemplo, en países del oriente como China y Japón [11]. En conclusión, se puede decir que la intercambiabilidad ha sido utilizada como un aspecto importante para la determinación del manejo de los gases en diferentes áreas de la salud [12], la industria, el espacio domiciliario [13] y el transporte [14].

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede ver que, aunque el análisis de la intercambiabilidad se ha estudiado y aplicado por más de medio siglo, aún existen áreas como las mezclas compuestas solo de gases de refinería, donde no se ha llegado a aplicar y que han ido tomando fuerza [15, 16].

2.2. RED DE GASES COMBUSTIBLES

Actualmente los procesos de combustión que se desarrollan en una refinería utilizan gases de refinería (corrientes de gas que se generan durante el proceso de refinación), así como gas natural. Las mezclas de estos gases son usadas para proporcionar energía a los equipos de combustión (hornos y calderas), consumiendo en promedio 60 MBTU/D de gas combustible [17]. Sin embargo, estas mezclas deben ser usadas a medida que se producen ya que generan altos costos si se llegan a almacenar. Los gases de refinería presentan una composición variable debido a que dependen del tipo de proceso del que provengan y las características del combustible utilizado, y los gases naturales varían dependiendo del campo de producción de donde provenga. 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 mezclas de gas natural y gases de refinería que provienen de diferentes procesos (gas de tratamiento con amina, de hidrogeno, y gas de la cima de la recuperado (absorbedora) de etano-etileno, por ejemplo), estos gases no son totalmente

intercambiables, a su vez, no son evaluados antes de ser quemados y sus impactos aumentan al ser usados como combustible. Por ende cada proceso de quema y horno, pueden ser estudiados individualmente con el fin de distribuir de la mejor manera todas las corrientes de gas combustible, bien sean natural o de refinería, que componen el proceso, lo anterior, en busca de mantener la eficiencia energética durante el tiempo que dure el proceso de quema. Lo cual puede ser denominado como red de gases combustibles, ya que al aplicar técnicas logísticas para organizar las corrientes de gas combustible en función a los problemas que producen al momento de quema y sus efectos, podemos crear una cadena de suministro eficiente que mantenga los efectos de la mezcla de gases combustibles en un mínimo manejable.

Los aspectos, por ejemplo aspectos ambiental, energético, económico, pueden ser asociados por medio de la evaluación del principal problema, por aspecto, con los gases combustibles y la variación en la composición de cada uno de estos gases por corriente dentro de la empresa analizada [17]. El problema principal de cada aspecto, puede ser evaluado por medio de parámetros medibles basados en la forma en que las corrientes de gas combustible y su composición afectan factores básicos del proceso de combustión (temperatura, presión, porcentaje molar) y las emisiones al medio ambiente [17,18].

Un ejemplo de factor afectado que puede ser ligado con múltiples aspectos de alta relevancia es la temperatura, el que, como parte importante del proceso de quema, se encuentra asociada a diferentes problemas como los de seguridad y ambientales [18, 19]. La temperatura cambia su nivel de incidencia dependiendo del área y del proceso analizado, pero son sus variaciones las que crean dificultades que van desde daños mínimos en el material hasta incendios [20, 21]. En este sentido, la utilidad en el análisis de la temperatura se ve representada en

diferentes investigaciones donde se relacionan sus variaciones con diferentes problemas que pueden afectar la eficiencia de la combustión, por ejemplo, al relacionar los límites que pueden favorecer la quema de mezclas de gases entorno a una temperatura de referencia, para posteriormente realizar predicciones al respecto [22]. Así mismo, en métodos de evaluación como el aplicado para la velocidad de la flamabilidad de los gases, se da gran importancia a la estabilidad de la temperatura para obtener los mejores resultados en su análisis [23, 24].

Al evaluar cada una de las propiedades se pueden obtener los rangos de trabajo óptimos, pero es su integración, lo que puede variar dependiendo del proceso que se realice así como de los aspectos evaluados, lo cual constituiría un rango general donde se mantengan las características del proceso constantes y se reduzca al mínimo la problemática asociada [25, 26].

2.3. INTEGRACIÓN DE ASPECTOS PARA LA SOSTENIBILIDAD

Al hablar de la integración (unión, de aspectos para la sostenibilidad del proceso de combustión), generalmente se piensa en el transporte de gases por medio de tuberías e infraestructura, sin embargo, se refiere a un método con el cual se organizan las corrientes de gas combustible para predecir, prevenir y reducir los problemas dentro de la mezcla de gases al momento de combustión, tratando de mantener constantes determinados parámetros, con la finalidad de evitar daños en equipos, infraestructura y al personal encargado del proceso [27, 28]. Con fundamento en lo anterior, se desarrollan metodologías basadas principalmente en aspectos propios de cada empresa en busca de la viabilidad de sistemas seguros que vayan de acuerdo con el desarrollo interno de la empresa [29, 30].

Dicha integración de aspectos puede ser descrita matemáticamente por medio de modelos estadísticos, paramétricos o algoritmos para diseñar la red de gases combustibles para determinado proceso de quema [31, 32], conjugando los diferentes aspectos que influyen directamente [29, 33]. Teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, incluimos el estudio de las corrientes de gas combustible en cada área del complejo, para poder definir las corrientes que puedan generar efectos que alteren el proceso de quema. En este sentido, se determina el planteamiento de la red de gases para un horno y las corrientes que llegan a él dentro del complejo, basándose en las propiedades de los gases combustibles y los aspectos que afectan las corrientes analizadas, que son problemas extrapolables al mismo complejo industrial en general [34, 35]. Es por medio de la evaluación de las propiedades de los gases combustibles (en primer lugar de manera controlada, seguidamente aplicando los mecanismos necesarios para su ajuste en un ambiente isotérmico e isobárico), que se puede aplicar el diseño logístico de red de gas en forma más real, buscando con ello la reducción de costos por medio del rediseño de procesos de quema que disminuyan emisiones y del mejor uso a los equipos involucrados en el proceso [24, 36].

3. FUNDAMENTOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS

Existe una gran variedad de gases combustibles que poseen diferentes propiedades físicas y químicas. Los gases pueden clasificarse según la forma de obtención, en naturales o manufacturados; pero teniendo en cuenta la amplia variabilidad de los gases, se hace necesario el análisis y caracterización de los gases combustibles a fin de tener una guía enfocada principalmente en la eficiencia energética de los mismos al momento de combustión y, de esta manera, poder integrar varias corrientes dentro de un mismo proceso de combustión basados en la reducción de diferentes efectos negativos producidos por problemas como la combustión detonante no controlada, emisiones de CO₂ por horno y variaciones del poder calorífico, y a su vez, nuevas corrientes que puedan ingresar al proceso de combustión evaluado debido a la disponibilidad de los gases combustibles trabajados [37, 38].

Dentro del proceso de refinación se encuentran diferentes gases combustibles provenientes de las diversas áreas de la refinería, los cuales no tienen una caracterización previa a su quema. Así, aunque las condiciones del proceso no cambien, las variaciones dentro de la composición y los pre tratamientos realizados pueden generar turbulencias y reducción de la eficiencia al momento de la quema, así como daños en los equipos. En este sentido, a continuación se presentan los parámetros aplicados para evaluar la intercambiabilidad de los gases combustibles.

3.1.1. Índice de Wobbe

Parámetro con el cual se evalúa la eficiencia energética de cada gas combustible evaluado y les agrupa en función de su potencial energético. Los valores que se obtienen al aplicar el Índice de Wobbe se clasifican por rangos de valores; dentro de cada rango se encuentran los gases combustibles que pueden ser intercambiables entre sí. A continuación se define la fórmula principal [39]:

$$w = \frac{PCS}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

Donde:

PCS= Poder Calorífico Superior

d = densidad específica

W =índice de Wobbe, kWh/m³

A partir de la ecuación se puede obtener el índice de Wobbe para una mezcla que se puede calcular por medio de la ecuación:

$$W_m = \frac{PCS_m \sum X_i PCS_i}{\sqrt{d_m} X_i d_i} \quad (2)$$

Donde,

W_m = índice de Wobbe de la mezcla en kWh/m³

PCS_m = poder calorífico superior de la mezcla kWh/m³

PCS_i = poder calorífico superior del componente i , kWh/m³

d_m = densidad específica de la mezcla

Al respecto, se clasifican los valores resultantes por medio de una división en familias y grupos. Debe tenerse en cuenta que los gases que pertenecen a una misma familia pueden ser intercambiables entre sí, mientras que si se encuentran en diferentes familias no pueden intercambiarse. Se evaluará el resultado de la aplicación del índice de Wobbe por corriente, por medio de la siguiente tabla [39, 40]:

Tabla 1 Clasificación de los combustibles gaseosos según el índice de Wobbe (a condiciones normales de presión y temperatura)

FAMILIA	DENOMINACIÓN		W [kWh/m ³]
Primera	Gases manufacturados		6000-9000
	Grupo A	Gas de Ciudad	6000-8000
	Grupo B	Gas de coquería	7000-9000
	Grupo C	Gases de mezcla Hidrocarburo- Aire	6500-9000
Segunda	Gas natural		11000-17000
	Grupo H	De alto W	13500-17000
	Grupo L	De bajo W	11000-13500
Tercera	Gases licuados del petróleo (GLP)		21500-26000

Fuente: AMELL, Andrés., et al. Tecnología de combustión de Gases y Quemadores Atmosféricos de Pre mezcla. Medellín, Universidad de Antioquia 1996 p.24.

Primera familia. Agrupa los gases combustibles de bajo poder calorífico, también conocidos como manufacturados. Los grupos representativos de esta familia son:

Grupo A (Gas de ciudad): consiste en un gas que contiene monóxido de carbono, hidrógeno y, en menor proporción, metano así como oxígeno y gases



inertes; la composición y propiedades dependen de la fuente de obtención, del proceso utilizado y de la reglamentación vigente.

Grupo B (Gas de coquería): está constituido por los gases no condensables obtenidos a partir de la pirólisis o destilación destructiva del carbón que se realiza aproximadamente a 1200°C en ausencia de aire, durante la fabricación del coque metalúrgico.

Grupo C (Gases de mezcla hidrocarburo-aire): consisten en mezclas de propano comercial o butano comercial con aire en tal proporción que la concentración de hidrocarburos esté sobre del límite superior de inflamabilidad. Se usa principalmente para sustituir el gas natural. Las propiedades dependen de la composición y del tipo de hidrocarburos que se utilice para la mezcla.

Segunda familia. Comprende gases combustibles que tienen como componente principal el metano y se divide en dos grupos, el H representado por el gas natural y el L que agrupa a los gases de refinería.

Grupo H (Gas natural): es una mezcla de hidrocarburos livianos en estado gaseoso, que está constituido principalmente por metano y etano, y en menor proporción, se encuentra propano, butanos, pentanos e hidrocarburos más pesados. Adicionalmente, posee algunos componentes no deseados como el vapor de agua, gas carbónico, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno, mercaptanos, helio y dióxido de carbono.

Grupo L (Gas de refinería): es la mezcla de hidrocarburos, producto de las operaciones de refinación del petróleo. Normalmente, se derivan corrientes de gas combustible de distintas unidades de proceso, se concentran en un punto común de mezcla en la planta, y es esta mezcla la que se utiliza como combustible en hornos de proceso y calderas.

Su composición es bastante heterogénea debido a la variación de las unidades de procesamiento que aportan gas; los componentes usuales del gas de refinería son: hidrógeno, metano, propano, butanos, pentanos, etileno, sulfuro de hidrógeno, entre otros.

Tercera familia. Corresponde a los combustibles gaseosos subproducto de la destilación fraccionada del petróleo, llamados gases licuados del petróleo (GLP).

El GLP es una mezcla de hidrocarburos livianos constituida principalmente por propano, butano y compuestos derivados de éstos, en proporciones variables y que a condiciones normales se presenta en estado gaseoso, sin embargo, son almacenados y manipulados como líquidos por aplicación de una presión moderada a temperatura ambiente y/o descenso de temperatura [40].

3.1.2. Número de metano

Parámetro que describe el comportamiento de la combustión detonante no controlada, que es auto iniciada en zona de gases del frente de llama (Combustión denominada como KNOCK) principalmente en turbinas a gas; su aplicación puede

extenderse a diferentes equipos y áreas. El método se basa en el análisis de la comparación del radio de compresión de un gas combustible, con un combustible de referencia el cual presenta un golpeteo al mismo radio de compresión [27, 41].

Este índice de resistencia al knock se puede definir como porcentaje en volumen de metano, que mezclado con hidrógeno coincide con la detonación de una mezcla de gases combustibles diferentes bajo condiciones determinadas. Los valores resultantes se encuentran principalmente entre 0 y 100, medida adimensional basada principalmente en la similitud de la resistencia con los gases de referencia, metano e hidrógeno.

$$\text{CH}_4: \quad \text{MN} = 100$$

$$\text{H}_2: \quad \text{MN} = 0$$

(3)

Al metano, con alta resistencia al knock, se le asigna un número de metano (MN) de 100. Hidrógeno, con la más baja resistencia al knock, se le asigna un número de 0. El MN compara cualquier mezcla gaseosa x con el valor que corresponde a una mezcla gaseosa metano/hidrógeno, definiendo de esta manera el valor de referencia de resistencia al knock para la mezcla gaseosa x . Este rango de trabajo no es cerrado, pueden presentarse valores mayores a 100 lo cual representaría principalmente que la resistencia al golpeteo es aún menor que la presentada por una mezcla metano/hidrogeno de 100% de metano [41, 42]. Su evaluación puede dar información sobre la composición del gas combustible evaluado, posibilidades de mezcla, eficiencia, daños, desempeño y modificaciones de los equipos. Se realiza aplicando la siguiente ecuación (4) con la cual se determina el número de metanos por medio del método de relación de radios (Hidrógeno/Carbono):

$$\text{MN} = 1.624 * (406.14 + 508.04 * \text{RHCR} - 173.55 * \text{RHCR}^2 + 20.17 * \text{RHCR}^3) - 119.1 \quad (4)$$

Donde RHCR representa la relación entre el radio de hidrógeno y el radio de Carbono, relación que se encuentra dada por la ecuación (5) [41, 42]:

$$RHCR = (\%metano * 4 + \%etano * 6 + \%propano * 8 + (\% 32 iso - butano + \% n - butano) * 10 + (\% iso - pentano + n - pentano) * 12 + (\% hexano y largas cadenas de hidrocarburos) * 14) / (\%metano * 1 + \%etano * 2 + \%propano * 3 + (\% 32 iso - butano + \% n - butano) * 4 + (\% iso - pentano + \% n - pentano) * 5 + \% (hexano y largas cadenas de hidrocarburos) * 6)$$

(5)

3.1.3. Medición de las emisiones de CO₂ al medio ambiente

El parámetro relacionado con el medio ambiente puede analizarse en diferentes partes del proceso, tanto en las emisiones estacionarias, como en equipos [28,43]. Para el caso de estudio se utilizó la metodología aplicada en la medición de emisiones de CO₂ en hornos, considerando que la medición se realiza en la puerta del horno [28, 43]. Se estimaron las posibles emisiones de CO₂ teniendo en cuenta la consideración de que se hará una combustión completa [28, 44]. Para combustión de gases combustibles, se calcula teniendo en cuenta la ecuación (6):

$$E_{CO_2} = FC * \frac{1}{Conversión\ molar\ volumen} * MW_{Mezcla} * Wt\%C_{Mezcla} * \frac{44}{12}$$

(6)

Donde,

E_{CO_2} = Emisiones en masa de CO₂ (lb o kg)

FC= Combustible consumido (scf o m³)

Conversión molar volumen= (379.3 scf/lbmol o 23.685 m³/kgmol)

MW_{Mezcla} =Peso Molecular de la mezcla

$Wt\%C_{Mezcla}$ = Contenido de carbón en una mezcla de combustible. Ecuación (7).

$$Wt\%C_{Mezcla} = \frac{1}{100} * \sum_{i=1}^{No.Componentes} (Wt\%_i * Wt\%C_i) \quad (7)$$

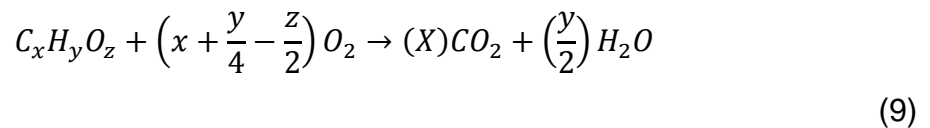
$Wt\%_i$ = porcentaje en peso del componente i

$Wt\%C_i$ = Contenido de carbono en el componente i sobre una base porcentual de peso.

$Wt\%C_{Cj}$ = contenido de carbón de cada hidrocarburo en porcentaje másico. Ecuación (8).

$$Wt\%C_{Cj} = \frac{\frac{12lbC}{lbmoleC} * \frac{x lbmoleC}{lbmoleCj}}{MW_{Cj} * \left(\frac{lb}{lbmole}\right)} * 100 \quad (8)$$

j = cualquier hidrocarburo compuesto por $C_xH_yO_z$ Ecuación (9).



X = coeficiente estequiométrico para el carbono (Ej. $X=3$ para el propano C_3H_8)

MW_{Cj} = peso molecular de cada hidrocarburo individualmente.

3.2. INTERCAMBIABILIDAD DE GASES

Dentro del área de investigación denominada intercambiabilidad de gases se indaga el rango bajo en el cual se puede variar la composición del gas combustible, con el fin de mantener un proceso de quema constante y eficiente, reduciendo los efectos negativos que se pueden presentar derivados de la variación del intercambio o de la variación de los diferentes gases que componen cualquier proceso dentro de unas condiciones de trabajo constantes [45, 46].

Aun cuando dos gases se encuentren clasificados dentro de una misma familia o posean parámetros similares no significa que sean 100% intercambiables, debido a que la composición del nuevo gas adicionado puede variar los efectos energéticos, ambientales y de seguridad dentro del proceso de combustión [47, 48]. Teniendo en cuenta que para que se dé una intercambiabilidad “ideal” es necesario que los dos gases en cuestión tengan la misma composición tanto en porcentajes como en componentes, es más factible mantener un rango de trabajo en el cual se puedan conservar estables [49, 50].

Para lo anterior, es indispensable extraer los siguientes enunciados basados en la intercambiabilidad:

- Clasificar los gases combustibles dentro de rangos óptimos determinados principalmente por el gas guía (elegido para el proceso de combustión evaluado). Así las cosas, para el caso de estudio, los rangos eficientes, son los siguientes para el tipo de gas natural tomado como guía fueron los siguientes: Índice de Wobbe (11000 – 13000 [kWh/m³]) con valores que se encuentran dentro de la segunda familia como se presentó en la tabla 1, número de

Metanos (75 - 95) y emisiones de CO₂ a la atmósfera (0- 2,5 [kg]). con el fin de que los equipos mantengan sus características de operación estables durante el proceso de quema.

- Mantener constantes los valores de los parámetros para aplicarlos como una medida de confianza enmarcada dentro de un rango definido como eficiente para los tres aspectos evaluados.
- Aportar a la creación de proyectos asociados para la corrección y prevención de daños relacionados con la eficiencia del proceso y los equipos utilizados.

Ahora bien, para poder cumplir con los enunciados antes descritos es necesario tener en cuenta dentro del estudio de la intercambiabilidad de los gases, lo siguiente:

- Mantener tanto las propiedades intrínsecas como la composición de los gases aplicados en un proceso determinado, así como el control de las características del proceso en el momento de quema.
- Evaluar la importancia de las condiciones de realización del proceso y de las posibles eventualidades que puedan surgir.
- Tener en cuenta los equipos utilizados para el proceso así como, la naturaleza de los gases utilizados y los pre tratamientos a los cuales han sido sometidos con la finalidad.

3.3. SISTEMAS INTEGRADOS DE GESTIÓN

El sistema integrado de gestión que se propone está compuesto por normas de carácter certificable, enfocado en garantizar la generación de una mezcla tipo que

sea óptima, por lo tanto, las normas que se van a tener en cuenta para este sistema de gestión son las siguientes:

- OHSAS 18001:2007. Sistemas de Gestión en seguridad y salud ocupacional. Requisitos con Orientación para su uso.
- ISO 50001:2011. Sistema de gestión de la Energía. Requisitos con Orientación para su uso.
- ISO 14001:2004. Sistemas de Gestión Ambiental. Requisitos con Orientación para su uso.

Al respecto, como primer paso se extraen los datos necesarios para el análisis de cada uno de los parámetros definidos, ordenándolos de acuerdo con el área de procedencia. Luego, se evalúan cada uno de los aspectos por medio de sus parámetros adjuntos, teniendo en cuenta la normatividad correspondiente.

A continuación se presentan cada uno de los sistemas de gestión que serán aplicados con sus respectivos aspectos y parámetros.

3.3.1. Aspecto de seguridad

El Sistema de Gestión de Seguridad, en el cual se enmarca el aspecto de seguridad, se basa en lo estipulado dentro de la norma OHSAS 18001, en su inciso 4.1. y a su vez, encontrándose de conformidad con la política de seguridad de la empresa, se construye bajo los siguientes lineamientos [51].



Como primera medida se debe establecer el procedimiento a evaluar, por medio de un parámetro determinado (número de metano y la seguridad y salud ocupacional "SySO") pertinentes). Así mismo, se debe estudiar, de manera documentada, el efecto de la combustión detonante no controlada en cada corriente, de tal manera que pueda ser usado dentro del proceso de diseño de la red de gases combustibles como datos de construcción e implementación en pro de la mejora continua del proceso, basada en los datos que se obtienen del procedimiento y su comparación en el transcurso del tiempo [51].

A continuación, se realiza la planificación del procedimiento, comenzando por el reconocimiento del aspecto de la seguridad y salud ocupacional (S y SO) evaluado (OHSAS 18001:2007; 3.6), el cual produce daños en hornos proporcionando así mismo, la información de seguridad y estabilidad mínima de la mezcla, reduciendo los peligros más significativos de la misma. Con el fin de adecuar el procedimiento a los requisitos legales y los requisitos propios de la empresa [51].

Por otra parte, el propósito principal es la evaluación del aspecto de la seguridad y salud ocupacional en condiciones de trabajo normales, para poder diseñar un procedimiento con el cual se pueda crear una guía de proceso que permita controlar y actuar en condiciones anormales o de emergencia, al ser puesto en marcha el procedimiento bajo las condiciones normales y teniendo en cuenta las condiciones de seguridad previamente existentes [51].

por último se debe tener en cuenta que, así como la seguridad y salud ocupacional se encuentran enmarcadas en una norma como es la OHSAS 18001:2007, la cual establece los requisitos con orientación para su uso, el parámetro denominado número de metano, posee normas que rigen su funcionamiento [41,52]. En este

sentido, la principal norma que se emplea al momento de aplicación del método es la siguiente:

- ISO/TR 22302:2014. Natural gas -- Calculation of methane number [27, 52]

3.3.2. Aspecto energético

El sistema de Gestión Energética, donde se enmarca el aspecto energético, está basado en lo estipulado dentro de la norma ISO 50001 en su inciso 4.1.y, encontrándose de conformidad con la política energética de la empresa, posee los siguientes lineamientos incluye con el fin de establecer un proceso constante de mejora respecto al aspecto energético, el establecer un procedimiento de evaluación de la variación en el tiempo del poder calorífico de cada corriente, por medio del Índice de Wobbe (parámetro energético), el cual debe ser documentado de tal manera que pueda ser usado dentro del proceso de diseño de la red de gases combustibles como datos de construcción e implementación.

Posteriormente, se realiza la planificación del procedimiento, comenzando por el reconocimiento del tipo de energía evaluada (ISO 50001:2011; 3.5), siendo para el caso de estudio la energía calorífica que puede ser generada al momento de quema de cada una de las corrientes evaluadas, estando el impacto más significativo del mismo en la alta variación en el tiempo del poder calorífico, lo que se ve representado en la pérdida de energía calorífica, así como en el desperdicio de energía que puede ser aprovechada dentro de la línea de base energética de la empresa (ISO 50001:2011; 3.6), reduciéndose de esta manera la dependencia de otras formas de energía. Además, se adecúa el procedimiento a los requisitos legales y otros requisitos propios de la empresa [53].

En cuanto a la planificación energética mencionada con antelación (ISO 50001:2011; 4.4), téngase en cuenta que esta se realiza por medio de la evaluación de un parámetro energético que identifique el poder calorífico presente en el proceso evaluado y lo distribuya, de manera eficiente, dentro de la línea de base energética de la empresa [53].

Al respecto, la finalidad energética principal es optimizar el uso y clasificación del gasto energético de las corrientes de gas combustible por medio de la agrupación de los gases en función de su potencial energético, aplicando como parámetro de evaluación el Índice de Wobbe en condiciones normales.

La normatividad que rige el parámetro del índice de wobbe se presenta a continuación:

- 54. UNE 60 002:1995 Clasificación de los combustibles gaseosos en familias. Orientación para su uso. [54]
- 55. UNE-EN ISO 6976:2005 Gas natural. Cálculo del poder calorífico, densidad, densidad relativa e índice de Wobbe a partir de la composición [55]

3.3.3. Aspecto Ambiental

El Sistema de Gestión Ambiental, donde se enmarca el aspecto ambiental y se basa en lo estipulado dentro de la norma ISO 14001 en su inciso 4.1. y encontrándose, de conformidad con la política ambiental de la empresa Se establece el procedimiento de evaluación del parámetro ambiental, con el objetivo de mejorar continuamente el proceso de combustión, por medio del estudio del

balance de masa de cada corriente, lo cual, debe ser documentado de tal manera que pueda ser usado dentro del proceso de diseño de la red de gases combustibles como datos de construcción e implementación, basado en los datos que se obtienen del procedimiento y su comparación en el transcurso del tiempo.

A continuación de lo anterior, se procede a planificar el procedimiento de evaluación del parámetro ambiental adecuando a los requisitos legales e industriales, mediante el reconocimiento de este aspecto evaluado (ISO 14001:2004; 3.6), teniendo en cuenta las emisiones de Dióxido de Carbono al medio ambiente, toda vez que no se puede dejar aún lado que ello genera impactos significativos como:

- Generación de gases contaminantes a la atmósfera
- Aumento del efecto invernadero [57]

La finalidad principal de este procedimiento se enfoca en controlar la emisión de contaminantes a la atmosfera, principalmente de Dióxido de Carbono CO₂ por horno, y el aumento del efecto invernadero (Impacto ambiental). Para este fin, se aplicará, como parámetro de análisis, la estimación de las emisiones de CO₂ por horno, por medio del estudio del balance de masa de cada corriente, evaluando cada una de las mismas como un gas combustible específico. A condiciones estándar, las condiciones que rigen la aplicación del parámetro son las siguientes [58]:

- Resolución 909 del 5 de junio de 2008
- Artículo 73 de la Resolución 909 de 2008

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar una logística para el aprovechamiento óptimo de gases de refinería teniendo en cuenta aspectos energéticos, ambientales y de seguridad.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las corrientes pertenecientes a un proceso de combustión determinado por medio de revisión de datos históricos de análisis cromatográficos de las corrientes de gas provenientes de procesos de refinería que aportan a la red de combustibles.
- Determinar las corrientes representativas usando como criterio de selección los parámetros definidos para los aspectos ambiental, energético y de seguridad.
- Diseñar por medio de análisis computacional un modelo del proceso de combustión para la evaluación de las diferentes mezclas de las corrientes representativas.
- Realizar experimentación estadística con las mezclas de las corrientes representativas con la finalidad de ajustar el modelo de combustión.
- Elaborar una función de optimización o rango Caracterice las corrientes pertenecientes a un proceso de combustión determinado incluyendo aspectos ambientales, energéticos y de seguridad con el fin de diseñar la logística para el aprovechamiento óptimo de los gases de refinería.

5. METODOLOGÍA

A continuación se presenta el diseño metodológico aplicado para la creación de una red de gases combustibles a partir de una población de 113 corrientes pertenecientes a un mismo proceso de quema, de donde se extrajo una muestra de 94 corrientes, sobre las cuales se realizará un análisis experimental, evaluando 19 compuestos comunes a todas las corrientes pero que en la mayoría de ellas se encuentran presentes en diferentes porcentajes lo cual modifica las propiedades y sus efectos en el proceso de quema. Apoyados en un enfoque mixto por ser cualitativo y cuantitativo, el primero, por cuanto se desea extraer valores determinados que puedan ser usados como base para el diseño de un sistema de gestión y, el segundo, por cuanto se cuenta con resultados puntuales, se pueden definir los rangos eficientes para el proceso de quema, con la finalidad de implementar una red de gases que pueda mantenerse y mejorar a través del tiempo. En la figura 1 se presenta la metodología general empleada por medio de etapas y en la figura 2 se esquematiza el proceso completo por medio de un mapa conceptual.

Figura 1 Metodología general del proyecto

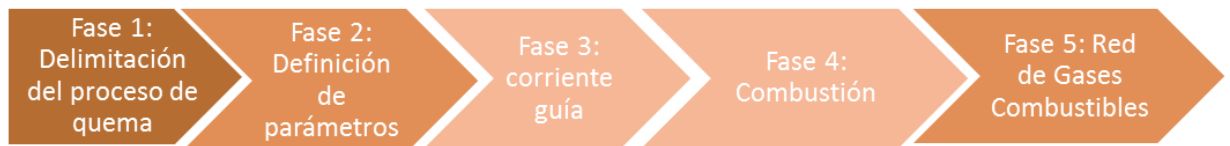
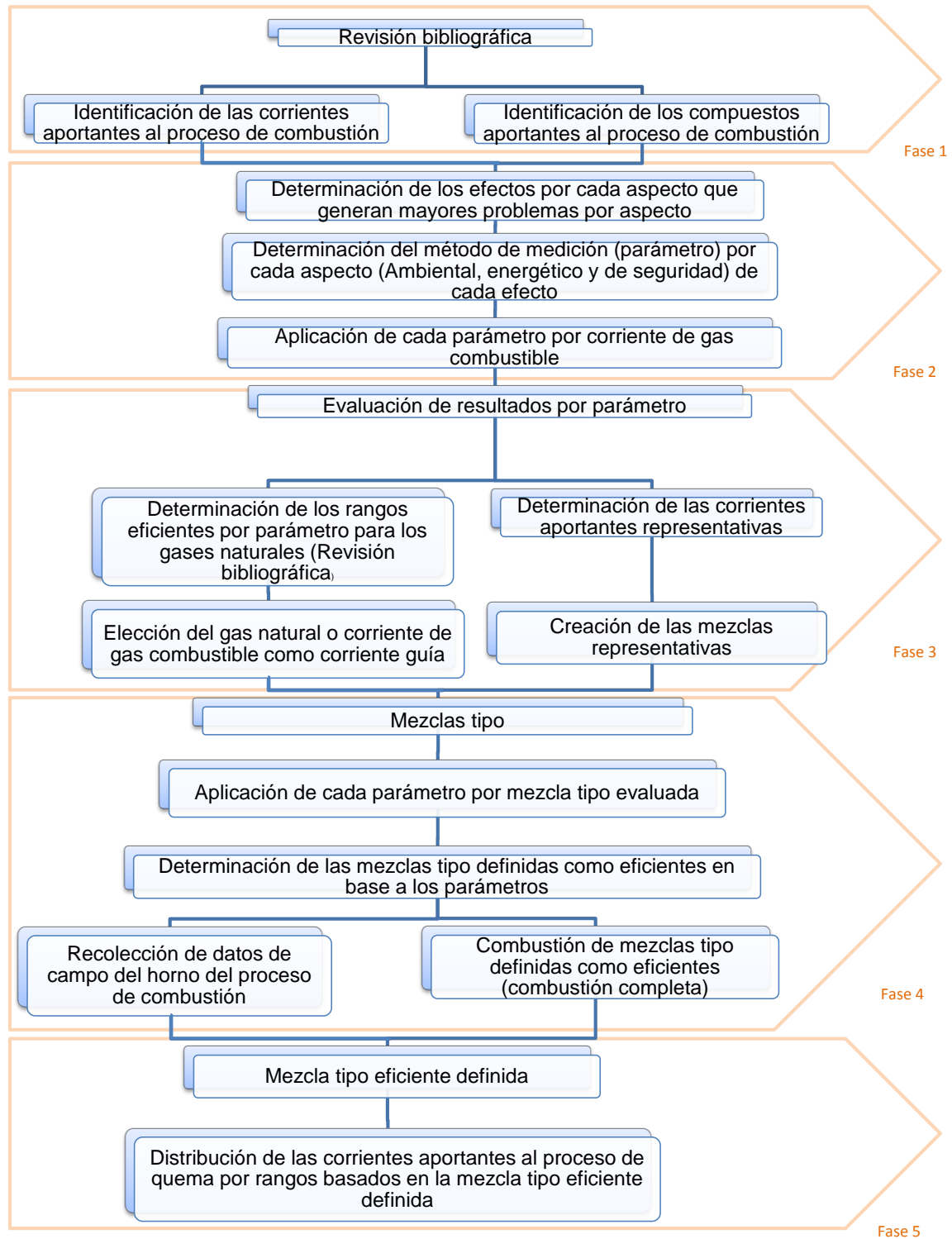


Figura 2 Mapa conceptual de la metodología general del proyecto



5.1. DELIMITACIÓN DEL PROCESO DE QUEMA

5.1.1. Identificación de las corrientes aportantes al proceso de combustión

Con el fin de identificar las corrientes que contribuyen a la red de gases del horno denominado SG-104 de la Refinería de Cartagena se revisaron los datos históricos cromatográficos de 113 corrientes de gas combustible provenientes de distintas unidades de la refinería, en un periodo de dos años, con la finalidad de determinar si cada corriente puede evaluarse como un gas combustible diferente.

5.1.2. Identificación de los compuestos aportantes al proceso de combustión

Hasta el momento, el análisis de las mezclas de gases dispuestas para quema se realiza por medio de la evaluación de cada compuesto, evaluando principalmente los compuestos que crean mayores problemas durante la combustión. Dentro de la red de gases combustibles a crear para un determinado proceso de quema, aun cuando se evalúa por corriente de gas combustible, debe tenerse en cuenta que son los compuestos los que determinan la diferencia entre una corriente y, otra, sus efectos al momento de quema, por lo tanto, se requiere del estudio de análisis cromatográficos, para proceder a determinar los compuestos que influyen en el proceso de quema.

5.2. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

5.2.1. Determinación de los efectos por cada aspecto que genera mayores problemas por aspecto

La composición de los gases combustibles genera impactos negativos en el proceso de quema y en la vida útil de los equipos de combustión (hornos y calderas), debido a la alta variación que se presenta en el poder calorífico de la mezcla de corrientes heterogéneas, entre 800 y 2500 Btu/pie³, puesto que las corrientes de gases combustibles heterogéneas, provenientes de las diferentes áreas de la refinería, entran en el horno sin un análisis previo. En este sentido, y teniendo en cuenta los aspectos evaluados (ambiental, energético y seguridad) se encontró, por medio de revisión bibliográfica, que los principales efectos que se pueden presentar en el proceso de quema evaluado son las emisiones de CO₂ por horno, alta variación en el tiempo del poder calorífico y la combustión detonante no controlada.

5.2.2. Determinación del método de medición (parámetro) por cada aspecto (Ambiental, energético y seguridad) de cada efecto

Para medir y poder controlar los efectos evaluados (Emisiones de CO₂ por horno, la alta variación en el tiempo del poder calorífico y la combustión detonante no controlada) se escogieron métodos de medición que no dependieran directamente del flujo de gas, sino que se encontraran enfocados en las variaciones de la composición de cada corriente y el tipo de compuestos, sirviendo a su vez, de guía al momento de implementar una regulación por aspecto (Ambiental, energética y

seguridad) para el seguimiento, prevención y mejora continua de cada efecto dentro del proceso de quema evaluado.

Los métodos de medición (parámetro) por efecto y aspecto escogidos para el proyecto son los siguientes:

Tabla 2 Método de medición (parámetro) por aspecto evaluado

ASPECTO ENERGÉTICO	<p align="center">Parámetro Energético: Índice de Wobbe</p> $w = \frac{PCS}{\sqrt{d}} \quad W_m = \frac{PCS_m \sum X_i PCS_i}{\sqrt{d_m} X_i d_i}$
ASPECTO DE SEGURIDAD	<p align="center">Parámetro de Seguridad: Numero de Metano</p> <p>CH4: MN = 100 H2: MN = 0</p> $MN = 1.624 * (406.14 + 508.04 * RHCR - 173.55 * RHCR^2 + 20.17 * RHCR^3) - 119.1$ <p>RHCR = (%metano * 4 + %etano * 6 + % propano * 8 + (% iso - butano + % n - butano) * 10 + (% iso - pentano + n - pentano) * 12 + (% hexano y largas cadenas de hidrocarburos) * 14) / (%metano * 1 + % etano * 2 + % propano * 3 + (% iso - butano + % n - butano) * 4 + (% iso - pentano + % n - pentano) * 5 + % (hexano y largas cadenas de hidrocarburos) * 6)</p>
ASPECTO AMBIENTAL	<p align="center">Parámetro Ambiental: Emisiones de CO₂ por horno</p> $E_{CO_2} = FC * \frac{1}{Conversion \ molar \ volumen} * MW_{Mezcla} * Wt\%C_{Mezcla} * \frac{44}{12}$

5.2.3. Aplicación de cada parámetro por corriente de gas combustible

Con base en el análisis de los principales problemas o efectos (Emisiones de CO₂ por horno, la alta variación en el tiempo del poder calorífico y la combustión detonante no controlada) que se presentan en el proceso de quema analizado, se

procede a asociar por medio de métodos de medición (parámetros) el grado de daño que puede generar una corriente determinada al ser quemada individualmente.

Inicialmente, se caracterizan cada una de las corrientes de la muestra que aportan al proceso de quema evaluado, para conocer por aspecto su influencia dentro del proceso de quema. Cada corriente es evaluada por medio del parámetro ambiental emisiones de CO₂ por horno, energético Índice de Wobbe, y de seguridad a través del Número de Metano.

5.3. CORRIENTE GUIA

5.3.1. Determinación de los rangos eficientes por parámetro para los gases naturales

Dentro de los gases combustibles en general, los gases naturales son los gases más usados y la mayoría de los equipos de combustión son diseñados para la quema de los mismos, por ende, los valores del gas natural al ser evaluados por cada parámetro representan una guía para mantener los efectos (ambiental, energético y de seguridad) en un mínimo manejable.

En este sentido es importante recordar que el gas natural no puede generalizarse como un solo gas combustible, ya que dependiendo principalmente de su lugar de extracción su composición y características pueden variar dentro de un rango de valores determinado, por ende, sus resultados por método de medición

(parámetro) se pueden agrupar dentro de un rango específico por método. Los rangos definidos como óptimos para el tipo de gas natural tomado como guía fueron los siguientes: Índice de Wobbe (11000 – 13000 [kWh/m³]) con valores que se encuentran dentro de la segunda familia como se presentó en la tabla 1, número de Metanos (75 - 95) y emisiones de CO₂ por horno (0- 2,5 [kg]).

5.3.2. Determinación de las corrientes aportantes representativas

Teniendo en cuenta los rangos definidos para los gases naturales como guía, se separan las corrientes aportantes al proceso de combustión evaluada por medio de los parámetros (emisiones de CO₂ por horno, Índice de Wobbe y número de Metanos), se toman las corrientes que cumplen con los tres rangos y las corrientes que no cumplen con los tres rangos para poder abarcar la mayoría de las corrientes de la muestra.

Las corrientes que cumplen y las que no cumplen con los rangos son mezcladas con un paso de 5%, como ejemplo podemos asumir que se obtuvieron 2 corrientes (C₁ y C₂) que cumplen y 2 corrientes (C₃ y C₄) no cumplen, la mezcla puede ser [(5%*C₁) + (95%*C₂) + (0%*C₃) + (0%*C₄)] o [(5%*C₁) + (45%*C₂) + (20%*C₃) + (30%*C₄)] entre otras, siendo en total 1767 las mezclas posibles para este caso.

5.3.3. Elección del gas natural o corriente de gas combustible como corriente guía

Dentro de las 94 corrientes de la muestra, se encuentran tres corrientes de gas

natural, las cuales corresponden a gases combustibles de dos regiones diferentes del país. En este sentido, se tiene que las corrientes 1 y 2 corresponden a pozos en la zona de la guajira, y la corriente 3, a pozos de la zona de Barrancabermeja. La corriente 3 permite mayor posibilidad de abastecimiento a futuro y que para la presente investigación es la que principalmente se ha tomado. Al respecto, es pertinente traer a colación la siguiente Tabla: La corriente se detalla a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3 Composición del gas natural utilizado en caso de estudio (corriente 3)

Componente	Porcentaje Molar
Dióxido de Carbono	0
Nitrógeno	1,26
Hidrogeno	0
Metano	91,46
Etano	6,26
Etileno	0
Propano	0,44
Propileno	0,01
Is o-Butano	0,09
Is o-Pentano	0,16
N-Butano	0,13
Total Oleafinas	0,06
Oxígeno	0,13
Monóxido de Carbono	0
H ₂ S	0

Fuente: composición suministrada por Ecopetrol

5.4. COMBUSTIÓN DE MEZCLAS TIPO

5.4.1. Mezclas tipo

Se realiza una comparación con un paso de 0,1, entre la corriente 3, elegida como corriente guía, y las mezclas representativas realizadas al mezclar las corrientes que cumplen y no cumplen con los rangos [Índice de Wobbe (11000 – 13000 [kWh/m³]), número de Metanos (75 - 95) y emisiones de CO₂ por horno (0- 2,5 [kg])] denominados como eficientes por ser los rangos de los gases naturales a condiciones estándar. Así las cosas, la evaluación se realiza comparando cada compuesto de cada mezcla representativa con cada compuesto de la corriente guía (corriente 3) con una diferencia máxima entre compuestos comparados de -0,1 ó 0,1, las mezclas representativas donde todos sus compuestos cumplen, se denominan como mezclas tipo.

5.4.2. Aplicación de cada parámetro por mezcla tipo evaluada

Tomando las mezclas tipo obtenidas al comparar con la corriente guía (corriente 3), como corrientes nuevas con características diferentes, se realiza la evaluación de estas mezclas por medio de los parámetros (ambiental, energético y de seguridad) antes definidos con la finalidad de conocer si cumplen con los rangos determinados para cada aspecto [Índice de Wobbe (11000 – 13000 [kWh/m³]), número de Metanos (75 - 95) y emisiones de CO₂ por horno (0- 2,5 [kg])], tomando para este caso solo las mezclas tipo que cumplan con cada uno de los rangos, definiéndolas como eficientes para llevar al horno para quema.

5.4.3. Combustión de mezclas tipo

Se realizó el proceso de combustión de las mezclas tipo resultantes por medio de simulación en combustión completa, seguidamente los resultados obtenidos para cada una de las mezclas tipo se compararon con los datos de campo para el mismo proceso de combustión. Luego se procedió a elegir la mezcla tipo que representaba mejor a todas las corrientes del proceso, denominándola como mezcla tipo eficiente.

Para el proceso de combustión se realizó una simulación por medio de una clase basada en el paquete de herramientas de Matlab para combustión, utilizando el entorno de desarrollo software Visual Studio Ultimate 2012.

5.5. REDES DE GASES

Una vez tomada la mezcla tipo eficiente se procede a compararla con las corrientes provenientes de las diferentes áreas de la refinería que aportan al proceso de quema, para poder definir las posibilidades de mezcla entre las corrientes aportantes, tratando de mantener las características y la eficiencia del proceso constantes a través del tiempo, y tratando de mantener controlados los efectos evaluados (Emisiones de CO₂ por horno, la alta variación en el tiempo del poder calorífico y la combustión detonante no controlada), en lo que tiene que ver con los aspectos evaluados ambientales, energéticos y de seguridad.

A partir de lo anterior, se procede a separar las corrientes en relación a la mezcla



tipo eficiente, separándolas en diferentes niveles entre los cuales se presenta una sinergia que permite mezclarlas y, a su vez, se debe mantener constantes los rangos de trabajo de cada uno de los parámetros evaluados [Índice de Wobbe (11000 – 13000 [kWh/m³]), número de Metanos (75 - 95) y emisiones de CO₂ por horno (0- 2,5 [kg])].

Ahora bien, debe tenerse en cuenta que los niveles en que se divide la red de gases son denominados como: gas óptimo, gas natural, gases meta, mezcla tipo, ventana operativa y descartable. Es importante resaltar, que la distribución de las corrientes y su integración en mezclas dependerán del resultado de la comparación con la mezcla tipo eficiente.

6. RESULTADOS

6.1. DELIMITACIÓN DEL PROCESO DE QUEMA

El caso de estudio comprende el horno, denominado SG-104 y una población de 113 corrientes que son quemadas de manera continua en dicho horno. De la población de 113 corrientes, se toma una muestra de 94 corrientes para su evaluación, siendo los compuestos que se tomaran en estudiados los siguientes Butilenos, C5 y más Pesados (hexano), Dióxido de Carbono, Etano, Etileno, H₂S, Hexano, Hidrogeno, Iso-Butano, Iso-Pentano, Metano, Monóxido de Carbono, N-Butano, Nitrógeno, N-Pentano, Oxigeno, Propano, Propileno, Total Olefinas (Etileno)

La muestra de corrientes se presenta a continuación por el área de la cual procede cada una dentro de la refinería, y a su vez, a cada corriente se le asignó un numero para realizar su seguimiento durante el procedimiento. Las áreas y su respectiva cantidad de corrientes son las siguientes: área de gases de campos, de donde provienen 3 corrientes; el área de producción dentro de la refinería es amplia y posee dos sub-áreas: cracking con 8 corrientes y petroquímica que aporta 5 corrientes; el área de generación de H₂ con 2 corrientes, el área denominada gas combustible consumido por la refinería es la principal aportante desde sus tres sub áreas: refinación con 16 corrientes, cracking 19 corrientes y petroquímica 21 corrientes; por último se encuentran las áreas de servicios industriales con 20 corrientes.

Para el presente análisis las corrientes antes mencionadas se identificaron por



áreas numerándolas de manera secuencial como se presenta en la tabla 4.

Tabla 4 Corrientes organizadas por área de procedencia

AREA	SUB AREA	NOMBRE
GAS NATURAL DE CAMPOS		Corrientes 1 a 3
PRODUCCIÓN DE REFINERÍA	CRACKING	Corrientes 4 al 16
	PETROQUÍMICA	Corrientes 17 al 26
GAS VENDIDO A EXTERNOS		Corrientes 27 al 29
GAS PARA PROCESO	GENERACIÓN DE H2	Corrientes 30 al 31
GAS COMBUSTIBLE CONSUMIDO POR LA REFINERÍA	REFINACIÓN	Corrientes 32 al 47
	CRACKING	Corrientes 48 al 67
	PETROQUÍMICA	Corrientes 68 al 88
SERVICIOS INDUSTRIALES		Corrientes 89 al 108
GENERACION DE ETANO		Corrientes 109 al 113

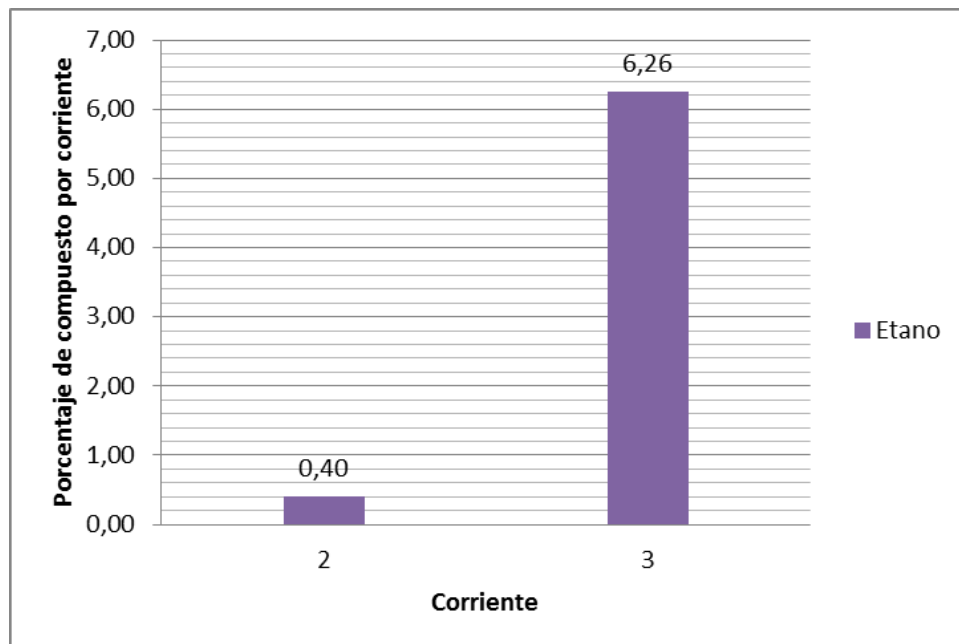
Se debe definir si cada corriente, al pasar por diferentes procesos que varían el porcentaje de su composición, son convertidas en una mezcla de compuestos diferentes dando la posibilidad de ser denominados como gases combustibles. Seguidamente, se presentan los porcentajes que generan más cambios entre corrientes por cada una de las áreas incluidas dentro del proceso de quema.

6.1.1. Gases de campos (3 Corrientes)

Las corrientes provenientes de esta área, aun cuando son gas natural, son gases combustibles de dos regiones diferentes, siendo las corrientes 1 y 2 de pozos de la zona de la guajira, y la corriente 3 de pozos de Barrancabermeja. Se encontró que incluso cuando su composición es relativamente similar, una alta variación del porcentaje de etano afecta sus propiedades y sus efectos al momento de quemar.

A continuación, se presentan las variaciones de etano entre los dos tipos de composiciones diferentes, de las tres corrientes dos de ellas tenían composiciones iguales las corrientes 1 y 2 de pozos de la guajira, por ende solo se presentan las corrientes 2 y 3 en el gráfico 3.

Figura 3 Variación de etano entre corrientes de gases de campos



6.1.2. Producción de refinería

6.1.2.1. Cracking (8 corrientes)

Dentro de la sub área de cracking se encontraron diferentes tipos de gases combustibles con altos contenidos de propano y etano principalmente, también se encontraron corrientes con altas concentraciones de hidrógeno. Lo cual se puede observar en las figuras 4, 5 y 6. Se presentan los principales compuestos que afectan las propiedades del proceso de combustión desde la presente sub área.

Figura 4 Variación de etano entre corrientes del área de producción sub área cracking

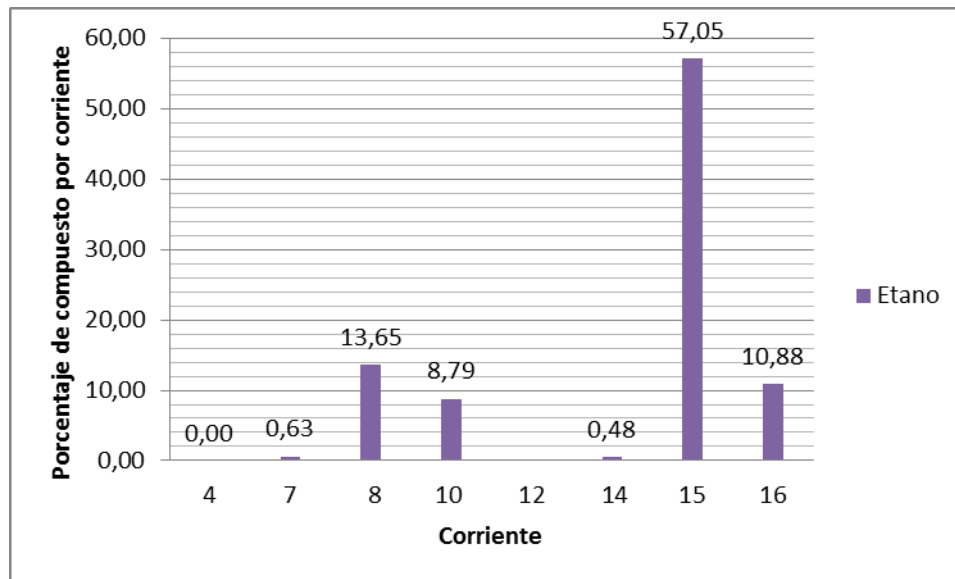


Figura 5 Variación de hidrogeno entre corrientes del área de producción sub área cracking

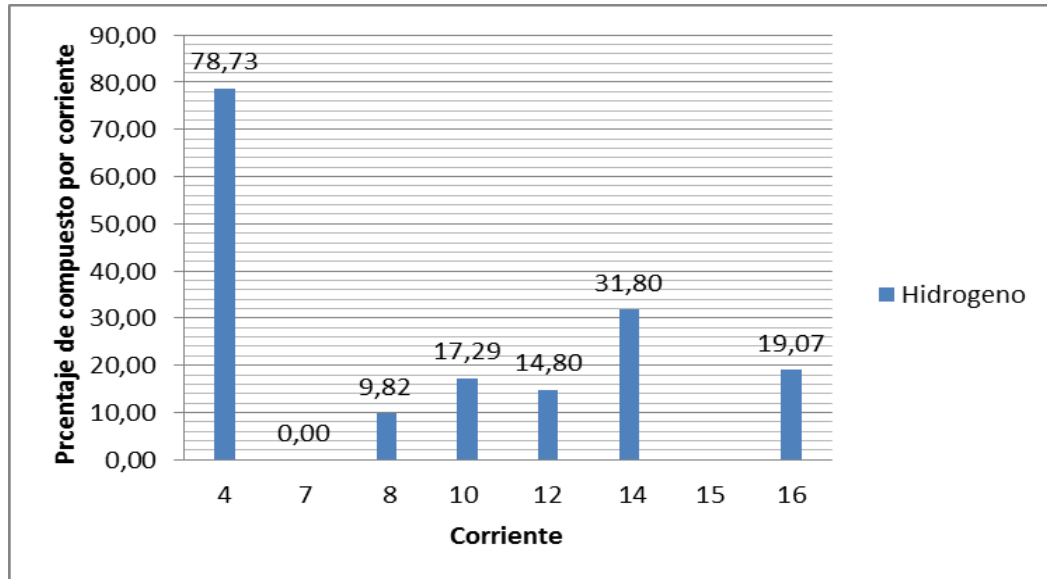
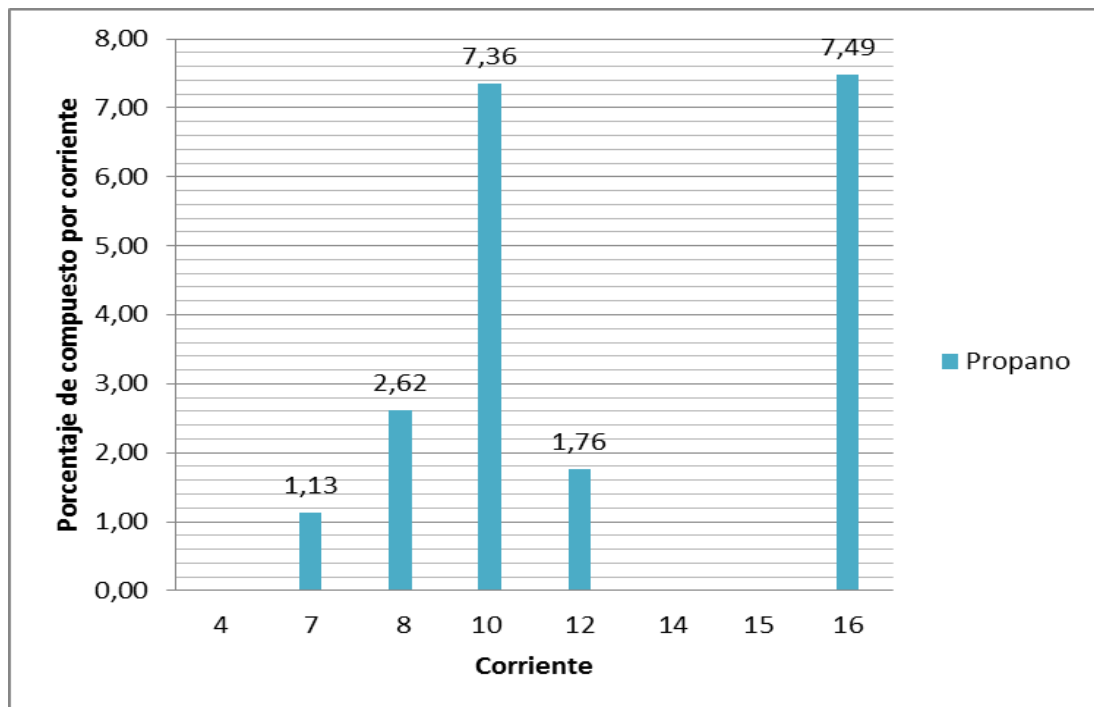


Figura 6 Variación de propano entre corrientes del área de producción sub área cracking



6.1.2.2. Petroquímica (5 Corrientes)

De manera similar a la sub área de cracking, dentro del sub área de petroquímica se encontró que las corrientes tenían porcentajes diferentes de varios de los 19 componentes estudiados, lo cual modifica sus características indicando que pueden ser tratados como gases combustibles diferentes. Dentro de las corrientes de esta área se presenta una corriente que posee altos porcentajes de etano, y otras con un alto contenido de hidrogeno como se observa en las figuras 7 y 8. En seguida se presentan los cinco tipos de corrientes de gas combustible en el área de petroquímica representadas en sus compuestos más distintivos.

Figura 7 Variación de etano entre corrientes del área de producción sub área petroquímica

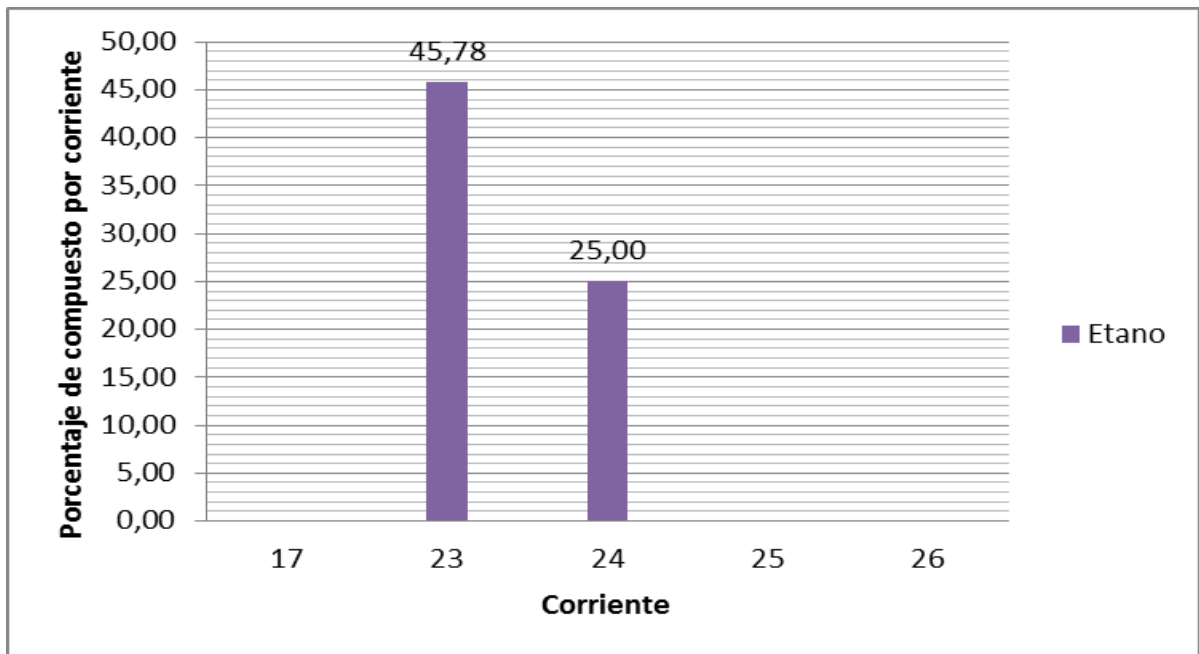
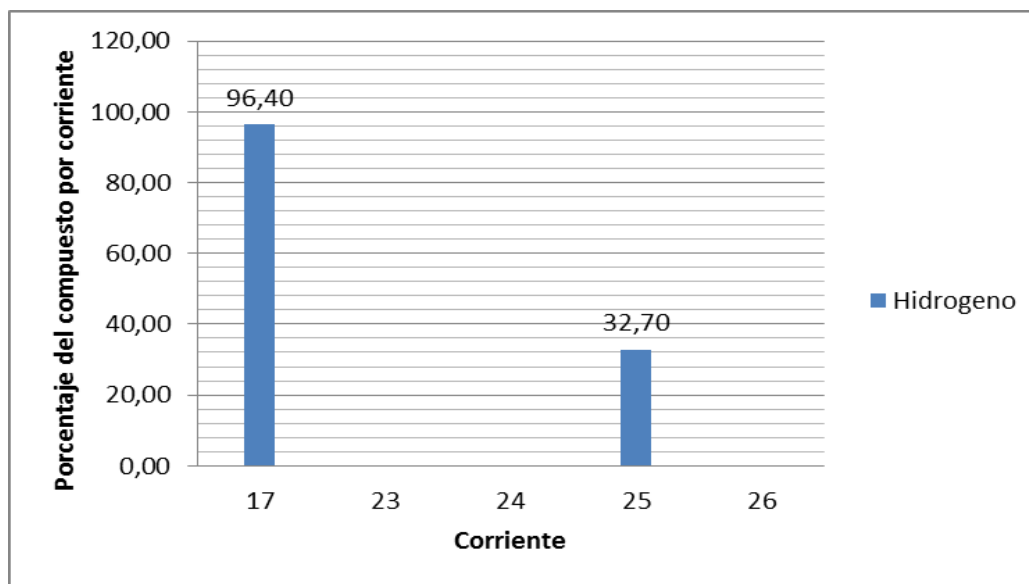


Figura 8 Variación de hidrogeno entre corrientes del área de producción sub área petroquímica



6.1.3. Gas para procesos

6.1.3.1. Generación de H₂ (2 corrientes)

Dentro de este tipo de gases se encuentra una alta similitud y homogeneidad en su composición, por ello pueden representarse con un solo tipo de corriente en la que principalmente se encuentra el metano y un porcentaje reducido de nitrógeno. Lo anterior se presenta en las siguientes figuras 9 y 10.

Figura 9 Variación de metano entre corrientes del área de procesos sub área de generación de H₂

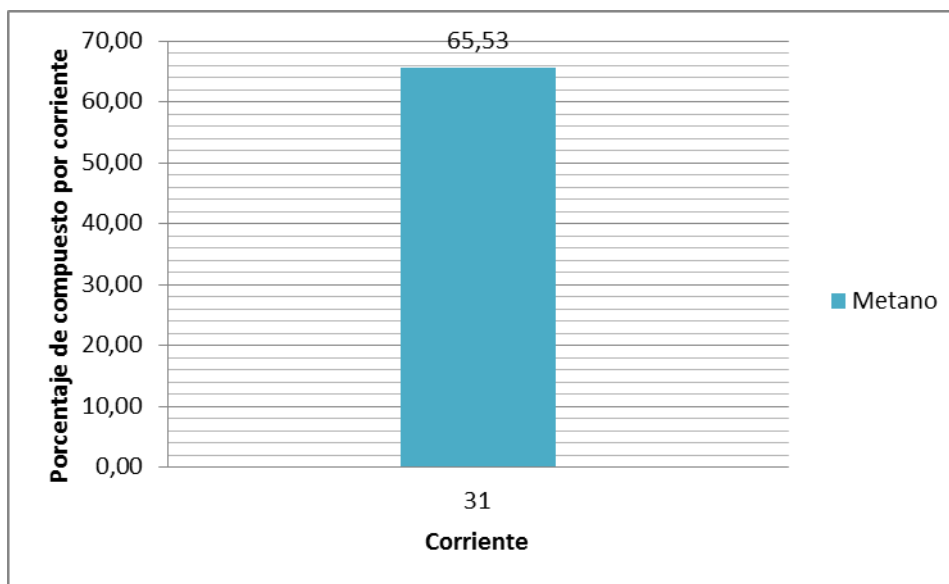
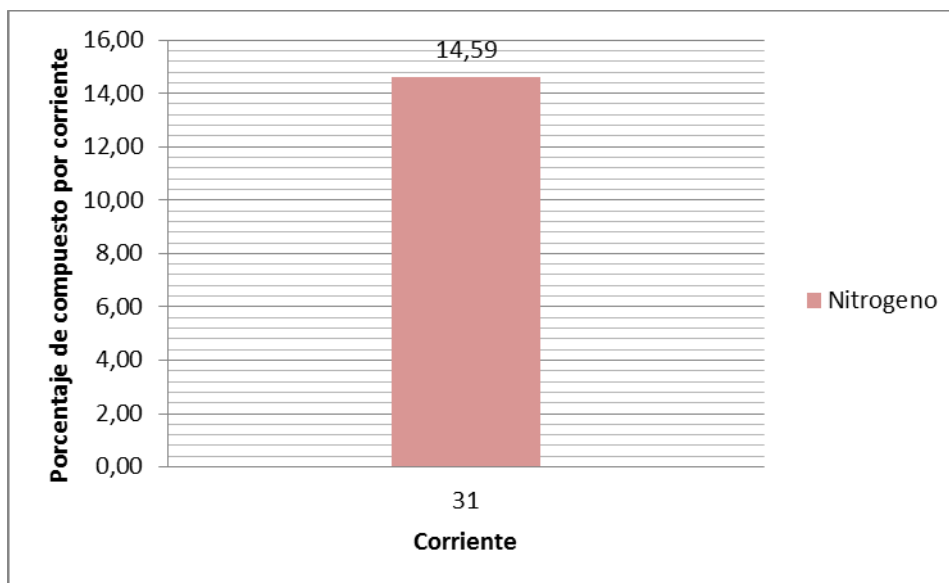


Figura 10 Variación de nitrógeno entre corrientes del área de procesos sub área de generación de H₂



6.1.4. Gas combustible consumido por la refinería

6.1.4.1. Refinación (16 Corrientes)

Dentro de esta sub área se presentan varios tipos de corrientes en las que los 19 componentes se encuentran distribuidos en diferentes proporciones, siendo el metano y el etano los principales en la mayoría de las corrientes y acompañadas de pequeñas cantidades de ácido sulfúrico, hidrogeno, nitrógeno, iso butano e iso pentanos. De las dieciséis corrientes se encontraron seis tipos de corrientes dentro del área de refinación, lo cual se representa a continuación por medio de la variación de los componentes más representativos en las figuras 11 y 12.

Figura 11 Variación de metano entre corrientes del área gas combustible consumido por la refinería sub área de refinación

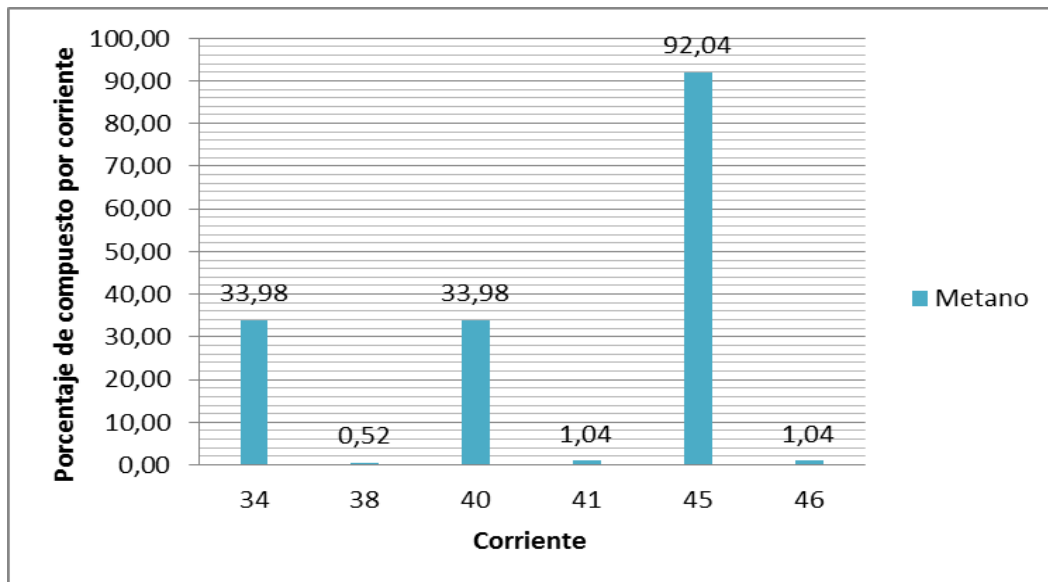
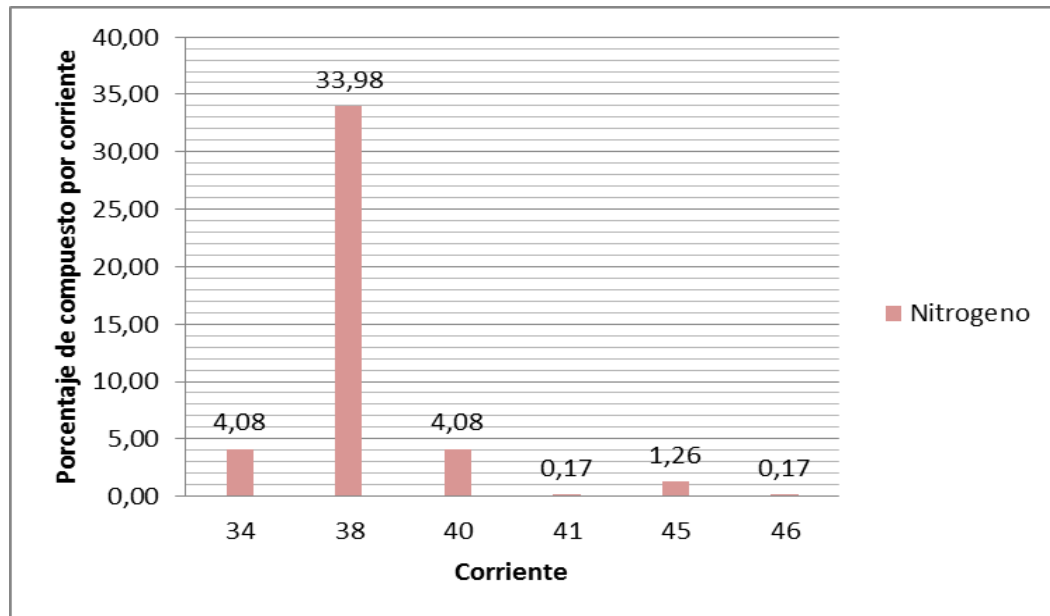


Figura 12 Variación de etano entre corrientes del área gas combustible consumido por la refinería sub área de refinación



6.1.4.2. Cracking (19 Corrientes)

Dentro de la sub área de cracking se presenta un elevado contenido de metano, iso-butano y etano. Principalmente en dos de las corrientes estudiadas, se tienen 6 tipos diferentes de composiciones que podrían modificar la eficiencia del proceso de quema, lo cual puede verse en la figura 13, 14 y 15.

Figura 13 Variación de metano entre corrientes del área gas combustible consumido por la refinería sub área de cracking

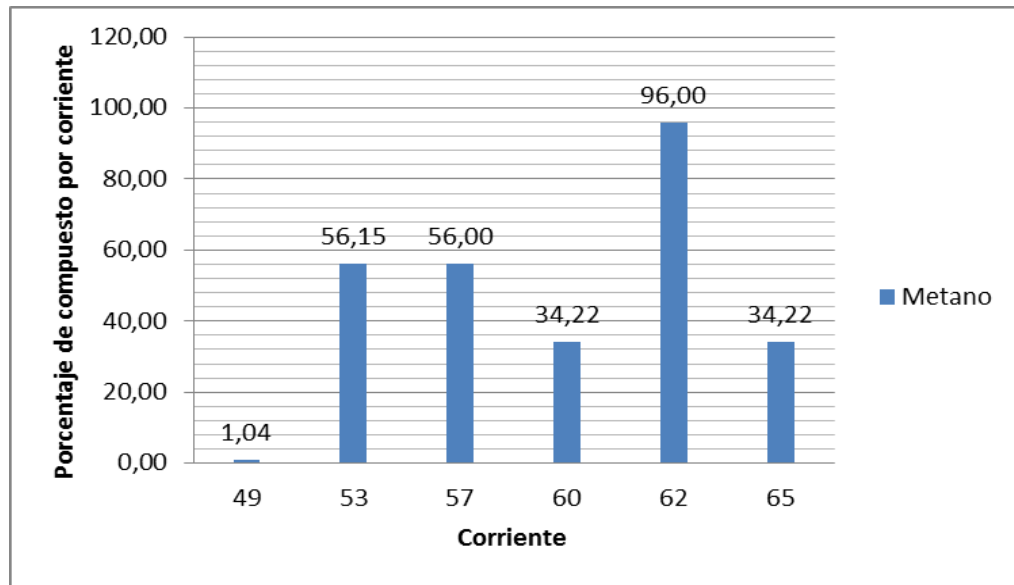


Figura 14 Variación de Iso-Butano entre corrientes del área gas combustible consumido por la refinería sub área de cracking

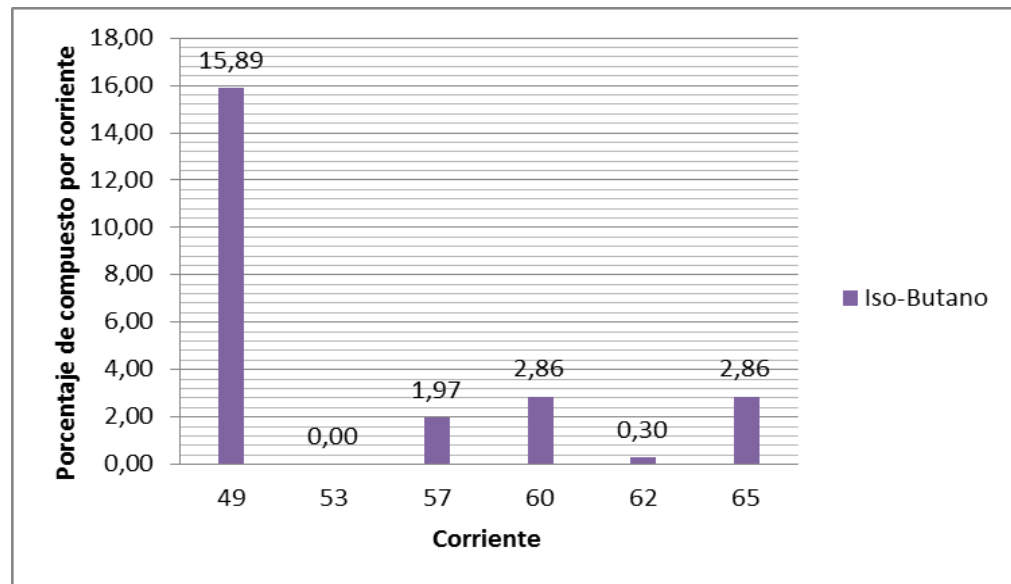
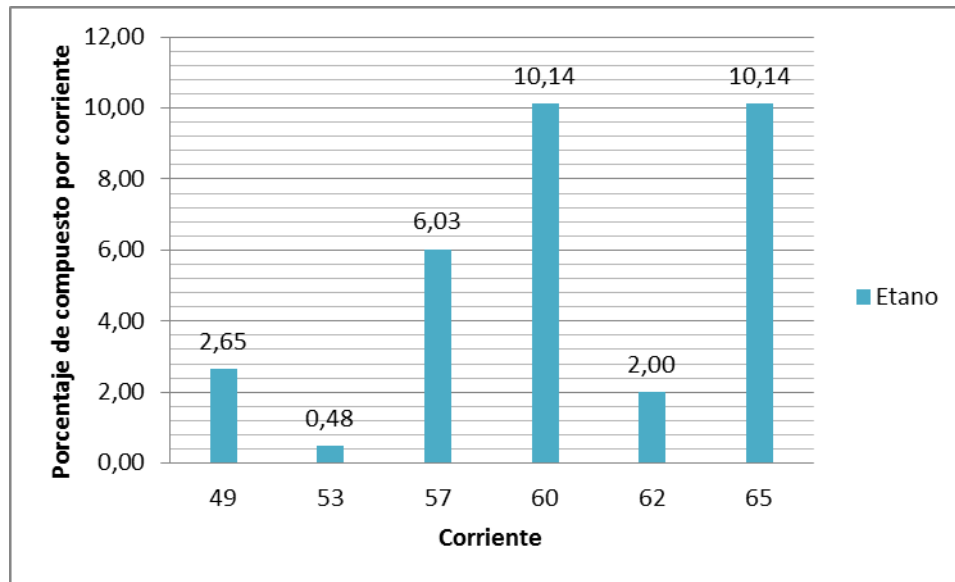


Figura 15 Variación de etano entre corrientes del área gas combustible consumido por la refinería sub área de cracking



6.1.4.3. Petroquímica (21 Corrientes)

Dentro de esta sub área se presenta un alta variación de nitrógeno y etano en la mayoría de las corrientes. Se encuentran 4 diferentes tipos de corrientes donde el oxígeno, el etano, el iso pentano y el dióxido de carbono se hacen presentes en una mínima cuantía, se presentan los diferentes tipos de corrientes representados en los compuestos más variables en el área en las gráficas 16 y 17.

Figura 16 Variación de etano entre corrientes del área gas combustible consumido por la refinería sub área de petroquímica

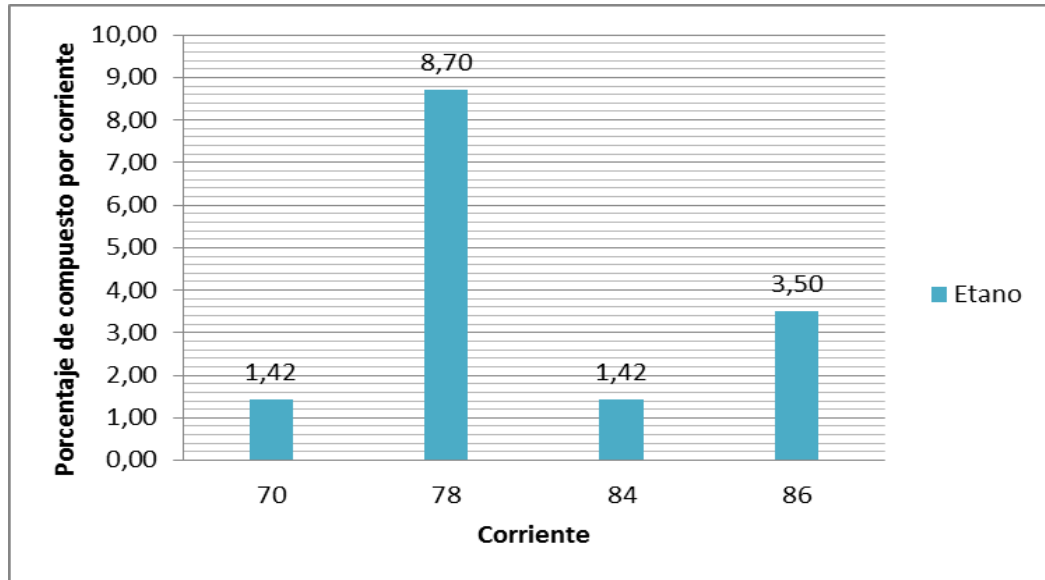
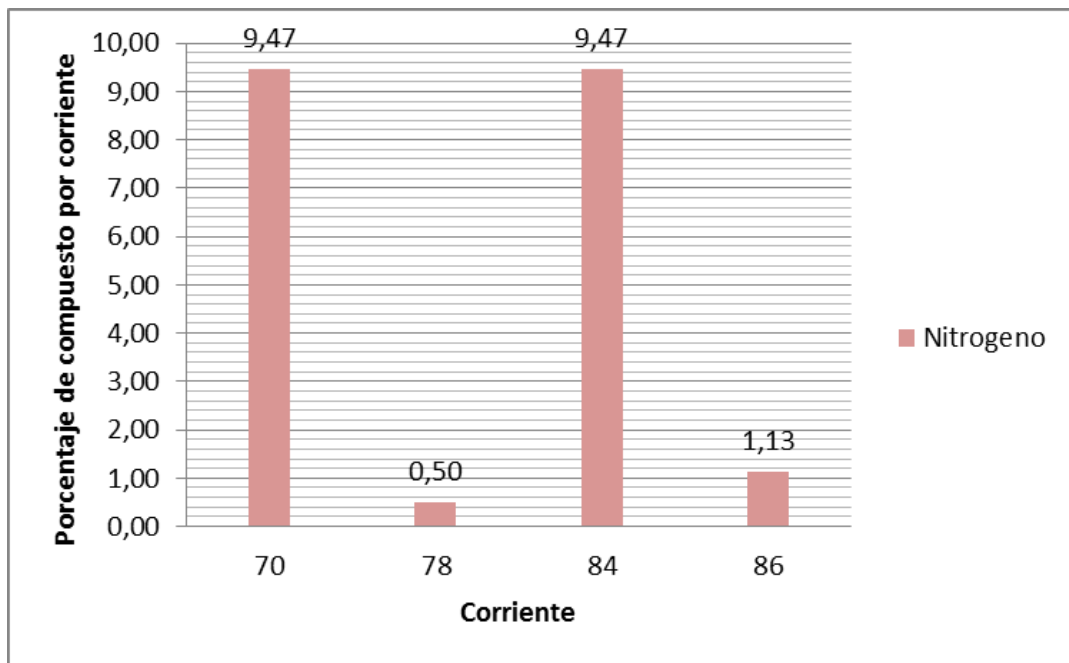


Figura 17 Variación de nitrógeno entre corrientes del área gas combustible consumido por la refinería sub área de petroquímica



6.1.5. Servicios industriales (20 corrientes)

Dentro del área de servicios industriales se presentan siete tipos de corrientes con una alta cantidad de metano, principalmente, siendo el etano y el nitrógeno, los compuestos que más variaciones presentan entre corrientes, ver figuras 18 y 19.

Figura 18 Variación de etano entre corrientes del área de servicios industriales

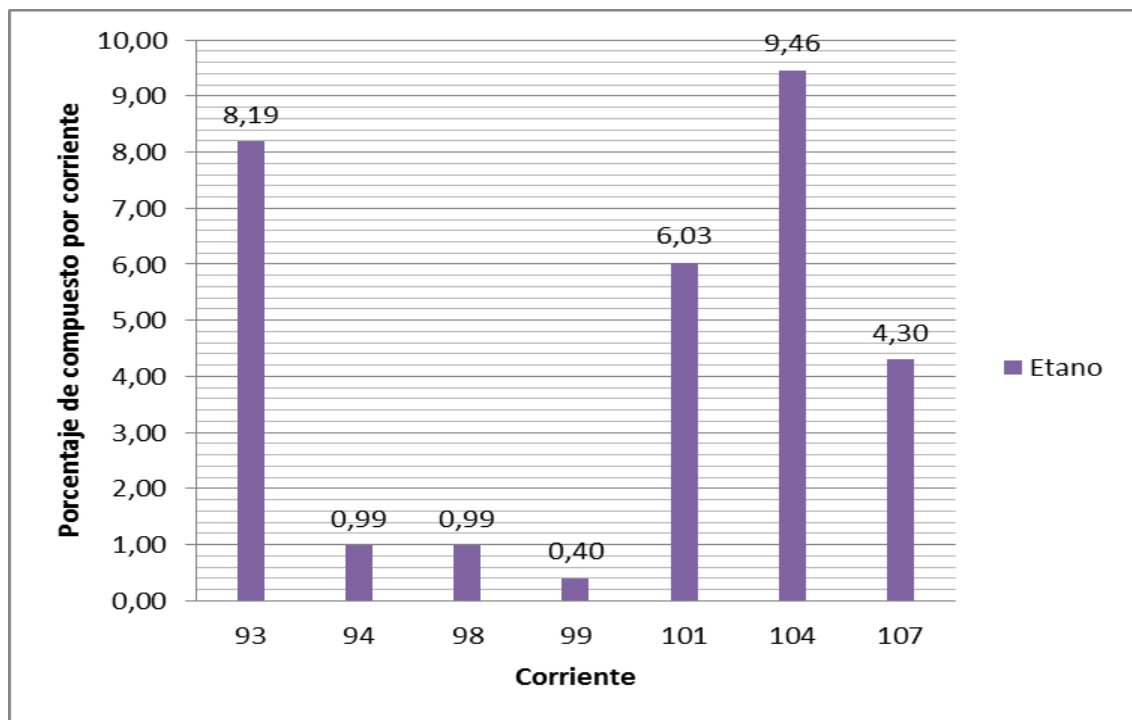
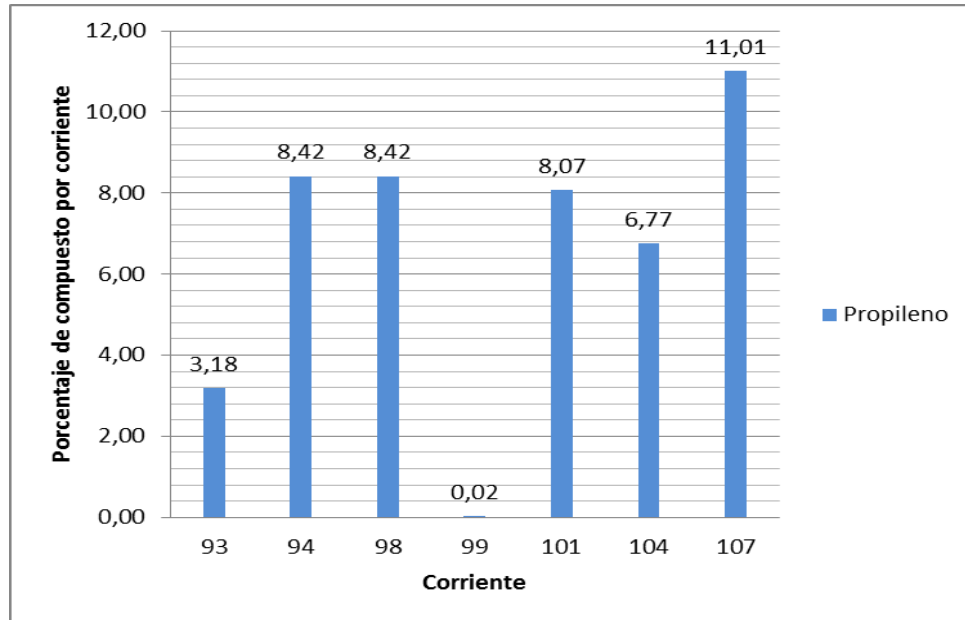


Figura 19 Variación de propileno entre corrientes del área de servicios industriales



Por medio de las gráficas anteriores se puede observar que por cada área existen diferentes tipos de corrientes basados en la variación porcentual de sus componentes, lo que posibilita trabajarlas de manera individual, y poder evaluar sus propiedades por separado. Posteriormente se analizaron los datos de tal manera que fue posible usar eficientemente las corrientes evaluadas y realizar un análisis confiable de sus compuestos.

6.2. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

Se realizó la evaluación de las corrientes por medio de 3 parámetros: número de metanos, índice de Wobbe y emisiones de CO₂ por horno, los cuales representan las problemáticas principales (efectos) definidos dentro de cada uno de los 3 aspectos (ambiental, energético y de seguridad) aplicando los métodos de medición (parámetros) por aspecto, tabla 2, en cada corriente de manera individual utilizando hojas de cálculo de Microsoft Excel. A continuación, se

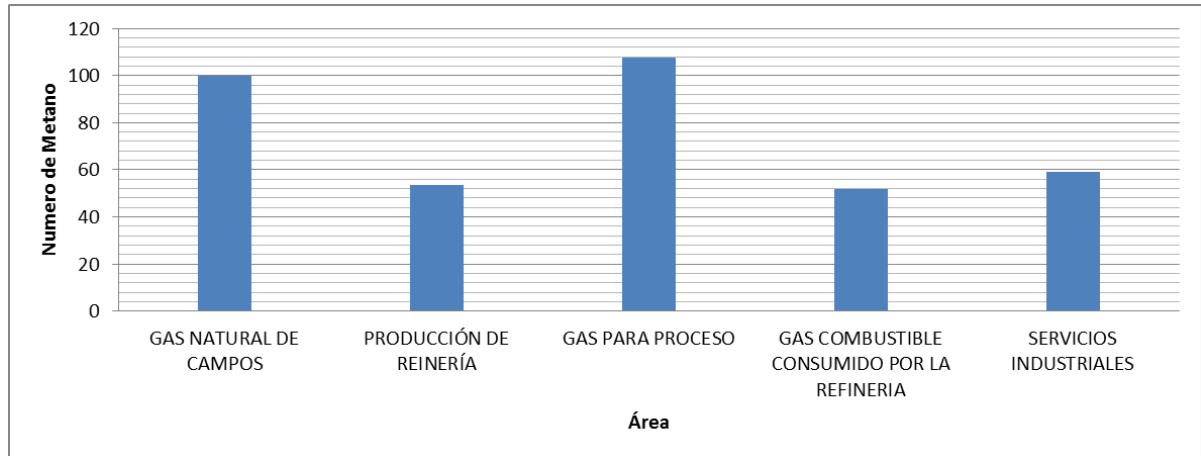
presentan los principales resultados en la evaluación de cada uno de los parámetros, exceptuando los valores repetidos, tabla 5.

Tabla 5 Resultados de aplicación del parámetro de seguridad

AREAS	SUB AREA	NOMBRE	MN
GAS NATURAL DE CAMPOS	GAS NATURAL DE CAMPOS	corriente 1	106,65
		corriente 3	93,49
PRODUCCIÓN DE REFINERÍA	CRACKING	corriente 4	108,42
		corriente 7	74,43
		corriente 8	31,75
		corriente 10	62,45
		corriente 12	31,75
	PETROQUÍMICA	corriente 17	108,42
		corriente 23	37,53
		corriente 24	21,11
	corriente 25	6,11	
GAS PARA PROCESO	GENERACIÓN DE H2	corriente 30	107,68
GAS COMBUSTIBLE CONSUMIDO POR LA REFINERIA	REFINACIÓN	corriente 32	40,55
		corriente 37	5,32
		corriente 41	29,05
		corriente 45	92,64
		corriente 47	40,55
	CRACKING	corriente 48	29,05
		corriente 51	75,59
		corriente 56	46,61
		corriente 59	41,39
		corriente 62	91,54
		corriente 66	41,39
		corriente 67	39,5
	PETROQUÍMICA	corriente 68	100,98
		corriente 75	55,3
		corriente 86	48,66
SERVICIOS INDUSTRIALES		corriente 89	61,26
		corriente 94	36,87
		corriente 99	105,47
		corriente 100	46,61
		corriente 104	44,99

Dentro de los resultados para el parámetro de seguridad, figura 20, se encontraron grandes variaciones para cada corriente dentro de una misma área, reforzando la idea inicial de las diferencias entre corrientes y la posibilidad de tratarse cada una como un gas combustible diferente.

Figura 20 Resultados de la aplicación del parámetro de seguridad por área



Al tomar un promedio del Número de Metano por área se puede apreciar que los valores se encuentran dispersos dentro de todo el rango de trabajo (0 – 100), y en algunos casos siendo este parámetro un comparativo entre una mezcla conocida de hidrógeno/metano y una mezcla x, existen corrientes que exceden el valor adimensional de 100 (mezcla de hidrógeno/metano de 100% de metano) lo cual representa que el gas combustible comparado (o mezcla de gases) tiene una mayor posibilidad de presentar golpeteo que el metano, aumentando los efectos negativos para el proceso de quema (valores de 101 en adelante).

Luego se presentan los resultados obtenidos al aplicar el parámetro energético, tabla 6, que para el caso de estudio es el Índice de Wobbe, donde aunque se encontraron similitudes en los valores para algunas corrientes, se halló que

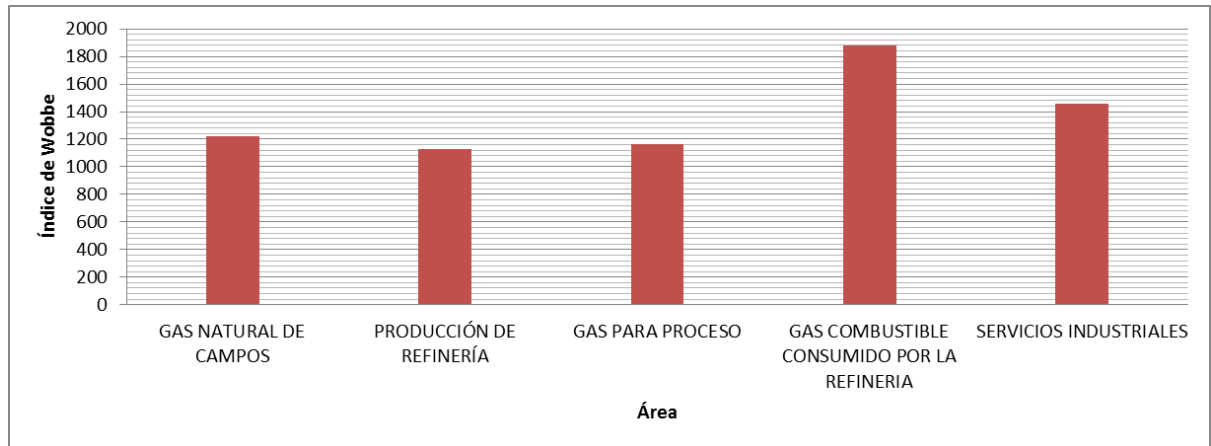
existen corrientes que no se encuentran dentro de la misma familia, representan un peligro latente para el proceso de quema.

Tabla 6 Resultados de la aplicación del parámetro energético

AREAS	SUB AREA	NOMBRE	IW (BTU/ft3)
GAS NATURAL DE CAMPOS	GAS NATURAL DE CAMPOS	corriente 1	1212,07
		corriente 3	1237,09
PRODUCCIÓN DE REFINERÍA	CRACKING	corriente 4	349,31
		corriente 7	560,79
		corriente 10	480,84
		corriente 17	652,91
	PETROQUÍMICA	corriente 23	1642,68
		corriente 24	1696,52
		corriente 25	1696,52
		corriente 30	1670,52
		corriente 32	1416,69
GAS PARA PROCESO	GENERACIÓN DE H ₂	corriente 37	1164,96
GAS COMBUSTIBLE CONSUMIDO POR LA REFINERÍA	REFINACIÓN	corriente 41	2399,21
		corriente 43	1193,63
		corriente 47	1493,15
		corriente 48	1483,51
		corriente 51	3603,98
	CRACKING	corriente 52	3336,17
		corriente 56	2930,64
		corriente 58	2955,26
		corriente 59	2236,88
		corriente 61	11,05
		corriente 67	2094,59
	PETROQUÍMICA	corriente 68	1030,77
		corriente 72	3665,43
		corriente 75	1248,74
		corriente 84	1030,61
		corriente 85	1177,92
		corriente 86	1181,09
		corriente 89	1284,86
corriente 90	1287,21		
SERVICIOS INDUSTRIALES		corriente 94	2171,3
		corriente 99	1193,03
		corriente 100	1368,83
		corriente 104	1287,91
		corriente 106	1268,24

Al hacer un promedio de las corrientes por área se puede ver que los valores del índice de wobble se compensan y pueden ser manejables si se tiene una corriente guía que delimite el rango de trabajo de las corrientes buscando mantener el proceso de quema constante y sin mayores daños.

Figura 21 Resultados de la aplicación del parámetro energético por área



En relación al parámetro ambiental, tabla 7, se asumió que el análisis se realizaba a una distancia muy corta del equipo de quema para aplicar un método de medición en equipos sobre el dióxido de carbono, que se encuentra estandarizado y cobijado por normas ambientales. Fue notorio un aumento significativo en las emisiones, pero a su vez se comprobó la heterogeneidad de las corrientes ya que no todas producían la misma cantidad de emisiones, como se puede ver en la tabla 7.

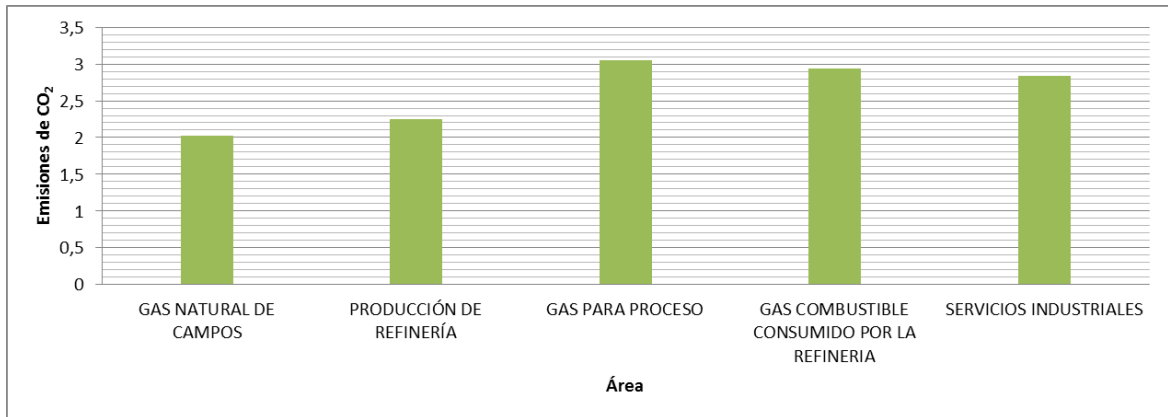
Tabla 7 Resultados de la aplicación del parámetro ambiental

AREAS	SUB AREA	NOMBRE	ECO2
GAS NATURAL DE CAMPOS	GAS NATURAL DE CAMPOS	corriente 1	1,96
		corriente 3	2,1
PRODUCCIÓN DE REFINERÍA	CRACKING	corriente 4	0,01
		corriente 7	1,76
		corriente 10	2,92
		corriente 17	7,65
	PETROQUÍMICA	corriente 23	2,29
		corriente 24	0,98
		corriente 25	2,63
		corriente 30	1,29
corriente 32	2,92		
GAS PARA PROCESO	GENERACIÓN DE H2	corriente 37	3,05
GAS COMBUSTIBLE CONSUMIDO POR LA REFINERÍA	REFINACIÓN	corriente 41	5,82
		corriente 43	2,06
		corriente 48	5,82
		corriente 51	1,34
	CRACKING	corriente 56	2,58
		corriente 58	2,62
		corriente 61	2,09
		corriente 67	0
		corriente 72	7,38
	PETROQUÍMICA	corriente 75	2,26
		corriente 84	1,77
		corriente 86	2,09
corriente 90		2,41	
SERVICIOS INDUSTRIALES	corriente 94	4,74	
	corriente 99	1,96	
	corriente 100	2,58	
	corriente 104	2,42	
	corriente 106	2,48	

En relación con el análisis por áreas se encontró una variación importante entre 0 y 7 m³ en la cantidad de dióxido de carbono con una tendencia al aumento, por

ende, es válida la aplicación de un método para la nivelación de estas emisiones dentro de un rango de trabajo ya que no pueden ser erradicadas en su totalidad. En la figura 22 se presentan las variaciones entre áreas de los resultados de la evaluación del parámetro ambiental.

Figura 22 Resultados de la aplicación del parámetro ambiental por área



6.3. CORRIENTE GUIA

6.3.1. Mezcla de corrientes aportantes representativas

Al evaluar los resultados obtenidos por corriente para cada parámetro (emisiones de CO₂ por horno, Índice de Wobbe y número de Metanos) y teniendo en cuenta los rangos definidos como óptimos para cada parámetro, (Índice de Wobbe (11000 – 13000 [kWh/m³]) con valores que se encuentran dentro de la segunda familia como se presentó en la tabla 1, número de Metanos (75 - 95) y emisiones de CO₂ por horno (0- 2,5 [kg])), seguidamente, se extraen las corrientes que cumplen con los tres rangos (17) y las corrientes que no cumplen con los tres rangos (14), las cuales se presentan a continuación en la tabla 8.



Tabla 8 Corrientes que cumplen y no cumplen con los 3 rangos definidos como óptimos para cada uno de los 3 parámetros evaluados

Corrientes que cumplen con los 3 parámetros	Corrientes que No cumple con los 3 parámetros
corriente3	corriente 15
corriente 7	corriente 23
corriente 43	corriente 24
corriente 44	corriente 41
corriente 45	corriente 46
corriente 61	corriente 48
corriente 62	corriente 49
corriente 75	corriente 50
corriente 76	corriente 72
corriente 77	corriente 94
corriente 78	corriente 95
corriente 79	corriente 96
corriente 80	corriente 97
corriente 81	corriente 98
corriente 82	-
corriente 85	-
corriente 86	-

Dentro del análisis realizado se tomó en cuenta tanto la cantidad de corrientes que se mezclan como las mezclas resultantes, en primer lugar se escogió igual número de corrientes por clasificación (cumplen, no cumplen), seguidamente se evaluó la cantidad de mezclas posibles por medio del ingreso de datos en hojas de cálculo de Excel, como se presenta en la figura 23.

Figura 23 Resultados de la determinación de las corrientes aportantes representativas

	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
398																	
399																	
400	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
401	96	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
402	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
403	15	74	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	
404																	
405																	
406																	
407	8,26	8,1552	8,0504	7,9456	7,8408	7,736	7,6312	7,5264	7,4216	7,3168	7,212	7,1072	7,0024	6,8976	6,7928		
408	6,54	6,4528	6,3656	6,2784	6,1912	6,104	6,0168	5,9296	5,8424	5,7552	5,668	5,5808	5,4936	5,4064	5,3192		
409																	
410	14,3025	14,1118	13,9211	13,7304	13,5397	13,349	13,1583	12,9676	12,7769	12,5862	12,3955	12,2048	12,0141	11,8234	11,6327		
411	1,2175	1,2014	1,1853	1,1692	1,1531	1,137	1,1209	1,1048	1,0887	1,0726	1,0565	1,0404	1,0243	1,0082	0,9921		
412	0,9275	0,9166	0,9057	0,8948	0,8839	0,873	0,8621	0,8512	0,8403	0,8294	0,8185	0,8076	0,7967	0,7858	0,7749		
413	47,765	48,4388	49,1126	49,7864	50,4602	51,134	51,8078	52,4816	53,1554	53,8292	54,503	55,1768	55,8506	56,5244	57,1982		
414	0,915	0,9028	0,8906	0,8784	0,8662	0,854	0,8418	0,8296	0,8174	0,8052	0,793	0,7808	0,7686	0,7564	0,7442		
415	0,4425	0,4366	0,4307	0,4248	0,4189	0,413	0,4071	0,4012	0,3953	0,3894	0,3835	0,3776	0,3717	0,3658	0,3599		
416	2,8575	2,8338	2,8101	2,7864	2,7627	2,739	2,7153	2,6916	2,6679	2,6442	2,6205	2,5968	2,5731	2,5494	2,5257		
417																	
418																	
419	5,6225	5,5582	5,4839	5,4096	5,3353	5,261	5,1867	5,1124	5,0381	4,9638	4,8895	4,8152	4,7409	4,6666	4,5923		
420	9,605	9,4772	9,3494	9,2216	9,0938	8,966	8,8382	8,7104	8,5826	8,4548	8,327	8,1992	8,0714	7,9436	7,8158		
421	1,535	1,5148	1,4944	1,4744	1,4544	1,434	1,4138	1,3936	1,3734	1,3532	1,333	1,3128	1,2926	1,2724	1,2522		
422																	

Evaluándose mezclas de 2, 4 y 6 corrientes dan como resultado 19, 1767 y 53124 mezclas posibles respectivamente, analizando estos resultados por medio de la técnica de análisis numérico denominada mínimos cuadrados, se encuentra que la cantidad de mezclas, dependiendo de la cantidad de corrientes mezcladas, se puede asociar a la siguiente función 10.

$$Y = 0,1193 * X^{7,1499} \tag{10}$$

Teniendo en cuenta los resultados del análisis y basados en la premisa de facilitar el proceso a los operarios, debido a no ser viable operacionalmente, reducir el valor de los porcentajes a menos del 5% teniendo en cuenta que, las variaciones en porcentaje serían difíciles de manejar. Se escogió la mezcla de 6 corrientes obteniendo 53124 mezclas posibles, las cuales se compararan seguidamente con la corriente guía elegida.

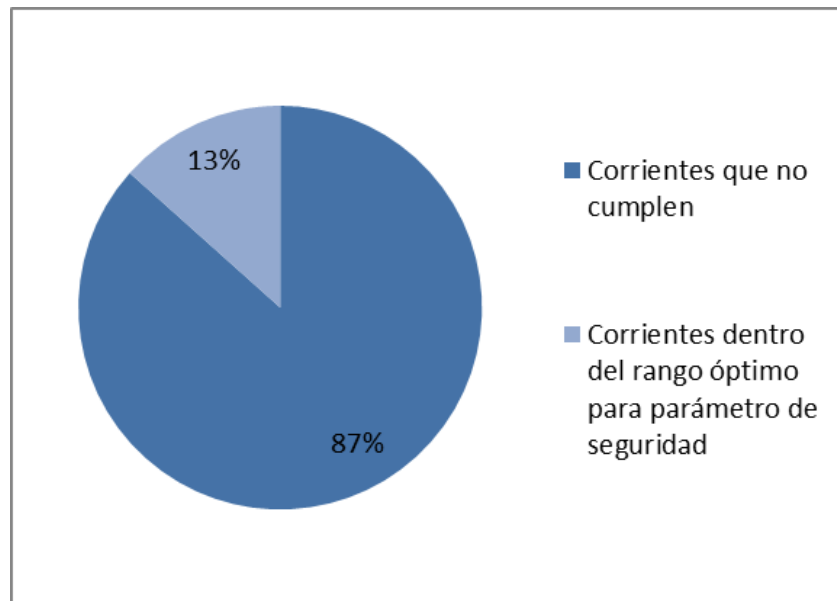
Seguidamente se presentan los resultados por parámetro y su respectivo análisis. Comenzando por los resultados para el parámetro de seguridad, número de metano.

Tabla 9 Corrientes que cumplen con el rango óptimo para el parámetro de seguridad

AREA	SUB AREA	NOMBRE	Número Metano
GAS NATURAL DE CAMPOS		Corriente 3	88,56
PRODUCCIÓN DE REFINERÍA	CRACKING	Corriente 7	88,61
GAS COMBUSTIBLE CONSUMIDO POR LA REFINERÍA	REFINACIÓN	Corriente 43, 44, 45	92,64
	CRACKING	Corriente 61, 62	94,03
	PETROQUÍMICA	Corrientes 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82	79,92
		Corrientes 85, 86	79,99

Como se puede apreciar en la tabla 9, las corrientes que cumplen con el parámetro de seguridad se encuentran dispersas en tres áreas diferentes, lo que hace posible que al mezclarlas representen un aporte negativo a la eficiencia energética del proceso de quema dentro de la totalidad de corrientes como aparece en la figura 24. Solo el 13% de las mismas cumple con el parámetro de seguridad, un número reducido que sirve como alerta y para tomar acciones correctivas que controlen los posibles efectos negativos buscando mantener un proceso estable y viable. Se trata de evitar efectos como la alta volatilidad de los gases, el golpeteo que puede aumentar procesos corrosivos dentro del horno y tuberías reduciendo la vida útil de las mismas, llevando a posibles fugas que pueden desencadenar problemas respiratorios en operarios o llegar a estallidos tanto en el proceso como en cada una de las áreas de donde provienen las corrientes [59].

Figura 24 Porcentaje de corrientes que cumplen con el rango óptimo definido para el parámetro de seguridad



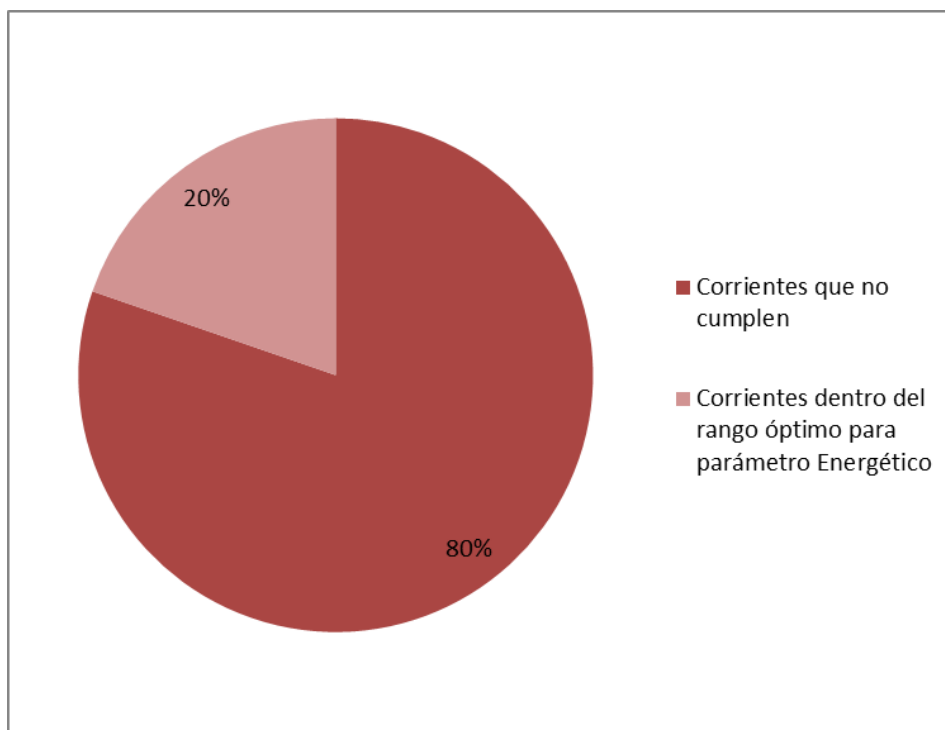
En comparación con el parámetro de seguridad, el parámetro energético tiene mayor presencia dentro de las diferentes áreas de la refinería, como se puede apreciar en la tabla 10, lo cual representa mayores posibilidades de efectos adversos a nivel energético, principalmente en relación a la alta variación en el tiempo del poder calorífico al momento de mezcla. Sin una distribución adecuada, las corrientes consideradas dentro de un rango denominado como óptimo, no aportan ningún beneficio y serían parte del problema que se desea evitar.

En comparación con la totalidad de corrientes, solo un 20% de las corrientes (como lo muestra la figura 25), cumple con el rango definido como óptimo para el parámetro energético.

Tabla 10 Corrientes que cumplen con el rango óptimo para el parámetro energético

AREA	SUB AREA	NOMBRE	Índice Wobbe
GAS NATURAL DE CAMPOS		Corriente 1 y 2	1212,06
		Corriente 3	1238,03
PRODUCCIÓN DE REFINERÍA	CRACKING	Corriente 7	1108,08
		Corriente 8	1257,04
GAS COMBUSTIBLE CONSUMIDO POR LA REFINERÍA	REFINACIÓN	Corrientes 37, 38	1164,95
		Corriente 43, 44, 45	1211,57
	CRACKING	Corriente 61, 62	1256,86
	PETROQUÍMICA	Corrientes 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82	1269,67
		Corrientes 85, 86	1198,83
SERVICIOS INDUSTRIALES		Corriente 99	1212,06
		Corrientes 106, 107, 108	1268,23
GENERACION DE ETANO		Corriente 110	1204,48

Figura 25 Porcentaje de corrientes que cumplen con el rango óptimo definido para el parámetro energético

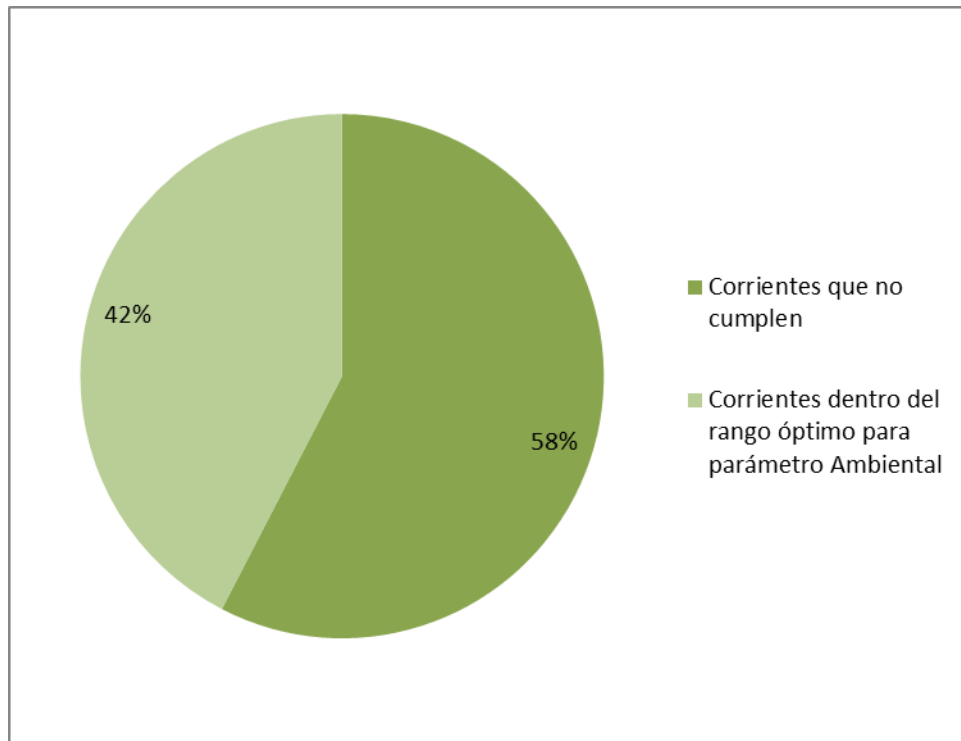


En cuanto al parámetro ambiental se encuentra una distribución más equitativa de las corrientes que cumplen con el mismo dentro de las diferentes áreas de la refinería, como se puede apreciar en la tabla 11. A su vez, el porcentaje de corrientes que cumplen con este parámetro es también mayor en relación a los anteriores, con un 42% de corrientes que se encuentran dentro del rango establecido como óptimo (figura 26), para el proceso analizado y con base en el gas combustible tomado como guía para la definición de los rangos óptimos.

Tabla 11 Corrientes que cumplen con el rango óptimo para el parámetro ambiental

AREA	SUB AREA	NOMBRE	Emisiones CO ₂
GAS NATURAL DE CAMPOS		Corriente 1 y 2	1,44
		Corriente 3	1,54
PRODUCCIÓN DE REFINERÍA	CRACKING	Corriente 4	0,00
		Corriente 7	1,30
		Corriente 8	2,06
		Corriente 10	2,15
		Corriente 12	0,80
		Corriente 13	0,00
		Corriente 14	0,98
		Corriente 16	2,19
	PETROQUÍMICA	Corriente 17	0,05
		Corriente 25	0,08
		Corriente 26	0,00
GAS PARA PROCESO	GENERACIÓN DE H ₂	Corriente 30	0,95
		Corriente 31	0,95
GAS COMBUSTIBLE CONSUMIDO POR LA REFINERÍA	REFINACIÓN	Corrientes 32, 33, 34, 35, 36, 39, 40, 42, 47	2,16
		Corrientes 37, 38	2,24
		Corriente 43, 44, 45	1,52
	CRACKING	Corrientes 51, 52, 53, 54, 55	0,98
		Corrientes 56, 57, 58	1,90
		Corriente 59, 60, 64, 65, 66	1,93
		Corriente 61, 62	1,54
	PETROQUÍMICA	Corriente 67	2,19
		Corrientes 68, 69, 70, 71, 73, 74, 83, 84, 87	1,30
		Corrientes 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82	1,67
		Corrientes 85, 86	1,54
SERVICIOS INDUSTRIALES		Corrientes 89, 90, 91, 92, 93	1,78
		Corriente 99	1,45
		Corrientes 100, 101, 102, 103	1,90
		Corrientes 104, 105,	1,78
		Corrientes 106, 107, 108	1,83
GENERACION DE ETANO		Corriente 110	1,77

Figura 26 Porcentaje de corrientes que cumplen con el rango óptimo definido para el parámetro de seguridad

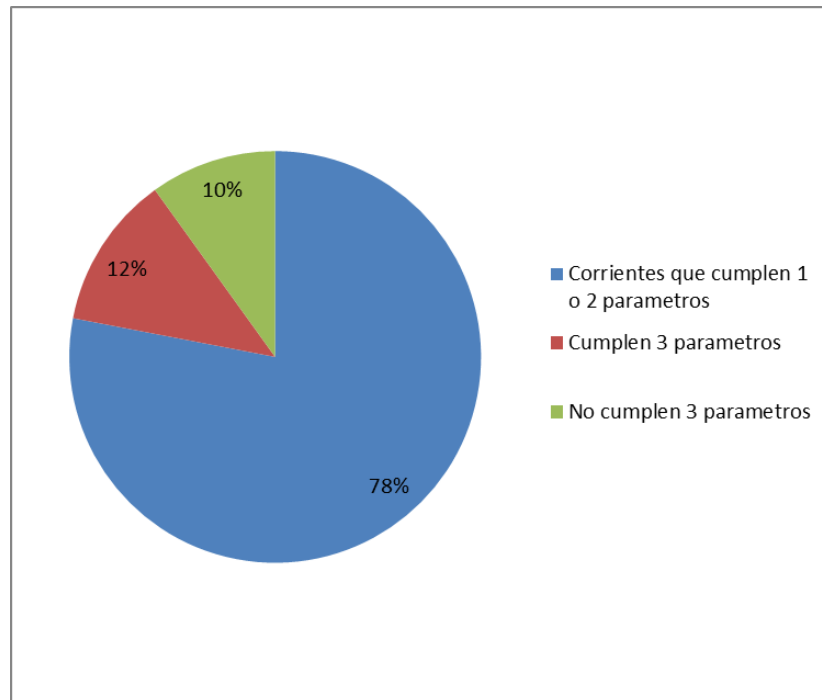


El análisis por medio de parámetros se aplicó con el fin de evaluar la contribución de las corrientes a la mezcla tipo y definir el rango en el cual se deben mantener cualquiera de las mezclas que se realicen entre las corrientes evaluadas, para tener una eficiencia térmica constante, estabilidad operacional y eficiencia operativa del horno.

Es posible apreciar que del total de 94 corrientes solo 31 corrientes cumplen con el rango determinado como óptimo para cada uno de los tres parámetros. Así que con la finalidad de hacer una evaluación que cubija al cien por ciento de las corrientes que influyen en el proceso de quema se buscaron las corrientes que no cumplen con los tres parámetros y se mezclaron para obtener una mezcla tipo

representativa de la red de gases combustibles.

Figura 27 Porcentaje de corrientes que cumplen y no cumplen con los tres rangos determinados como óptimos

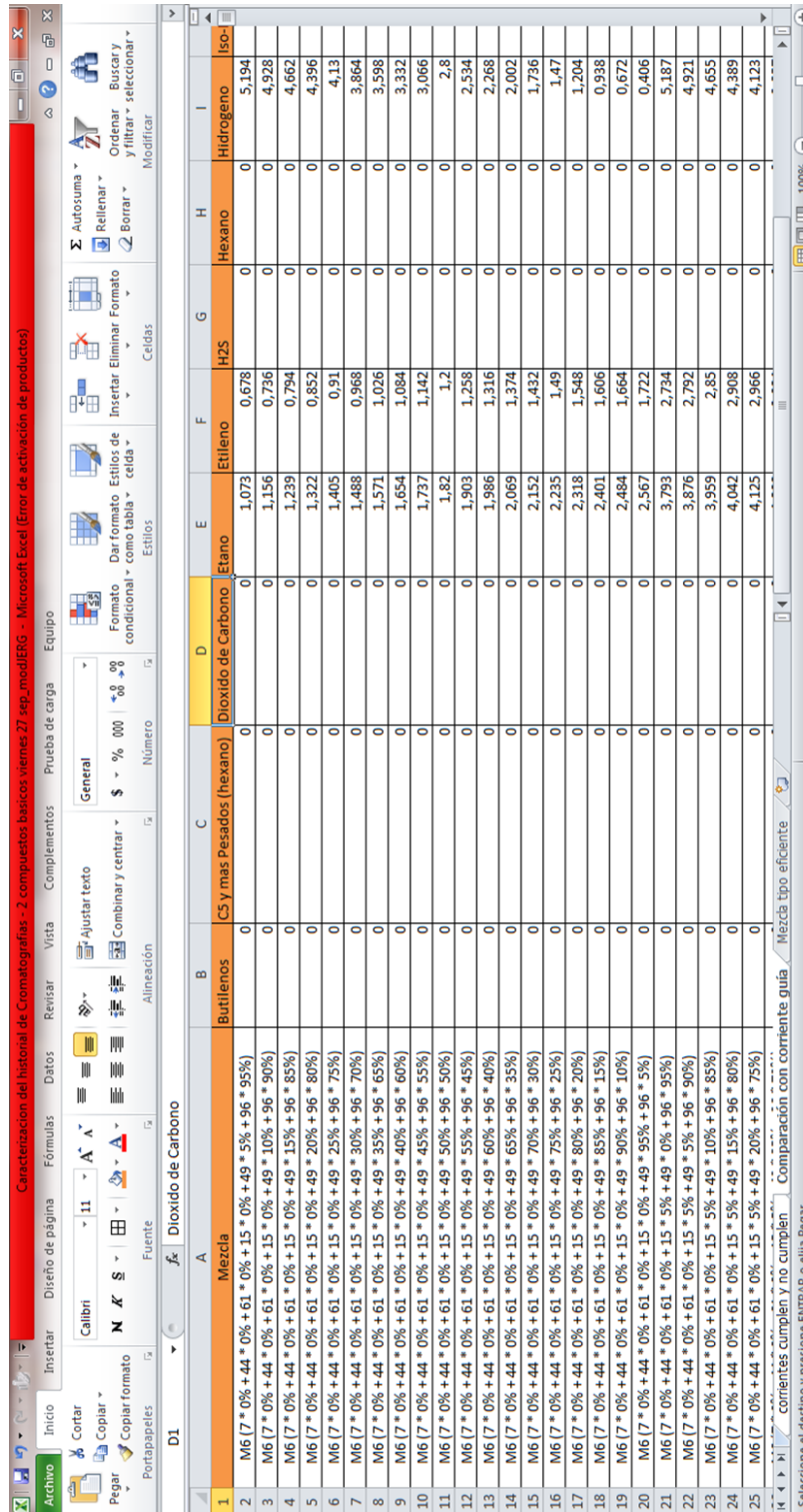


6.3.2. Comparación de la mezcla de corrientes aportantes representativas y la corriente guía

El siguiente paso es tomar las 53124 mezclas obtenidas y compararlas con la corriente guía, corriente número 3, con un paso de 0,1, para poder separar las mezclas lo más similares posibles, en relación con su composición.

Para esta etapa se evaluó la cantidad de mezclas posibles por medio del ingreso de datos en hojas de cálculo de Excel, como se presenta en la figura 28.

Figura 28 Resultados de la comparación de las mezclas representativas y la corriente guía



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Mezcla	Butilenos	C5 y mas Pesados (hexano)	Dióxido de Carbono	Etano	Etileno	H2S	Hexano	Hidrogeno
1									
2	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 5% + 96 * 95%)	0	0	0	1.073	0.678	0	0	5.194
3	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 10% + 96 * 90%)	0	0	0	1.156	0.736	0	0	4.928
4	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 15% + 96 * 85%)	0	0	0	1.239	0.794	0	0	4.662
5	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 20% + 96 * 80%)	0	0	0	1.322	0.852	0	0	4.396
6	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 25% + 96 * 75%)	0	0	0	1.405	0.91	0	0	4.13
7	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 30% + 96 * 70%)	0	0	0	1.488	0.968	0	0	3.864
8	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 35% + 96 * 65%)	0	0	0	1.571	1.026	0	0	3.598
9	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 40% + 96 * 60%)	0	0	0	1.654	1.084	0	0	3.332
10	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 45% + 96 * 55%)	0	0	0	1.737	1.142	0	0	3.066
11	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 50% + 96 * 50%)	0	0	0	1.82	1.2	0	0	2.8
12	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 55% + 96 * 45%)	0	0	0	1.903	1.258	0	0	2.534
13	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 60% + 96 * 40%)	0	0	0	1.986	1.316	0	0	2.268
14	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 65% + 96 * 35%)	0	0	0	2.069	1.374	0	0	2.002
15	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 70% + 96 * 30%)	0	0	0	2.152	1.432	0	0	1.736
16	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 75% + 96 * 25%)	0	0	0	2.235	1.49	0	0	1.47
17	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 80% + 96 * 20%)	0	0	0	2.318	1.548	0	0	1.204
18	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 85% + 96 * 15%)	0	0	0	2.401	1.606	0	0	0.938
19	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 90% + 96 * 10%)	0	0	0	2.484	1.664	0	0	0.672
20	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 0% + 49 * 95% + 96 * 5%)	0	0	0	2.567	1.722	0	0	0.406
21	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 5% + 49 * 0% + 96 * 95%)	0	0	0	3.793	2.734	0	0	5.187
22	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 5% + 49 * 5% + 96 * 90%)	0	0	0	3.876	2.792	0	0	4.921
23	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 5% + 49 * 10% + 96 * 85%)	0	0	0	3.959	2.85	0	0	4.655
24	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 5% + 49 * 15% + 96 * 80%)	0	0	0	4.042	2.908	0	0	4.389
25	M6 (7 * 0% + 44 * 0% + 61 * 0% + 15 * 5% + 49 * 20% + 96 * 75%)	0	0	0	4.125	2.966	0	0	4.123

6.4. ANALISIS DE LA COMBUSTION DE MEZCLAS TIPO

6.4.1. Determinación de las mezclas tipo

De las 53124 mezclas representativas que se compararon con la corriente guía solo 10621 de ellas cumplió con la condición impuesta. Tomando las 10621 mezclas tipo como corrientes de gas combustible, se procede a evaluarlas por medio de los parámetros (ambiental, energético y de seguridad) cada una de las corrientes con el fin de poder ser consideradas como eficientes, de esta evaluación se obtuvo 89 mezclas tipo que cumplieran con los rangos definidos como óptimos [Índice de Wobbe (11000 – 13000 [kWh/m³]), número de Metanos (75 - 95) y emisiones de CO₂ por horno (0- 2,5 [kg])].

6.4.2. Resultados de la combustión de mezclas tipo y comparación con datos de campo

Los resultados obtenidos a partir de la evaluación anterior son evaluados por medio de un proceso de combustión teórica, con el fin de evaluar los rangos utilizados y así poder ajustarlos y darles validez por medio de la comparación con datos de campo de los productos de combustión en iguales condiciones de operación.

Luego se procedió a evaluar los resultados de la combustión de las mezclas tipo, al ser comparadas con los datos de monitoreo realizados para el horno SG-104 analizado después de la combustión. En el monitoreo realizado se reportó que

dentro de los siguientes rangos se presentaba un proceso de combustión eficiente por la apariencia de la llama. La medición se realizó tomando los valores del porcentaje molar de CO₂, debido al impacto ambiental que generan y el porcentaje de CO en ppm representado en altos porcentajes (mayores de 100 ppm), aumento en la temperatura, incremento del exceso de aire (lo que afecta la eficacia de la combustión); los cuales representan un sistema de control para poder llevar la operación de la caldera cerca de su mejor nivel de funcionamiento, en relación a las condiciones de su entorno, con el control del CO en ppm. Los rangos son los siguientes [60, 61]:

$$\%CO_2mol= 8,43 - 9,92$$

$$CO ppm= 0 - 40$$

(11)

Se pudo apreciar que los valores del dióxido de carbono CO₂, así como del monóxido de carbono CO se encuentran en un rango de trabajo similar, teniendo en cuenta que las variaciones en los valores de combustión resultantes cambian de acuerdo con los porcentajes de cada corriente dentro de la mezcla tipo, es decir, si se presenta mayor valor porcentual de corrientes que no cumplen, aumentará la cantidad de dióxido y monóxido de carbono resultante y viceversa.

Tabla 12 Comparación de los valores obtenidos con los valores del monitoreo

%CO ₂ monitoreo	% CO ₂ programa	%CO monitoreo	%CO programa
8,73	9,42	0	0,97
9,92	9,44	0,03	1,02
9,62	9,33	0,04	1,06
8,73	9,36	0	1,11
8,53	9,43	0	0,96
8,63	9,45	0	1,01
9,03	9,34	0	1,054
8,43	9,36	0	1,10
8,43	9,20	0	1,19

En la tabla 12 se presenta la relación de los valores obtenidos del proceso de combustión incompleta, aun cuando el método para la medición de las emisiones de CO₂ se realiza asumiendo combustión completa, se desea simular el proceso de quema de tal manera que los datos obtenidos se encuentren lo más cercano a la realidad posible. Los rangos de monitoreo porcentaje molar de CO₂ (8,43 – 9,92) y partes por millón de CO (0 – 40) sirven como limitantes para los resultados de la combustión de las mezclas tipo. Igualmente, se puede apreciar en la comparación de los datos de campo que el porcentaje molar de CO₂ es similar, pero existen diferencias entre los valores de campo y de simulación del porcentaje de CO, esto es debido principalmente al tipo de simulador de combustión utilizado (basado en el Toolbox de combustión de Matlab) y a que no se contaba con los datos necesarios para evaluar algunos de los componentes. Sus efectos se ven presentes en el aumento de las emisiones de CO. Al no analizar este exceso de CO al realizar la simulación en combustión completa, desde el estudio teórico del CO₂ era de esperarse un aumento en el porcentaje de CO [58, 62].

Seguida a la comparación con los datos de campo se obtuvieron resultados para las 89 mezclas tipo con los rangos dados para el porcentaje de dióxido de carbono CO₂ y la cantidad de monóxido de carbono CO en los datos de campo. se elige la mezcla tipo más adecuada para el caso de estudio. A continuación, en la tabla 13, se presenta la mezcla tipo elegida, la cual se utiliza para definir los rangos de campo determinados para distribuir las corrientes aportantes al proceso de quema de manera que sean utilizadas cada una de estas corrientes de manera eficiente.

Tabla 13 Mezcla tipo elegida

Mezcla (Mezcla porcentual de 6 corrientes)	%CO ₂	%CO
M6 (Corriente 7 * 0% + Corriente 44 * 40% +Corriente 61 * 50% + Corriente 15 * 0% + Corriente 49 * 5% + Corriente 96 * 5%)	9,504	0,950

6.5. DISTRIBUCION DE LA REDES DE GASES

Las mezclas tipo elegidas (tabla 13), después de realizado el análisis, se usaron como guía para establecer los diferentes rangos de mezcla por medio de la evaluación de los componentes de cada una de las 94 corrientes que componen el proceso de quema. Teniendo en cuenta la heterogeneidad de las corrientes se distribuyeron dentro de 4 rangos no excluyentes. Como resultado se obtiene un gráfico que sirve de base para el diseño de estrategias de reacción ante emergencias y de mejora continua, basado en los objetivos de cada una de las normas que integran el sistema de gestión.

La clasificación obtenida en relación a la mezcla tipo elegida entre las 90 posibilidades de mezcla tipo es la siguiente, ver figura 29.

Figura 29 Clasificación de las corrientes pertenecientes al proceso de quema.

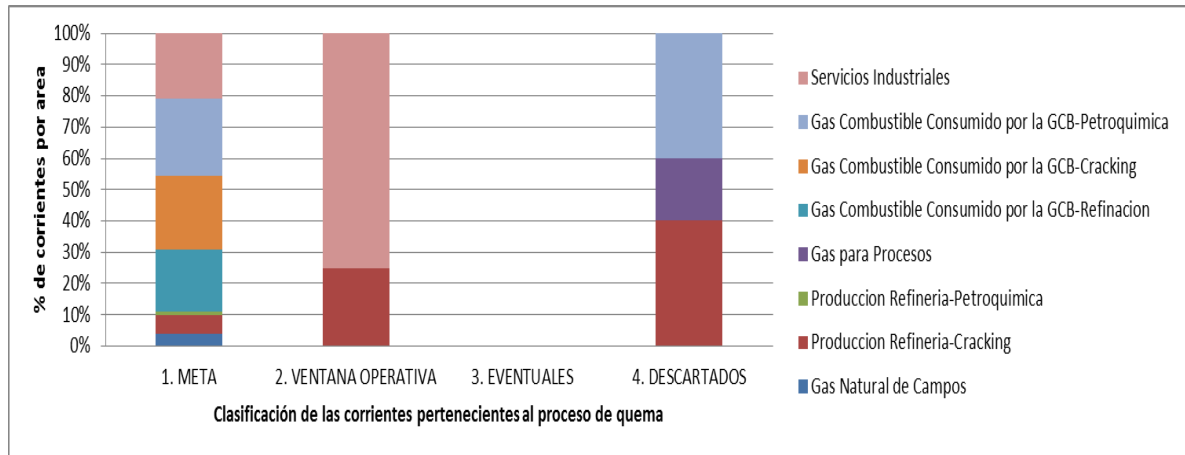


Después se presenta la organización de las corrientes evaluadas teniendo en cuenta sus posibilidades de mezcla en el momento de quema, es decir, cuáles de

las corrientes o mezclas de estas mismas corrientes pueden ser quemadas sin la necesidad de adicionar otra corriente diferente y cuáles necesitan ser mezcladas con corrientes de un rango de eficiencia mayor o cuales deben ser definitivamente descartadas. En relación a lo anterior, se crearon cuatro rangos basados en la metodología utilizada, el primer rango son los gases que se encuentran dentro de la clasificación meta siendo los más similares a la mezcla tipo, el rango dos denominado ventana operativa recoge todas las corrientes que pueden o no ser mezcladas con corrientes meta para ser integradas al proceso de quema sin que modifiquen la eficiencia, como tercer rango se encuentran las corrientes eventuales, las cuales deben ser mezcladas con corrientes meta para reducir riesgos; y por último, el rango cuatro son las corrientes descartadas, las cuales se mezclan directamente con la corriente tipo para evitar daños graves. A través de la definición de estos rangos se pretende extraer los mayores beneficios de la quema de cada una de las corrientes.

Entre los principales beneficios está el mejorar la forma de mezclado, la distribución de las corrientes con base en la problemática y características con la finalidad de optimizar, prever inconvenientes y controlar eventualidades en el proceso de quema. Seguidamente se presenta la distribución de corrientes de acuerdo con la mezcla tipo escogida y los rangos determinados, figura 30.

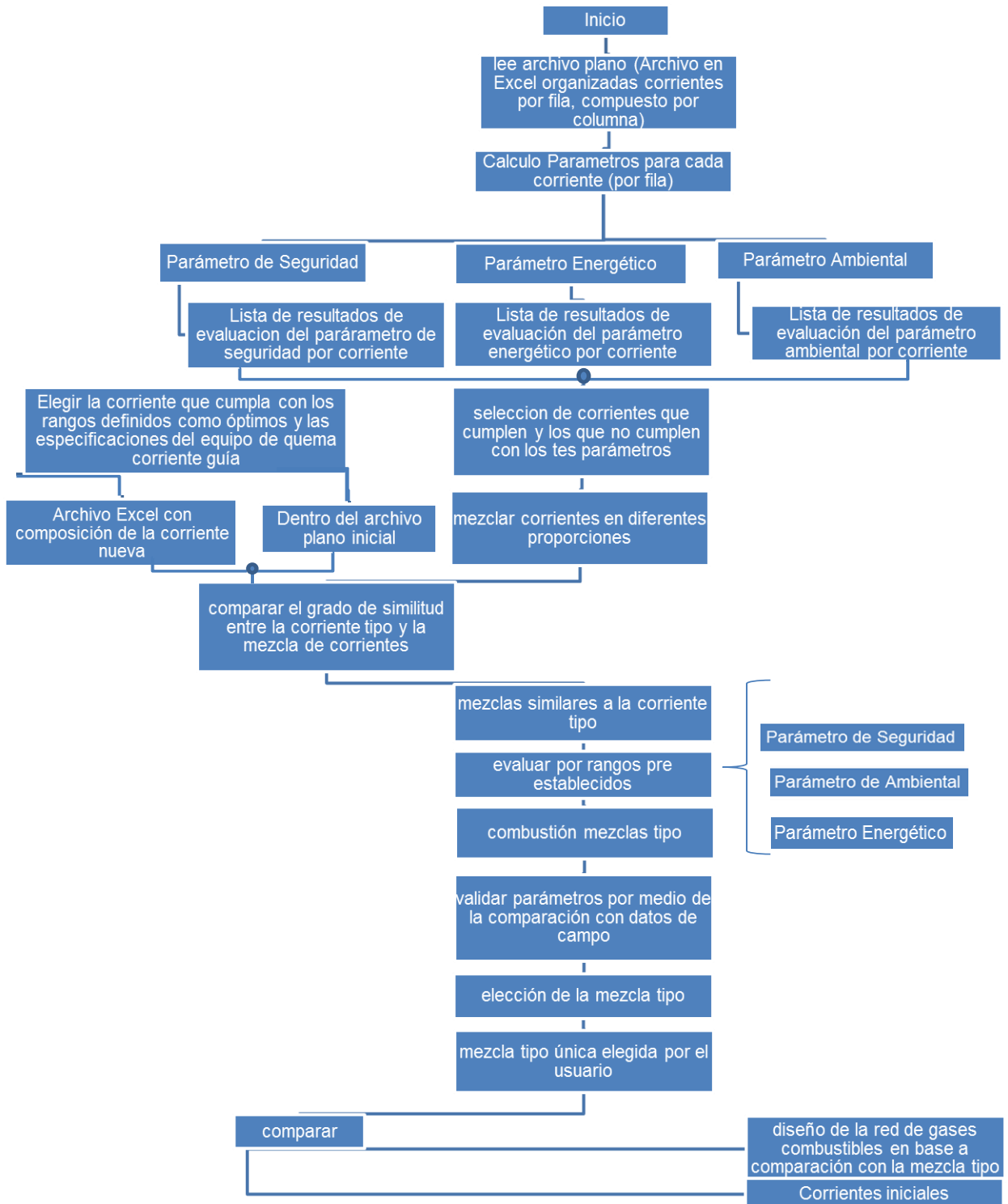
Figura 30 Corrientes pertenecientes al proceso de quema ordenadas en relación a la mezcla tipo



6.6. IMPLEMENTACIÓN DESARROLLO SOFTWARE

En la simulación se utilizó el entorno de desarrollo software Visual Studio Ultimate 2012 para el diseño del entorno gráfico del programa y la caja de herramientas de Matlab (denominado combustión, como base para el desarrollo de la clase denominada combustión dentro del programa) para simular el proceso de combustión de las mezclas tipo óptimas [63], de tal manera que permita al usuario llevar un control de la mayoría de las etapas del proceso metodológico (para mayor información sobre el programa, en el anexo A se presenta el manual de funcionamiento del desarrollo software realizado). Dicho programa es resultado del diagrama de flujo que se creó con base en las actividades programadas para desarrollar la investigación del caso de estudio dentro de la propuesta del presente proyecto. El diagrama se presenta a continuación en la figura 31.

Figura 31 Diagrama de flujo del programa desarrollado en base a la metodología propuesta



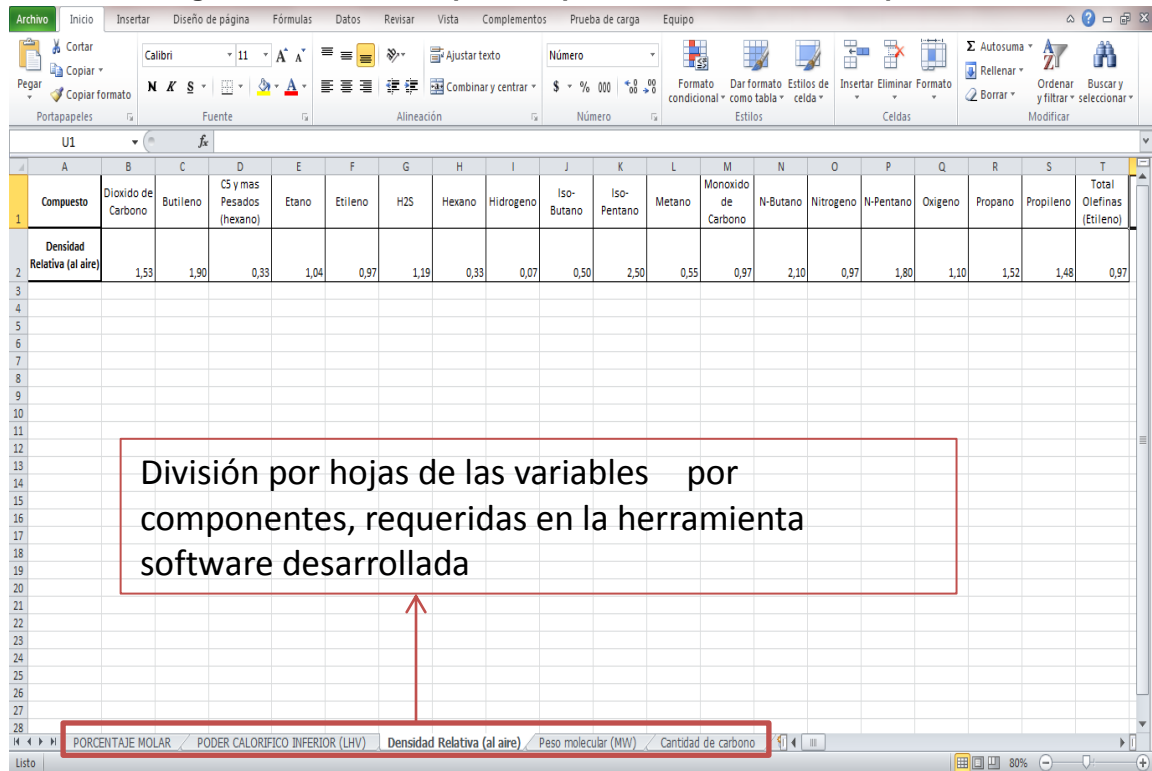
A continuación, se presenta una guía básica de los componentes del programa, acompañada del análisis del caso de estudio al aplicar la metodología propuesta en el apartado anterior.

Cada una de las ventanas tiene un nombre diferente para guiar al usuario durante el proceso. Las ventanas se denominan de la siguiente manera:

1. Carga Inicial: Carga desde Excel el archivo con los datos necesarios por corriente, para la evaluación de los tres parámetros escogidos.
2. Parametrización: Se evalúa cada una de las corrientes en los tres parámetros (ambiental, energético y de seguridad) y se extraen las corrientes que cumplen con el rango seleccionado.
3. Comparación: Análisis y elección de las mezclas tipo, por medio de la comparación de los resultados de cada una de las corrientes al ser evaluada por los tres parámetros y por la corriente guía.
4. Combustión: Toma las mezclas obtenidas en el paso anterior, aplica a cada una de las mezclas los tres parámetros con los rangos definidos en un principio y elige las corrientes que estén dentro de estos rangos predefinidos. Pide los datos de campo del porcentaje de CO_2 y de CO en partes por millón de tal manera que al aplicar la combustión solo aparecerán las mezclas o corrientes nuevas que cumplan con estos rangos de campo.
5. Logística: se realiza la evaluación de las corrientes al compararlas con la mezcla óptima obtenida en el paso anterior y se organizan las corrientes de tal manera que se tiene una distribución general de las corrientes que pueden ser quemadas individualmente o mezcladas entre ellas manteniendo los tres parámetros en un rango constante y eficiente. A su vez, determina cuáles son las corrientes que deben pasar por un pre-tratamiento antes de unirse al proceso de quema.

Como primera medida se cargan las corrientes previamente organizadas dentro de un archivo en Excel, figura 33, el cual se despliega y se presenta de tal manera que cada fila representa una corriente diferente y cada columna un compuesto; cargando de esta manera, y por hoja, dentro del archivo en Excel, los datos necesarios para la evaluación de cada uno de los parámetros (para el caso de estudio, hoja 1: porcentaje molar, hoja 2: poder calorífico inferior, hoja 3: densidad, hoja 4: peso molecular, hoja 5: cantidad de carbonos presente en cada compuesto, figura 32) se cargan al programa .

Figura 32 Variables requeridas para la evaluación de los parámetros



Compuesto	Dioxido de Carbono	Butileno	C5 y mas Pesados (hexano)	Etano	Etileno	H2S	Hexano	Hidrogeno	Iso-Butano	Iso-Pentano	Metano	Monoxido de Carbono	N-Butano	Nitrogeno	N-Pentano	Oxigeno	Propano	Propileno	Total Olefinas (Etileno)
Densidad Relativa (al aire)	1,53	1,90	0,33	1,04	0,97	1,19	0,33	0,07	0,50	2,50	0,55	0,97	2,10	0,97	1,80	1,10	1,52	1,48	0,97

División por hojas de las variables por componentes, requeridas en la herramienta software desarrollada

Sheet tabs: PORCENTAJE MOLAR / PODER CALORIFICO INFERIOR (LHV) / **Densidad Relativa (al aire)** / Peso molecular (MW) / Cantidad de carbono

Figura 33 Corrientes cargadas al programa de diseño de la red de gases combustibles

	Butílenos	CS y mas Pesados (Hexano)	Dioxido de Carbono	Etano	Etileno	H2S	Hexano	Hidrogeno	Iso-Butano	Iso-Pentano	Metano	Monoxido de Carbono	N-Butano	Nitrogeno	N-Pentano	Oxigeno	Propano	Propileno	Total Gafinas (Etileno)	
F1																				
1	0		0.00	0.40	0.00	0.00	0	0.00	0.01	0.11	98.30	0.00	0.00	1.08	0.00	0.00	0.06	0.02	0.02	0.02
2	0		0.00	0.40	0.00	0.00	0	0.00	0.01	0.11	98.30	0.00	0.00	1.08	0.00	0.00	0.06	0.02	0.02	0.02
3	0		0.00	6.26	0.00	0.00	0	0.00	0.09	0.16	91.46	0.00	0.00	1.26	0.00	0.13	0.44	0.01	0.06	0.06
4	0		0.00	0.00	0.00	0.00	0	78.73	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	20.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0	0.02	0	0.63	0.08	0	0	0	0.64	0.01	62.05	2.43	0.19	0	0	2.43	1.13	5.21	0.68	0.68
8	0	0.19	1.94	13.65	11.97	6.08	0	9.82	0.62	0.56	32.79	1.41	0.10	4.83	0	0	2.62	13.00	0.61	0.61
10	0		0.67	8.79	5.79	3.01	0	17.29	4.45	0.42	36.89	0.62	1.94	1.64	0.00	0	7.36	9.50	1.63	1.63
12	0	0.10	1.36	0.00	11.89	5.59	0	14.80	0.00	0.35	0.00	1.12	0.02	3.22	0.00	0	1.76	7.17	0.00	0.00
13	0		0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0		0.000	0.48	4.57	0	0	31.80	0	0	56.15	1.77	0	5.23	0.00	0	0	0	0	0
15				57.05	42.90	0.00	0	0	0	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.02	0	0.00	0.00
16	0		0	10.88	8.72	0	0	19.07	1.62	1.20	30.92	1.22	0.59	3.45	0.00	0	7.49	12.80	2.04	2.04
17	0		0.00	0.00	0.00	0.00	0	96.40	0.00	0.00	3.34	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0		0.00	45.78	53.02	0.00	0	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0		0.00	25.00	99.99	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0		0.00	0.00	2.50	0.00	0	32.70	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0		0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0		0.04	0.17	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	65.53	0.00	0.00	14.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
31	0		0.04	0.17	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	65.53	0.00	0.00	14.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0		0.40	9.38	6.98	0.00	0	18.22	3.30	0.52	33.98	0.87	1.67	4.08	0.00	0.41	7.27	10.89	2.03	2.03
33	0		0.40	9.38	6.98	0.00	0	18.22	3.30	0.52	33.98	0.87	1.67	4.08	0.00	0.41	7.27	10.89	2.03	2.03
34	0		0.40	9.38	6.98	0.00	0	18.22	3.30	0.52	33.98	0.87	1.67	4.08	0.00	0.41	7.27	10.89	2.03	2.03
35	0		0.40	9.38	6.98	0.00	0	18.22	3.30	0.52	33.98	0.87	1.67	4.08	0.00	0.41	7.27	10.89	2.03	2.03
36	0		0.40	9.38	6.98	0.00	0	18.22	3.30	0.52	33.98	0.87	1.67	4.08	0.00	0.41	7.27	10.89	2.03	2.03
37	0		0.87	0.41	4.08	18.22	0	6.98	7.27	10.89	0.52	0.00	2.03	33.98	9.38	3.30	1.67	0.40	0.00	0.00
38	0		0.87	0.41	4.08	18.22	0	6.98	7.27	10.89	0.52	0.00	2.03	33.98	9.38	3.30	1.67	0.40	0.00	0.00
39	0		0.40	9.38	6.98	0.00	0	18.22	3.30	0.52	33.98	0.87	1.67	4.08	0.00	0.41	7.27	10.89	2.03	2.03

Se realizó la simulación del caso base aplicando la evaluación de las corrientes por medio de 3 parámetros: número de metanos, índice de Wobbe y emisiones de CO₂, los cuales representan las problemáticas principales definidas dentro de cada uno de los 3 aspectos (ambiental, energético y de seguridad) evaluados para cada corriente en particular.

El análisis por medio de parámetros se aplicó con el fin de evaluar la contribución de las corrientes a la mezcla tipo y definir el rango en el cual se deben mantener cualquiera de las mezclas que se realicen entre las corrientes evaluadas, para tener una eficiencia térmica constante, estabilidad operacional y eficiencia operativa del horno. El procedimiento que se realiza es la evaluación de las mezclas de las corrientes óptimas (denominadas así por cumplir con los 3 parámetros) con las corrientes que no cumplen con los mismos.

La segunda ventana del programa (figura 34), donde el usuario tiene la posibilidad de elegir los rangos teniendo en cuenta las características propias del proceso de combustión estudiado.



Figura 34 Evaluación de parámetros por medio del programa

Corrientes De Gas

Carga Inicial Parametrización Comparación Combustión Logística Puebas

Parametro De Seguridad
 Número De Melanos

Rango: Min: 75 Max: 95 Ejecutar

Resultado

Comente	RHCR	Numero Melanos
3	3.84221349785007	88.564578154062
7	3.8427126371278	88.6194740167865
43	3.8782057439247	92.646852325011
44	3.8782057439247	92.646852325011
45	3.8782057439247	92.646852325011
61	3.88994307400379	94.0332742581388
62	3.88994307400379	94.0332742581388
75	3.7575647432885	79.9248863333101

Comente: RHCR = (%metano*4+%Etano*6 + % propano*8+ (% iso-butano + % n-butano)*10 + (% iso-pentano + n-pentano)*12+ (% hexano + C5 v mas pesados)*14) / (%metano*1+% etano*2+ % propano*3+ (% iso-butano + % n-butano)*4+ (% iso-pentano+ % n-pentano)*5+ (% hexano + C5 y mas pesados)*6)

MIN = 1.624*(1-406.14* 508.04/RHCR -173.55/RHCR*2 + 20.17/RHCR*3) -19.1

Parametro Energetico
 Índice De Wobbe

Rango: Min: 1100 Max: 1300 Ejecutar

Resultado

Comente	Índice De WOBBE	PCSm	-/Densidadm
1	1212.06722200995	906.6093	0.747985989173594
2	1212.06722200995	906.6093	0.747985989173594
3	1238.03586113578	956.00443	0.772194457374566
7	1108.08241558611	768.18662	0.683257657729075
8	1257.04246971069	1169.89613	0.930665557544707
37	1164.95950080422	1275.7189	1.09507575000448
38	1164.95950080422	1275.7189	1.09507575000448
43	1211.57366271295	934.00095	0.770899020624621
44	1211.57366271295	934.00095	0.770899020624621
45	1211.57366271295	934.00095	0.770899020624621

Comente: $W = \frac{PCS_m}{\sqrt{d_m}} = \frac{\sum X_i PCS_i}{\sqrt{\sum X_i d_i}}$

Parametro Ambiental
 Emisiones Al Medio Ambiente

Rango: Min: 0 Max: 2.5 Ejecutar

Flujo de Combustible: 27.21

Resultado

Comente	EmisionesCO2	EmisionesCO2 Anuales
1	1.44639683286791	3.60209359076038
2	1.44639683286791	3.60209359076038
3	1.5498899240286	4.11396238468071
4	0.00462395882282415	0.00535001147956503
7	1.2982008289039	2.7785465983847
8	2.0585097908819	7.93650502314866
10	2.15346308496608	7.40636145131216
12	0.80270172407137	1.42208079540302

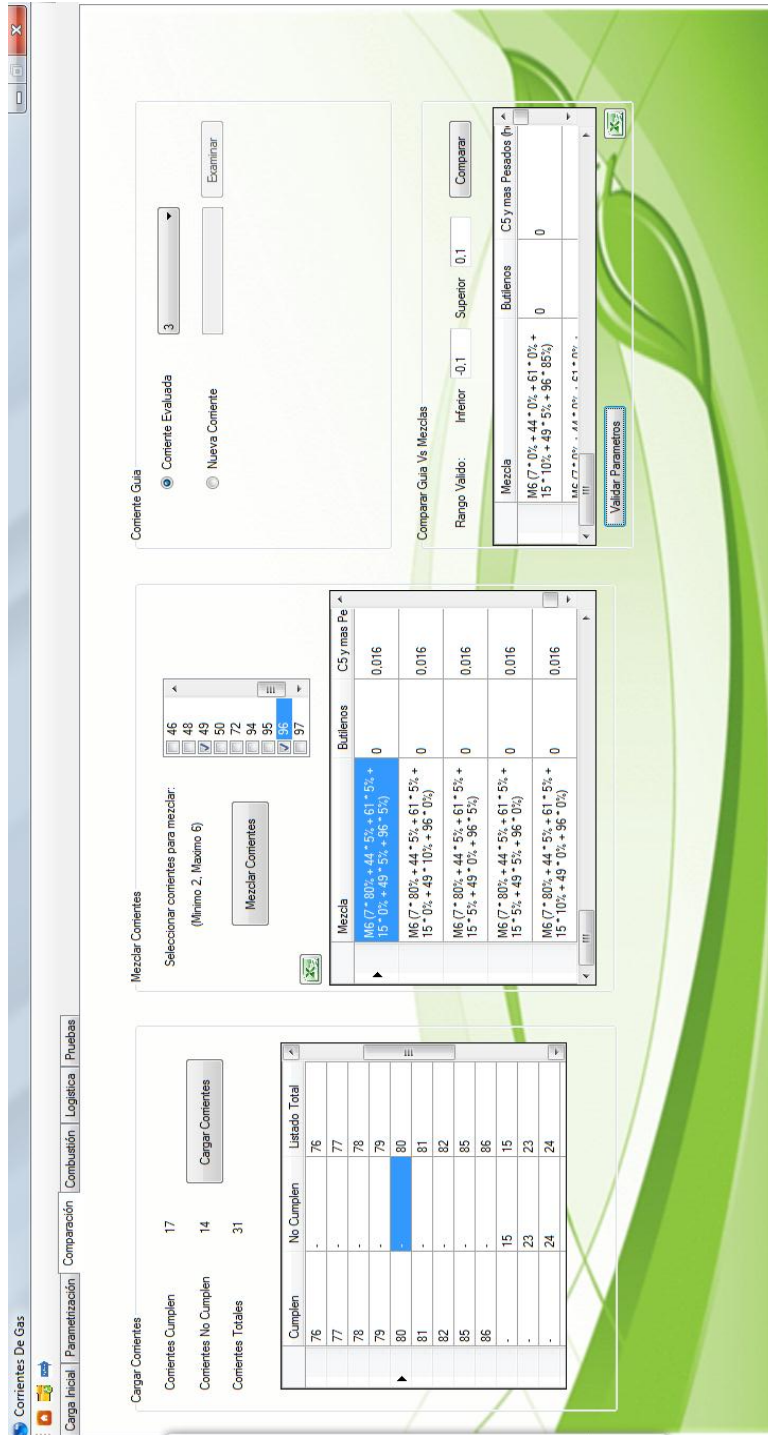
Comente: $E_{CO2} = FC * Conversion\ molar\ vol\ mten * MW_{Mixture} * W/F * C_{Mixture} * \frac{44}{12}$

A continuación se comparan con una corriente denominada corriente guía que, ya sea parte o no de las corrientes evaluadas, representa la óptima corriente para trabajar dentro del equipo utilizado para quema, sin olvidar que la mayoría de los equipos se diseñan para trabajar con gas natural. De esta forma se tomó como corriente guía la denominada como corriente 3 que pertenece al área de gas natural que se encuentra dentro de las corrientes que aportan al proceso de combustión evaluado. La anterior comparación se realiza teniendo en cuenta que no existe un tipo general de gas natural.

Luego se tomaron las corrientes que se encontraban en el rango más cercano (elegido con base en las características propias del proceso evaluadas por medio de los parámetros) tratando de abarcar en la elección a la mayor parte de las áreas. Para el caso de estudio se escogieron seis corrientes que cubrían la mayoría de las áreas y corrientes dentro del proceso. Las corrientes elegidas fueron las mismas presentadas en la tabla 8. Se tomaron las seis corrientes elegidas y a cada una se le fue variando el porcentaje entre 5% y 100%, lo que generaba un cambio de valor de las demás corrientes en mezcla.

A continuación se presenta el proceso descrito anteriormente, simulado por medio de la figura 35 en donde se aprecia cada uno de los pasos realizados.

Figura 35 Evaluación de la mezcla de gases combustibles



Mezclar Comientes

Seleccionar comientes para mezclar:
 (Mínimo 2, Máximo 6)

Mezclar Comientes

Mezcla	Butileno	C5 y mas Pe
M6 (7*80% + 44*5% + 61*5% + 15*0% + 49*5% + 96*5%)	0	0.016
M6 (7*80% + 44*5% + 61*5% + 15*0% + 49*10% + 96*0%)	0	0.016
M6 (7*80% + 44*5% + 61*5% + 15*5% + 49*0% + 96*5%)	0	0.016
M6 (7*80% + 44*5% + 61*5% + 15*5% + 49*5% + 96*0%)	0	0.016
M6 (7*80% + 44*5% + 61*5% + 15*10% + 49*0% + 96*0%)	0	0.016

Comente Guia

Comente Evaluada: 3

Nueva Comente

Examinar

Comparar Guia Vs Mezclas

Rango Valido: Inferior -0.1 Superior 0.1

Mezcla	Butileno	C5 y mas Pesados (h)
M6 (7*0% + 44*0% + 61*0% + 15*10% + 49*5% + 96*85%)	0	0

Validar Parametros

Cargar Comientes

Comentarios Cumpen	Comentarios No Cumpen	Comentarios Totales
17	14	31

Listado Total

Cumpen	No Cumpen	Listado Total
76	-	76
77	-	77
78	-	78
79	-	79
80	-	80
81	-	81
82	-	82
85	-	85
86	-	86
-	15	15
-	23	23
-	24	24

De las 53124 mezclas iniciales, que fueron halladas por medio de la evaluación de la unión en mezcla de las corrientes que cumplieron y las que no cumplieron, y realizada la evaluación de los parámetros (Índice de Wobbe, Numero de Metanos y Emisiones de CO₂) a cada una de las mezclas (las cuales se asumen como nuevas corrientes) seguida por la comparación con la mezcla tipo de donde se reducen a 10621, dio como resultado 89 mezclas tipo que cumplieron con los rangos dados para el porcentaje de dióxido de carbono CO₂ y la cantidad de monóxido de carbono CO en los datos de campo. Para el estudio se eligió entre las 89 mezclas tipo una mezcla representativa al incluir valores porcentuales diferentes de cero en la mayoría de las corrientes. A continuación, en la figura 36 se muestra un fragmento del código fuente de la herramienta software, el cual se encarga de realizar la combustión completa o incompleta según corresponda. Posteriormente, en la figura 37, se presenta el área de trabajo dentro del programa en el cual se realiza la combustión de mezclas tipo y se definen los rangos de campo determinados para el proceso evaluado

Figura 36 Fragmento de código fuente, clase combustión.

```
//combustion completa
public class COMPLET_COMB
{
    public double TK;
    public double O2MINI1;
    public double AIRMINI1;
    public double TRE;
    public double TAD;

    public double V1_WG;
    public double V1_WG_DRY;
    public StructuraGAS S_WG;
    public StructuraGAS S_WG_DRY;

    public double GetTAD() // - adiabatic temperature of combustion...
    public double GetTRE() // - real temperature of combustion...
    public double GetVolWG() // - volume of wastegas for 1m3 fuel...
    public StructuraGAS GetStructuraWG() // - structure of wastegas...

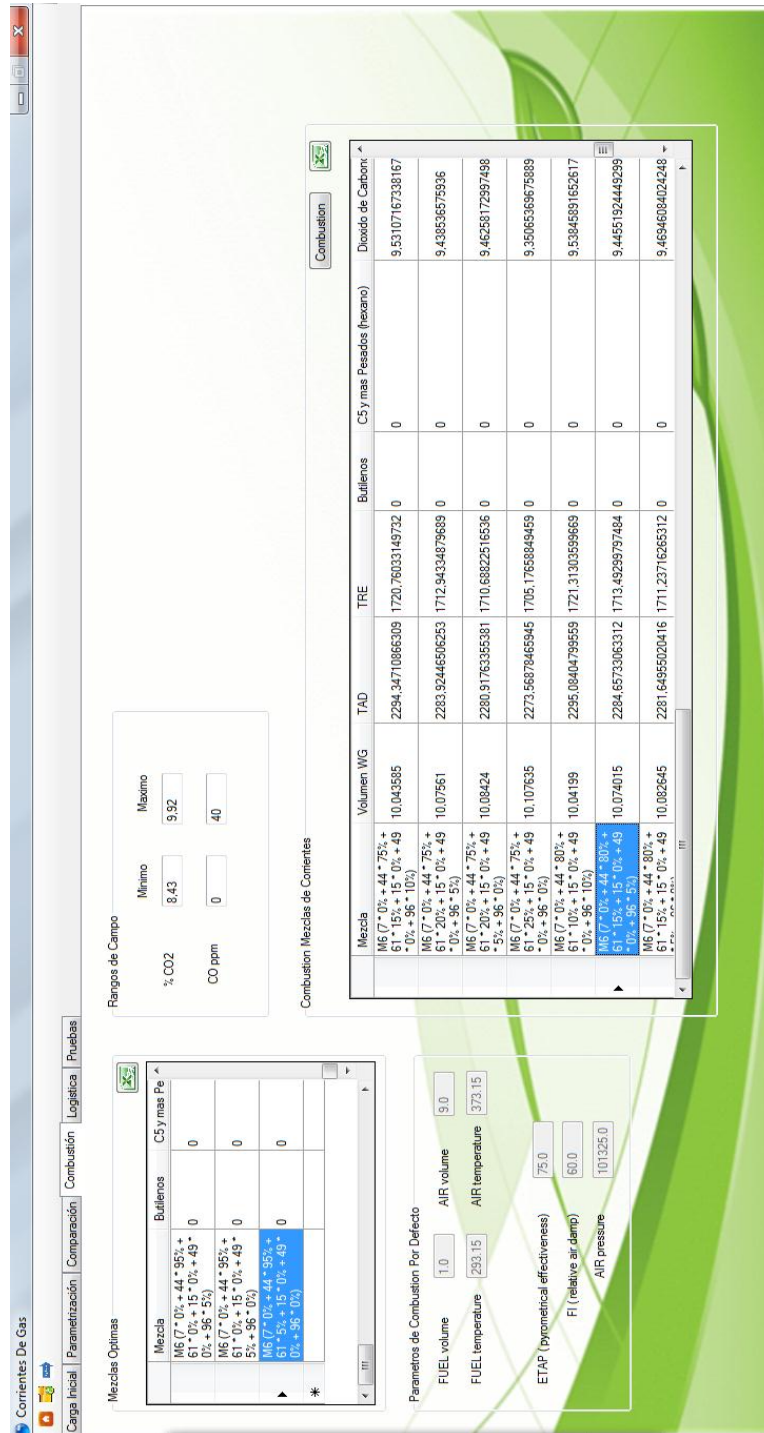
    public void OperacionCombustion(StructuraGAS S_FUEL, double V_FUEL, doub

    public void TA_TEMPERATURE(double ETAP, double T_AIR, double V_AIR, Structu
}

// combustion incompleta
public class INCOMPLET_COMB
{
    public double TK;
    public double O2MINI1;
    public double AIRMINI1;
    public double V1_WG;
    public double TAD;
    public double TRE;
    public StructuraGAS S_WG;

    public double GetTAD() // - adiabatic temperature of combustion...
    public double GetTRE() // - real temperature of combustion...
    public double GetVolWG() // - volume of wastegas for 1m3 fuel...
    public StructuraGAS GetStructuraWG() // - structure of wastegas...
    public double f(double T)...
    public void OperacionCombustion(StructuraGAS S_FUEL, double V_FUEL, dou
}
```

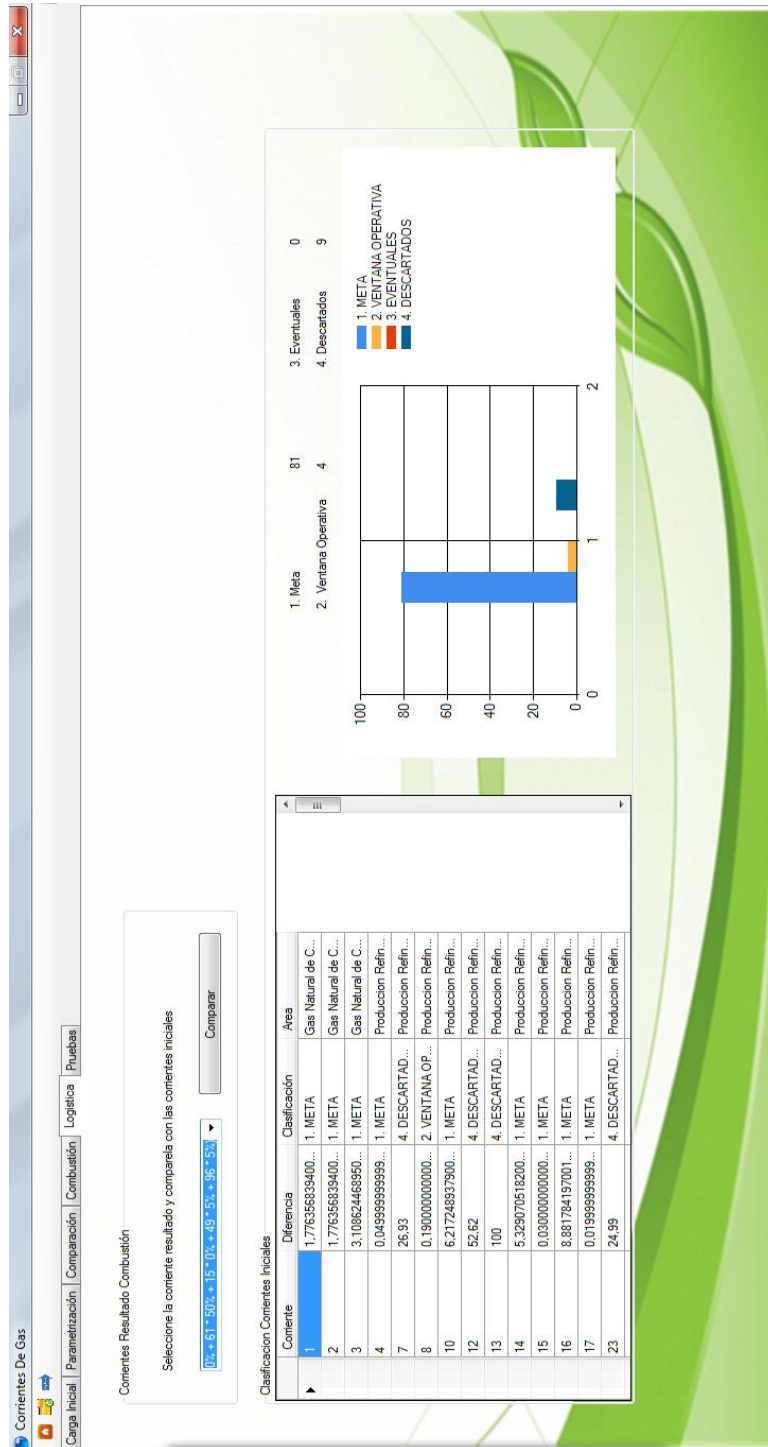
Figura 37 Comparación de las mezclas tipo con rangos de campo





Las mezclas tipo obtenidas, después de realizado el análisis, se usaron como guía para establecer los diferentes rangos de mezcla por medio de la evaluación de los componentes de cada una de las 94 corrientes que componían el proceso de quema, figura 38. Teniendo en cuenta la heterogeneidad de las corrientes se distribuyeron dentro de 4 rangos no excluyentes. Como resultado se obtiene un gráfico que sirve de base para el diseño de estrategias de reacción ante emergencias y de mejora continua, basado en los objetivos de cada una de las normas que integran el sistema de gestión.

Figura 38 Distribución de las corrientes en relación a la mezcla tipo





6.7. ANALISIS DEL PROGRAMA

Se llevó a cabo un análisis estadístico donde se evaluaron los resultados de la estimación de cada parámetro por corriente, la simulación del proceso de combustión incompleta de las mezclas tipo y los rangos óptimos para cada uno de los parámetros (ambiental, energético y de seguridad), con los datos de una operación de combustión real. Todo esto para lograr llevar el proceso desarrollado en hojas de cálculo de Microsoft Excel a un programa dentro del cual se pueda monitorear cada etapa del proceso de creación de la red de gases combustibles para un proceso de quema determinado.

Como primera medida se realizó la comparación de los cálculos realizados por cada parámetro para el caso de prueba, encontrando una alta similitud en los resultados obtenidos. Lo anterior se puede ver a continuación por medio de las tablas 14, 15 y 16. Seguidamente se presenta el análisis de los rangos definidos como óptimos [Índice de Wobbe (11000 – 13000 [kWh/m³]), número de Metanos (75 - 95) y emisiones de CO₂ por horno (0- 2,5 [kg])] con la finalidad de corroborar la importancia de mantener los tres rangos, sin variaciones, para que pueda dar la mezcla tipo eficiente y por ende, una distribución eficiente de las corrientes dentro del proceso de quema estudiado.

6.7.1. Comparación del parámetro ambiental

Tabla 14 Comparación del parámetro ambiental tabulado (tabla 7) y el programado

AREAS	SUB AREA	NOMBRE	ECO2	ECO2 Programado
GAS NATURAL DE CAMPOS	GAS NATURAL DE CAMPOS	corriente 1	1,96	1,446
		corriente 3	2,1	1,550
PRODUCCIÓN DE REFINERÍA	CRACKING	corriente 4	0,01	0,005
		corriente 7	1,76	1,299
		corriente 10	2,92	2,153
		corriente 17	7,65	0,048
	PETROQUÍMICA	corriente 23	2,29	0,048
		corriente 24	0,98	3,617
		corriente 25	2,63	0,084
		corriente 30	1,29	0,954
		corriente 32	2,92	2,156
	GAS PARA PROCESO	GENERACIÓN DE H2	corriente 37	3,05
GAS COMBUSTIBLE CONSUMIDO POR LA REFINERIA	REFINACIÓN	corriente 41	5,82	4,287
		corriente 43	2,06	1,517
		corriente 48	5,82	4,287
		corriente 51	1,34	0,984
	CRACKING	corriente 56	2,58	1,900
		corriente 58	2,62	1,900
		corriente 61	2,09	1,542
		corriente 67	0	2,187
		corriente 72	7,38	5,439
	PETROQUÍMICA	corriente 75	2,26	1,665
		corriente 84	1,77	1,303
		corriente 86	2,09	1,543
		corriente 90	2,41	1,779
SERVICIOS INDUSTRIALES		corriente 94	4,74	3,495
		corriente 99	1,96	1,446
		corriente 100	2,58	1,900
		corriente 104	2,42	1,784
		corriente 106	2,48	1,828

6.7.2. Comparación del parámetro energético

Tabla 15 Comparación del parámetro energético tabulado (tabla 6) y el programado

AREAS	SUB AREA	NOMBRE	IW (BTU/ft3)	IW (BTU/ft3) Programado
GAS NATURAL DE CAMPOS	GAS NATURAL DE CAMPOS	corriente 1	1212,07	1212,07
		corriente 3	1237,09	1238,04
PRODUCCIÓN DE REFINERÍA	CRACKING	corriente 4	349,31	428,79
		corriente 7	560,79	1108,08
		corriente 10	480,84	1437,55
		corriente 17	652,91	991,14
		corriente 23	1642,68	1670,78
	PETROQUÍMICA	corriente 24	1696,52	1714,04
		corriente 25	1696,52	392,7
		corriente 30	1670,52	843,03
		corriente 32	1416,69	1416,69
		GAS PARA PROCESO	GENERACIÓN DE H ₂	corriente 37
GAS COMBUSTIBLE CONSUMIDO POR LA REFINERÍA	REFINACIÓN	corriente 41	2399,21	2416,57
		corriente 43	1193,63	1211,57
		corriente 47	1493,15	1416,69
		corriente 48	1483,51	2416,57
		corriente 51	3603,98	1014,87
	CRACKING	corriente 52	3336,17	1014,87
		corriente 56	2930,64	1368,83
		corriente 58	2955,26	1366,14
		corriente 59	2236,88	1367,79
		corriente 61	11,05	1256,87
		corriente 67	2094,59	1415,43
	PETROQUÍMICA	corriente 68	1030,77	1030,77
		corriente 72	3665,43	3665,43
		corriente 75	1248,74	1269,68
		corriente 84	1030,61	1030,77
		corriente 85	1177,92	1198,84
		corriente 86	1181,09	1198,84
		corriente 89	1284,86	1304,55
corriente 90	1287,21	1304,55		
SERVICIOS INDUSTRIALES	corriente 94	2171,3	2189,56	
	corriente 99	1193,03	1212,07	
	corriente 100	1368,83	1368,83	
	corriente 104	1287,91	1305,13	
	corriente 106	1268,24	1268,24	

6.7.3. Comparación del parámetro de seguridad

Tabla 16 Comparación del parámetro de seguridad tabulado (tabla 5) y el programado

AREAS	SUB AREA	NOMBRE	MN	MN Programado
GAS NATURAL DE CAMPOS	GAS NATURAL DE CAMPOS	corriente 1	106,65	105,64
		corriente 3	93,49	88,56
PRODUCCIÓN DE REFINERÍA	CRACKING	corriente 4	108,42	108,42
		corriente 7	74,43	88,62
		corriente 8	31,75	53,8
		corriente 10	62,45	47,44
	PETROQUÍMICA	corriente 12	31,75	36,4
		corriente 17	108,42	108,42
		corriente 23	37,53	49,15
		corriente 24	21,11	44,31
		corriente 25	6,11	0
GAS PARA PROCESO	GENERACIÓN DE H2	corriente 30	107,68	107,69
GAS COMBUSTIBLE CONSUMIDO POR LA REFINERÍA	REFINACIÓN	corriente 32	40,55	47,64
		corriente 37	5,32	32,45
		corriente 41	29,05	34,88
		corriente 45	92,64	92,65
		corriente 47	40,55	47,64
	CRACKING	corriente 48	29,05	34,88
		corriente 51	75,59	106,06
		corriente 56	46,61	55,99
		corriente 59	41,39	50,03
		corriente 62	91,54	94,03
		corriente 66	41,39	50,03
		corriente 67	39,5	48
	PETROQUÍMICA	corriente 68	100,98	102,43
		corriente 75	55,3	79,92
corriente 86		48,66	80	
SERVICIOS INDUSTRIALES		corriente 89	61,26	74,99
		corriente 94	36,87	39,06
		corriente 99	105,47	105,64
		corriente 100	46,61	55,99
		corriente 104	44,99	58,34

6.7.4. Variación del parámetro ambiental

Al aumentar el rango de las emisiones de dióxido de carbono (2,5 – 5,0 kg y de 5,0-7,0 kg) se reducen altamente las corrientes que alcanzan estos nuevos rangos. De las 13 corrientes de diferentes áreas en un rango entre 2,5 – 5,0 kg a una corriente en el rango de 5,0-7,0 kg, se puede apreciar que las corrientes que se encuentran dentro de estos rangos pertenecen a diferentes áreas y sub áreas aportantes, lo que reafirma tanto la heterogeneidad de las corrientes como la necesidad de realizar un análisis previo a la quema de las mismas. Seguidamente, al realizar las consideraciones con los demás rangos asociados, energético y de seguridad, no permiten que pasen la primera evaluación de los parámetros, corroborando la importancia del rango elegido como óptimo.

6.7.5. Variación del parámetro energético

Al realizar la evaluación de los parámetros definidos se encontró que al variar tanto aumentando (13500 – 1700 BTU/pie³) como disminuido (9000 – 11000 BTU/pie³) el rango determinado como óptimo, para el índice de Wobbe (1100 – 1300 BTU/pie³) se apreció que ninguna de las corrientes cumplía con estos rangos (mayor o menor), así que la integración con los aspectos ambiental y de seguridad no se podría efectuar, por ende es necesario mantener le rango definido como optimo o eficiente para poder mantener la eficiencia energética constante de los gases combustibles que aportan a este determinado proceso de quema.

6.7.6. Variación del parámetro de seguridad

En relación al número de metano, tanto al aumentar como al disminuir el rango de trabajo entre (95-115) y (55 – 75), se encontraron corrientes que cumplieran con este requisito; pero al ser evaluadas sus mezclas con los 3 parámetros por los mismos valores, aumentados o disminuidos, se presentó la disminución del rango del número de metano y no se pudieron obtener datos para la etapa de combustión, ya que ninguna de las mezclas cumplió con los tres parámetros. Caso contrario al aumentar los valores del rango, ya que al realizar la evaluación de las mezclas por medio de los 3 parámetros se extrajeron mezclas óptimas pero no representativas, pues dentro de las mezclas solo se encontraban porcentualmente representadas las corrientes que cumplieran con la primera evaluación de los tres rangos y dentro de los valores resultantes del proceso de combustión se apreció un aumento en la temperatura adiabática 2283,32 K a 2300 K y en la temperatura real de combustión de 1712,49 K a 1725 K lo que podría acarrear problemas y daños en el equipo.

6.7.7. Evaluación de la de aplicación de la red de gases combustibles

Desde un punto de vista técnico la aplicación del análisis y posterior implementación de una red de gases combustibles particularizadas puede reducir los problemas principales dentro de la combustión de la mezcla de gases combustibles, manteniendo los efectos adversos dentro de un rango sostenible y manejable de (8,43 – 9,92) % de emisiones de CO₂ y obtener una eficiencia energética constante dentro del proceso de quema.

Al aplicar la metodología definida dentro del proyecto se puede trabajar en cualquier tipo de compañía que maneje corrientes de gas combustible buscando optimizar tanto su manejo, como el control de los daños de una forma constante y de manera organizada; teniendo como objetivo prever efectos adversos y preparar a los operarios para eventualidades o en el tratamiento de urgencias.

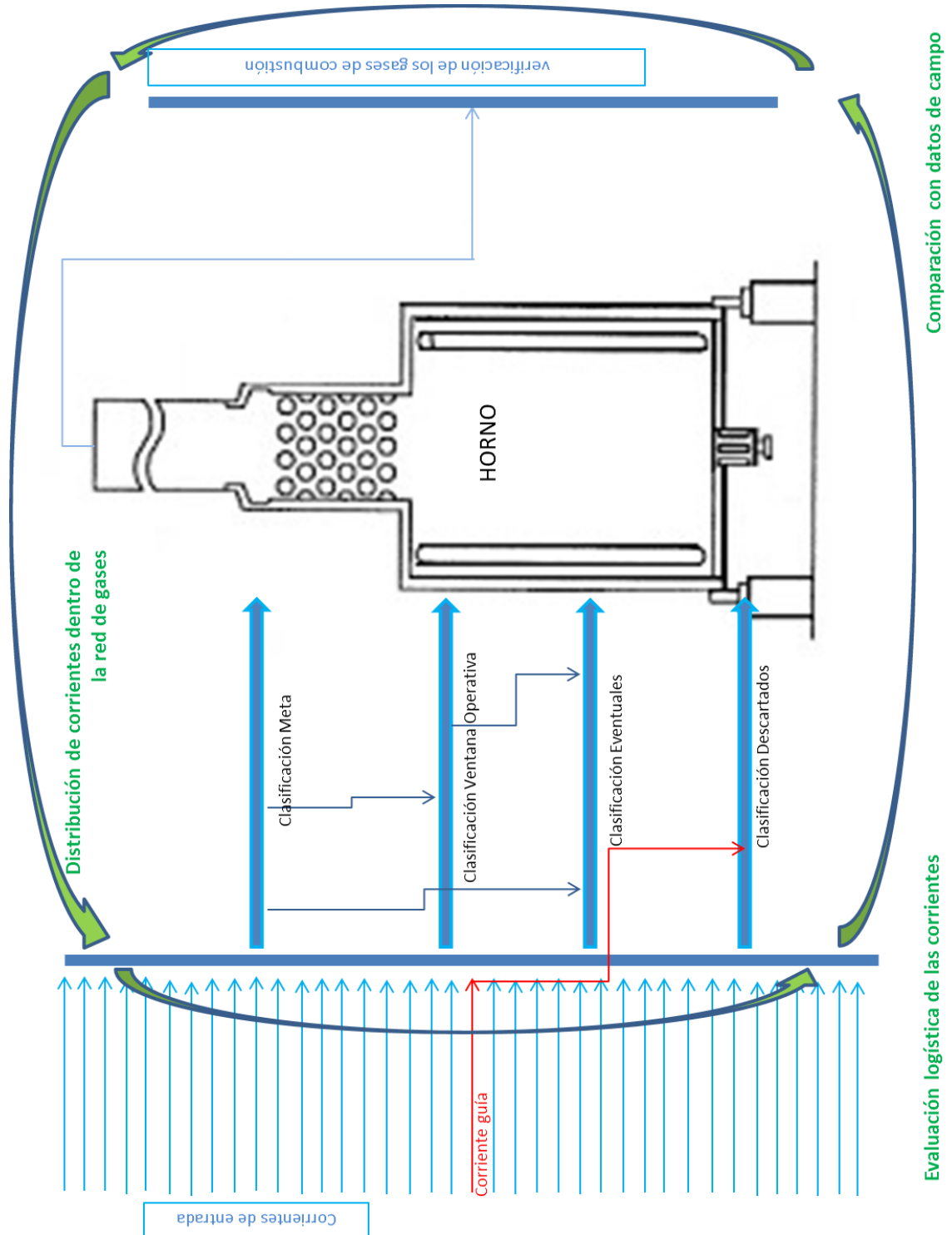
Para el caso de estudio se procedió a distribuir las corrientes de tal manera que las que se encuentran en la clasificación meta, así como sus mezclas, pueden ser quemadas de forma directa. Así mismo las corrientes clasificadas como ventana operativa pueden ser quemadas de forma directa, pero haciendo revisiones eventuales de su composición y de ser necesario ser mezcladas con una de las corrientes de clasificación meta. Pero para el caso de corrientes que no pueden ser quemadas directamente, como las clasificaciones de eventuales y descartados, se deben tomar mayores precauciones dependiendo cual sea la clasificación. Para corrientes eventuales es obligatorio realizar mezclas entre corrientes pertenecientes a la clasificación de meta y eventuales para poder ser quemadas.

En cuanto a la clasificación de descartados es necesario separar las corrientes y realizar una evaluación para definir si se debe aplicar un pre tratamiento, en caso extremo, o si al ser mezcladas con la corriente tipo, como el gas natural en este caso corriente 3, esta decisión recaería en el ingeniero que esté a cargo del proceso, así como la revisión constante con el fin de reconocer los cambios que se van dando en las corrientes y las implicaciones que esto tiene en el proceso. Pero con la aplicación del sistema integral de gestión se busca incluir a todos los actores del proceso para concientizarlos sobre los cuidados y el compromiso que deben tener en relación tanto al proceso como a los aspectos ambientales, energéticos y de seguridad implicados en el proceso. Cada persona tiene su lugar

dentro del proceso, los operarios son quienes deben realizar el control puntual de los cambios debidos a la implementación o ajuste del proceso; por su parte los directivos deben implementar campañas de concienciación sobre la importancia de la vigilancia, control y monitoreo de gases.

Es con base en lo anterior que se puede definir este diseño como un proceso situado en un ciclo de mejoramiento continuo, conocido como Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA); ya que se planifica la clasificación, se realiza la distribución, se verifican los resultados por medio de la evaluación con datos de campo y se actúa aplicando las correcciones necesarias al diseño; esto con el fin de realizar una mejora continua del diseño y su aplicación particular dentro de la industria evaluada. A continuación, figura 39, se presenta un gráfico que facilita la comprensión del concepto mencionado.

Figura 39 Representación gráfica del proceso análisis realizado basado el ciclo de mejoramiento conocida como Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA).



7. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que las mezclas óptimas se catalogan a partir de los beneficios en eficiencia energética, ambiental y de seguridad logrados al momento de quema para el caso de estudio, se pudo establecer que es posible implementar una distribución logística de las corrientes aportantes al proceso de combustión con base en determinada mezcla óptima que represente de la mejor manera las corrientes heterogéneas que lo conforman. Lo anterior, en busca de reconocer los beneficios individuales que cada corriente puede aportar al momento de quema y la forma en que estas corrientes heterogéneas pueden ser mezcladas para mantener un proceso de quema eficiente.

Entendiendo como un gas diferente cada una de las corrientes que forman parte del proceso de quema, se encontró que aunque solo se evaluaron 19 de los posibles compuestos que pueden hallarse en cada corriente, por medio de cromatografía, la mayoría de las corrientes resultaron ser tipos diferentes de gases combustibles con resultados variados para cada parámetro. En cuanto a la variabilidad de la intercambiabilidad de los gases, se concluye que ésta se maneja de tal manera que puede ser diseñado un procedimiento práctico, integral y singular obteniéndose un rango de eficiencia energética constante lo cual demuestra la importancia de integrar los diversos factores propios de la industria del refino.

Es posible obtener una función objetivo o, como para el caso de estudio, un rango óptimo, (Índice de wobbe entre 11000 – 13000 [KWh/m³], segunda familia, número de metanos 75 – 95, y emisiones de CO₂ a la atmósfera entre 0- 2,5 [kg]), donde el tipo de función o rango óptimo que se obtiene, se encuentra ligado directamente

a la relación que se localice entre las corrientes heterogéneas y los parámetros aplicados.



8. RECOMENDACIONES

Es viable aplicar la lógica difusa para trabajar con funciones de membresía, por ejemplo para definir los problemas principales, así como facilitar la asociación entre el modelo y la logística por medio del uso de expresiones lingüísticas asociadas a formalismos matemáticos. De esta forma se mejora la elección de manera computacional y lógica de los parámetros a aplicar.

Finalmente se recomienda investigar diferentes tipos de programas de combustión, o en su defecto toolbox de combustión, que trabajen con una mayor cantidad de compuestos para poder realizar un análisis del proceso de combustión más profundo.

9. DIVULGACIÓN DE RESULTADOS (Publicaciones y eventos)

Publicaciones

“Optimización de la combustión utilizando como criterios de evaluación el índice de wobbe y el número de metano”. M. Gómez, J. Saavedra, V. Kafarov. Revista: Revista ITECKNE. Volumen: 11 No 1. ISSN 1692 - 1798 (Impreso) ISSN 2339-3483 (Web-Online), Categoría: B. Fecha de publicación: Enero de 2015

<http://www.ustabuca.edu.co/ustabmanga/revista-iteckne>

“Combustion optimization using methane number and wobbe index as evaluation criteria”. J. Saavedra, L. Meriño, M. Gómez, V. Kafarov. Evento: PRESS 2014 Conference Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction 23–27 August 2014. Prague, Czech Republic. <http://www.conferencepres.com/>. Revista asociada al evento: CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. ISSN 19749791. Fecha de publicación: 2014.

<http://www.aidic.it/cet/14/39/206.pdf>

Eventos científicos

“Aplicación del concepto de red de gases combustibles para la adecuación de gases combustibles provenientes de procesos termoquímicos en biorefinerías”. J. Saavedra, L. Meriño, M. Gómez, V. Kafarov. Evento: CIBSCOL. Congreso internacional de ciencia y tecnología de los biocombustibles. Cartagena 19–21 Marzo 2014

<http://www.cides-uis.com/cibscol/>

“effect of the variability of the composition of the fuel gas on the methane number at furnaces at refinery”. J. Saavedra, L. Meriño, M. Gómez, V. Kafarov. Evento: PRESS 2014 9th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. September 20 - 27, 2014, Venice-Istanbul

<http://www.mediterranean2014.sdewes.org/>

BIBLIOGRAFÍA

A.P.I. “*Compendium of greenhouse gas emissions methodologies for the oil and natural gas industry*”. American Petroleum Institute. August 2009.

Abrell, J. Weigt, H. “*Combining energy Networks*”. Networks & Spatial Economics 2012. 12 p 377-401.

ACEVEDO, C. “*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*”. Universidad de Antioquia. Departamento de Mecánica. Medellín.2003, p 7-15

Ahmad, I., Hussain, S. “*Prospects of natural gas pipeline infrastructure in hydrogen transportation*” International Journal of Energy Research. 2012. 36 p 1338-1345.

Amell, A., et al. “*Tecnología de la Combustion de Gases y Quemadores Atmosfericos de Premezcla*”. Medellin, Universidad de Antioquia. 1996. 3 p1.

Appendix A: Proposed Regulation Order Amendments to Sections 2290, 2291, 2292.5 and 2292.6, Title 13, California Code of Regulations, Regarding the Compressed Natural Gas and Liquefied Petroleum Gas Specifications in the Alternative Fuels for Motor Vehicle Regulations; Air Resources Board, California Environmental Protection Agency: Sacramento, CA, 2002; available at <http://www.arb.ca.gov/regact/cng-lpg/appa.pdf> (Accessed January 11, 2011).

Bland, R. “*changes in Natural Gas Composition and its Effect on Low-Emission Combustors*”. Electric Light & Power. 2009. p.50-51.

Chen, C., Liaw, H., Wang, T. Lin, C. “*Carbon dioxide dilution effect on flammability*

limits for hydrocarbons". Journal of Hazardous Materials. 2009. 163 p 795-803.

Clodic, D. Jabbour, T. "*Method of test for burning Velocity measurement of flammable gases and results*" HVAC&R Research 2011. 17 (1) p 51-75.

Combustion toolbox. MATLAB 7.0.1 (R14SP1). Matlab Central
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26492-combustion-toolbox>

Cortes, J. Hernandez, J. "*Validación de la intercambiabilidad de gases en el contexto colombiano: Calentadores Instantáneos de agua*". Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniera. Medellín 2003, p 99-102

Dean, A., Penyazkov, O., Sevruck, K., Varatharajan, B. "Autoignition of surrogate fuels at elevated temperatures and pressures". Proceedings of the Combustion Institute 31. 2007, p 2481–2488.

Delbourg., P. L'interchangeabilité des combustibles gazeux. Annales de Mines. p. 49. (1969).

Elliot, F., Kurz, R., Etheridge, C., O'Connell, J. "Fuel System Suitability Considerations for Industrial Gas Turbines". J. Eng. Gas Turbines Power 2004. 126 p 119–126.

Faruque, M. Karimi, I. Matthew, C. "Preliminary Synthesis of Fuel Gas Networks to Conserve Energy and Preserve the environment". Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011. 50(12) p 7414-7427.

Friedl, H., Mirkov, R. Steinkamp, A. "*Modelling and Forecasting Gas Flow on Exits of Gas Transmission Networks*" International Statistical Review 2012. 80 (1) p 24-39.

Fygueroa-Salgado, S.J., Serrano-Rico, J.C., Molina-Mojica, J.R. “*Metodo para determinar las propiedades termodinámicas de mezclas combustibles considerando doce especies químicas en los productos*”. Ingeniería y Universidad. 2012. 16(1): p.61-75.

Gas Turbine Fuels; Standard ASME B133.7; ASME International: New York, 1992
Gessa, A., Rabadán, I., Jurado, A. “*la planificación de la producción industrial y las emisiones de CO2. Implicaciones del Protocolo de Kyoto*”. DYNA – Ingeniería e Industria 2009. 84 (2) p 117-126.

GIE. “*GIE Position Paper on impact of including Methane Number in the European Standard for Natural Gas*”.Ref.: 12GIE127. 2012

Hansen, T. “*Meeting Gas Quality Challenges*”. Power Engineering. 2008. P. 46-56.
Jagannath A., Faruque M., Al-Fadhli, M., Karimi I. Allen D.” *Minimize Flaring through Integration with Fuel Gas Networks*”. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011. 51(39), 12630-12641.

Kondo, S., Takizawa, K., Takahashi, A., Tokuhashi, K. “*On the temperature dependence of flammability limits of gases*”. Journal of Hazardous Materials. 2011. 187 p 585-590.

Larson, D., Scott, M. “*The Combustion Interchangeability Of Natural And Substitute Gases*”.Institute of Gas Technology, Chicago, Illinois.Society of Petroleum Engineers of AIME. 1973.

Leino, A., Kurvinen, K. “*Interchangeability of blood gas, electrolyte and metabolite results measured with point-of-care, blood gas and core laboratory analyzers*”. Clinical Chemistry & Laboratory Medicine.2011. 49(7). P 1187 – 1191.

Li, Z. Guo, K., Huangfu, L., Gao, W., Xu, W. "Study on natural gas interchangeability discriminant method". *Chemical engineering of Oil & Gas/ shi You Yu* . 2013. 42(6). P 642 – 646.

Lindberg, A., Hansson, S., Rollenhagen, C. "*Learning from accidents – What more do we need to know?*". *Safety Science* 2010. 48 p 714-721.

Liu, J., Chen, Q., Lang, X., Wang, Y., Fan, S. "*Analysis on the development prospect of natural gas utilization in Shenzhen*". *Journal of Low-Carbon Technologies*. 2012. 7.p 264 – 270.

Liu, K., Alexander, V., Sanderson, V., Bulat, G. "*Extension of Fuel Flexibility in the Siemens Dry Low Emissions SGT-300-1S to Cover a Wobbe Index Range of 15 to 49 MJ/Sm³*". *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 2013. 135 p 024502-1 - 024502-5.

Liu, P. Qin, C. Yang, X. "*Test method study of natural gas interchangeability for industrial gas burners*". *Chemical engineering of Oil & Gas/ shi You Yu*. 2013. 42(5). p 487 – 491.

Lukic, D., Littlejohn, A., Margaryan, A. "*A framework for learning from incidents in the workplace*". *Safety Science*. 2012.p 950–957

Mac Knight, V., Frickmann, C. "*Cost-benefit analysis of fuel substitution from diesel to natural gas in urban buses in Sao Paulo Metropolitan Region*". *Revista de Economía Mackenzie*. 7 (3) p 24-36.

Malenshek, M., Olsen, D. "*Methane number testing of alternative gaseous fuels*". *Fuel* 2009. 88 p 650–656.

Meloni, V., Morales, M. *“Proposição de metodologia para a analise da expansão da rede de gas natural nas cidades brasileiras usando indicadores urbanos”*. RAI – Revista de Administração e Inovação 2013. 10 (2) p 102-122.

MESA, C. “Análisis de la eficiencia de la combustión de gas de refinería en hornos industriales tipo cabina, mediante el estudio de su comportamiento real”. Universidad Industrial de Santander, Tesis de Grado, 2002.

Montaña, D. *“Determinación de las propiedades de combustión e identificación de problemas de intercambiabilidad de las mezclas de gas natural con otros combustibles de refinería”*. Tesis de maestría en ingeniería química. Universidad Industrial de Santander. 2011.

Muller, C. Craig, I. Ricker, N. *“Modelling validation, and control of an industrial fuel gas blending system”*. Journal of Process Control 2011. 21(6), p 852-860.
Natural Gas Regulation. “Report of the natural gas regulation & Compliance committee”. Energy Law Journal. 2009. 30(639). P 639-712

NTC-ISO 14001:2004. Sistemas de Gestión Ambiental. Requisitos con Orientación para su uso.

NTC-ISO 50001:2011. Sistema de gestión de la Energía. Requisitos con Orientación para su uso.

NTC-OHSAS 18001:2007. Sistemas de Gestión en seguridad y salud ocupacional. Requisitos con Orientación para su uso.

Ricker, N., Muller, C. Craig, I. *“Fuel gas blending benchmark for economic performance evaluation of advanced control and state estimation”*. Journal of

Process Control 2012. 22 p 968-974.

Romano, S., Cozzi, M., Di Napoli, F., Viccaro, M. *“Building Agro-Energy Supply Chains in the Basilicata Region: Technical and Economic Evaluation of Interchangeability between Fossil and Renewable Energy Sources”*. Energies journal. 6 p 5259-5282.

S. Bajpai, J.P. Gupta. Site security for chemical process industries. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 18 (2005) 301–309

Saavedra J., Meriño, L. Gómez M. Kafarov, V. *“Optimización de la combustión utilizando como criterios de evaluación el índice de Wobbe y el número de metano”*. Revista innovación e investigación en ingeniería ITECKNE 2014. Volumen 11. p 76-83.

Saavedra, J., Barrios, W., Barreto, F. *“Informe del monitoreo de gases de combustión en calderas de refinería de Cartagena y actualización de los valores de exceso de Oxígeno Vs CO existentes para las calderas SG-103/104 y 1005. Servicio de laboratorio y Plantas Piloto. Laboratorio de Plantas Piloto. 2012.*

Saavedra, J., Meriño, L., Montaña, D., Kafarov, V. *“Análisis de mezclas combustibles producidas en procesos de refinación. V simposio internacional de Biofabricas”*. I congreso Internacional de Flujos Reactivos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.2011.

Sanaye, S., Mahnoudimehr, J. *“Optimal design of a natural gas transmission network layout”* Chemical engineering Research and Design 2013. 91 p 2465-2476.

Specification for Fuel Gases for Combustion in Heavy-Duty Gas. Turbines; Report GEI 41040j; GE Energy: Atlanta, GA, 2007.

Tubb, R. *“LDCs Continue To Upgrade The Nation’s Gas Distribution Network”*. Pipeline & Gas Journal, december 2013 p 24-26.

U.S E.P.A. Technical Report Series, Chapter 2: Preferred and Alternative Methods for estimating Air emissions from boilers. United States Environmental Protection Agency (U.S E.P.A.). Emission Inventory Improvement Program (E.I.I.P.). Volume II. Jan 2001.}

UNE 60 002:1995 Clasificación de los combustibles gaseosos en familias. Orientación para su uso.

UNE-EN ISO 6976:2005 Gas natural. Cálculo del poder calorífico, densidad, densidad relativa e índice de Wobbe a partir de la composición

US E.P.A. Emission Estimation Protocol for Petroleum Refineries. United States Environmental Protection Agency (U.S E.P.A.). Version 2.1.1 May 2011

Vantuono, W. *“ A Closer Look at LNG”*. Railway Age. 2013. p 14-17

Wang, Q. Liu, W., Zhong, X., Yang, J., Yuan, Q. *“Development and application of equipment maintenance and safety integrity management system”*. Journal of Loss prevention in the process Industries 2011. 24 p 321- 332.

Yin., Y., Qin, C., Dai, W. *“Estudio experimental de la ley de discriminación de intercambio típico en el hogar, idoneidad del gas”*. Chemical Engineering of oil & gas/ Shi You. 2012. p 48 – 52



Zhang, Q., Li, Z., Luo, Q., Zhou, L. “*Research and development of China’s natural gas interchangeability identification software*”. Chemical engineering of Oil & Gas/ shi You Yu. 2013. 42(4). P 365 – 368.

Zhang, Y. Qin, C, Liu, P. “*Gas Natural y GLP intercambiabilidad temperaturas en China, cuestiones a discutir*”. Chemical engineering of Oil & Gas/ shi You Yu Tian Ran Qi hua Gong. 2013. 42(2). P 219 – 222.

Zhang, Y., Qin, C., Xiao L. “*Applicability of AGA and Weaver indices for natural gas interchangeability in China*”. Chemical engineering of Oil & Gas/ shi You Yu Tian Ran Qi hua Gong. 2013. 42(1). P 31 – 35.

Zlochower, -I. “Experimental flammability limits and associated theoretical flame temperatures as a tool for predicting the temperature dependence of these limits”. Journal of Loss prevention in the process Industries 2012. 25 p 555- 560.

ANEXOS

ANEXO A Herramienta software para el diseño de la logística de una red de gases combustibles asociada a un proceso de quema en la industria del refino (Guía para su uso)



DISEÑO DE LA LOGÍSTICA PARA EL APROVECHAMIENTO ÓPTIMO DE LOS GASES DE REFINERÍA TENIENDO EN CUENTA ASPECTOS ENERGÉTICOS, AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD

MANUAL DE USUARIO

Herramienta Software Para El Diseño De La Logística De Una Red De Gases Combustibles
Asociada A Un Proceso De Quema En La Industria Refino



CONTENIDO

Lista De Gráficos	116
1. OBJETIVO Y DOCUMENTACIÓN. PRESENTACIÓN DE TESIS, TRABAJOS DE GRADO Y OTROS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN	117
2. INTRODUCCIÓN	117
3. INSTALACIÓN	117
4. INICIO DEL PROGRAMA	118
4.1 Ingreso Programa	118
4.2 Pantalla Acceso E Inicial Programa.	119
5. ENTORNO DEL PROGRAMA	120

LISTA DE GRÁFICOS

Grafico 1 Archivo setup.exe	117
Grafico 2 Ventana Instalación	117
Grafico 3 Desinstalar Programa	118
Grafico 4 Ingreso Programa	119
Grafico 5 Pantalla Acceso	120
Grafico 6 Pantalla Inicial	120
Grafico 7 Pantalla Carga Inicial	121
Grafico 8 Pantalla Parametrización	121
Grafico 9 Pantalla Comparación	122
Grafico 10 Pantalla Combustión	123
Grafico 11 Pantalla Logística	124

OBJETIVO

Brindar al usuario las instrucciones necesarias para la instalación y servir de guía para el uso de cada uno de los pasos que se realizan dentro la herramienta software.

INTRODUCCIÓN

El programa de proyecto de gases fue diseñado con la finalidad de crear la logística para el aprovechamiento óptimo de los gases de refinería, dentro de un proceso de quema determinado.

INSTALACIÓN

Para instalar la herramienta software, en el equipo elegido, solo es necesario ingresar a la carpeta de instalación y ejecutar el archivo setup.exe.

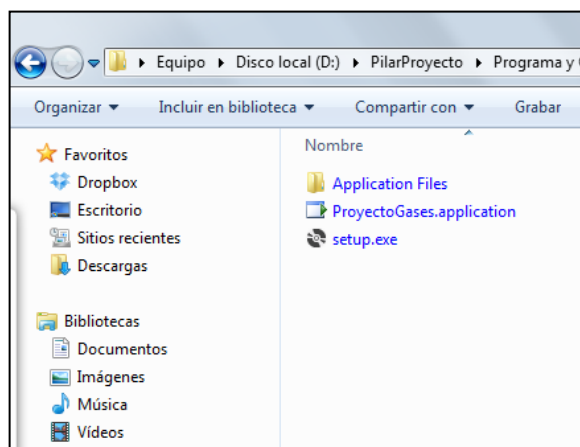


Grafico 1 Archivo setup.exe

Deberá esperar unos segundos para que el programa de instalación se inicialice.

Una vez iniciado el programa de instalación, este presentará un cuadro de diálogo como el siguiente:

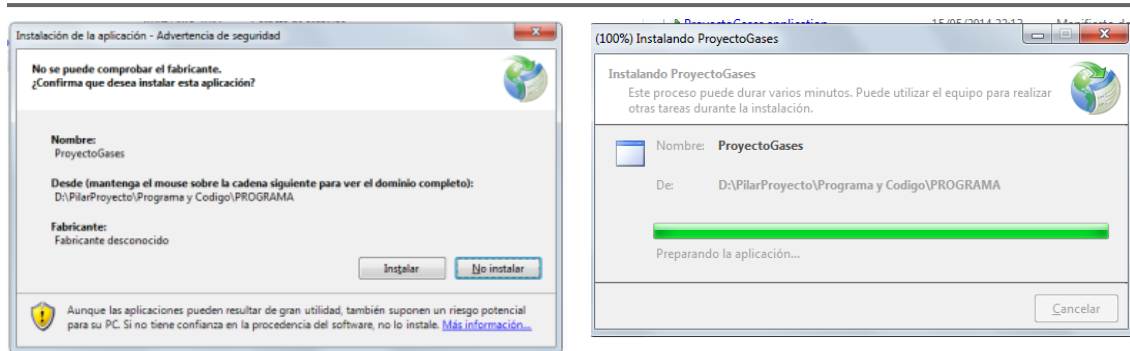


Grafico 2 Ventana Instalación

Al dar click en la opción “Instalar”, la herramienta quedara instalada en el equipo.

Para desinstalar el software es necesario ir al panel de control, seleccionar programas y características, buscar el nombre de la herramienta software (para el caso “ProyectoGases”) y finalmente dar click en desinstalar y seleccionar “Quitar la aplicación del equipo”.

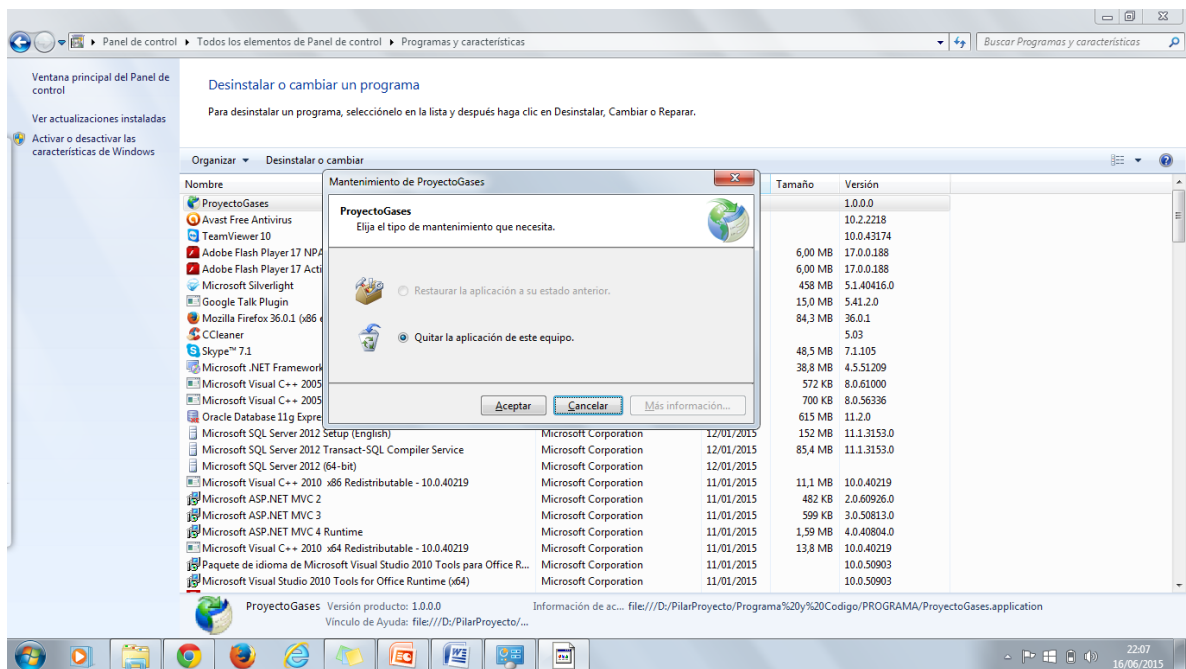
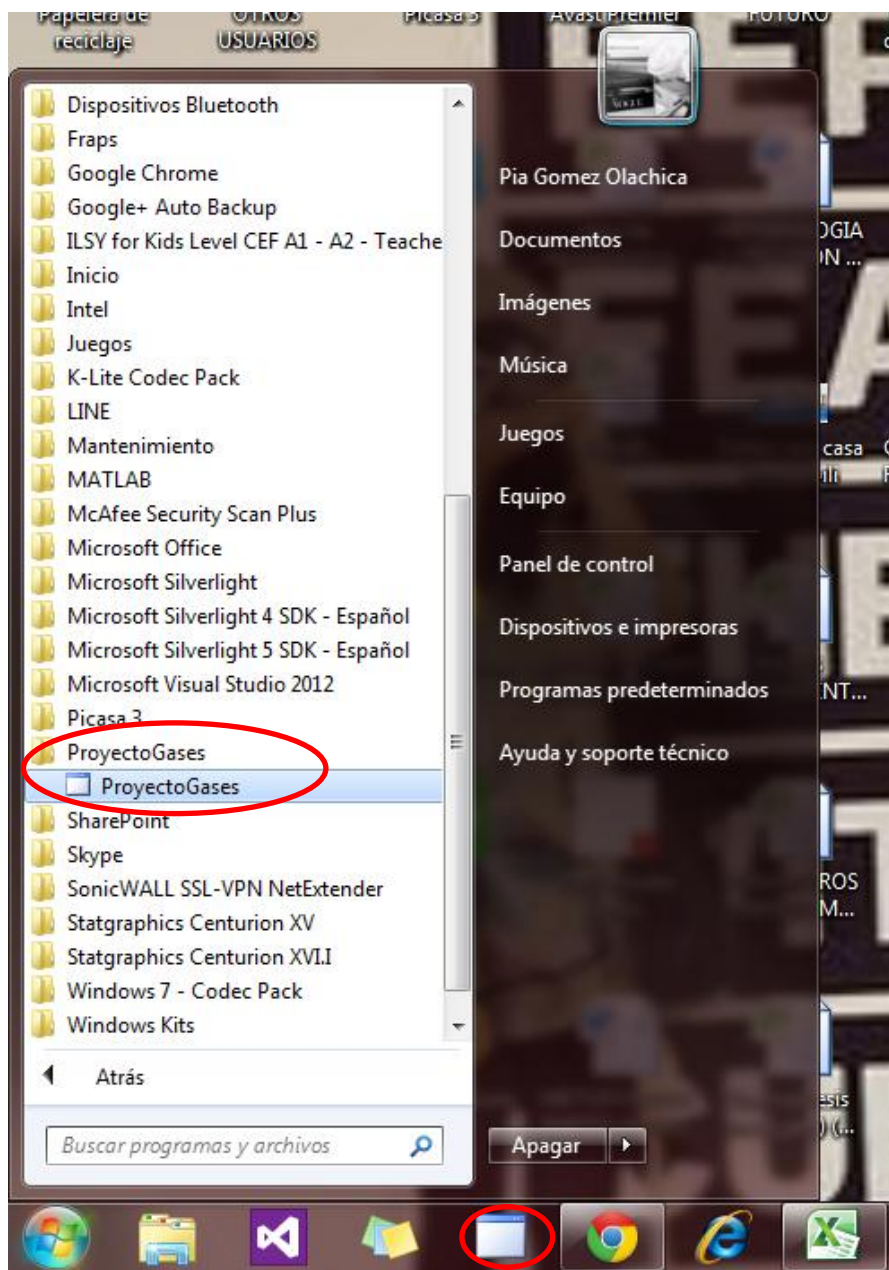


Grafico 3 Desinstalar Programa

INICIO DEL PROGRAMA

Ingreso Programa

El ingreso se puede realizar de dos formas, la primera mediante la ruta de inicio, todos los programas, proyecto gases y la segunda forma por medio del acceso directo ubicado en la barra de tareas tal como se aprecia en la imagen a continuación:



Acceso Directo

Grafico 4 Ingreso Programa

Pantalla Acceso E Inicial Programa.

La pantalla de acceso y la pantalla inicial al programa se presentan a continuación. En la de acceso se aprecian los logos correspondientes a la universidad industrial de Santander y del grupo de investigación, de igual forma se tiene un botón de ingreso, el cual permite acceder a la pantalla inicial.



Grafico 5 Pantalla Acceso

La pantalla inicial permite la interacción con el programa y en ella se aprecia la estructura de ventanas descrita con anterioridad, al igual que la barra de herramientas asociada al programa desarrollado.

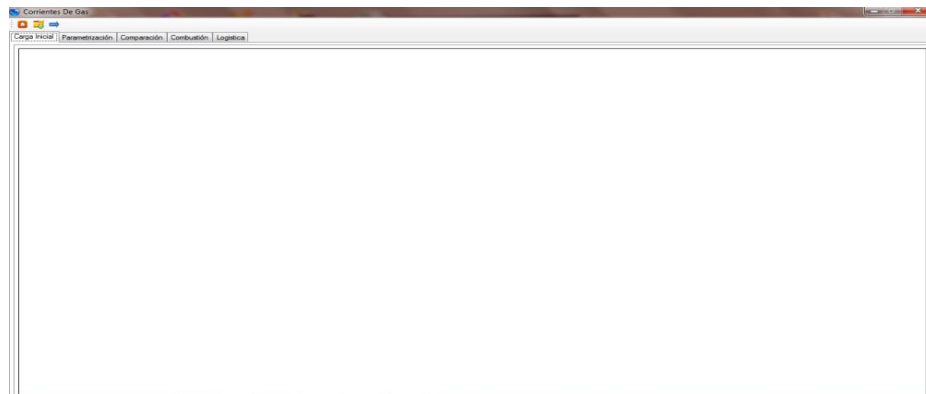


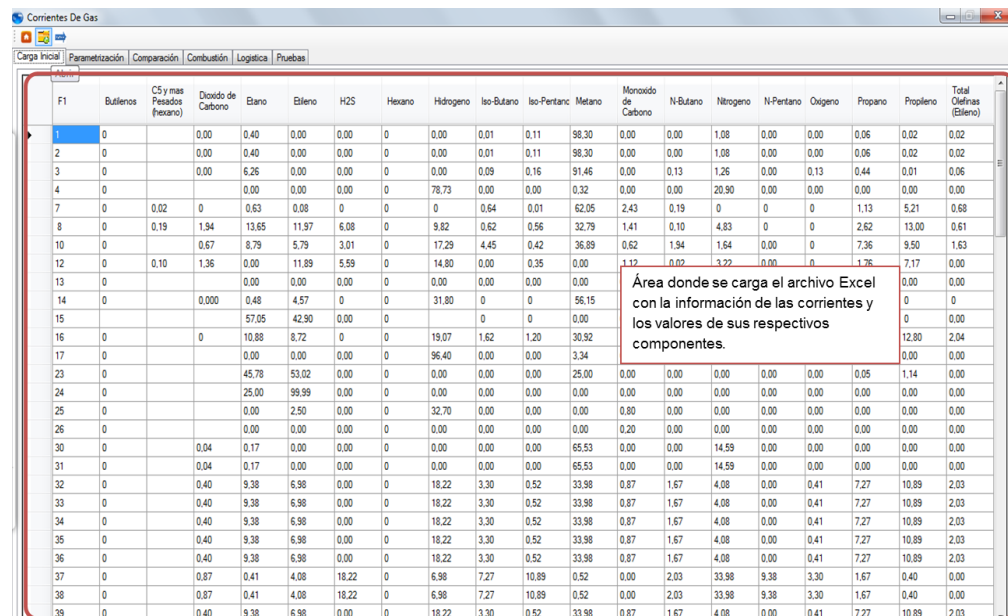
Grafico 6 Pantalla Inicial

ENTORNO DEL PROGRAMA

En este capítulo se presenta una guía básica de los componentes del programa, acompañada del análisis del caso de estudio al aplicar la metodología propuesta en el apartado anterior.

Cada una de las ventanas tiene un nombre diferente para guiar al usuario durante el proceso. Las ventanas se denominan de la siguiente manera:

Carga Inicial: Carga desde Excel el archivo con los datos necesarios por corriente, para la evaluación de los tres parámetros escogidos. Las filas corresponden a las corrientes a evaluar y las columnas a sus respectivos componentes.



F1	Butenos	C5 y mas Pesados (Hexano)	Dicido de Carbono	Etano	Etileno	H2S	Hexano	Hidrogeno	Iso-Butano	Iso-Pentano	Metano	Monoxido de Carbono	N-Butano	Nitrogeno	N-Pentano	Oxigeno	Propano	Propileno	Total Olefinas (Etileno)
1	0		0.00	0.40	0.00	0.00	0	0.00	0.01	0.11	98.30	0.00	0.00	1.08	0.00	0.00	0.06	0.02	0.02
2	0		0.00	0.40	0.00	0.00	0	0.00	0.01	0.11	98.30	0.00	0.00	1.08	0.00	0.00	0.06	0.02	0.02
3	0		0.00	6.26	0.00	0.00	0	0.00	0.09	0.16	91.46	0.00	0.13	1.26	0.00	0.13	0.44	0.01	0.06
4	0			0.00	0.00	0.00	0	78.73	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	20.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0	0.02	0	0.63	0.08	0	0	0	0.64	0.01	62.05	2.43	0.19	0	0	0	1.13	5.21	0.68
8	0	0.19	1.94	13.65	11.97	6.08	0	9.82	0.62	0.56	32.79	1.41	0.10	4.83	0	0	2.62	13.00	0.61
10	0	0.67	8.79	5.79	3.01	0	17.29	4.45	0.42	36.89	0.62	1.94	1.64	0.00	0	7.36	9.50	1.63	
12	0	0.10	1.36	0.00	11.89	5.59	0	14.80	0.00	0.35	0.00	1.12	0.02	3.22	0.00	0	1.26	7.17	0.00
13	0			0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0		0.000	0.48	4.57	0	0	31.80	0	0	56.15	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0			57.05	42.90	0.00	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0		0	10.88	8.72	0	0	19.07	1.62	1.20	30.92	0	0	0	0	0	0	12.80	2.04
17	0			0.00	0.00	0.00	0	96.40	0.00	0.00	3.34	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
23	0			45.78	53.02	0.00	0	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	1.14	0.00
24	0			25.00	99.99	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0			0.00	2.50	0.00	0	32.70	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0			0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0		0.04	0.17	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	65.53	0.00	0.00	14.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
31	0		0.04	0.17	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	65.53	0.00	0.00	14.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0		0.40	9.38	6.98	0.00	0	18.22	3.30	0.52	33.98	0.87	1.67	4.08	0.00	0.41	7.27	10.89	2.03
33	0		0.40	9.38	6.98	0.00	0	18.22	3.30	0.52	33.98	0.87	1.67	4.08	0.00	0.41	7.27	10.89	2.03
34	0		0.40	9.38	6.98	0.00	0	18.22	3.30	0.52	33.98	0.87	1.67	4.08	0.00	0.41	7.27	10.89	2.03
35	0		0.40	9.38	6.98	0.00	0	18.22	3.30	0.52	33.98	0.87	1.67	4.08	0.00	0.41	7.27	10.89	2.03
36	0		0.40	9.38	6.98	0.00	0	18.22	3.30	0.52	33.98	0.87	1.67	4.08	0.00	0.41	7.27	10.89	2.03
37	0		0.87	0.41	4.08	18.22	0	6.98	7.27	10.89	0.52	0.00	2.03	33.98	9.38	3.30	1.67	0.40	0.00
38	0		0.87	0.41	4.08	18.22	0	6.98	7.27	10.89	0.52	0.00	2.03	33.98	9.38	3.30	1.67	0.40	0.00
39	0		0.40	9.38	6.98	0.00	0	18.22	3.30	0.52	33.98	0.87	1.67	4.08	0.00	0.41	7.27	10.89	2.03

Grafico 7 Pantalla Carga Inicial

Parametrización: Se evalúa cada una de las corrientes en los tres parámetros y se extraen las corrientes que cumplen con el rango seleccionado. En los casos del parámetro de seguridad y energético se ingresa un rango compuesto de un valor mínimo y máximo, con los cuales se ejecuta el proceso de cálculo de las ecuaciones asociadas. Para el parámetro ambiental es requerido incluir un valor para el flujo de gas combustible adicional al rango.

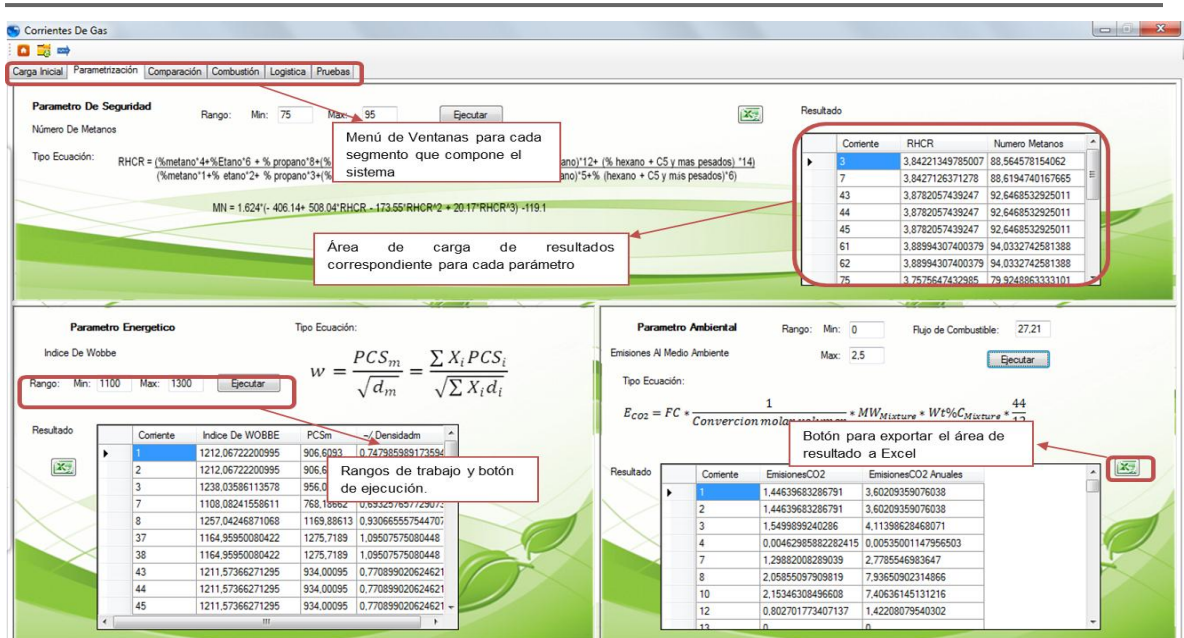


Grafico 8 Pantalla Parametrización

Comparación: Análisis y elección de las mezclas tipo, por medio de la comparación de los resultados de cada una de las corrientes al ser evaluada por los tres parámetros y por la corriente guía.

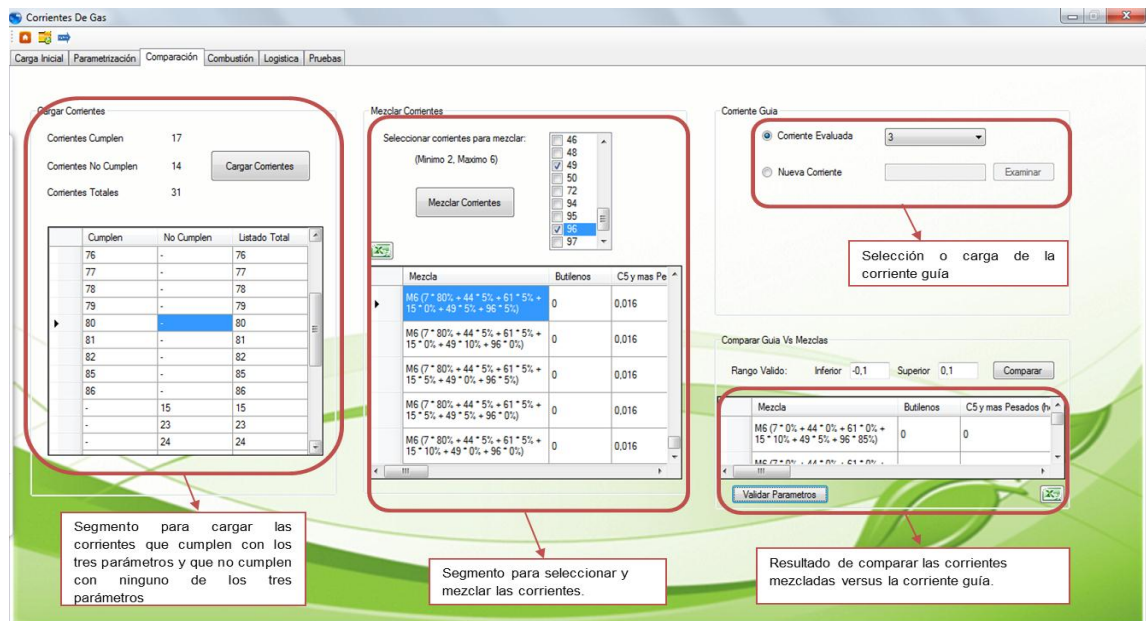


Grafico 9 Pantalla Comparación

Combustión: Toma las mezclas obtenidas en el paso anterior, aplica a cada una de las mezclas los tres parámetros con los rangos definidos en un principio y elige las corrientes que estén dentro de estos rangos predefinidos. Pide los datos de campo del porcentaje de CO₂ y de CO en partes por millón de tal manera que al aplicar la combustión solo aparecerán las mezclas o corrientes nuevas que cumplan con estos rangos de campo.

The screenshot shows the 'Corrientes De Gas' software interface with several key sections:

- Mezclas Óptimas:** A table listing optimal mixtures with their compositions and associated parameters.
- Rangos de Campo:** A section for defining field ranges for CO₂ (8.43 to 9.32) and CO ppm (0 to 40).
- Parámetros de Combustión Por Defecto:** Default combustion parameters such as FUEL volume (1.0), AIR volume (9.0), FUEL temperature (293.15), AIR temperature (373.15), ETAP (75.0), FI (60.0), and AIR pressure (101325.0).
- Combustión Mezclas de Corrientes:** A table showing the results of combustion for various mixtures, including columns for Mezcla, Volumen WG, TAD, TRE, Butlenos, C5 y mas Pesados (hexano), and Dioxido de Carbono.

Annotations in the image highlight the 'Rangos reales para filtrar los resultados de combustión' and the 'Area de resultados de la combustión de las mezclas optimas elegidas'.

Grafico 10 Pantalla Combustión

Logística: se realiza la evaluación de las corrientes al compararlas con la mezcla óptima obtenida en el paso anterior y se organizan las corrientes de tal manera que se tiene una distribución general de las corrientes que pueden ser quemadas individualmente o mezcladas entre ellas manteniendo los tres parámetros en un rango constante y eficiente. A su vez, determina cuales son las corrientes que deben pasar por un pre-tratamiento antes de unirse al proceso de quema.

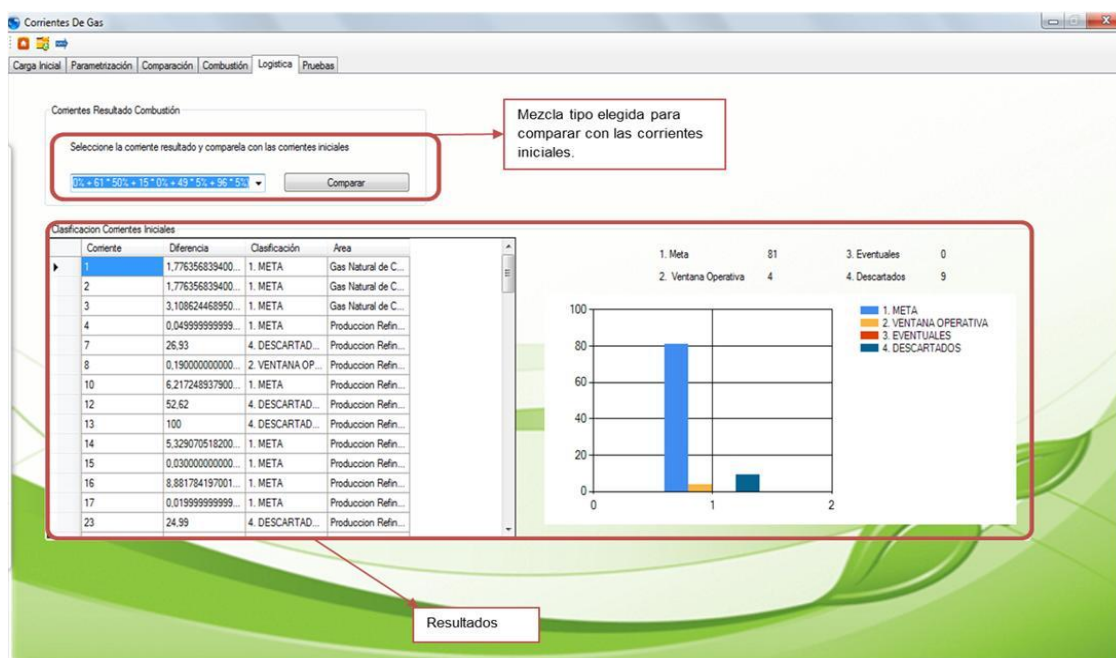


Grafico 11 Pantalla Logística