

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE COMBUSTIÓN E  
IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS DE INTERCAMBIABILIDAD DE LAS  
MEZCLAS DE GAS NATURAL CON OTROS COMBUSTIBLES DE REFINERÍA.**

**DANIEL DARIO MONTAÑA HERRERA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2011**

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE COMBUSTIÓN E  
IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS DE INTERCAMBIABILIDAD DE LAS  
MEZCLAS DE GAS NATURAL CON OTROS COMBUSTIBLES DE REFINERÍA.**

**DANIEL DARIO MONTAÑA HERRERA**

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

Magister en Ingeniería Química

**Director:**

**Dr. DIONISIO LAVERDE CATAÑO**

**CoDirector:**

**Ing. M. Sc JAQUELINE SAAVEDRA RUEDA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2011**

## **DEDICATORIA**

A la memoria de mi padre.

A mi familia.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Mario Mejía, por su constante motivación.

A Jaqueline Saavedra, por su apoyo incondicional, su gran amistad, sus sugerencias, consejos y aportes.

Al Profesor Dionisio Laverde, por darme la oportunidad y confiar en mí, por su asesoría y guía del trabajo.

A Lourdes Meriño, por su colaboración para terminar este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
2. ESTADO DEL ARTE.....	19
2.1. ESTUDIOS DE INTERCAMBIABILIDAD .....	19
2.2. PROBLEMAS ENCONTRADOS EN LA COMBUSTIÓN POR LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES. ....	24
2.2.1. <i>MODOS DE FALLA DE LA COMBUSTION</i> .....	25
2.3. METODOS PARA HALLAR LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES. [8, 13] 34	
2.3.1. <i>MÉTODOS DE INDICES SIMPLES</i> .....	35
2.3.2. <i>MÉTODOS DE INDICES COMPUESTOS</i> .....	38
2.3.3. <i>MÉTODO GRAFICO.</i> .....	42
2.3.4. <i>OTROS METODOS.</i> .....	45
3. FUNDAMENTOS .....	47
3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS.....	47
3.2. PROPIEDADES DEL GAS COMBUSTIBLE .....	51
3.3. INTERCAMBIABILIDAD DE GASES. ....	52
4. OBJETIVOS.....	55
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	55
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	55
5. METODOLOGÍA .....	56
6. RESULTADOS.....	62
6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO. ....	62
6.2 SIMULACION DEL CASO BASE Y DE LOS ESQUEMAS DE OPERACIÓN.....	63
6.3. VALIDACION DE LOS CASOS SIMULADOS CON DATOS DE LABORATORIO. ....	70
6.4. EVALUACION DE LOS EFECTOS QUE GENERA LA VARIACION DEL INDICE DE WOBBE. ....	74
6.4.1 <i>CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TERMICA Y DEL IMPACTO ECONÓMICO</i> .....	74
6.4.2 <i>EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL PODER CALORÍFICO EN LOS HORNOS.</i> .....	79
6.5. ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACION DEL CONSUMO DE GAS COMBUSTIBLE.....	80
6.5.1 <i>DISEÑO DE UN EQUIPO AMORTIGUADOR DE LOS DESVÍOS DE C3C3= Y C2C2= A GAS COMBUSTIBLE.</i> .....	80

6.5.2 SIMULACION DE LOS CASOS PROPUESTOS.....	84
6.6. BENEFICIOS DE LA IMPLEMENTACION .....	87
6.6.1 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA NETA.....	87
6.6.2. CÁLCULO DEL BENEFICIO ECONÓMICO.....	88
6.6.3. EVALUACION FINANCIERA DEL NUEVO TAMBOR.....	88
6.6.4 ESTABILIDAD DEL ÍNDICE DE WOBBE .....	89
7. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	92
BIBLIOGRAFÍA.....	94
ANEXOS.....	97

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pag.</b>
Figura No. 1 Imágenes de inspección de Horno de Viscosreducción II de GRB....	17
Figura No. 2 Representación gráfica de Delbourg [40]. .....	42
Figura No. 3 Metodología para realizar la simulación. ....	58
Figura No. 4. Metodología empleada. ....	61
Figura No. 5. Descripción del sistema de gas combustible de unidad de estudio .	62
Figura No. 6. Diagrama utilizado para la simulación de corrientes .....	63
Figura No. 7. Índice de Wobbe casos simulados. ....	70
Figura No. 8 Índice de Wobbe simulado y real. ....	72
Figura No. 9. Desviación índice de Wobbe de los datos de laboratorio.....	73
Figura No. 10 Herramienta Gaseq. ....	75
Figura No. 11. Relación temperatura pared de tubos vs poder calorífico del gas.	79
Figura No. 12. Diagrama de flujo caso 12 en Pro II .....	85
Figura No. 13. Índice de Wobbe casos simulados. ....	90
Figura No. 14 Composición de la mezcla de gases para los casos simulados. ....	91

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pag.</b>
Tabla No. 1. Parámetros empleados en el método de Delbourg .....	45
Tabla No. 2 Clasificación de combustibles gaseosos según el índice de Wobbe. .	48
Tabla No. 3. Condiciones de las corrientes de gas sometidas a simulación.....	64
Tabla No. 4 Composición de la corriente de Tratamiento con Amina .....	64
Tabla No. 5. Composición de la corriente Gas de Cima de la absorbidora de Etano Etileno.....	65
Tabla No. 6 Composición de la corriente Gas de Hidrógeno. ....	65
Tabla No. 7. Descripción de las corrientes simuladas. ....	69
Tabla No. 8 Propiedades del gas con base en datos de laboratorio.....	71
Tabla No. 9 Eficiencia casos simulados.....	77
Tabla No. 10. Flujos de las corrientes simuladas.....	79
Tabla No. 11. Información requerida para el diseño de tambor. ....	81
Tabla No. 12. Identificación de los niveles en un recipiente. ....	82
Tabla No. 13 Dimensiones del tambor acumulador. ....	84
Tabla No. 14. Resultados de simulaciones caso 12-15 .....	87
Tabla No. 15 Eficiencia Térmica casos propuestos. ....	88
Tabla No. 16. Evaluación financiera del tambor dosificador. ....	89

## RESUMEN

**TITULO:** Determinación de las propiedades de combustión e identificación de problemas de intercambiabilidad de las mezclas de gas natural con otros combustibles de refinería.\*

**AUTOR:** Daniel Darío Montaña Herrera\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Gas Combustible, Índice de Wobbe, Eficiencia térmica.

### **DESCRIPCIÓN:**

El presente proyecto analiza las propiedades de las mezclas combustibles y evalúa su impacto en la eficiencia y el beneficio económico que se presenta.

La identificación y caracterización fisicoquímica de las corrientes gaseosas se realizó extrayendo los datos de los sistemas de información de la refinería y analizando el flujo, propiedades y características de cada una de las corrientes de gas combustible. Con los datos obtenidos se construyeron los casos para la simulación de las mezclas, la cual se desarrolló utilizando la herramienta de simulación en estado estacionario Pro II ® de Simsci. Se establecieron los casos de desvíos máximos observados y sostenibles durante el periodo de estudio, de Propano Propileno, Etano Etileno e Hidrógeno. Como criterio de aproximación se tomó en cuenta el poder calorífico alto de la salida del tambor hacia los hornos y calderas, y la densidad relativa de la mezcla para calcular el índice de Wobbe.

A partir de los resultados de la simulación se calculó el beneficio económico de las modificaciones y recomendaciones planteadas, proponiendo la implementación de un tambor dosificador, se cotejó contra los beneficios que conlleva por extensión de la corrida de la unidad (tiempos entre cada parada para decoquizar) y por el incremento de la eficiencia térmica por la estabilización del índice de Wobbe.

La presente investigación facilitará la implementación de iniciativas de ahorro de energía y mejoramiento de la integridad de los equipos de combustión, basado en las características de las mezclas de gas de refinería, utilizadas como combustible por los hornos y calderas.

---

\*Proyecto de Grado

\*\*Facultad de Ingeniería Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química, Directores: Dionisio Laverde, Jaqueline Saavedra.

## ABSTRACT

**TITLE:** Interchangeability of mixtures of natural gas with others refinery fuels\*

**AUTHOR:** Daniel Darío Montaña Herrera\*\*

**KEYWORDS:** Fuel Gas, Wobbe Index, Thermal Efficiency.

**DESCRIPTION:**

This project examines the properties of refinery fuel alternatives of mixtures and assesses its impact on efficiency and economic benefit that comes along.

The physicochemical characterization of the refinery fuel gas streams was obtained by extracting data from the refinery data base information systems; and as the flow properties of each of the fuel gas streams. With the data obtained, a model was built to simulate the typical cases of mixtures. This model was developed using steady state SimSci Pro II ®. Established cases of change and sustainable peaks observed during the study period, Propane Propylene, Ethane Ethylene and Hydrogen. As a criterion of approximation were taken into account the high calorific output of the mixing drum to the furnaces and boilers, and the relative density of the mixture to calculate the Wobbe index.

From the simulation results of the profit was calculated with the changes and recommendations put forward by proposing the implementation of a mixing feeder drum, that was compared with profit of extending the run of the unit (time between each stop to decoking ) and the increase in thermal efficiency by stabilizing the Wobbe index.

This research will facilitate the implementation of energy saving initiatives and improving the integrity of the combustion equipment, based on the characteristics of the refinery gas mixtures, used as fuel for furnaces and boilers.

---

\*Graduate Project

\*\*Faculty of Physical-Chemical Engineering, School of Chemical Engineering. Directors: Dionisio Laverde, Jaqueline Saavedra.

## INTRODUCCION

El gas combustible es la principal fuente de energía utilizada por los hornos y calderas, para el calentamiento de corrientes de proceso, para la descomposición térmica de las corrientes intermedias, y para la generación de vapor, utilizado directamente en las plantas o en la generación de energía eléctrica en la industria, especialmente en la de refinación de petróleo y gas. El gas utilizado generalmente es una mezcla de gas natural y diversas corrientes de gas, que se generan en el proceso de refinación. Estas mezclas, generalmente no son homogéneas, por lo que generan perturbaciones que modifican el grado de conversión deseada y permiten la formación de coque en la superficie interna de los tubos de los hornos y calderas, afectando la eficiencia del equipo, la seguridad operacional, las emisiones de contaminantes, aumentando los costos de mantenimiento.

El presente proyecto pretende analizar y determinar las degradaciones de corrientes de refinería hacia el cabezal de gas combustible y evaluar su impacto en las mezclas.

En el primer capítulo, se planteará el problema de interés, realizando una descripción del caso de estudio y abordando los problemas operacionales como consecuencia del alineamiento de las corrientes de gases de alto poder calorífico hacia el cabezal de gas combustible. En el segundo capítulo se mencionará el estado del arte en Colombia y en el mundo, iniciando con los estudios realizados

en Norteamérica y Europa, y los estudios en Colombia sobre gas vehicular y doméstico, se tratarán los problemas que generan las mezclas de gases no intercambiables en la combustión, se abordarán los métodos existentes para hallar la intercambiabilidad. En el tercer capítulo se hace una referencia a los fundamentos y conceptos principales de la intercambiabilidad de gases: clasificación de los combustibles gaseosos, propiedades de los gases y el concepto de intercambiabilidad propiamente dicho. En el capítulo cuarto se enuncian el objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo. En el quinto capítulo se plasma la metodología a seguir, con una primera etapa de identificación y caracterización de las corrientes, en una segunda etapa de simulación de los casos de enriquecimiento del gas combustible de alimentación a los hornos y calderas con corrientes como el etano etileno y propano propileno, en la tercera etapa se proponen varios arreglos que se evaluarán técnica y económicamente. En el capítulo seis se presentan los resultados de las simulaciones, los diseños básicos requeridos para mejorar la homogeneización de las corrientes, las soluciones a las propuestas de mejoramiento y se comparan con los datos históricos de planta en donde se comprueban los efectos de los desvíos. Finalmente en el capítulo siete se sintetizan las conclusiones y se proponen las recomendaciones para posteriores trabajos.

---

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El gas combustible que proporciona energía a los hornos y calderas en la industria de refinación del petróleo, está conformado por gas natural y gas de refinería. Existen otras corrientes de muy alto, (Etanos, Propanos y Butanos), o muy bajo poder calorífico, (Hidrógeno, metano) derivadas del proceso de refinación que pueden intervenir en el sistema de gas combustible. La participación de estas últimas corrientes depende de varios factores:

- De la disponibilidad de gas natural.
- De la estabilidad operacional de las unidades de proceso que generan las corrientes.
- De la estabilidad operacional de las unidades de proceso que reciben las corrientes.

Cuando se realizan los desvíos de Etanos, Propanos, Butanos e Hidrógeno a la red de gas, se genera una contribución que conlleva a una fluctuación del poder calorífico de la mezcla. Las variaciones en el poder calorífico del gas combustible generan perturbaciones en la operación, modificando el grado de recuperación de productos valiosos o la conversión deseada, y permitiendo la rápida formación de coque, que se deposita en la superficie interna de los tubos de los hornos, provocando efectos indeseables como la reducción del diámetro interno de los

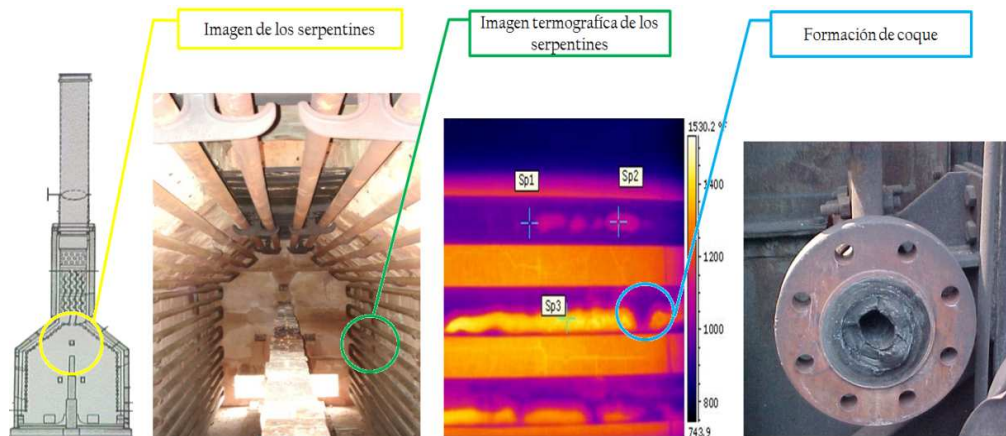
serpentines y la generación de una resistencia térmica adicional [1], ésta alteración favorece los fenómenos de oxidación en la parte externa de la tubería y la disminución del tiempo de corrida de las unidades en operación, siendo preciso realizar paradas de planta no programadas para decoquizar los tubos del horno, lo que contribuye a la disminución de la vida útil de la tubería.

Las fluctuaciones en las propiedades de las mezclas de gas combustible causan sobrecalentamientos ya sea por cargas con exceso o por defecto de energía, originando una distribución desigual en la transferencia de calor y turbulencias en la llama que producen el choque directo con los serpentines o el quemador, siendo estas las condiciones apropiadas para el desarrollo de depósitos internos de coque, ambientes severos a alta temperatura y deterioro mecánico, como se muestra en la figura 1, donde la deposición de coque en la superficie interna de los tubos del serpentín provoca una reducción irregular del diámetro interno de la tubería, generando una resistencia a la transferencia de calor que incrementa la temperatura del metal, afectando las propiedades mecánicas del material y la eficiencia en la operación del horno [1].

Por lo tanto, es preciso medir con la mejor precisión posible la cantidad de energía producto de la deflagración de las mezclas de gas, ya que esto permite aumentar la eficiencia operativa del horno, reducir el consumo de gas combustible e incrementar el margen de rentabilidad del proceso, como resultado de la reducción

de costos relacionados con el número de paradas no programadas, costos de mantenimiento y degradación de los materiales del horno.

**Figura No. 1** Imágenes de inspección de Horno de Viscosreducción II de la GRB.



Parametro de objeto	Valor	Comentario
Sp1	968.6 F	Punto 1, temperatura de piel de tubo
Sp2	1091.1 F	Punto 2, se observa calentamiento de tubo por posible deposito de coque al interior del mismo
Sp3	1369.1 F	Punto 3, alta temperatura por deposito de calamina

La presente investigación pretende abordar las siguientes preguntas, al analizar y determinar las variaciones del poder calorífico del gas, que generan perturbaciones en los hornos y calderas:

¿De qué manera la variabilidad en las propiedades de las mezclas de gas de refinería que se utiliza como combustible, afecta la combustión en los hornos?



---

¿Cuál es el impacto de las corrientes que componen el gas combustible, en las propiedades del gas de refinería?

¿Qué impacto económico genera la implementación de posibles cambios en las mezclas del gas de refinería?

---

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. ESTUDIOS DE INTERCAMBIABILIDAD

En 1932 la Asociación Americana de Gases A.G.A.[2] completó un extensivo proyecto de investigación sobre la intercambiabilidad de gases manufacturados y mezclas de gases combustibles, cuyos poderes caloríficos eran menores a los 700 BTU/PC. Se realizaron aproximadamente unas 175000 pruebas, para unas 250 mezclas de gases.

En la década siguiente, con el incremento de la demanda de gas natural en Estados Unidos, la necesidad de tener a disposición reservas de gas para satisfacer picos de demanda y suplir fugas por fallas en las líneas de transporte se hizo de mayor importancia. Por eso la A.G.A. en compañía del Comité para uso de Mezclas Gaseosas, inició una investigación en los años 1942-43, que tenía como objetivo principal, el desarrollo de un método que pudiera predecir con confianza, qué gases podrían sustituir al gas natural o las mezclas de gases de alto poder calorífico (superior a los 800 BTU/PC).

El carácter de los gases sustitutos y el alcance bajo los cuales ellos podrían ser utilizados, depende de factores técnicos y económicos.

---

Se introduce entonces el concepto de flexibilidad del quemador, referido como la capacidad para funcionar en óptimas condiciones bajo los parámetros de tolerancia a los cambios en la potencia térmica de entrada, tasa de aireación primaria y fenómenos asociados a la combustión y estabilidad de la llama, sin ejecutar ningún cambio en los inyectores de gas, la graduación del aire primario ni la presión de suministro [2].

Los resultados experimentales obtenidos en la investigación dirigida por la AGA en los años 1942-43, se analizaron y se compararon con trabajos anteriores para obtener las siguientes conclusiones:

Cuando el poder calorífico y la densidad del gas sustituto causa una disminución en la potencia térmica, existe una tendencia al desprendimiento y al retroceso de la llama. El desprendimiento es más notorio para gases manufacturados, mientras que el retroceso es más crítico para las mezclas aire butano.

Cuando el poder calorífico y la densidad del gas sustituto causa un aumento en la potencia térmica, existe una tendencia hacia las puntas amarillas y a la combustión incompleta.

Fue común el fenómeno de puntas amarillas, para las mezclas de gases combustibles que excedían 50 % de propanos, 40% de butanos y 20 % de hidrocarburos saturados.

La tendencia a la inestabilidad de la llama, puntas amarillas y combustión incompleta en los quemadores evaluados, depende de la composición del gas de referencia y el respectivo ajuste en los artefactos para el mismo.

Las preguntas de intercambiabilidad han sido dirigidas por cambios específicos y anticipados en el mercado norteamericano. En general, los siguientes son los factores que contribuyen a llevar al máximo interés a la intercambiabilidad de gases y ha direccionado las actividades técnicas de los gases en los Estados Unidos [2]:

- En los años 1930s, la introducción del gas natural y cuestiones de intercambiabilidad con gases producidos localmente.
- En los años 1940s, el desarrollo de enfoques nivelados de suministros, incluyendo gases manufacturados y sistemas de aires propanados e intercambiabilidad con suministros bases de carga.
- En los años 1970s, introducción de LNG importado en áreas de mercado local e intercambiabilidad con proveedores locales.

- Ahora, un renovado interés en la importación de LNG localmente y nacionalmente, cambios en el procesamiento del gas producido domiciliario.

Se han realizado varias investigaciones sobre la Intercambiabilidad de gases en los últimos años, de las cuales se menciona el trabajo realizado por C.J. Muller, I.K.Craig, and N.L.Ricker [3], quienes modelaron, validaron y controlaron un sistema industrial de mezclado de gas combustible, y concluyeron que las correlaciones entre los datos de las simulaciones y los de planta, indican que la hipótesis clave, de gases ideales y mezclado uniforme, son razonables.

En 2002 investigadores de la Escuela de Minas de Nantes [4], presentaron una metodología para la determinación del poder calorífico, el índice de Wobbe y la relación estequiométrica aire /combustible, usando la conductividad térmica y el índice de refracción.

En 2005 Aker Solutions US [5], propuso varios métodos para controlar la calidad del gas de los terminales de LNG, dependiendo de los requerimientos del gasoducto y de las regulaciones. Se concluyó que la integración de los terminales, aumenta la eficiencia energética y reduce las emisiones.

Este mismo año, la Comisión Regulatoria Federal de Energía de Estados Unidos, actualizó los Estándares de Intercambiabilidad de Gases, concluyó que el IW es el índice simple más robusto para medir la intercambiabilidad, y que una variación de la composición puede dañar los equipos, y violar las normas ambientales.

Los estudios de intercambiabilidad de gases combustibles en Colombia se concentran en el sector de transporte vehicular, ya que surgieron en respuesta a los inconvenientes derivados de la política energética de finales de 1999, que impulsaba el programa de reconversión del parque automotriz a GNV (\*) y que creó una dependencia del sector al gas natural de la Guajira, convirtiéndose en una situación de alto riesgo debido a las limitaciones a futuro de dicho gas [6].

Estas investigaciones se basaron en el uso de métodos (método de Delbourg y método de Dutton) para evaluar la intercambiabilidad de los principales gases naturales colombianos específicamente el gas Cusiana y gas Guajira, por medio del análisis comparativo de las composiciones químicas, propiedades de combustión e índices de intercambiabilidad, que comprobaron que estos gases no son intercambiables [7].

En el año 2006, García Posada Jorge, en Análisis comparativo de las propiedades de combustión de las mezclas metano hidrógeno con respecto al metano [8]. concluyó que al adicionar hidrógeno al gas natural (metano), las propiedades volumétricas de combustión disminuyen por los menores requerimientos de aire y las variaciones del Índice de Wobbe no son significativas.

---

(\*) Gas Natural Vehicular.

---

## **2.2 PROBLEMAS ENCONTRADOS EN LA COMBUSTIÓN POR LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES.**

En los trabajos de investigación realizados, se han encontrado algunos problemas comunes de la combustión, afines con la intercambiabilidad de gases, que se relacionan a continuación [2,9]:

- Seguridad.
- Fiabilidad de los resultados.
- Durabilidad de los aparatos y equipos.

Los asuntos de seguridad de la combustión, incluyen control de la generación de polución (CO) en aparatos y equipos, sobrecalentamiento de las superficies de los aparatos, y mantenimiento de espacios libres para los materiales combustibles, riesgos de incendio debido a llamas extendidas, y sobrepresión debido a la ignición retardada.

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

de la llama relacionados con el intercambio de calor en la superficie, alteración de la capacidad de los equipos y reducida capacidad.

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

Los modos de falla de la combustión específica están asociados con la mayoría de estos problemas y relacionados con fenómenos de combustión observables en equipos y aparatos. El criterio de la intercambiabilidad de gases incorpora estos fenómenos observables en índices numéricos, para la evaluación de la intercambiabilidad.

### **2.2.1. MODOS DE FALLA DE LA COMBUSTION**

Los siguientes modos de falla de la combustión están descritos en términos de sus causas, importancia relativa en criterios de la intercambiabilidad de gases y la cobertura en los índices de intercambiabilidad.

#### **2.2.1.1. ELEVADA GENERACION DE CONTAMINANTES.**

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

### ➤ Producción de CO.

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

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

La oxidación del metano y de los hidrocarburos acompañantes, principalmente el etano, se somete a reacciones intermedias como las mostradas en forma simplificada en la ecuación 1:



La formación del radical inestable hidroxilo (OH) (no mostrado para simplificar), facilita esta secuencia a través de la formación de CO en la zona interna de reacción de estas llamas. Seguidamente el CO es recombinado en la zona de reacción externa para completar la combustión hasta CO<sub>2</sub>.

En la combustión estequiométrica completa, estas reacciones ocurren en forma general muy cercanas, por eso la simplificación de la primera ecuación es una descripción razonable. Sin embargo, solo la combustión rica en combustible, puede ocurrir en regiones de llama premezcladas parcialmente, y si la entrada de aire secundario es requerida para completar la combustión, la permanencia de esos radicales libres puede persistir hasta alcanzar los niveles estequiométricos de  $O_2$ . Los factores que pueden obstruir la entrada de suficiente aire secundario son:

- Insuficiente suministro de aire a la llama, en la cámara de combustión secundaria.
- Obstrucción del flujo de entrada, debido al quemador o a la geometría de la cámara de combustión.
- Choque de llamas contra la superficie y consecuente alteración de la geometría de la llama.
- Cambios inherentes en los requerimientos de oxígeno, asociados con la mayor cantidad de hidrocarburos pesados en el combustible, y a su vez, mayores requerimientos de oxígeno para completar la combustión.

El último de estos factores, mayor cantidad de hidrocarburos pesados, es el de mayor impacto, al introducir combustibles no intercambiables.

Una elevada producción de CO en una operación aplicada, es inferida en el laboratorio y en el campo, observando las puntas amarillas de las llamas. La medida directa de la producción de CO, fue lograda primeramente en experimentos de laboratorio y después con la disponibilidad de instrumentación de campo menos costosa, en la medición directa en campo [4,10].

➤ **Producción de material particulado.**

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

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

El índice de puntas amarillas es usado para diagnosticar problemas en las aplicaciones operativas y para investigaciones empíricas sobre el desempeño y la intercambiabilidad. De hecho, los índices de intercambiabilidad de gases asocian la composición y propiedades del gas con los comportamientos observables directamente.

#### ➤ **Producción de NO<sub>x</sub>.**

Las elevadas emisiones de NO<sub>x</sub>, no son caracterizadas directamente como una forma de falla de la combustión. Sin embargo, el desarrollo de aplicaciones de bajas emisiones de NO<sub>x</sub>, ha llevado a incrementar la preocupación acerca de la sensibilidad al desempeño de NO<sub>x</sub> de los equipos en respuesta a los cambios del suministro de gas. A través del uso final, la preocupación de las emisiones de NO<sub>x</sub>, están dominadas por el cumplimiento regulatorio de las aplicaciones de combustión con los límites de emisión de calidad del aire del ambiente.

El  $\text{NO}_2$  es un tema de preocupación asociado a la calidad del aire interno, como un irritante respiratorio. En contraste, las emisiones de  $\text{NO}_x$  son un factor contribuyente para la formación de ozono. Como un resultado de la diferencia de intereses entre el  $\text{NO}_2$  interno y el  $\text{NO}_x$  externo, la literatura norteamericana sobre la intercambiabilidad, algunas veces no reporta la especificación de  $\text{NO}_x$  requerida para determinar cómo los cambios en el suministro de gas, afectan los niveles de  $\text{NO}_2$  y la salud y seguridad del consumidor.

El Departamento de Industria y Comercio del Reino Unido, (DTI), financió pruebas aplicadas para investigar los problemas de la intercambiabilidad de gases entre los años 2003-2005 [11]. El reporte que cubre pruebas de intercambiabilidad de gases de 20 aplicaciones, encontró que mientras el  $\text{NO}_x$  total se incrementó con el aumento del Índice de Wobbe en el gas de suministro, los instrumentos produjeron resultados inconsistentes para la fracción de  $\text{NO}_2$  del total de  $\text{NO}_x$ . En algunas aplicaciones, el incremento fue dominado por el  $\text{NO}$ , una especie altamente reactiva que interactúa con elementos constructores y decae rápidamente. En otras aplicaciones, inclusive en las no aireadas, el  $\text{NO}_2$  domina el incremento.

#### **2.2.1.2. LOS CONSUMOS TERMICOS UNITARIOS ALTERADOS.**

El consumo térmico en el quemador se expresa como el Número de Wobbe.

Para un rendimiento volumétrico ajustado, el consumo térmico de calor de la aplicación, variará proporcionalmente con el cambio del Número de Wobbe del gas de suministro. Los problemas de intercambiabilidad están asociados en el nivel de aplicación, con el cambio del combustible y con la ausencia de alguna modificación en la velocidad del flujo volumétrico o en los orificios del quemador.

El impacto de tales cambios en el consumo térmico de las aplicaciones puede ser significativo y puede exceder los límites de sobrefuego especificados en los estándares de diseño, esto puede conllevar a problemas en los equipos.

➤ **Durabilidad de los intercambiadores de calor (hornos y calderas) y sus componentes.**

El sobrecalentamiento de los intercambiadores de calor y sus componentes, incluyendo los controles, han sido asociados al sobrefuego de los equipos debido a la introducción de un gas con un valor muy alto de Número de Wobbe. No hay datos disponibles sobre esto y las mediciones del intercambiador de calor y otras medidas de temperatura superficiales en las pruebas de intercambiabilidad de gas hechas por Sempra Utilities/Southern California Gas Company [4, 12], no lo indican, para los gases, éste analiza los límites de temperatura en los productos estándares.

Sin embargo, las temperaturas elevadas están asociadas con el Número de Wobbe de los gases y por eso están especificadas para las pruebas de los gases.

➤ **Cambios en la eficiencia.**

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

Los efectos de segundo orden sobre la eficiencia pueden ser asociados con llamas interactuando ineficientemente con superficies de intercambiadores de calor y otras influencias de cambio de longitud y forma de llama. Una entrada reducida debido a la introducción de un gas con un muy bajo Número de Wobbe puede producir una llama muy corta y una transferencia de calor ineficiente. Las llamas frías de un gas de bajo Wobbe pueden incluso contribuir a elevar la producción de CO, debido a la insuficiente temperatura en la zona de reacción que promueva la oxidación completa. Gases con muy alto Wobbe impiden el intercambio de calor en la zona exterior y producen una combustión incompleta.

Sin embargo, la eficiencia reducida debería ser el problema menos importante para el consumidor. Investigadores de DTI [11] no encontraron un problema fuerte

en la eficiencia en las aplicaciones asociadas con las pruebas de gases con un amplio rango de Número de Wobbe.

### **2.2.1.3. ESTABILIDAD DE LA COMBUSTION.**

#### **➤ Estabilidad de las llamas**

La Estabilidad de las llamas es necesaria para mantener el calor útil, emisiones y eficiencia, mientras se reduce el potencial de daño por paradas o apagado.

#### **➤ Desprendimiento de la llama.**

El desprendimiento de llama es debido a la inestabilidad inherente del frente de llama del quemador saliendo de este o a la habilidad para permanecer encendido, y a los cambios en el perfil de temperaturas que afectan las superficies de calentamiento. El desprendimiento del frente de llama es debido fundamentalmente a que la velocidad de decrecimiento de quema es inferior al flujo a través del quemador y puede ser debido a la mezcla excesivamente rica en el quemador, o altos niveles de inertes en el gas combustible.

#### **➤ Retroceso de la llama.**

Es un comportamiento asociado principalmente con la concentración de  $H_2$  en el gas combustible. La velocidad alta de quemado del  $H_2$  en la mezcla podría facilitar el movimiento del frente de llama, desde antes del quemador, hasta el cuerpo del quemador e inyector. La llama pulsante es una conducta común asociada con el

retroceso de llama. El hidrógeno, como un constituyente del gas combustible, era un problema cuando el gas manufacturado representaba una porción significativa del suministro de gas local. Con la transición hacia el gas natural y con la ausencia relativa de  $H_2$  en el gas natural, esta preocupación desapareció.

### **2.3.METODOS PARA HALLAR LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES. [8, 13]**

En la actualidad existe una variedad de métodos para hallar la intercambiabilidad de gases combustibles, basados en el cálculo de magnitudes llamadas “índices de intercambiabilidad” que relacionan las propiedades físicoquímicas del gas y los fenómenos de combustión, permitiendo una mejor caracterización y en consecuencia un rango más ajustado y preciso de intercambiabilidad, asimismo, determinan el comportamiento de la combustión del gas sustituto. Los métodos se agrupan así:

Grupo I Métodos de Índices simples.

Grupo II Métodos de Índices múltiples.

Grupo III Métodos con Diagramas.

Grupo IV Otros métodos.

### 2.3.1. MÉTODOS DE INDICES SIMPLES

- **Índice de Wobbe.**

Definido en el numeral 1.1. Se emplea para agrupar a los gases en función de su contenido energético. Es el más usado. **Criterio de intercambiabilidad:** Dos o más gases son intercambiables si poseen el mismo número de Wobbe.

- **Índice de Willien.**

Se basa en las siguientes cuatro consideraciones: La mezcla en la cabeza del quemador posee un poder calorífico de 175 BTU/PC, la caída de presión es igual para diferentes gases (con el ajuste adecuado en el quemador), el diámetro del inyector es igual para los diferentes gases y la tasa de aireación primaria es independiente de la gravedad específica del gas. El índice se calcula con la ecuación 2

$$F = \frac{Hx(S_a)^{\frac{1}{2}}}{(S_a)^{\frac{1}{2}} + \left[\frac{H_a - 175}{175}\right] x (S_r)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

Donde:

H: Poder calorífico gas de reemplazo.

S: Gravedad específica gas de reemplazo.

El subíndice “a” relaciona el gas de ajuste o gas de referencia.

Este método posee desventajas como su restricción para gases con poderes caloríficos muy bajos y que no considera los fenómenos al interior de la llama

como la velocidad de deflagración. **Criterio de intercambiabilidad:** Dos o más gases son intercambiables si el cálculo del número F está entre 160 y 190.

### Índice de Knoy.

Se toma la relación de Willien y se adapta para mezclas GLP- aire, las cuales servirían para sustituir a gases manufacturados y gases naturales, con ayuda de la ecuación 3 se calcula el índice:

$$C = \frac{H - 175}{S^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

Sin embargo, si la composición del gas sustituto no se acerca a la del gas ajuste, los resultados de este método, pueden ser erróneos. **Criterio de intercambiabilidad:** Dos o más gases son intercambiables si el cálculo de su número C es igual, con una desviación tolerable de 7.5%.

- **Índice de Schuster.**

Se deriva de la consideración del balance entre la velocidad de suministro de calor, representado por el Índice de Wobbe y la tasa de producción de calor, representado por la velocidad de quemado (velocidad de deflagración), ecuación 4:

$$S_c = \frac{W}{S_u} \quad (4)$$

Donde:

Sc: Índice de Schuster; W: Índice de Wobbe;  $S_u$ : Velocidad de deflagración.

**Criterio de intercambiabilidad:** Dos o más gases son intercambiables si el cálculo de su número es igual.

- **Índice C de la AGA.**

Se determinó que, para gases con poderes caloríficos inferiores a 750 BTU/PC se tiene la expresión 5:

$$C = \frac{H_a \times A_a \times S_a}{H_a \times A_a \times S} + \frac{H_a \times A_a}{F_a \times E_a \times 5000} + \frac{H \times A}{F \times E \times 5000} \quad (5)$$

Donde:

A: aire teórico requerido para la combustión estequiométrica, E: calor específico teórico de los humos producto de la combustión de 60 a 1600 °F (BTU/PC). El subíndice "a" relaciona las propiedades de gas de ajuste o gas de referencia. Los términos restantes se relacionan con el gas sustituto.

$$E = 0.029 \times V_{CO_2} + 0.023 \times V_{H_2O} + 0.0189 \times V_{N_2}$$

V= Volumen de cada producto formado por la combustión de un pie cúbico de gas con el aire teórico requerido para la combustión completa. H: poder calorífico (BTU/PC). S: Gravedad específica. F: sumatoria de todas las fracciones molares para cada combustible.

**Criterio de intercambiabilidad:**

Dos o más gases son intercambiables si el cálculo del número C se encuentra entre 0.85 y 1.15. En la práctica se admite una desviación, ampliando el rango

para  $C$  entre 0.75 y 1.225. Para valores de  $C > 1$  se presenta el fenómeno de combustión incompleta y para valores  $< 1$ , el retroceso de llama.

### 2.3.2.MÉTODOS DE INDICES COMPUESTOS

Los métodos simples, están relacionados con la intercambiabilidad en lo concerniente a la potencia térmica de entrada al artefacto y no se dirigen a otros parámetros como el retroceso y desprendimiento de llama puntas amarillas y combustión incompleta. Debido a estas limitaciones se desarrollan otros métodos.

- Índices de la AGA

Fueron desarrollados para los gases manufacturados, y comprenden los índices de desprendimiento, retroceso y puntas amarillas, basados en las mediciones realizadas en un quemador de precisión. Son básicamente modelos empíricos puros obtenidos de los tres tipos de gases más representativos de los Estados Unidos y los cuales se presentan a continuación:

- Índice de desprendimiento de llama:

$$I_c = \frac{K_a}{\frac{f_a}{f} \times \alpha_a \left[ K - \log \left( \frac{f_a}{f} \right) \right]} \quad (6)$$

- Índice de retroceso de llama:

$$I_R = \frac{K_f}{K_A \times f_a} \times \left( \frac{H}{1000} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

- Índice de Puntas amarillas:

$$I_{PA} = \frac{f x a_a x y_a}{f_a x a x y} \quad (8)$$

Donde:

a: relaciona las propiedades del gas de ajuste o referencia.

f: factor de aire primario =  $\frac{1000s^{\frac{1}{2}}}{H}$ .

S: gravedad específica.

a: aire teórico requerido para combustión estequiométrica.

H: poder calorífico.

K: constante de la AGA para el desprendimiento de la llama

Y: constante de la AGA para puntas amarillas.

#### **Criterio de intercambiabilidad:**

Dos o más gases son intercambiables si el cálculo de los índices de retroceso, desprendimiento y punta amarilla es igual. Aplica para el cumplimiento simultáneo de los tres índices.

- **Índices de Weaber**

Introdujo como parámetro adicional, la velocidad de deflagración. Los índices mostrarán mayor confiabilidad que el método de la AGA para los gases de bajo poder calorífico (gases de la primera familia).

Índice de entrada de calor JH:

$$J_H = \frac{H}{H_a} \times \left( \frac{S_a}{S} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Índice de aireación primaria JA:

$$J_A = \frac{A}{A_a} \times \left( \frac{S_a}{S} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Índice de desprendimiento de llama JL:

$$J_L = J_A \times \frac{S}{S_a} \times \left( \frac{100 - Q_c}{100 - Q_A} \right) \quad (11)$$

Índice de retroceso de llama JF

$$J_F = \frac{S}{S_a} - 1.4 \times J_A + 0.4 \quad (12)$$

Índice de puntas amarillas JY

$$J_Y = J_A + \left( \frac{N - N_A}{110} \right) \quad (13)$$

Índice de combustión incompleta JI:

$$J_I = J_A - 0.366 \times \frac{R}{R_a} - 0.634 \quad (14)$$

Factor de velocidad de deflagración de Weaver (s):

$$s = \frac{\sum(a_i \times B_i)}{A + 1 + 5xZ - 18.8xQ} \quad (15)$$

Donde:

ai: fracción volumétrica del componente i en el combustible. A: aire teórico requerido para la combustión estequiométrica.

Bi: coeficiente de Weaver de velocidad de deflagración del componente i.

H: poder calorífico del combustible.

N: Número de átomos fácilmente liberados por la combustión de 100 moléculas de gas.

Q: fracción volumétrica de Oxígeno en la premezcla.

R: Relación del número de átomos de hidrógeno al número de átomos de carbono en el hidrocarburo.

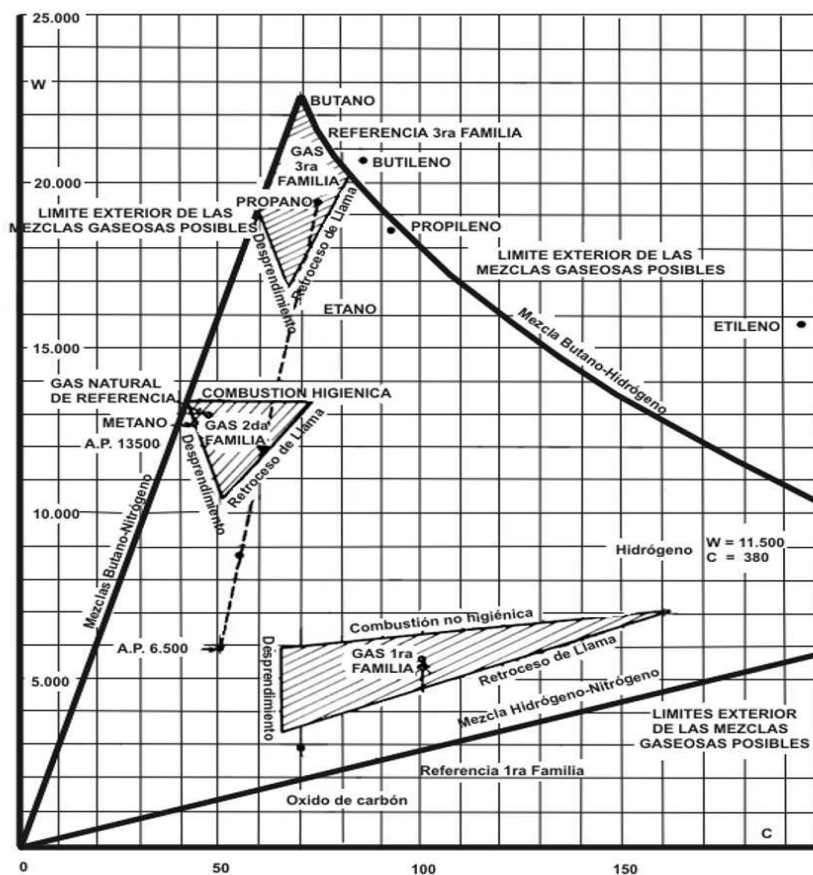
Z: fracción volumétrica de inertes en el gas combustible.

**Criterio de intercambiabilidad:** Dos o más gases son intercambiables si los índices de entrada de calor y desprendimiento de llama son iguales a 1.0; y los índices de retroceso de llama, puntas amarillas y combustión incompleta son iguales a cero.

### 2.3.3. MÉTODO GRAFICO.

La figura 2 muestra el diagrama que presenta la mezcla de gases, que pudiera resolver algún tipo de problema de intercambiabilidad.

Figura No. 2 Representación gráfica de Delbourg [40].



El método de Delbourg, es un método europeo que define gráficamente el área aceptable de intercambiabilidad entre gases de una misma familia. Para ello es necesario conocer la composición del gas sustituto, calcular los índices de intercambiabilidad y ubicarse en la gráfica. "Si el punto se encuentra en el interior

de la gráfica y si los índices son inferiores a los valores límites, entonces el gas es considerado como intercambiable con el gas de referencia. En el caso contrario, es necesario alterar la composición del gas sustituto para volverlo intercambiable”[8].

A continuación se detallan las ecuaciones para calcular los índices según el método de Delbourg [14]:

❖ Índice de Wobbe corregido ( $W'$ ), ec. (16).

$$W' = K_1 \times K_2 \times \frac{PCS}{\sqrt{d}} \quad (16)$$

Donde:

$$K_1 = \frac{x_{CO} + 4O_2 - 0.52CO_2}{PCS}, \text{ calcula el balance existente entre el CO, CO}_2 \text{ y O}_2,$$

en kcal/m<sup>3</sup>.

$K_2$  = constante que se halla gráficamente según la familia (ver Anexo B) e indica el efecto de hidrocarburos pesados con excepción del metano, en kcal/m<sup>3</sup>.

❖ Potencial de combustión ( $C$ ) o índice de Delbourg, se define en la ecuación (17):

$$C = u \times \frac{H_2 + 0.7CO + 0.3CH_4 + v \sum (a \times C_n H_m)}{\sqrt{d}} \quad (17)$$

Donde:

u, v = parámetros que dependen del contenido O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> del gas, se hallan gráficamente según la familia.

C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> = porcentaje de cada hidrocarburo superior al CH<sub>4</sub>.

a = parámetro calculado para cada tipo de hidrocarburo.

❖ El índice de Puntas amarillas “yellow tips”, ecuación (18).

$$I_j = \frac{\sum(j \times A)}{\sqrt{d}} \times \left( 1 - 0.418 \times \frac{O_2}{PCS} \right) \quad (18)$$

Donde:

A = porcentaje de cada hidrocarburo.

J = propiedad calculada para cada hidrocarburo en particular.

❖ Índice de formación de hollín, ecuación. (19).

$$I_{ch} = \frac{\sum b \times A}{\sqrt{d}} \times \left( 1 + \frac{H_2}{100} + \frac{CO}{100} \right) \times (1 - 0.013 \times O_2) \quad (19)$$

Donde:

b = propiedad calculada para cada hidrocarburo en particular.

Los valores calculados con las ecuaciones anteriores, deben estar entre los límites registrados en la tabla 1, a fin de conocer la estabilidad de la llama del gas de estudio.

**Tabla No. 1. Parámetros empleados en el método de Delbourg**

FENÓMENOS DE COMBUSTIÓN	VALORES LÍMITES	ÍNDICE CARACTERÍSTICO DEL FENÓMENO
Desprendimiento de llama	Curva de $W = f(C)$ , correspondiente a la zona donde aparezcan los fenómenos.	Índice de Wobbe ( $W$ )  Potencial de Combustión ( $C$ )
Retroceso de llama Producción de Monóxido de Carbono	Curva de $W = f(C)$ correspondiente a: $CO/CO_2 \geq 0,01$ (1 <sup>ra</sup> familia) $CO/CO_2 \geq 0,02$ (2 <sup>da</sup> familia)	
Puntas Amarillas	$210 \geq I_j$ (2 <sup>da</sup> familia) $160 \geq I_{ch}$ (1 <sup>ra</sup> familia)	$I_j$ : Índice de puntas amarillas $I_{ch}$ : Índice de formación de hollín
Disminución de Potencia Térmica	10% Potencia Nominal	Índice de Wobbe ( $W$ )

Fuente: CORTÉS TORRES, Jaime., et al. Validación de la intercambiabilidad de gases en el contexto colombiano: Calentadores Instantáneos de Agua. Medellín, Universidad de Antioquia. 2003. p.66

#### 2.3.4. OTROS METODOS.

- **Sommers- Ruhrgas.**

Dos gases son intercambiables si se permiten cambios limitados en la potencia de entrada sin ajustes en el quemador a presión de suministro constante. Su

---

aplicación es para gases de segunda familia y no contempla criterios de estabilidad de llamas.

En resumen los índices de caracterización de gases representan:

- *El índice de Retroceso de llama “flash back”, muestra el porcentaje admisible de hidrógeno en el combustible.*
- *El índice de Desprendimiento de llama “lifting” obedece al porcentaje de nitrógeno.*
- *El índice de Puntas amarillas “yellow tips”, determina el porcentaje de hidrocarburos pesados aceptable en el gas suplente, para que no se presente combustión incompleta.*

---

### 3. FUNDAMENTOS

#### 3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS

Según su obtención, los combustibles gaseosos pueden ser naturales o manufacturados. La disponibilidad de una amplia variedad de gases combustibles, asociadas a sus diferentes propiedades físicas y químicas, ratifica la necesidad de clasificarlos en función de su contenido energético.

El índice de Wobbe ( $W$ ) es el parámetro que agrupa los gases combustibles en función de su potencial energético, como se muestra en la Tabla 2; esta clasificación es una medida internacional para facilitar el estudio y la aplicación de los mismos, incluye tres familias, divididas en grupos según el valor de su índice de Wobbe medido en las mismas condiciones de referencia.

Este índice determina que los gases que pertenecen a una misma familia pueden ser intercambiables, mientras que esto no es posible entre los que pertenecen a familias diferentes [15, 16].

**Tabla No. 2** Clasificación de los combustibles gaseosos según el índice de Wobbe.

FAMILIA	DENOMINACIÓN		W [kWh/m <sup>3</sup> (n)]
Primera	<b>Gases manufacturados</b>		6.5-9.0
	Grupo A	Gas de ciudad	6.5-8.0
	Grupo B	Gas de coquería	7.0-9.0
	Grupo C	Gases de mezcla hidrocarburo-aire	6.5-8.0
Segunda	<b>Gas natural</b>		11.0-17.0
	Grupo H	De alto W	13.5-17.0
	Grupo L	De bajo W	11.0-13.5
Tercera	<b>Gases licuados del petróleo (GLP)</b>		21.5-26.0

(n): a condiciones normales de presión y temperatura.  
 Fuente: AMELL A., Andrés., et al. Tecnología de la Combustión de Gases y Quemadores Atmosféricos de Premezcla. Medellín, Universidad de Antioquia. 1996. p. 24

**3.1.1. Primera familia.** Agrupa los gases combustibles de bajo poder calorífico, también conocidos como manufacturados. Los gases 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 pirolisis o destilación destructiva del carbón que se realiza

aproximadamente a 1200°C en ausencia de aire, durante la fabricación del coque metalúrgico.

❖ Grupo C (Aire propanado, aire butanado): consisten en mezclas de propano comercial o butano comercial con aire en tal proporción que la concentración de hidrocarburos esté por arriba del límite superior de inflamabilidad. Esto se hace con el fin de obtener mayor facilidad y seguridad en el transporte y almacenamiento. 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.

**3.1.2 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 mezcla hidrocarburo-aire, como el gas de refinería.

➤ Grupo H (Gas natural): es una mezcla de hidrocarburos livianos en estado gaseoso, que está constituido principalmente por metano y etano, 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. El gas natural se encuentra al igual que el petróleo, en yacimientos en el subsuelo denominados “trampas geológicas”.

➤ 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 a 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, los que promueven la amplia variación en la composición del gas, siendo indispensable un adecuado control del tipo de mezcla para evitar daños a equipos y al proceso de combustión.

**3.1.3. 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.

El butano y el propano no son de carácter tóxico porque su combustión normalmente es bastante completa, están exentos de monóxido de carbono, excepto, en el caso de combustión incompleta. Por su elevada relación carbono/hidrógeno, resulta un combustible excelente, de alto poder calorífico, de llama muy limpia y no contaminante.

Las principales impurezas en el GLP son los compuestos de azufre, tales como  $H_2S$  (ácido sulfhídrico) y los mercaptanos (R-SH), su eliminación se realiza mediante lavado cáustico y con aminas, no obstante pueden quedar trazas. Otro contaminante que puede aparecer en cantidades mucho menores es el amoníaco, que se usa en la refinería como un agente para controlar la corrosión, pero cuando no es eliminado o su concentración es mayor a 3 ppm (partes por millón), produce corrosión en el cobre o en el zinc [17].

### **3.2. PROPIEDADES DEL GAS COMBUSTIBLE**

La propiedad de particular interés para los objetivos planteados en esta investigación es el Índice De Wobbe.

➤Índice de Wobbe. Es la relación entre el poder calorífico superior y la raíz cuadrada de la densidad relativa, como se detalla en la ecuación (20).

$$W = \frac{PCS}{\sqrt{d}} \quad (20)$$

Donde:

$W$ = índice de Wobbe, kWh/m<sup>3</sup> (n)

El índice de Wobbe para una mezcla se puede calcular por medio de la expresión planteada por la ecuación. (21):

$$W_m = \frac{PCS_m}{\sqrt{d_m}} = \frac{\sum X_i PCS_i}{\sqrt{(\sum X_i d_i)}} \quad (21)$$

Donde:

$W_m$  = índice de Wobbe de la mezcla en kWh/m<sup>3</sup> (n)

$PCS_m$  = poder calorífico superior de la mezcla kWh/m<sup>3</sup> (n)

$PCS_i$  = poder calorífico superior del componente  $i$ , kWh/m<sup>3</sup> (n).

Esta propiedad es indispensable cuando se requiere conocer la potencia que se utiliza en un sistema de combustión y es un parámetro fundamental en la teoría de intercambiabilidad de gases.

### 3.3.INTERCAMBIABILIDAD DE GASES.

---

La intercambiabilidad de gases es un área de estudio orientada a determinar el rango bajo el cual puede variar la composición del gas combustible en una aplicación de combustión, sin cambiar la seguridad operativa, eficiencia y desempeño del quemador.

Un concepto idealizado de intercambiabilidad expone que dos gases son perfectamente intercambiables si al remplazar el uno por el otro, las características de operación del aparato doméstico, comercial o industrial no se modifican. Esta definición implica que para alcanzar una intercambiabilidad perfecta, los gases deben tener composición química idéntica, argumento que en la práctica resulta imposible. A nivel industrial no se exige una intercambiabilidad perfecta, si no que los artefactos donde se lleve a cabo la combustión operen dentro de los límites permisibles de operación, dicho de otra manera, “un gas se dice intercambiable con otro de referencia, si él asegura, sin ajuste para los aparatos domésticos y eventualmente con simple ajuste para ciertos aparatos industriales, el funcionamiento satisfactorio de los aparatos de uso térmico que fueron ajustados para el gas de referencia” [18].

En general los objetivos de la intercambiabilidad de gases combustibles son:

- ❖ Conocer cuáles son las variaciones en la composición del gas admisibles dentro de una misma familia.

---

❖ Prever cualquier situación indeseable en el funcionamiento del aparato con el uso de un gas sustituto.

Para dar cumplimiento a dichos objetivos la noción de intercambiabilidad involucra [14]:

❖ Las propiedades intrínsecas de los gases, es decir, composición y condiciones de alimentación a los aparatos.

❖ Características del proceso de combustión.

❖ Los artefactos de trabajo, es decir, la flexibilidad y naturaleza para usar gases de diferentes calidades, los ajustes que se puedan efectuar y la severidad de los criterios establecidos para juzgar su buen funcionamiento.

---

## 4. OBJETIVOS

### 4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la intercambiabilidad de las mezclas de gas natural con gas de refinería, y proponer una alternativa para disminuir la variación del Índice de Wobbe.

### 4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1. Caracterizar las corrientes de gas combustible que componen la red de gas del caso de estudio.
2. Determinar el impacto de las corrientes del gas combustible en las propiedades del gas de refinería que alimenta los quemadores en los hornos de la Unidad del caso estudio.
3. Simular posibles mezclas del gas de refinería que sean favorables para la estabilidad de la combustión en los hornos de la Unidad de estudio.
4. Evaluar el impacto financiero que genera la implementación de posibles cambios en las mezclas del gas de refinería utilizado para la combustión en los hornos del caso estudio.

---

## 5. METODOLOGÍA

La presente investigación facilitará la implementación de iniciativas de ahorro de energía y mejoramiento de la integridad de los equipos de combustión, mediante un estudio de las mezclas de gas de refinería, utilizadas como combustible por los hornos y calderas, aplicados a un área caso de estudio, que corresponde a un tambor acumulador de gases de refinería, que para efecto se denominará T 91 y que suministra gas combustible a hornos de craqueo térmico.

Para cumplir con los objetivos propuestos enunciados en el capítulo anterior, se utilizó la siguiente metodología:

**Etapa 1: IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS CORRIENTES GASEOSAS.**

- Identificación de las corrientes de gas combustible que alimentan el sistema. Se identificaron las corrientes en los diagramas de flujo que aportan al tambor caso de estudio. Se tomó la información de los sistemas de información en línea de la planta, (PI), en un periodo comprendido del 2008 al 2010.
- Recolección de información sobre las características de los gases combustibles y sus respectivas propiedades. Se extrajeron los datos de los sistemas de información de la refinería. Se tomaron los datos promedios día a día de los años

2008 al 2010. Los análisis por cromatografía fueron realizadas según la norma ASTM D 2504.

➤ Recopilación de los registros de caracterización y de flujo de desvíos de las corrientes de gas de alto y bajo poder calorífico que alimentan a los hornos y calderas, en los sistemas de información.

#### *Etapa 2: SIMULACIÓN DE DATOS.*

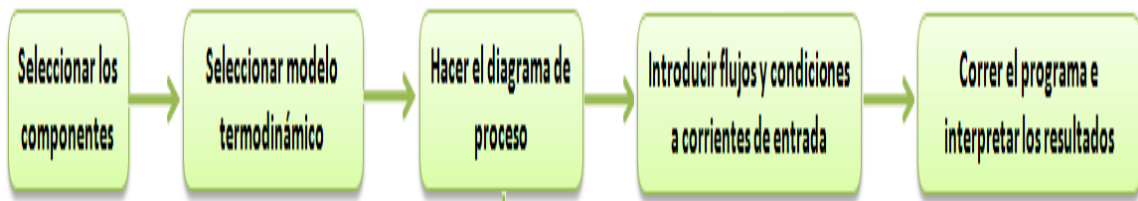
➤ Reconocimiento e instrucción en la herramienta de simulación de análisis computarizado que permite el cálculo y la simulación de la mezcla de gases. Se escogió la herramienta de simulación en estado estacionario Pro II ® de Simsci. El cabezal de gas se modeló con cuatro estados, (la cantidad molar de cada uno de los cuatro componentes), cuatro variables manipuladas, (los flujos volumétricos de cada una de las corrientes), y tres variables controladas, (Poder calorífico alto, el índice de Wobbe y la presión).

➤ Compilación de información o datos necesarios para realizar la simulación. Se elaboró generando inicialmente un caso base con 100% Gas Guajira con aportes de Gas de Refinería: Gas rico en etano etileno, gas del tratamiento con amina de los gases provenientes de la planta de Craqueo térmico y de la hidrodesulfuradora del aceite demetalizado de los fondos. Para la convergencia y ajuste del modelo, se introdujo información de planta, que comprende los valores

promedio de las variables de proceso a lo largo de un determinado periodo de tiempo. Las variables que se tuvieron en cuenta son: Flujos, Temperatura, Presión, Composición Molar y Poder Calorífico para cada una de estas corrientes. Para este trabajo se tomó información de 2 años de operación, descartando información fuera de rango o con errores de instrumentación o de laboratorio.

➤ Realización del montaje en el software de simulación. Después de la identificación y caracterización de las corrientes de gas combustible, se realizó la simulación con la metodología de la figura 3.

**Figura No. 3 Metodología para realizar la simulación.**



Para esto se tuvieron en cuenta los resultados de las cromatografías presentadas en las tablas 3-6, los componentes a utilizar son: metano, etano, etileno, propano, propileno, n-butano, i-butano, n- pentano, i-pentano, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, y sulfuro de hidrógeno. Simultáneamente se escogió el método termodinámico: la ecuación de estado Peng- Robinson, debido a que se tienen mezclas de hidrocarburos y componentes ligeramente polares como dióxido de carbono e hidrógeno [2, 19]. Posteriormente se calculó el flujo de alimentación de las corrientes de gas a los hornos y calderas

y las propiedades físicoquímicas de las corrientes de gas combustible evaluadas, se introdujeron los datos de presiones y temperaturas de las corrientes de entrada.

Con la simulación base en estado estacionario se procedió a configurar los casos de estudio. Se establecieron los casos de desvíos máximos observados y sostenibles durante el periodo de estudio, de Propano Propileno, Etano Etileno e Hidrógeno.

Como criterio de aproximación se tomó en cuenta el poder calorífico alto de la salida del tambor hacia los hornos y calderas, y la densidad relativa de la mezcla para calcular el índice de Wobbe. Para este propósito se realizaron validaciones de los casos simulados con datos de laboratorio y con la información operacional del sistema de Gas Combustible.

### *Etapas 3: ANÁLISIS DEL TRATAMIENTO PLANTEADO.*

- Estudio de los resultados obtenidos de la simulación. Este análisis permitió definir varias propuestas de arreglos, las cuales se utilizaron como entradas para nuevas simulaciones, que finalmente fueron evaluadas técnica y económicamente.
- Validación de los datos obtenidos en la simulación con las cifras reales de la planta. Se Compararon los resultados de la simulación con los datos tomados de

la planta en circunstancias similares de flujos, composiciones y poderes caloríficos.

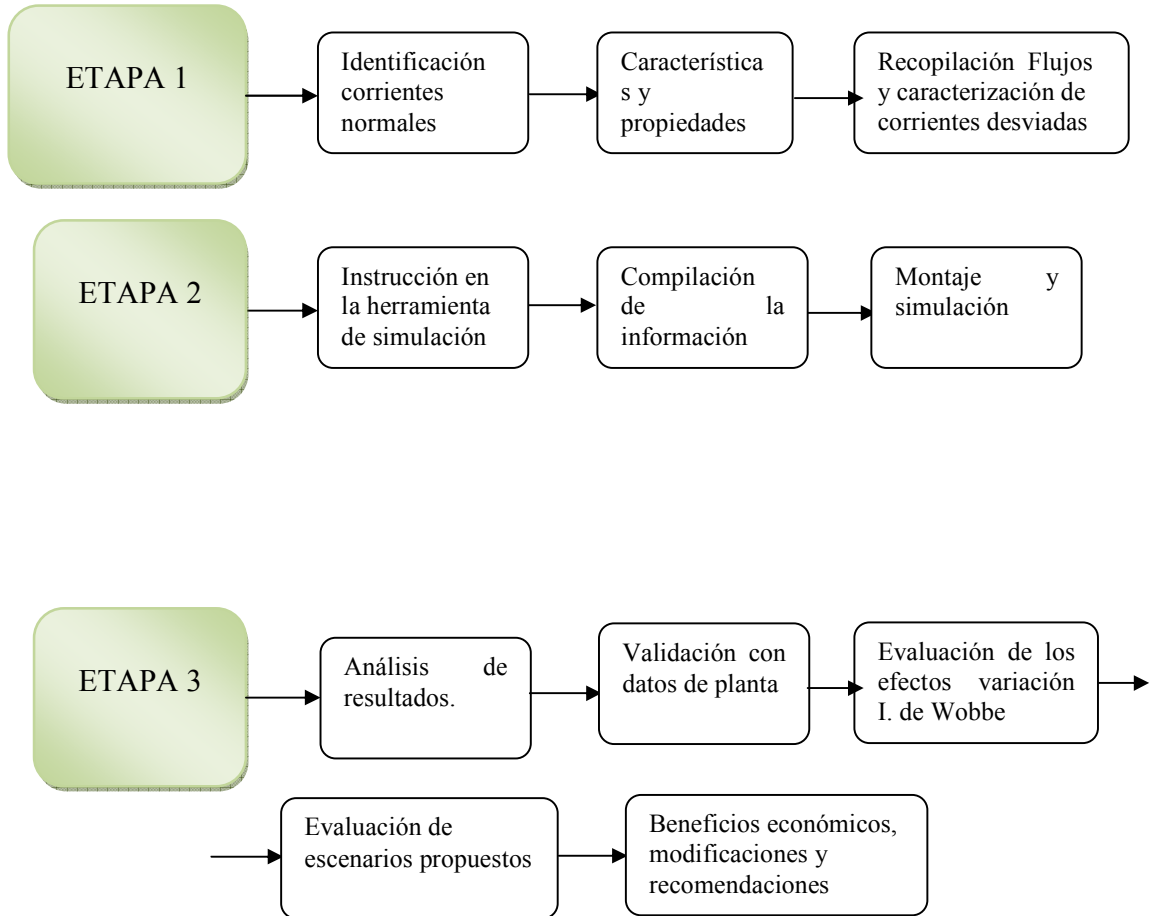
➤ Evaluación de los efectos que genera la variación del índice de Wobbe. Se calculó la eficiencia térmica y el impacto económico, se correlacionaron los efectos que genera en los hornos de la unidad de craqueo térmico, el cambio del índice de Wobbe.

➤ Se establecieron estrategias de optimización del consumo de gas combustible. Se diseñaron las modificaciones que permitieron mejorar la distribución del gas combustible. Teniendo en cuenta los requisitos del proceso, se diseñó un tambor mezclador que amortigua el impacto en los hornos y calderas, de los desvíos de las corrientes con alto y bajo poder calorífico. Se simularon los escenarios que se proponen para minimizar la alteración de las propiedades del gas de consumo. Se especificaron cuatro escenarios con la incorporación del tambor dosificador, se evaluó y se comparó la variación del índice de Wobbe, respecto a los casos iniciales.

➤ Cálculo del beneficio económico de las modificaciones y recomendaciones planteadas. Se realizó el análisis económico de la implementación de un tambor dosificador, se cotejó contra los beneficios que conlleva por extensión de la corrida de la unidad (tiempos entre cada parada para decoquizar) y por el incremento de la eficiencia térmica por la estabilización del índice de Wobbe.

La metodología empleada se indica en la figura 4

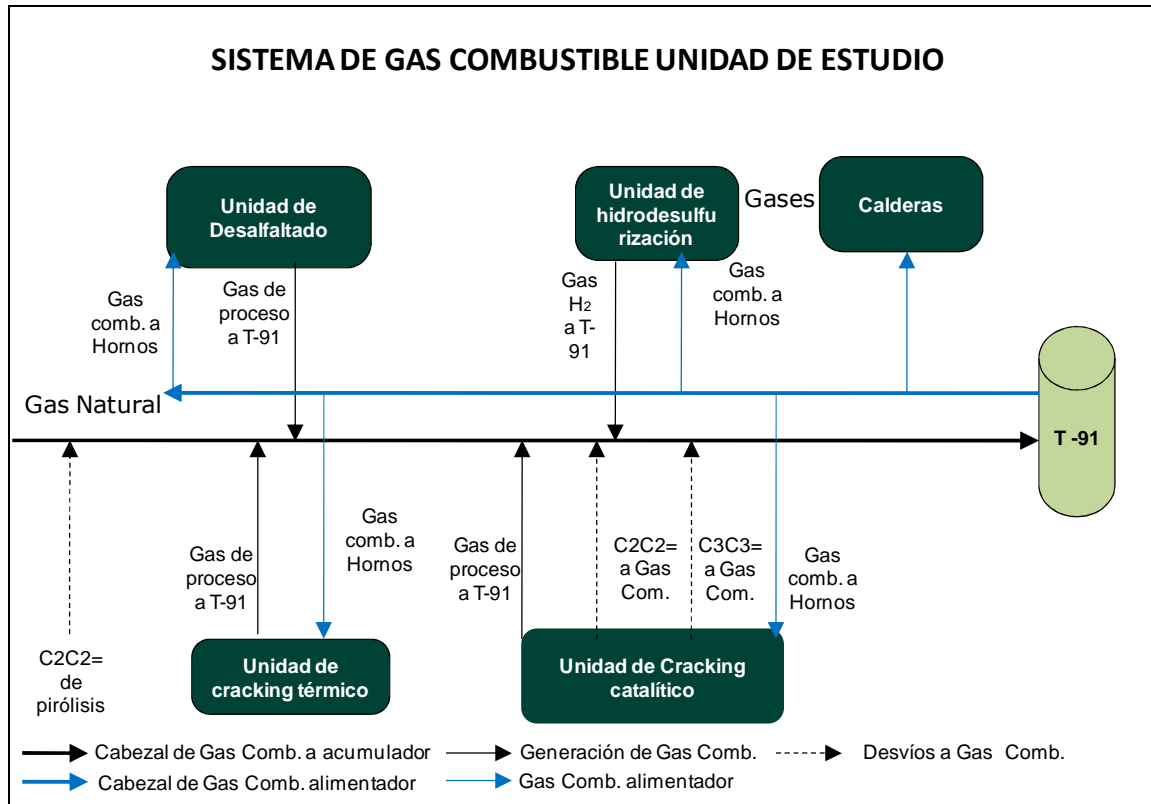
**Figura No. 4. Metodología empleada.**



## 6. RESULTADOS

### 6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

Figura No. 5. Descripción del sistema de gas combustible de la unidad de estudio



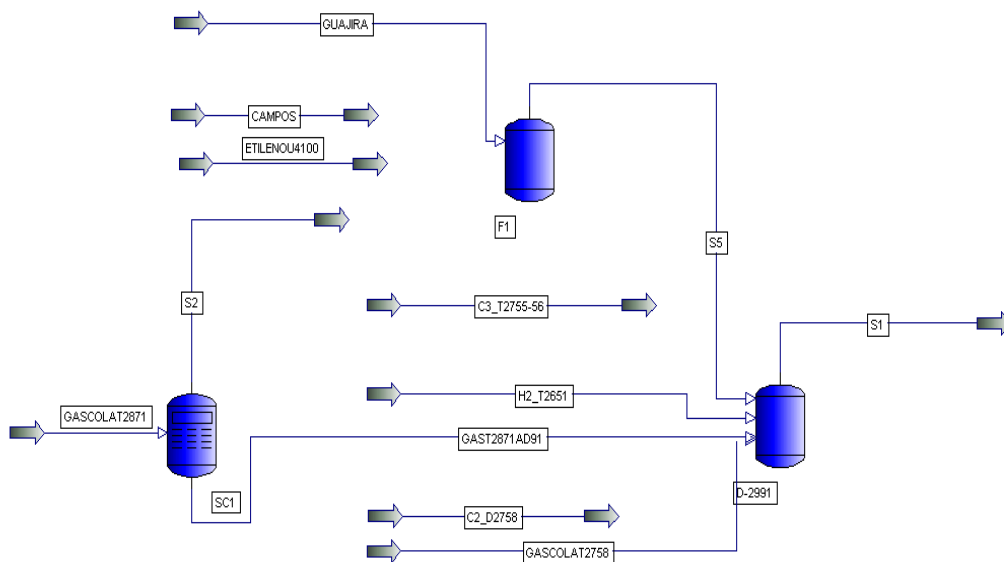
El caso de estudio de este proyecto, ver figura 5, comprende el tambor acumulador de gases T 91, el cual recibe el gas natural como componente principal, y los gases producto de las reacciones de los diferentes procesos que componen el sistema, por un cabezal de recibo. Se tienen corrientes que usualmente no se direccionan al tambor alimentador, solo en casos de requerimientos energéticos por insuficiencia de gas natural, por no cumplimiento con las especificaciones de calidad para enviarlo como producto final, o por salida

de servicio de la unidad aguas abajo del proceso. (ver línea a trazos negra de la figura 5). Del tambor alimentador T 91 se distribuye el gas combustible desde el cabezal de salida, a los diferentes consumidores, principalmente hornos y calderas

## 6.2 SIMULACION DEL CASO BASE Y DE LOS ESQUEMAS DE OPERACIÓN.

Se simuló el caso base, construido con las corrientes del caso estudio: gas natural, (Gas Guajira) y gas de refinería, (Gas de Tratamiento con Amina, de Hidrógeno y Gas de la cima de la recuperadora (absorbedora) de Etano Etileno). Ver figura 6. Los códigos que aparecen en la figura 6 corresponden a los nombres de las corrientes en ProII.

Figura No. 6. Diagrama utilizado para la simulación de corrientes



Las condiciones de trabajo de las corrientes sometidas a la simulación se encuentran en la tabla 3 y la composición típica cada una de las corrientes en las tablas 4-6, las cuales corresponden a condiciones reales de procesos de refinería de petróleo.

**Tabla No. 3. Condiciones de las corrientes de gas sometidas a simulación.**

CORRIENTES APORTANTES DE GAS	CONDICIONES DE TRABAJO		
	Presión, psig	Temperatura, °F	Flujo, scfh
Gas Guajira	310	74	702625
Gas de Campos	360	108	562100
Gas de Tratamiento con Amina	70	104	91264
Gas de cima de absorbidora de Etano Etileno	400	15	223160
Desvío de Propano Propileno	115	116	134061
Desvío de Etano Etileno	180	100	147329
Etileno de Pirólisis	130	70	79653

**Tabla No. 4 Composición de la corriente de Tratamiento con Amina**

COMPUESTOS	PORCENTAJE MOL
Metano	38,28
Etileno	1.98
Etano	7,33
Propileno	3.98
Propano	3.1
i-Butano	1.63
n-Butano	1.95
i-Pentano	0.75
Hidrógeno	11.88
Monóxido de carbono	2.28
Nitrógeno	14.75
Dióxido de carbono	3.23
Sulfuro de hidrógeno	2.21
PROPIEDADES	
ÍNDICE DE WOBBE kWh/m <sup>3</sup> (n)	12,37

**Tabla No. 5. Composición de la corriente Gas de Cima de la absorbidora de Etano**

**Etileno**

COMPUESTOS	PORCENTAJE MOL
Metano	43.59
Etileno	0.8
Etano	2.19
Propileno	2.54
Propano	1.34
i-Butano	0.61
n-Butano	0.25
i-Pentano	0.01
Hidrógeno	37.01
Monóxido de carbono	2.64
Nitrógeno	7.58
Dióxido de carbono	0
Sulfuro de hidrógeno	0
<b>PROPIEDADES</b>	
<b>ÍNDICE DE WOBBE kWh/m<sup>3</sup> (n)</b>	11.47

**Tabla No. 6 Composición de la corriente Gas de Hidrógeno.**

COMPUESTOS	PORCENTAJE MOL
Metano	4.02
Etileno	1.42
Etano	3.6
Propileno	0
Propano	0
i-Butano	0
n-Butano	0.31
i-Pentano	0.02
Hidrógeno	89.75
Monóxido de carbono	0
Nitrógeno	0.88
Dióxido de carbono	0
Sulfuro de hidrógeno	0
<b>PROPIEDADES</b>	
<b>ÍNDICE DE WOBBE kWh/m<sup>3</sup> (n)</b>	11.42

A partir de los datos presentados se realizó simulación de cada caso, que se denomina “corrida”.

Tomando como referencia el caso base, se simularon esquemas de operación del sistema de gas combustible, con el fin de evaluar el Índice de Wobbe, el Poder Calorífico y la Densidad de la mezcla de gases en función de los desvíos que se realizan de corrientes de Gas de Refinería compuestas de propano Propileno ( $C_3H_8$ ) y etano - etileno ( $C_2H_6$ ), que están mezcladas con otras corrientes minoritarias.

❖ La corrida Base es el resultado de implementar la metodología de la figura 3, teniendo en cuenta todas las corrientes de gas combustible desviadas al sistema de gas combustible y sus respectivas características; los valores de composición son los consignados en las tablas 4 a 6, las condiciones de operación se presentan en la tabla 3 y el diagrama de flujo se detalla en la figura 6.

Los quemadores instalados en los hornos del caso estudio, son de marca Samir, de posición de encendido contra la pared, usa como combustible gas, las características del combustible se encuentran en la tabla 7, columna Corrida Base, el encendido se hace a través de los conductores de gas y las boquillas, y el suministro de aire es natural, son 24 quemadores ubicados en dos hileras de 12. La temperatura del gas es de 110 °F y la presión 35 psig. Las condiciones de diseño de la combustión son: HHV del gas 1006 BTU/pc; Densidad relativa del gas: 1.253 lb/pc; IW: 13.31 kW/hr, Exceso de aire, mol, 15%, calor transferido, 89.13 MMBTU/hr, Eficiencia calculada 87%, pérdidas

por radiación: 1.5%, velocidad másica de los gases de combustión: 0.286 lb/(sec xft<sup>3</sup>), temperatura del gas de combustión saliendo de la zona de radiación: 1584 °F, de la zona de convección: 480 °F. Las condiciones de diseño de proceso son: Flujo másico del fluido: 217400 lb/hr, Fluido, asfalto, Absorción de calor, Zona radiante: 49.35 MMBTU/hr, Zona de convección: 28.19 MMBTU/hr, Caída de presión: 400 psi, el máximo flujo de calor calculado es 14490 BTU/(hrxFt<sup>2</sup>) en la zona radiante y 14900 BTU/(hrxFt<sup>2</sup>) en la zona de convección.

Para el caso base, el índice de Wobbe se encuentra en el grupo L de la segunda familia.

❖ Las corridas 1-5 son sensibilidades a la composición del gas combustible con dos fuentes de gas natural: Gas Guajira y Gas de Campos. Se disminuyó una de las corrientes desde 100% hasta 0%, aumentando en la misma proporción la segunda corriente. Los Índices de Wobbe resultantes no variaron significativamente, por lo que se optó por no tener en cuenta estas corridas en los resultados de este trabajo.

❖ La Corrida 6 se hizo con el fin de evaluar la variación del índice de Wobbe, cuándo se realiza el desvío de 2.0 KBD de C<sub>3</sub>C<sub>3</sub>= a Gas combustible. El índice de Wobbe varía apreciablemente debido a que el aporte en el aumento del poder calorífico del gas, es superior al aporte en el crecimiento de la

---

densidad relativa del gas, por lo tanto pasa del grupo L al grupo H de la segunda familia.

❖ En la Corrida 7 se evaluó el desvío de 2.2 KBD de C<sub>2</sub>C<sub>2</sub>= a Gas Combustible. Este desvío tiene un impacto inferior que el anterior desvío, por el menor poder calorífico del gas evaluado, sin embargo, la mezcla resultante cambia al grupo H de la familia 2, igual que el caso precedente.

❖ En la corrida 8 se realizó un desvío simultáneo de 2.0 KBD de C<sub>3</sub>C<sub>3</sub>= y 2.2 KBD de C<sub>2</sub>C<sub>2</sub>=, con un efecto grande en el índice de Wobbe. La mezcla de gases se aparta aún más del grupo L, al alcanzar un índice superior de 14.3.

❖ En la corrida 9 se desvía 1.77 KBD de C<sub>2</sub>C<sub>2</sub>= desde la Unidad de Pirólisis hacía el cabezal de gas combustible. El efecto sobre el Índice de Wobbe es similar al efecto que tuvo la corrida 7, ubicándose en el grupo H.

❖ En la corrida 10 se hace una sensibilidad realizando desvíos simultáneos de C<sub>2</sub>C<sub>2</sub>=, C<sub>3</sub>C<sub>3</sub>= y C<sub>2</sub>C<sub>2</sub>= de la planta de Pirólisis. El Índice de Wobbe resultante es el mayor registrado por el volumen de corrientes con alto poder calorífico, no obstante se mantiene en el grupo H.

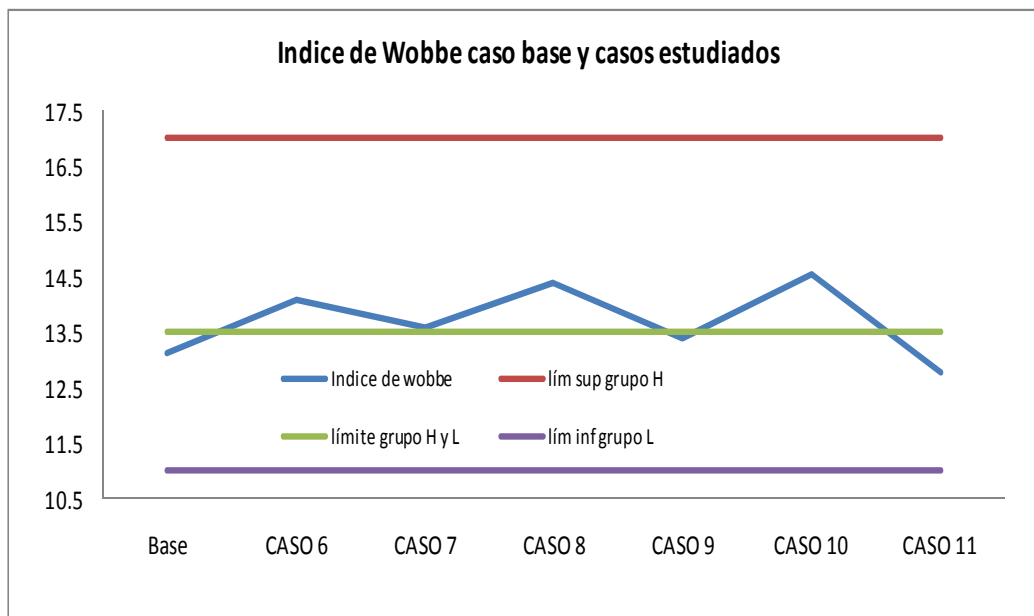
En la tabla 7 se resumen los resultados de las corridas realizadas con el software Pro II.

**Tabla No. 7. Descripción de las corrientes simuladas.**

COMPUESTOS	CONCENTRACIONES, (fracción molar)						
	Corrida Base	Corrida 6	Corrida 7	Corrida 8	Corrida 9	Corrida 10	Corrida 11
Metano	0,75	0,67	0,69	0,62	0,70	0,58	0,71
Etileno	0	0	0,05	0,05	0,07	0,05	0,01
Etano	0,02	0,01	0,06	0,05	0,01	0,10	0,02
Propileno	0,01	0,09	0,01	0,08	0,01	0,08	0,01
Propano	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01
i-Butano	0	0	0	0	0	0	0,0
n-Butano	0	0	0	0	0	0	0
i-Pentano	0	0	0	0	0	0	0
Dióxido de carbono	0	0	0	0	0	0	0
Oxígeno	0	0	0	0	0	0	0
Hidrógeno	0,16	0,14	0,14	0,13	0,15	0,12	0,20
Monóxido de carbono	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Nitrógeno	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,12	0,12
Sulfuro de hidrógeno	0	0	0	0	0	0	0
PROPIEDADES							
<b>DENSIDAD RELATIVA</b>	0.539	0.641	0.582	0.670	0.568	0.687	0.542
<b>PODER CALORÍFICO SUPERIOR, Wh/m<sup>3</sup> (n)</b>	9.64	11.27	10.35	11.75	10.11	12.04	9.40
<b>ÍNDICE DE WOBBE, kWh/m<sup>3</sup> (n)</b>	13.13	14.08	13.57	14.38	13.41	14.53	12.76

❖ En la corrida 11 se evaluó la variación de las propiedades de los combustibles con el desvío adicional de 3 MPCED de H<sub>2</sub>. El impacto sobre el Índice de Wobbe es negativo, disminuyendo aproximadamente en 1 punto, con relación al caso base. En la figura 7 se presentan los índices de Wobbe de los casos simulados.

Figura No. 7. Índice de Wobbe casos simulados.



### 6.3. VALIDACION DE LOS CASOS SIMULADOS CON DATOS DE LABORATORIO.

Los resultados de las corridas anteriores se validaron comparándolos con los resultados de datos reales de planta para el periodo enero 1- abril 20 de 2011.

Con base en los resultados de las muestras tomadas en planta y reportados por el laboratorio de la refinería de Barrancabermeja, se calculó el índice de Wobbe, partiendo de análisis por cromatografía, la densidad relativa y el poder calorífico de las mezclas de gases, con una composición similar a los casos simulados. Los resultados se muestran en la tabla 8.

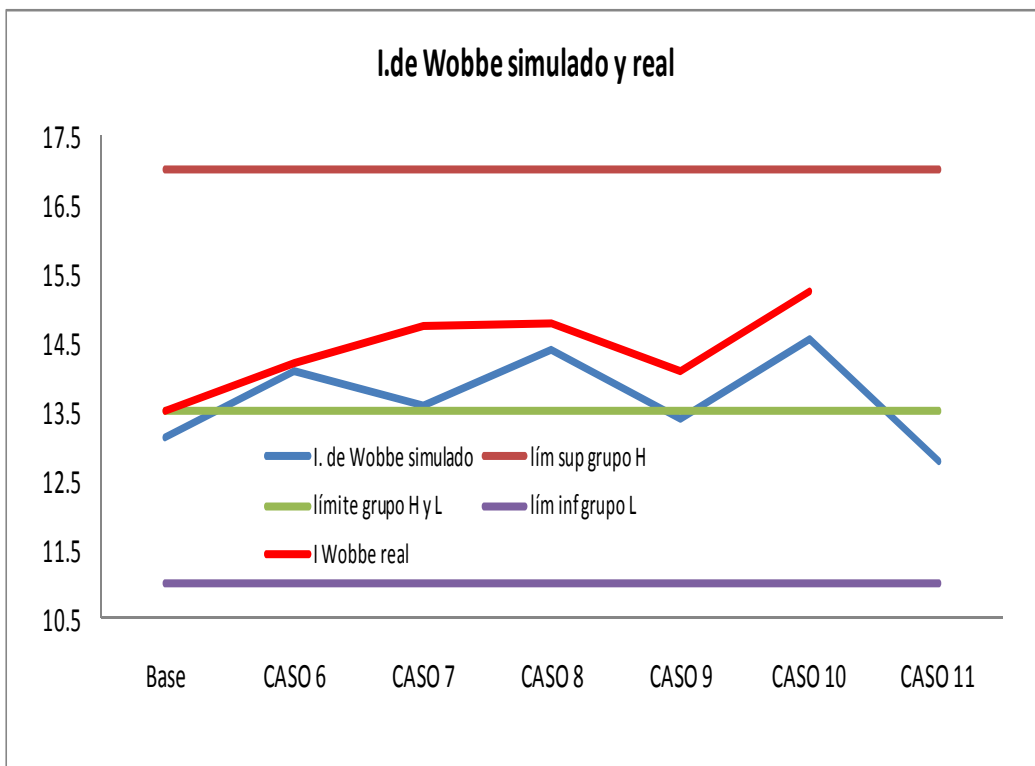
**Tabla No. 8 Propiedades del gas con base en datos de laboratorio.**

COMPUESTOS	CONCENTRACIONES, (fracción molar)					
	Corrida Base	Corrida 6	Corrida 7	Corrida 8	Corrida 9	Corrida 10
Metano	0,89	0,66	0,59	0,56	0,84	0,78
Etileno	0	0,07	0,12	0,19	0,04	0,07
Etano	0,01	0,05	0,13	0,03	0,04	0,09
Propileno	0,0	0,03	0,02	0,03	0,01	0,03
Propano	0,0	0,02	0,01	0,02	0,0	0,02
i-Butano	0	0	0	0	0	0
n-Butano	0	0	0	0	0	0
i-Pentano	0	0	0	0,01	0	0
Dióxido de carbono	0	0	0	0	0	0
Oxígeno	0	0	0	0	0	0
Hidrógeno	0,08	0,14	0,09	0,13	0,6	0,0
Monóxido de carbono	0,0	0,0	0,0	0,0	0,01	0,0
Nitrógeno	0,02	0,02	0,03	0,02	0,0	0,0
Sulfuro de hidrógeno	0	0	0	0	0	0
PROPIEDADES						
<b>DENSIDAD RELATIVA</b>	0.532	0.609	0.678	0.674	0.575	0.689
<b>PODER CALORÍFICO SUPERIOR, Wh/m<sup>3</sup> (n)</b>	9.85	11.07	12.12	12.12	10.68	12.64
<b>ÍNDICE DE WOBBE, kWh/m<sup>3</sup> (n)</b>	13.50	14.19	14.72	14.76	14.08	15.23

Para el caso 11, desvío máximo de hidrógeno, no se encontraron datos registrados en laboratorio, similares en composición al caso simulado, por lo que se optó por no reportarlo.

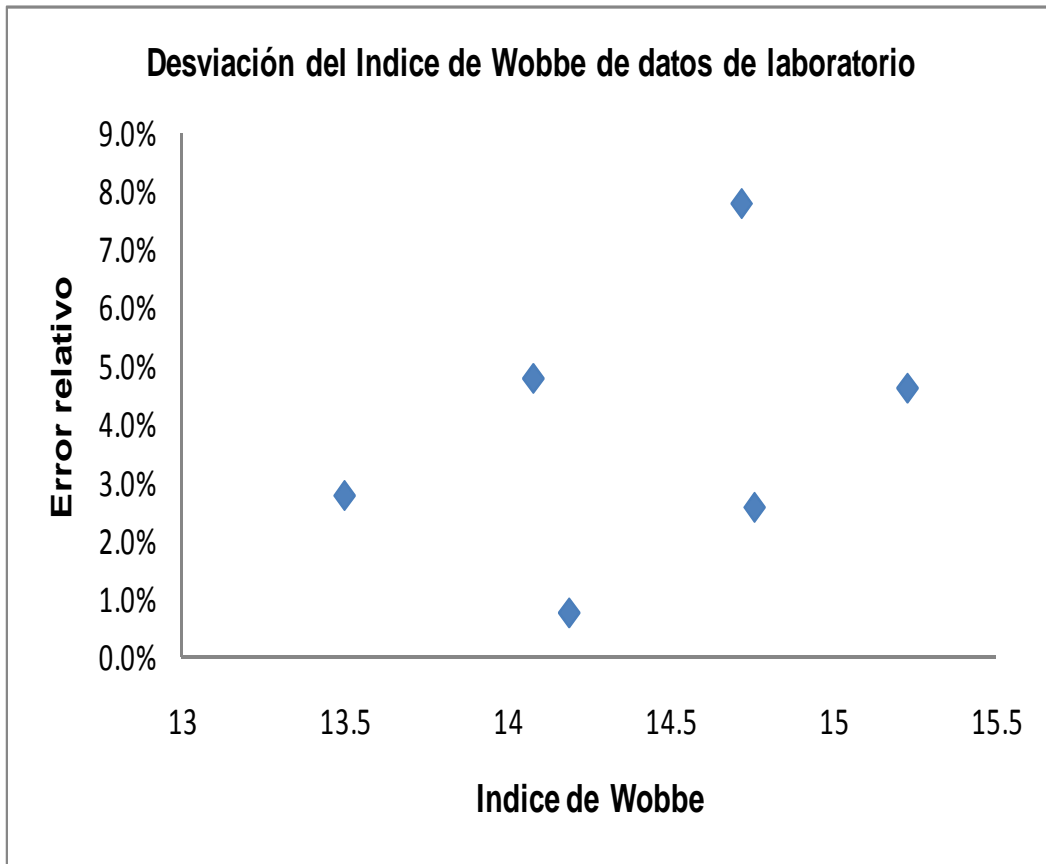
En la figura 8, se compara el índice de Wobbe calculado en el simulador con los datos promedios de composición y el calculado con los datos puntuales reales de laboratorio.

**Figura No. 8 Índice de Wobbe simulado y real.**



El error relativo de los datos calculados por el simulador y los calculados con los datos de laboratorio varía entre 0.8% para el caso 6 y 7.8% para el caso 7. El error relativo promedio de todos los casos es de 3.9%, lo cual se muestra en la figura 9.

Figura No. 9. Desviación índice de Wobbe de los datos de laboratorio.



Los resultados anteriores se encuentran en el rango encontrado en la literatura de  $\pm 4\%$  de desviación, (AGA Bulletin # 36 and Weaber Interchangeability methods).

En el Trabajo realizado por Loubar, Rahmouni, Le Corre y Tazerout [22], el error relativo de los datos experimentales obtenidos promedio fue de 0.28%.

---

## **6.4. EVALUACION DE LOS EFECTOS QUE GENERA LA VARIACION DEL INDICE DE WOBBE.**

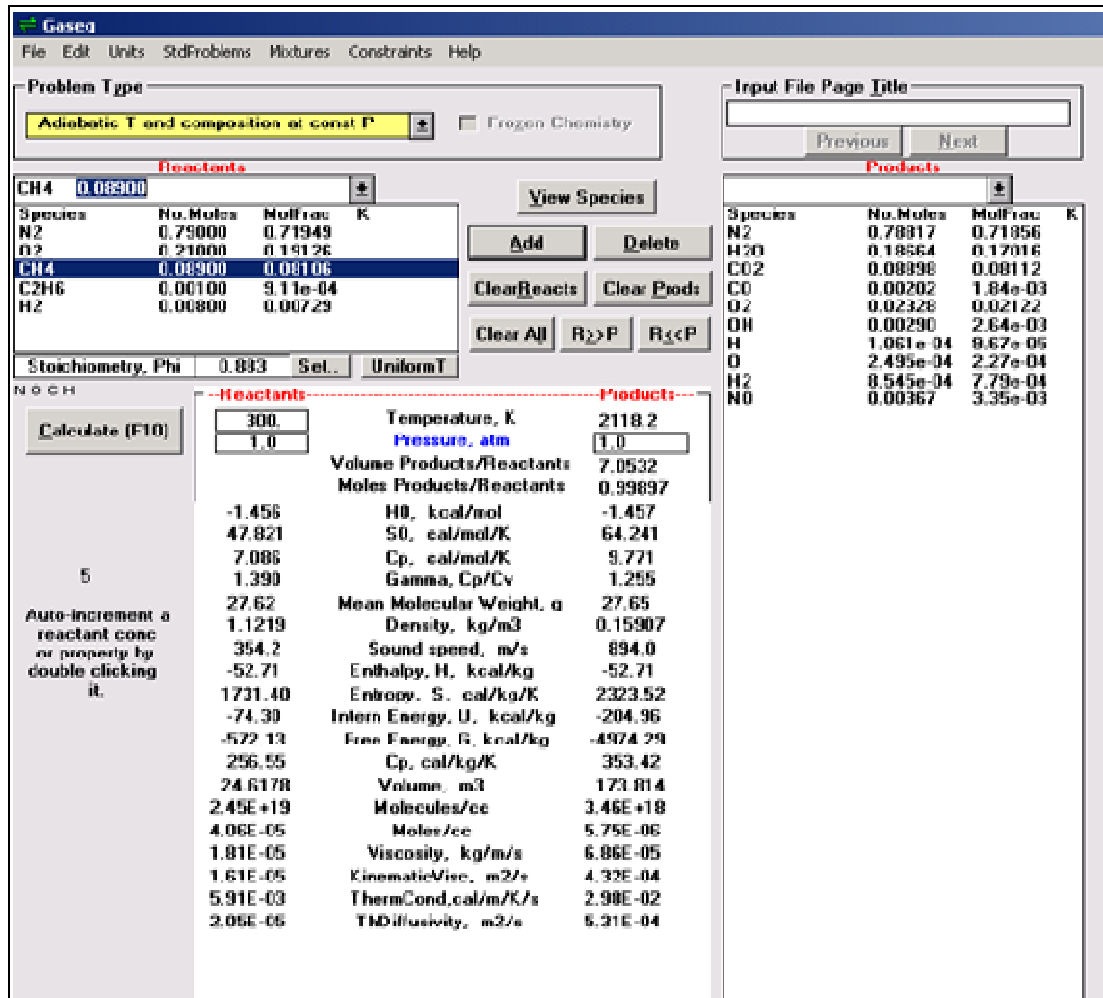
### **6.4.1 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TERMICA Y DEL IMPACTO ECONÓMICO**

La eficiencia térmica se calcula a partir de los datos estadísticos de Temperatura de chimenea y exceso de oxígeno, obtenidos de la planta, desechando los valores con errores de instrumentación o fuera de rango.

Para el cálculo de la temperatura de chimenea, se tomaron los valores promedio día, desde el 20 de agosto hasta el 20 de diciembre de 2010, de tres de los cuatro medidores de la temperatura ubicados en cada una de las dos chimeneas de los dos hornos de proceso de la planta, tomados como referencia, se descartó un medidor por tener valores fuera de rango. Para el cálculo del exceso de oxígeno se tomaron los valores promedios de cuatro medidores instalados en los hornos, para el periodo evaluado anteriormente. Posteriormente se correlacionaron los datos históricos del horno, dividiendo el poder calorífico promediado diario, entre el promedio de los tres medidores de la temperatura de chimenea diario para hallar la relación poder calorífico vs temperatura de chimenea diaria, cuyo promedio fue  $2.08 \text{ BTU/P}^3$  sobre temperatura de chimenea en  $^{\circ}\text{F}$ . Igual procedimiento se realizó para hallar la relación poder calorífico/ exceso de oxígeno, su promedio fue  $347.93 \text{ BTU/P}^3 / \% \text{ de exceso de aire}$ .

La Temperatura Adiabática se calculó para cada caso simulado, dependiendo de su composición, utilizando la herramienta Gaseq.

Figura No. 10 Herramienta Gaseq.



Con base en los datos anteriores se calculó la eficiencia térmica con la siguiente ecuación:

$$ET = 97 - \left( 100 \times \left( \frac{21}{21 - ExcO2} \right) \times \left( \frac{(T_{chtm} - 32)}{1.8} \right) / T_{adia} \right) \quad (22)$$

En donde:

ET: Eficiencia térmica, %.

97%: 100%-97%= 3% (pérdidas por radiación).

Exc O<sub>2</sub>: Exceso de oxígeno, %.

T chim: Temperatura de chimenea, °F.

T adia: Temperatura adiabática, °C.

Con la eficiencia térmica, se calculó el impacto económico por la variación del índice de Wobbe, entre los casos de mayores desvíos y el caso base, sin desvíos de corrientes de alto poder calorífico con la siguiente ecuación:

$$Ben\ Eco = \left( \frac{Efi.ce - Efi.cb}{Efi.cb} \right) \times CG \times PG \quad (23)$$

En donde:

Ben Eco: Beneficio económico, US\$/año.

Efi.ce: Eficiencia caso estudio, %.

Efi.cb: Eficiencia caso base, %.

CG: Consumo de gas, MBTU/Año.

PG: Precio del gas, US\$/MBTU.

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$Ben\ Eco = \left( \frac{83.7\% - 85.8\%}{85.8\%} \right) \times 967784 \times 4 = -94048 \frac{US\$}{año} . \quad (24)$$

Se obtuvo un impacto económico negativo de 94048 US\$/año, por lo que se deduce la necesidad de proponer un esquema diferente para el manejo de los diferentes desvíos.

Los resultados de las temperaturas adiabáticas, temperaturas de chimenea, exceso de oxígeno, eficiencia térmica y beneficio económico se registran en la tabla 9.

**Tabla No. 9 Eficiencia casos simulados**

CASO	TEMPERATURA ADIABATICA, °C	TEMPERATURA CHIMENEA, °F	EXCESO O <sub>2</sub> , %	EFICIENCIA TERMICA, %	FAMILIA	GRUPO
<b>BASE</b>	1845	403	2.41	85.8	II	L
<b>6</b>	1977	475	2.84	84.5	II	H
<b>7</b>	1949	435	2.60	85.5	II	H
<b>8</b>	2001	498	2.98	84.1	II	H
<b>9</b>	1937	425	2.54	85.7	II	H
<b>10</b>	2003	510	3.05	83.7	II	H
<b>11</b>	1826	374	2.24	86.6	II	L

Como conclusión de estas primeras corridas se tiene que las mezclas de gases no son perfectamente intercambiables, porque cambian del grupo L al grupo H de la segunda familia de gases.

El índice de Wobbe varía desde 12.76 en el caso simulado No 11, (Hidrógeno a la red de gas), hasta 14.53 en el caso con máximos desvíos de corrientes de alto poder calorífico, y la eficiencia de 86.58 a 83.72 % con un impacto económico de

---

94048 US\$/año. Las eficiencias se calcularon con los datos de la tabla 9 utilizando la ecuación 22 y el beneficio económico con la ecuación 24.

Estos resultados se apartan un poco de las conclusiones obtenidas de los trabajos de Amell, García y Burbano [12, 21-24], quienes afirman que la variación del índice de Wobbe no es significativa al cambiar gas natural con hidrógeno hasta un 15%.

De lo anteriormente mencionado se concluyó que el impacto del desvío de H<sub>2</sub> a la red de gas es significativo con desvíos menores de 15%.

En la tabla 10 se registran los flujos de las corrientes que componen los casos simulados. Las corrientes fijas son: Gas Natural, Gas Absorbadora y Gas de Tratamiento de Amina. Las corrientes variables son: Etano Etileno y Propano Propileno de Craqueo Catalítico, Etileno de Pirólisis e Hidrógeno, el cual varía en el caso 11.

Aunque los flujos de las corrientes variables son pequeños comparados con el gas natural, su impacto en las propiedades de combustión son significativas debido al mayor Poder Calorífico por unidad de volumen que poseen estas.

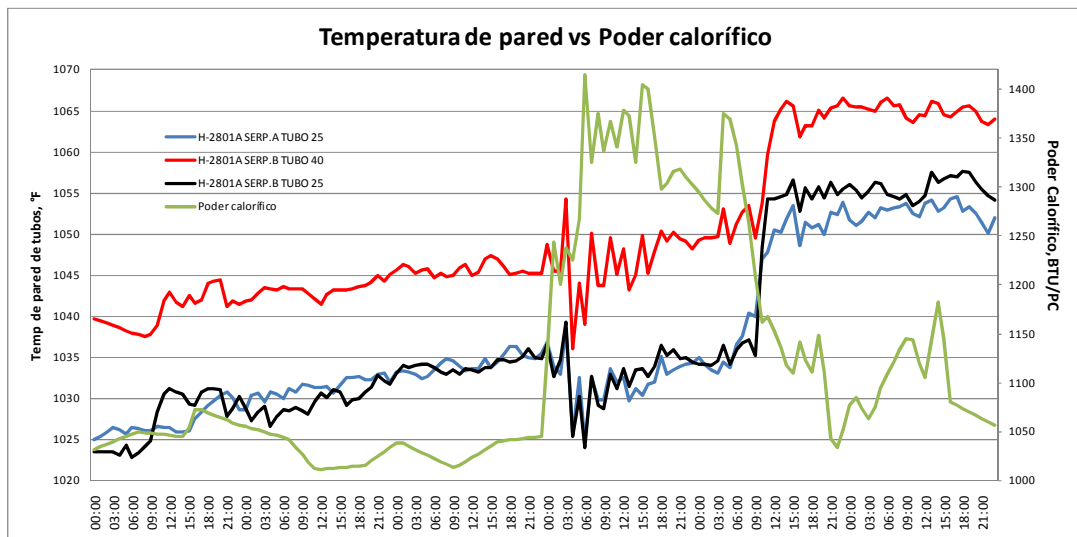
**Tabla No. 10. Flujos de las corrientes simuladas.**

CASOS	BASE	6	7	8	9	10	11
<b>CORRIENTES, KPCED</b>							
GAS NATURAL	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	15.8
C2C2=	-	-	2.9	2.9	-	2.9	-
C2=	-	-	-	-	1.9	1.9	-
C3C3=	-	3.2	-	3.2	-	3.2	-
H2	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	3.0
GAS ABSORBEDORA	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
GAS TRATAMIENTO AMINA	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2

### 6.4.2 EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL PODER CALORÍFICO EN LOS HORNOS.

Los principales efectos de la variación del poder calorífico y del índice de Wobbe en los hornos de proceso, se evidencian en las temperaturas de piel de tubos de los hornos, como lo muestra la figura 11. Existe una relación directa, al aumentar el poder calorífico, se incrementa la temperatura de piel de tubos.

**Figura No. 11.** Relación temperatura de pared de los tubos vs poder calorífico del gas.



En un estudio realizado por el Instituto Colombiano del Petróleo [23], se llegó a la conclusión que, la vida útil de los tubos, puede ser maximizada con la operación de los hornos, con una adecuada temperatura de piel de tubos.

## **6.5. ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACION DEL CONSUMO DE GAS COMBUSTIBLE.**

En esta parte se contempló el diseño de las modificaciones que permitieron mejorar la distribución del gas combustible.

Tomando como referencia los resultados de las corridas anteriores, se procedió a proponer escenarios en donde se minimice la alteración de las propiedades del gas de consumo de los hornos, como consecuencia de los desvíos de corrientes de alto poder calorífico. Para ello se procedió a especificar cuatro posibles escenarios, con la incorporación de un tambor mezclador, para amortiguar el efecto de los desvíos de las corrientes de alto poder calorífico en la corriente de salida hacia los consumidores finales.

### **6.5.1 DISEÑO DE UN EQUIPO AMORTIGUADOR DE LOS DESVÍOS DE C<sub>3</sub>C<sub>3</sub>= Y C<sub>2</sub>C<sub>2</sub>= A GAS COMBUSTIBLE.**

❖ Obtención de la información de proceso. Para comenzar el diseño del tambor mezclador separador, fue necesario determinar cuáles son los datos requeridos para el dimensionamiento, estos datos se registraron en la tabla 11.

**Tabla No. 11. Información requerida para el diseño de tambor.**

<b>P= 4.3 bar, T = 15°C</b>	<b>GAS</b>	<b>LIQUIDO</b>	<b>AGUA</b>
Flujo másico, Kg/h	6866	4.3	3.31
Peso Molecular	44.1	86	18
Densidad, Kg/m <sup>3</sup>	9	654	1000
Flujo Volumétrico, m <sup>3</sup> /h	760	0.007	0.003
Viscosidad, cP	0.009	0.29	1
Factor Z	1	-	-

❖ Definición del tipo de separador.

Se escogió un separador vertical debido a que la relación gas-líquido es alta y porque ocupa poco espacio horizontal. En los separadores verticales, se debe mantener un diámetro mínimo con el fin de permitir que las gotas de líquido se separen del movimiento vertical del gas. El requerimiento de tiempo de retención de líquido específica una combinación de diámetro y altura del volumen de gas. Cualquier diámetro mayor que el mínimo requerido para la capacidad del gas puede ser escogido.

❖ Localización de los criterios de diseño.

Se consultaron las Design Practices de Exxon sección XIV- D, la International Practice de Exxon, IP5-0-0y el Manual de Diseño PDVSA-MDP-03-S-05, las secciones 4.2, Decantación de fases líquidas; 4.6 Consideraciones de Diseño para algunos servicios específicos, y el Manual PDVSA-MDP-03-S-03, para identificar

criterios de diseño como a la configuración del tambor, tiempos de residencia, L/D, velocidad permisible de vapor.

❖ Dimensionamiento del tambor a través del cálculo de :

-Velocidad crítica de vapor.

-Área de flujo de vapor requerida disponible.

-Relación L/D

-Volumen de retención de líquido en el tambor.

-Diseño/especificación de internos que afecten el diseño de proceso del recipiente.

-Volumen del tambor.

❖ Definición y dimensionamiento de las boquillas de entrada y de salida.

❖ Cálculo de la caída de presión del equipo.

### Niveles/tiempos de residencia.

Tabla No. 12. Identificación de los niveles en un recipiente.

Sigla en español	Descripción	Sigla en inglés
NAAL	Nivel alto-alto de líquido	HHLL
NAL	Nivel alto de líquido	HLL
NNL	Nivel normal de líquido	NLL
NBL	Nivel bajo de líquido	LLL
NBBL	Nivel bajo-bajo de líquido	LLLL

---

### **Volumen de operación.**

Es el volumen de líquido existente entre NAL y NBL, se fija de acuerdo a los requerimientos del proceso para asegurar un control adecuado, continuidad de las operaciones durante perturbaciones operacionales, y para proveer suficiente volumen de líquido para una parada ordenada y segura cuando suceden perturbaciones mayores de operación.

### **Tiempo de residencia de operación.**

Es el tiempo correspondiente en el cual el flujo de líquido puede llenar el volumen de operación, lo que realmente se indica en cuántos minutos deben transcurrir entre NAL Y NBL.

### **Tiempo de respuesta del operador**

Es el tiempo que gasta el operador en responder cuando suena una alarma de nivel en el panel y resolver la perturbación operativa que originó la alarma, antes que otros sistemas automatizados originen paradas seguras de equipos o de la planta. Se usará como criterio que el tiempo de respuesta de un operador es de cinco minutos.

### **Volumen de emergencia.**

Es el volumen adicional que corresponde al líquido que debe satisfacer el llamado tiempo de respuesta o de intervención del operador. Cuando se tengan

interruptores y/o alarmas de NAAL o NBLL, se tendrán 10 minutos adicionales de tiempo de residencia de líquido, a lo cual corresponde un volumen de líquido de emergencia de 10 minutos del máximo flujo de líquido.

Con el procedimiento descrito en el anexo 1, se procedió a calcular el tambor acumulador con las dimensiones incluidas en la tabla 13.

**Tabla No. 13 Dimensiones del tambor acumulador.**

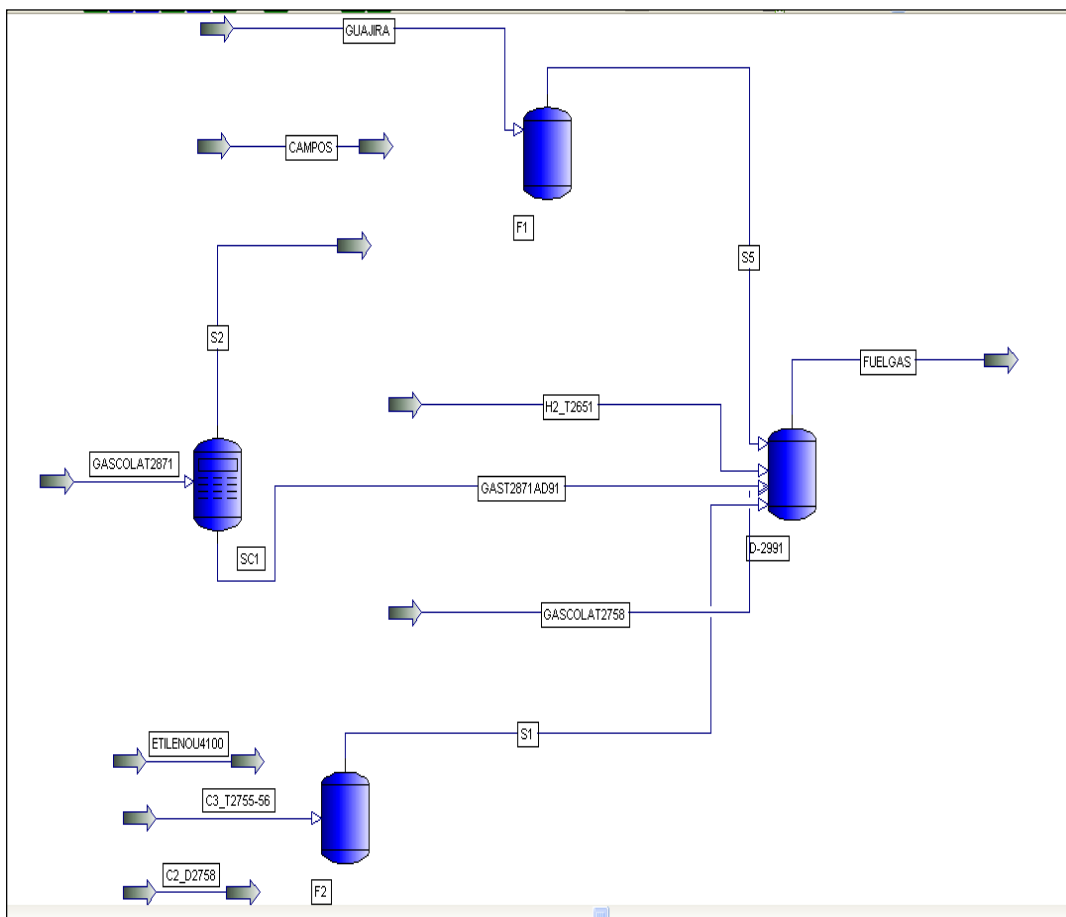
<b>Dimensión</b>	
Diámetro interno	2438 mm
Longitud efectiva	6096 mm
Capacidad	32.25 m <sup>3</sup>
Diámetro boquilla entrada gas	14"

### **6.5.2 SIMULACION DE LOS CASOS PROPUESTOS.**

Con el objetivo de disminuir el impacto negativo que generan los desvíos de corrientes de alto poder calorífico en el pool de gas combustible, se simularon los casos de desvíos anteriormente vistos, llevando las corrientes inicialmente a un tambor cuyo objetivo es disminuir la variabilidad de las propiedades de la combustión, mediante el almacenamiento de la corriente, para luego realizar desvíos controlados.

El caso 12, toma como base el caso 6, recibo de 2 KBD de C<sub>3</sub>C<sub>3</sub>= en el tambor diseñado anteriormente, para luego dosificarlo en un periodo aproximado de 8 horas que dura en promedio la perturbación operacional en la unidad, y lo dosifica a una velocidad de 1 KBD. En la figura 12 se detalla el diagrama de flujo del proceso planteado. El índice de Wobbe resultante es 13.46 inferior al 14.08 del caso 6.

Figura No. 12. Diagrama de flujo caso 12 en Pro II



---

El caso 13 toma como base el caso 7, recibo de 2 KBD de C<sub>2</sub>C<sub>2</sub>= en un periodo aproximado de 8 horas que dura en promedio la perturbación operacional en la unidad, y lo dosifica a una velocidad de 1 KBD.

Los diagramas de proceso de los casos simulados 13,14 y 15, son similares al diagrama del caso 12.

El índice de Wobbe para este caso es 13.26 inferior al 13.57 del caso inicial No 7.

El caso 14 toma como base el caso 9, recibo de 1.77 KBD de C<sub>3</sub>C<sub>3</sub>= en un periodo aproximado de 8 horas que dura en promedio la perturbación operacional en la unidad, y lo dosifica a una velocidad de 1 KBD.

El índice de Wobbe es 13.16 vs 13.41 del caso 9 inicial.

El caso 15 toma como base el caso 10, recibo de 2 KBD de C<sub>3</sub>C<sub>3</sub>=, C<sub>2</sub>C<sub>2</sub>= de la planta UOP1 y C<sub>2</sub>C<sub>2</sub>= de la planta Etileno 2 en un periodo aproximado de 8 horas que dura en promedio la perturbación operacional en la unidad, y lo dosifica a una velocidad de 1 KBD.

El índice de Wobbe es 13.33 vs 14.53 del caso 10.

En la tabla 14 se resumen los resultados de las corridas anteriores; se muestran los flujos de cada una de las corrientes simuladas en el caso base y en los casos del 12 al 15.

**Tabla No. 14. Resultados de simulaciones caso 12-15**

COMPUESTOS	CONCENTRACIONES, (fracción molar)				
	Corrida Base	Corrida 12	Corrida 13	Corrida 14	Corrida 15
Metano	0,75	0,71	0,72	0,74	0,72
Etileno	0	0	0,02	0,01	0,02
Etano	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02
Propileno	0,01	0,04	0,01	0,01	0,02
Propano	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
i-Butano	0	0	0	0	0
n-Butano	0	0	0	0	0
i-Pentano	0	0	0	0	0
Dióxido de carbono	0	0	0	0	0
Oxígeno	0	0	0	0	0
Hidrógeno	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Monóxido de carbono	0,01	0	0	0,01	0,01
Nitrógeno	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Sulfuro de hidrógeno	0	0	0	0	0
PROPIEDADES					
<b>DENSIDAD RELATIVA</b>	0.539	0.576	0.555	0.543	0.563
<b>PODER CALORÍFICO SUPERIOR, kWh/m<sup>3</sup> (n)</b>	9.64	10.22	9.88	9.70	10.0
<b>ÍNDICE DE WOBBE, kWh/m<sup>3</sup> (n)</b>	13.13	13.46	13.26	13.16	13.33

## 6.6. BENEFICIOS DE LA IMPLEMENTACION

A continuación se calcula el beneficio económico y financiero de la implementación del tambor dosificador.

### 6.6.1 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA NETA.

La eficiencia térmica se calculó, con el procedimiento mencionado en el numeral 6.3.1. Para los casos propuestos, 12, 13 y 14, los resultados se muestran en la tabla 15

**Tabla No. 15 Eficiencia Térmica casos propuestos.**

CASOS	PODER CALORIFICO, BTU/PC	TEMPERATURA ADIABATICA, °F	TEMPERATURA DE CHIMENEA, °F	EXCESO DE O2, %	EFICIENCIA TERMICA, %
CASO 12	892	3474	429	2.6%	85.4
CASO 13	861	3398	414	2.5%	85.6
CASO 14	844	3366	406	2.4%	85.8

### 6.6.2. CÁLCULO DEL BENEFICIO ECONÓMICO.

Con base en la eficiencia promedio de los casos simulados inicialmente, eficiencia base, y la eficiencia de los casos propuestos, eficiencia caso estudio, se calcula el beneficio económico que genera la propuesta de incluir un tambor dosificador, con la ecuación 23.

$$Ben\ Eco = \left( \frac{87.8\% - 86.9\%}{86.9\%} \right) \times 967784 \times 4 = 38818 \frac{US\$}{año} . \quad (23)$$

A manera de conclusión se obtuvo que el beneficio se genera por la inestabilidad operacional que surge al incluir las corrientes con Índice de Wobbe alto, la llama aumenta, creando desprendimiento, golpeando los tubos cercanos al quemador y aumentando su temperatura. A partir del anterior resultado, se toma la decisión de construir el tambor dosificador, para lo cual se realiza una valoración en el siguiente numeral.

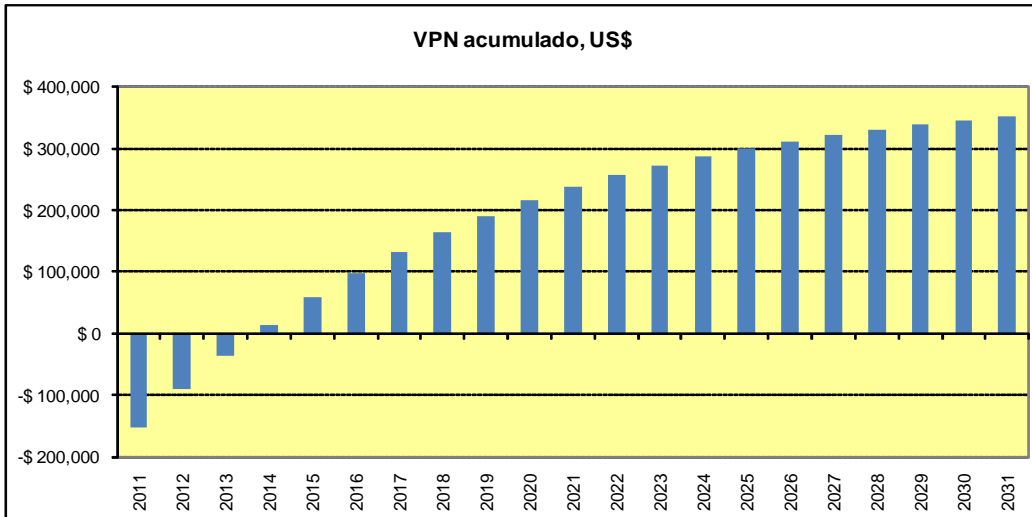
### 6.6.3. EVALUACION FINANCIERA DEL NUEVO TAMBOR.

Según los datos obtenidos de la planta, con la implementación del tambor, las corridas entre los decoquizados se extenderían de 180 a 183 días, con un beneficio económico de 60397 US\$/año. La inversión en el tambor dosificador es

de 152632 US\$, los cuales se recuperan al cuarto año de la inversión, como se muestra en la tabla 16.

**Tabla No. 16. Evaluación financiera del tambor dosificador.**

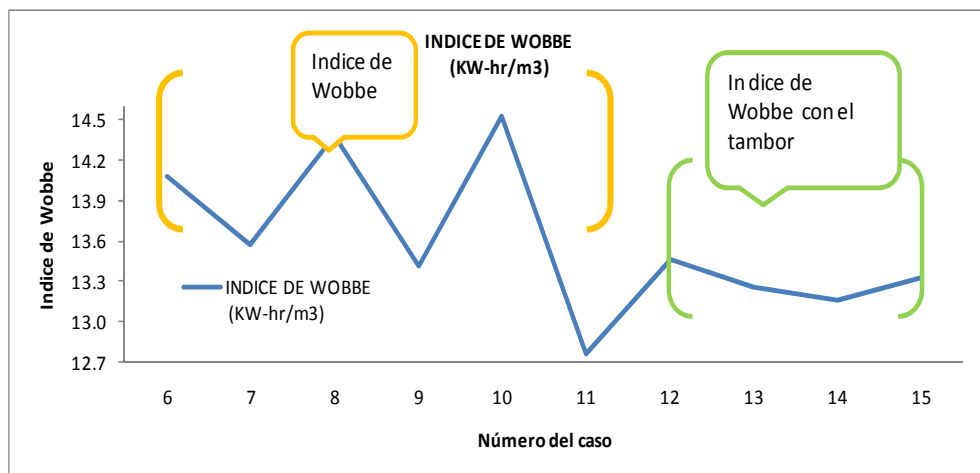
EVALUACION TAMBOR									
Moneda	US\$	0	1	2	3	4	5	6	7
Año		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Tasa de Descuento	12%	1.00	0.89	0.80	0.71	0.64	0.57	0.51	0.45
<b>INVERSIONES</b>		\$ 152,632							
DEPRECIACION	10		\$ 15,263	\$ 15,263	\$ 15,263	\$ 15,263	\$ 15,263	\$ 15,263	\$ 15,263
<b>FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO</b>									
<b>INGRESOS</b>		\$ 0	\$ 99,215	\$ 99,215	\$ 99,215	\$ 99,215	\$ 99,215	\$ 99,215	\$ 99,215
AHORRO EN DECOQUIZADO									
HORNOS DE VR2			\$ 60,397	\$ 60,397	\$ 60,397	\$ 60,397	\$ 60,397	\$ 60,397	\$ 60,397
EFICIENCIA DE LA COMBUSTION			\$ 38,818	\$ 38,818	\$ 38,818	\$ 38,818	\$ 38,818	\$ 38,818	\$ 38,818
<b>COSTO MANTENIMIENTO</b>			\$ 624	\$ 699	\$ 783	\$ 877	\$ 982	\$ 1,100	\$ 1,232
COSTOS ADICIONALES			\$ 624	\$ 699	\$ 783	\$ 877	\$ 982	\$ 1,100	\$ 1,232
<b>UTILIDAD OPERACIONAL</b>		\$ 0	\$ 83,327	\$ 83,252	\$ 83,168	\$ 83,075	\$ 82,969	\$ 82,851	\$ 82,719
IMPUESTOS 35%		\$ 0	\$ 29,165	\$ 29,138	\$ 29,109	\$ 29,076	\$ 29,039	\$ 28,998	\$ 28,952
<b>UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTOS</b>		\$ 0	\$ 54,163	\$ 54,114	\$ 54,060	\$ 53,998	\$ 53,930	\$ 53,853	\$ 53,768
DEPRECIACION		\$ 0	\$ 15,263	\$ 15,263	\$ 15,263	\$ 15,263	\$ 15,263	\$ 15,263	\$ 15,263
<b>FLUJO DE CAJA</b>		-\$ 152,632	\$ 69,426	\$ 69,377	\$ 69,323	\$ 69,262	\$ 69,193	\$ 69,117	\$ 69,031
FLUJO DE CAJA DESCONTADO		-\$ 152,632	\$ 61,987	\$ 55,307	\$ 49,343	\$ 44,017	\$ 39,262	\$ 35,017	\$ 31,226
<b>FDC DESCONT. ACUMULADO</b>		-\$ 152,632	-\$ 90,645	-\$ 35,337	\$ 14,005	\$ 58,022	\$ 97,284	\$ 132,301	\$ 163,527
<b>TIR</b>	29.3%								
VPN									

#### 6.6.4 ESTABILIDAD DEL ÍNDICE DE WOBBE

Con la implementación del tambor, el índice de Wobbe se estabiliza, mejorando la operación de los equipos aguas abajo del sistema, como se aprecia en la figura 13

**Figura No. 13. Índice de Wobbe casos simulados.**

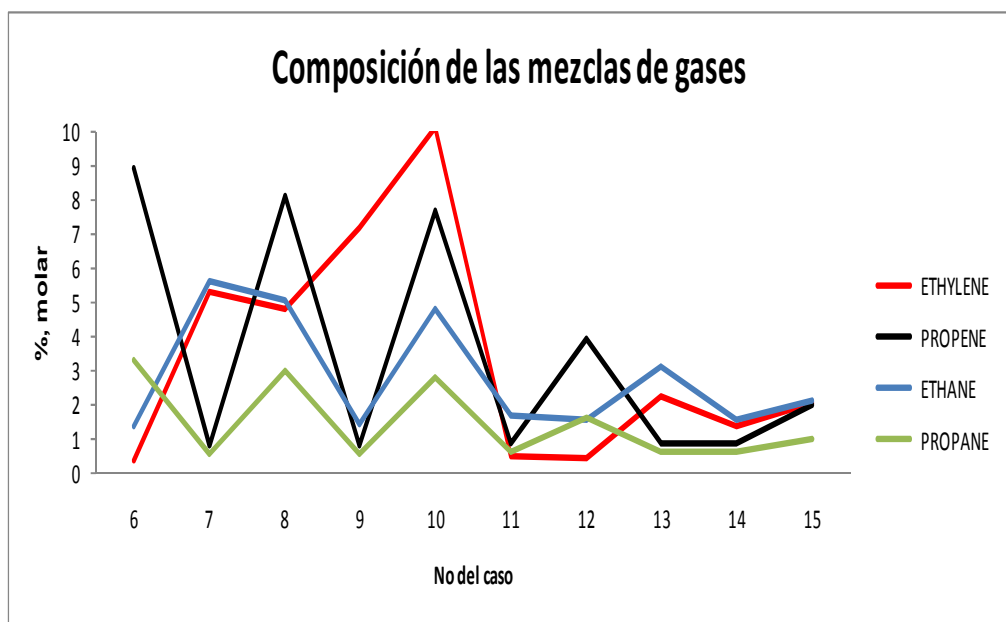


Hay una disminución en la variabilidad del índice, lo que se traduce en estabilidad en la operación y eficiencia en la combustión.

La anterior conclusión se confirma con el cambio de la composición de la corriente de salida hacia los quemadores, (ver figura 14), a partir de la corrida 12, estas corrientes se dosifican desde el nuevo tambor con el propósito de garantizar una composición del gas estable con el tiempo.

Las corrientes de Etano Etileno y Propano Propileno, que en el caso inicial tenían una composición de hasta 11% y 12% molar respectivamente, pasan a una composición de 5% y 6 %.

Figura No. 14 Composición de la mezcla de gases para los casos simulados.



---

## 7. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Las mezclas de gases naturales con gases de refinería que se utilizan como combustibles de hornos y calderas, que se realizan en las refinerías cuando se tiene anomalía operacional, generalmente no son intercambiables. Cuando las mezclas superan el 6% de composición de Etano- Etileno y 6% de Propano Propileno, el Índice de Wobbe tiene un comportamiento inestable.

Este trabajo propone una alternativa con el fin de disminuir los efectos negativos de la no intercambiabilidad. Al incluir el tambor, el índice de Wobbe se estabiliza, disminuyendo la desviación estándar de 0.67 a 0.13, retornando la inversión al cuarto año de entrar en servicio, con un beneficio económico por mejoramiento de la eficiencia térmica de 38818 US\$/año.

Se recomienda para trabajos futuros, determinar las principales propiedades de combustión de mezclas gas natural y otros combustibles gaseosos, mediante la utilización de software de simulación de fenómenos cinéticos, térmicos y fluidodinámicos, que represente rigurosamente el comportamiento de los quemadores, la eficiencia térmica de la combustión y las emisiones de contaminantes. Posteriormente se debe hacer uso de la planta piloto de combustión, para comprobar los resultados obtenidos en los modelos numéricos.

---

Estos dos trabajos serán el punto de partida para nuevos trabajos como, El Desarrollo de una Metodología para lograr la Ecoeficiencia de la Combustión de los Gases Residuales de Refinería, integrando aspectos de seguridad de los procesos y un trabajo concerniente a la integridad de los equipos: Metodología de la Evaluación de los Mecanismos de daño Ocasionados por la Combustión en Hornos de Proceso de la Industria de Refinación y Petroquímica.

---

## BIBLIOGRAFÍA

Acevedo Alvarez, Carlos Alberto. Estudio sobre la influencia de la composición química de los principales gases naturales colombianos sobre el rendimiento de la conversión y el desempeño mecánico de los motores a gas en Colombia.. (Especialización en combustibles gaseosos). Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Mecánica. p. 9-15. Medellín. (2003).

Amell A., Andrés., et al. Tecnología de la Combustión de Gases y Quemadores Atmosféricos de Premezcla. Medellín, Universidad de Antioquia. Capítulo 3 p. 1. (1996)

American Gas Association. AGA. *Interchangeability of Other Fuel Gases with Natural Gases*. Reseach Bulletin #36.

Anward Ul- Hamid. Failure analysis of furnace radiant tubes exposed to excessive temperature. En: Engineering Failure Analysis. 13. 2006. 1005-1021..

C.J. Muller, I.K.Craig, and N.L.Ricker, Modelling, validation, and control of an industrial fuel gas blending system. En: Journal of Process Control (2011), doi:10.1016/j.jprocont.2011.04.001.

Cámara De Empresas Argentinas De Gas Licuado. En: ¿Qué es el GLP? [en línea]. Disponible en <[http://www.cegla.org.ar/el\\_glp/](http://www.cegla.org.ar/el_glp/)>.[consultado 18 de Abril 2010]

Castellanos Fernandez, Julián., et al. Fundamentos del proceso de IMP de reducción de viscosidad. En: Revista del Instituto Mexicano del Petróleo. Vol XXIV, No. 3; p. 16. (1992)

Chang-Eon Lee \*, Cheol-Hong Hwang 1, Sung-Chang Hong. Proposal and validation of a new type of flame stability diagram for partially premixed flames

Cortés, J.; Hernández, J. Validación de la intercambiabilidad de gases en el contexto colombiano: Calentadores Instantáneos de Agua. (Especialización en gases combustibles). Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. p. 99-102. Medellín (2003).

Daniel Rogers. Gas Interchangeability and its effects on US imports plans. En: Pipeline & Gas journal. August 2003. Pag 18.

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

Dubois, R. Introducción a la refinación del petróleo, EUDEBA, 1ª edición Buenos Aires, p. 181. (2006).

García Posada Jorge Mario. Análisis comparativo de las propiedades de combustión de las mezclas metano hidrógeno con respecto al metano. En: Ingeniería y Desarrollo. Número 20. Julio- Diciembre 2006

Gas Natural Sdg, S.A. Manual de instalaciones receptoras. En: Manual de instalaciones receptoras. [en línea] p. 15-16. Disponible en [www.prosener.com/Manuales%20Gas%20Natural/Manual%20de%20Instalaciones%20Receptoras.pdf](http://www.prosener.com/Manuales%20Gas%20Natural/Manual%20de%20Instalaciones%20Receptoras.pdf)>.

Gómez, R. Evaluación Muestras de Tubería Viscorredutora II. H-2801. (2007).  
Josten, M. Programme Committee D1: Lng Quality & Interchangeability 2006-2009 Triennium Work Report. October 2009.

Larson, D. and Scott, M. The Combustion Interchangeability Of Natural And Substitute Gases. Institute of Gas Technology, Chicago, Illinois. En: Society of Petroleum Engineers of AIME. (1973)

Loubar, K.; Rahmouni, C; Le Corre, O.; Tazerout, M. A combustionless determination method for combustion properties, of natural gases, (2007)

Meza Méndez, Carlos Alberto. Análisis de la eficiencia en la combustión de gas de refinación en hornos industriales tipo cabina, mediante estudio de su comportamiento real. Bucaramanga. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería química. (2002)

Morales, M; et al. Optimización de la combustión en calderas y hornos industriales: Tecnología ABACO para la mejora del rendimiento y de las emisiones generadas. En: Ingeniería Química. Vol 36, N° 413; p. 156-161. (2004).

Natural Gas Business Management Specialization. Thermodynamics and Transfer Phenomena Department. Simón Bolívar University. Venezuela.

NGC Interchangeability Work Group. White paper on natural gas Interchangeability and non-combustion end use. En: American Gas Association. p. 3. Disponible en <[http://www.aga.org/NR/rdonlyres/F5F63D96-7282-4405-93B6-B79FCFD441E\\_0/0/0502NGINTERCHANGE.pdf](http://www.aga.org/NR/rdonlyres/F5F63D96-7282-4405-93B6-B79FCFD441E_0/0/0502NGINTERCHANGE.pdf)> [consultado 21 de Abril 2010]

---

Rahmounia, C; Tazeroutb, M; Le Corre, O. Determination of the combustion properties of natural gases by pseudo-constituents. Ecole des Mines de Nantes France. available online 28 February 2003.

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

School of Mechanical Engineering, Inha University. Republic of Korea. journal homepage: [www.elsevier.com/locate/fuel](http://www.elsevier.com/locate/fuel). Available online 26 July 2008

Shak,K, Aker solutions US, INC, Houston Texas. Improve gas Interchangeability. En: Hidrocarbon Processing. 01.05.2008

Twu, Chorong H., et al. Selection of equations of state models for process simulator. En: Simulation Sciences, Inc. USA;14 p (2007)

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

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

Williams, T. White Paper on Natural Gas Interchangeability And Non-Combustion End Use. Xcel Energy. AGA. (2006).



---

## ANEXOS

## ANEXO 1

### PROCEDIMIENTO DEL CÁLCULO DEL TAMBOR ACUMULADOR.

1. Cálculo de la altura mínima permisible entre NBLL y el fondo del tambor.

La distancia mínima desde el nivel bajo-bajo de líquido hasta la boquilla de salida es de 230 mm. Se aplica este criterio debido a que el flujo de líquido en la carga es pequeño.

2. Cálculo de la velocidad permisible de flujo de vapor, es una velocidad calculada empíricamente que se utiliza para asegurar que la velocidad superficial de vapor, a través del tambor separador, sea lo suficientemente baja para prevenir un arrastre excesivo de líquido, la velocidad crítica viene definida por la ecuación 24:

$$V_c = F_{21} \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_{Gas}}{\rho_{Gas}}} \quad (26)$$

**Donde :**

$V_c$ = Velocidad crítica, m/s, (pie/s).

$\rho_L$ = Densidad del líquido a condiciones de operación, Kg/m<sup>3</sup>

$\rho_{GAS}$ = Densidad del vapor a condiciones de operación, Kg/m<sup>3</sup>

$F_{21}$ = Factor que depende de las unidades usadas, 0.048 m/s, (0.157 pie/s).

3. Cálculo del área transversal requerida  $A_v$ , para el flujo de vapor y el diámetro del recipiente.

El área transversal para el flujo de vapor  $A_v$ , requerida para satisfacer los criterios de velocidad permisible se calcula con la ecuación 25:

$$A_v = \frac{Q_v}{V_v} \quad (27)$$

Donde

$A_v$ = Área de sección transversal para el flujo de vapor, m<sup>2</sup>.

$Q_v$ = Flujo de descarga de vapor, m<sup>3</sup>/s.

$V_v$ = Velocidad de vapor permisible en el recipiente, m/s.

El diámetro se obtiene del valor de  $A_v$ :

$$D' = \sqrt{\frac{4A_v}{\pi}} \quad (28)$$

Y luego se redondea al diámetro comercial, por arriba, más cercano (D).

### **Cálculo de los volúmenes de operación y de emergencia**

Volumen de operación/Tiempo de residencia: Igual o mayor que el volumen equivalente a 15 minutos de flujo de condensado.

El volumen de retención de operación de líquido, entre el NAL y el NBL se obtiene:

$$V_{r1} = Q_L \cdot t_r. \quad (29)$$

El volumen de retención de líquido por tiempo de respuesta del operador al accionarse una alarma se obtiene multiplicando el flujo de alimentación líquida por

el tiempo de respuesta, el cual es 5 min, desde NAL hasta NAAL y 5 min más desde NBL hasta NBBL:

$$V_{r2} = Q_L \cdot 600s \quad (30)$$

El volumen de retención máximo de líquido ( $V_r$ ), entre el NAAL y el NBBL:

$$V_r = V_{r1} + V_{r2}. \quad (31)$$

Cálculo de la altura del líquido entre NAAL y NBBL.

Conocido  $V_r$ , la altura de líquido entre NAAL y NBBL:

$$h_{NBBL-NAAL} = \frac{V_r}{\frac{\pi \left(\frac{D}{F_{25}}\right)^2}{4}} \quad (32)$$

$F_{25}$ = factor, 1000 en SI y 12 en unidades inglesas

Cálculo de la altura desde el fondo del tambor y el NAAL.

$$h_{fco-NAAL} = h_{NBBL-NAAL} + h_{NBLL} \quad (33)$$

Fijación de la altura desde NAAL hasta la boquilla de entrada:

$$h_{NBLL-boq=dp} \quad (34)$$

### **Cálculo de la boquilla de entrada.**

Los tambores separadores se diseñan normalmente con régimen de flujo anular/rocío en la tubería de entrada. Se debe evitar el flujo tapón el flujo tipo burbuja en la tubería de entrada de tambores separadores verticales. Estos regímenes de flujo resultan en arrastre excesivo de líquido y vibraciones. Si estos regímenes de flujo no se pueden evitar, el arrastre de líquido se puede minimizar con un distribuidor de ranuras.

### **Boquillas de proceso en general.**

A continuación se presentan los criterios para diseño de las boquillas de entrada y salida.

Salida de vapor: velocidad menor que  $7.32 \sqrt{\rho_G}$  m/s. (35)

Alimentación bifásica en tambores sin malla: velocidad de la mezcla menor que

$$5.49 \sqrt{\rho_L} \text{ m/s. (36)}$$

Alimentación bifásica en tambores con malla: velocidad de la mezcla menor que

$$73.2 \sqrt{\rho_M} \text{ m/s. (37)}$$

Donde  $\rho_M = (1+\lambda)\rho_G + \lambda\rho_L$  (37)

$$\lambda = \frac{Q_L}{Q_L + Q_V} \text{ (38)}$$

$\lambda$  = Fracción volumétrica de líquido alimentado al tambor.

$\rho_G$  = Densidad del vapor a condiciones de operación, Kg/m<sup>3</sup>

$\rho_L$  = Densidad del líquido a condiciones de operación, Kg/m<sup>3</sup>.

$\rho_M$  = Densidad de la mezcla a condiciones de operación, promediada en volumen Kg/m<sup>3</sup>.

Cálculo de la velocidad real de la mezcla a la entrada  $V_S$ :

$$V_S = \frac{F_{20} Q_M}{\pi d_p^2} \quad (39)$$

De acuerdo al bajo flujo de líquido en la alimentación al tambor, 7.6 Kg/m<sup>3</sup>, se descarta el uso de mallas separadoras de gotas.

#### **Cálculo el criterio de máxima velocidad en la boquilla de acuerdo a:**

Arrastre en la superficie del líquido.

A continuación se presentan los criterios para estimar la velocidad máxima de mezclas a la salida de la boquilla de entrada, de manera que no ocurra arrastre desde la superficie del líquido:

$$V_E = \frac{F_3 \sigma}{f \mu G \left[ \frac{d_p}{h-0.5 d_p} \right]^{0.5} - \left[ \frac{\rho_G}{\rho_L} \right]^{0.5}} \quad \text{para } h > 2.5 d_p \quad (40)$$

$V_E$  = **Velocidad máxima de la mezcla la salida de la boquilla de entrada.**

$f$  = Factor de disipación de la velocidad del chorro, es una función de la distancia  $X$ , (la cual es una distancia entre la boquilla de entrada y la superficie de choque) y del diámetro de la boquilla  $d_p$ .

$h$ = Distancia desde la parte inferior de la boquilla de entrada al nivel alto alto de líquido (NAAL).

$d_p$ = diámetro de la boquilla de entrada.

$d_h$ = diámetro del orificio.

$\mu_G$ = Viscosidad del vapor a condiciones de operación, mPa.s

$\rho_G$ = Densidad del vapor a condiciones de operación, Kg/m<sup>3</sup>.

$\rho_L$ = Densidad del líquido a condiciones de operación, Kg/m<sup>3</sup>.

$\sigma$ = Tensión superficial del líquido a condiciones de operación, mN/m.

$F_3$ = Factor que depende de las unidades:  $1.1 \times 10^{-4}$ .

Cálculo de las boquillas de salida de gas y líquido.

Fijación de la altura desde la boquilla de entrada y la línea tangente superior ( $h_{boq-tan}$ )

Para tambores verticales sin entrada tangencial y sin malla, fijar la boquilla con una distancia mínima de 920 mm o 0.5 veces el diámetro del tambor (lo que sea mayor) entre la boquilla de entrada y la línea tangente superior.

**Cálculo de la altura efectiva de separación del tambor.**

Es la altura de tambor requerida para que suceda la separación vapor/gas-líquido, y se puedan obtener los volúmenes requeridos de líquido, tanto de operación como de emergencia

$$L_{\text{eff}} = (h_{\text{fon-NAAL}} + h_{\text{NAAL}} + d_p + h_{\text{boq-tan}}) / F_{24} \quad (41)$$

Donde:

$F_{24}$  = factor 1000 en el sistema internacional y 1 en unidades inglesas.

Con los anteriores cálculos y los requerimientos de tiempo de residencia para las corrientes que se desvían al sistema de gas combustible, se diseñó un tambor con las siguientes dimensiones:

Diámetro interno: 2438 mm.

Longitud efectiva: 6096 mm.

Capacidad: 32.25 m<sup>3</sup>

Diámetro boquilla de entrada de gas: 14".