

**EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA INYECCIÓN DE GAS GUAJIRA EN LA
CORRIENTE DE SUMINISTRO ENERGÉTICO DEL TREN DE TOPPING U-150
DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA – ECOPETROL.**

JULIETH ANGÉLICA LARA DIAZ

FABIÁN DAVID PINO BAUTISTA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2015

**EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA INYECCIÓN DE GAS GUAJIRA EN LA
CORRIENTE DE SUMINISTRO ENERGÉTICO DEL TREN DE TOPPING U-150
DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA – ECOPETROL.**

JULIETH ANGÉLICA LARA DIAZ

FABIÁN DAVID PINO BAUTISTA

Tesis de grado para optar el título de:

Ingeniero Químico

Directores:

**Humberto Escalante
Ingeniero Químico Ph. D.
Universidad Industrial de Santander**

**María Paola Maradei
Ingeniero Químico Ph. D.
Universidad Industrial de Santander**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2015

AGRADECIMIENTOS

"Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa" Mahatma Gandhi

***A Dios** por darme la salud, la fortaleza, la perseverancia, para llegar hasta aquí. Por darme la capacidad de levantarme en la adversidad y permitirme vivir, aprender, experimentar, crear, valorar y crecer como hija, hermana, profesional, mujer. Gracias a Dios por mi familia, siempre ahí para apoyarme.*

***A mi papito Luis Fidel Lara** GRACIAS por su dedicación, esfuerzo, sacrificios, responsabilidad, paciencia.*

***A mi mamita Carmenza Diaz** GRACIAS por su amor, su apoyo, su entrega, su ejemplo, por inculcarme valores y enseñarme a ser la persona que soy. Gracias a los dos por apoyar mi carrera, por confiar en mí, por creer que lo podía lograr aún lejos de ustedes y de casa.*

A mis hermanas Milena, Johana, Geraldine y mi hermano Daniel, por creer en mí.

A mis sobrin@s, Ehimy, Camilo, Mariana, aunque me he perdido su crecimiento, sus etapas, sus logros por la distancia, los quiero mucho.

A mi amiga Katherine y su familia, por acogerme en su casa y hacerme partícipe de esa familia. Gracias por todo. Por su valiosa amistad y por tantas experiencias vividas.

A doña Liliana, Camila y don Alcides, mi otra familia adoptiva.

A Johana Aguirre por todas nuestras risas, vivencias y momentos.

A mi amor Andrés Suarez García, por llegar a mi vida y convertir mis días en felicidad.

A mi compañero de proyecto, Fabián Pino por la paciencia para trabajar conmigo.

"Muchas son las cátedras universitarias, pero escasos los maestros sabios y nobles" Albert Einstein

*Miles de gracias a mis profesores, más que a los catedráticos, a los profesores que son personas, que enseñan más allá que las lecciones de un libro, lecciones de vida. A nuestro director de proyecto de grado, **Humberto Escalante** por exigirnos, por guiarnos y por tomar de su tiempo para que llegemos a éste punto de nuestro aprendizaje.*

*Por últimos, a todas las personas que he conocido, a las buenas porque me han dejado lecciones de vida, a las malas, por mostrarme la forma para no ser como ellas. **JULIETH ANGÉLICA***

LARA DIAZ

Primeramente quiero agradecer a Dios por permitirme alcanzar esta meta, gracias a él por darme la salud, la fuerza para no rendirme antes los obstáculos que se me presentaron en estos cinco años que viví en la universidad.

Gracias a mi mamá quien estuvo a mi lado a lo largo de éste tiempo y tenerme paciencia, a mi padre por aconsejarme; y especialmente a ambos por inspirarme a siempre seguir adelante.

Gracias a todos mis amigos porque me acompañaron en este viaje, a ellos quienes se convirtieron en mi segunda familia, con quienes viví infinidades de momentos. Muchas Gracias.

Especiales gracias a mi compañera de proyecto, a Julieth, quien tuvo la paciencia y fue un apoyo para seguir adelante

A todos mis maestros que me guiaron hasta este punto, en especial a nuestro director de proyecto, el profesor Humberto, muchas gracias por la paciencia y el acompañamiento en este proceso; a la profesora Paola, quien nos aportó parte de su conocimiento en la construcción de este proyecto.

Muchas Gracias.

FABIÁN DAVID PINO

RESUMEN

Título:

Evaluación técnica de la inyección de gas Guajira en la corriente de suministro energético del tren de Topping U-150 de la refinería de Barrancabermeja – Ecopetrol.*

Autores:

LARA DIAZ Julieth Angélica**

PINO BAUTISTA Fabián David**

Palabras Claves:

Topping, simulación, Aspen HYSYS, destilación, capacidad calorífica, combustible, Drum.

El Horno Atmosférico de la unidad Topping tiene como función transferir el calor necesario al crudo para facilitar la destilación en la torre atmosférica y de esta manera recuperar productos valiosos del crudo. En el Horno se lleva a cabo un proceso de combustión, el cual utiliza como fuente principal de energía una mezcla de gas natural (GN) proveniente de campos de producción externa, los cuales tienen un alto porcentaje de metano en su composición. Además, se alimenta gas de refinería (GR), llamado también gas combustible el cual es obtenido de procesos de destilación como producto secundario con características no reguladas, por lo que su calidad es menor que el gas natural. En la refinería de Barrancabermeja los flujos de GR son provenientes de las unidades Cracking Modelo IV, Orthoflow, Hidrotratamiento y del cabezal de gas de aromáticos (mezcla de gas combustible de refinería) por lo cual se tendrá un gas cuya composición varía ampliamente dependiendo de su origen y ocasiona perturbaciones en el poder calorífico y densidad.

Al salir de servicio alguna de las unidades de Cracking como la Modelo IV o Orthoflow que alimentan los hornos de las unidades de destilación se presenta una baja significativa en el poder calorífico del gas combustible debido a la ausencia de gases pesados de alta capacidad calorífica y a la alta concentración de hidrógeno (35-45% de H₂ en el Drum-940). En condiciones normales se presenta limitación en los hornos de las unidades de refinación de crudo.

Mediante simulación computacional utilizando el simulador (comercial) de procesos Aspen HYSYS V.8.4, se logró evaluar las condiciones de operación del tren de calentamiento de la unidad Topping U-150 utilizando como fuente de gas natural el gas Guajira y evaluando el poder calorífico del combustible con diferentes tipos de carga al Drum.

*Trabajo de grado **Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química.
Director: ESCALANTE HERNÁNDEZ Humberto Ing, Químico PhD.Co-Directora: MARADEI Maria Paola Ing, Químico PhD

ABSTRACT

Title: Technic evaluation of the Guajira gas injection in the current of energetic supply of the train Topping U-150 of Barrancabermeja-Ecopetrol's refinery.

Authors:

LARA DIAZ Julieth Angélica **

PINO BAUTISTA Fabián David**

Keywords:

Topping, simulation, Aspen HYSYS, distillation, calorific, capacity, fuel, Drum.

The atmospheric oven of the Topping unit has a function to transfer the necessary heat to the crude to facilitate the distillation in the atmospheric tower and thus to recover the crude's valuable products. In the oven is conducted a process of combustion, which uses as principal energy source a mixture of natural gas (NG) that proceeds from external production fields, which have a high percentage of methane in their composition. Further, feeds refinery gas (RG) also called fuel gas, which is obtained of distillation process as secondary product with no regulated characteristics, so its quality is lower than natural gas. In the Barrancabermeja's refinery, the flows of RG are from the units Cracking Model IV, Orthoflow, Hydrotreatment and the bolster of gas of aromatics (mixture of refinery's fuel gas) whereby there will a gas whose composition varies amply depending its origin and causes perturbations in the calorific power and density.

After outing of service some Cracking units like the Model IV or Orthoflow that feed the ovens of the destination units, a significant drop occurs in the calorific power of fuel gas due to the absence of heavy gases of high calorific capacity and the high hydrogen concentration (35 % - 45 % of H₂ in the Drum 940) in normal conditions the limitation occurs in the ovens of the crude's refinement units.

Through computational simulation using the (commercial) simulator of Aspen HYSYS V.8.4 processes, it was possible to assess the operation conditions of the train of heating the Topping U-150 unit, using as source of natural gas the Guajira gas and assessing calorific power of the fuel with different kind of burdens to the Drum.

Degree work** Faculty of Physico-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering.

Director: ESCALANTE HERNÁNDEZ Humberto. Chemical Engineer PhD. Co-Director: MARADEI Maria Paola Chemical Engineer PhD

GLOSARIO

ACPM: Aceite Combustible Para Motores.

AF: Relación aire-combustible (Air-Fuel)

API: *American Petroleum Institute* o medida de densidad que, en comparación con el agua, define como pesado o liviano al petróleo.

Assay: Evaluación de crudo. Descripción detallada de las propiedades físicas y químicas del petróleo.

ASTM: American Society for Testing and Materials. Estándares y normas de materiales y procedimientos

D-940: Drum o tanque receptor de las corrientes del gas combustible

DESALADOR: Equipo cuyo propósito es remover sales y agua del crudo.

GN: Gas Natural

GR: Gas de Refinería

H-150: Horno de la unidad 150

KBPD: Miles de Barriles Por Día

PCI: Poder calorífico inferior

T-152: Torre de destilación Preflash.

TBP: True Boiling Point. Temperatura de Ebullición verdadera

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN.....	13
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. GENERAL.....	18
2.2. ESPECÍFICOS.....	18
3. MARCO TEÓRICO	19
3.1. SIMULADOR ASPEN HYSYS.....	19
3.1.1. Lista de Componentes.	19
3.1.2. Paquete de Fluidos	19
3.1.3. Oil Manager.....	20
3.1.4. Ambiente de simulación	20
3.2. Conceptos del calentamiento en el horno atmosférico, Furnace.....	21
3.3. Factores que disminuyen el poder calorífico.....	22
4. METODOLOGÍA	23
4.1. Apropiación teórico-práctica del proceso de topping:.....	23
4.2. Recopilación de datos.....	24
4.3. Simulación del proceso energético de la unidad topping.....	25
4.3.1. Caracterización del crudo	25
4.3.2 Simulación de Equipos.....	29
5. VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN	29
6.1. Simulación del proceso.....	30
7. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVA PARA AUMENTAR LA TEMPERATURA A LA SALIDA DEL HORNO H-150-	40
7.1. VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN	41
7.1.1. Análisis de la validación	42

8. CONCLUSIONES.....	45
9. RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47
ANEXOS.....	49

Listado de Tablas.

Tabla 1. Unidades generadoras de GR y porcentaje de Hidrógeno que provee*	25
Tabla 2. Datos de Caracterización del Crudo*	31
Tabla 3. Datos de Temperatura Vs Fracción másica para curva TBP*	32
Tabla 4. Características del crudo simulado	33
Tabla 5. Datos de entrada y consideraciones para equipos simulados	34
Tabla 6. Composición del Gas de Refinería*	36
Tabla 7. Resultados de simulación H-150 con Gas de Refinería	38
Tabla 8. Resultados análisis de varianza y desviación estándar para el GR	39
Tabla 9. Resultados de simulación H-150 con gas Guajira	40
Tabla 10. Validación de datos para la simulación de la Topping U-150	42

Listado de Figuras

<i>Figura 1. Diagrama de bloques de la Unidad Topping 150</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2. Metodología a desarrollarse.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3. Etapas para caracterizar el crudo en Aspen Hysys.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4. Información contenida en la TBP</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6. Conexiones y corrientes de proceso para el H-150 con GR.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 7. Conexiones y corrientes de proceso para el H-150 con GN.....</i>	<i>40</i>

INTRODUCCIÓN

El Complejo Industrial de Barrancabermeja - Ecopetrol tiene una capacidad productiva de 250 KBPD y la responsabilidad de generar el 75 por ciento de la gasolina, combustóleo, ACPM y demás combustibles que el país requiere, así como el 70 por ciento de los productos petroquímicos que circulan en el mercado nacional².

El crudo está acompañado de impurezas que son perjudiciales en el proceso de destilación. Estas impurezas corresponden a compuestos solubles e insolubles en aceite. Las impurezas solubles son: azufre, oxígeno, nitrógeno, metales pesados, asfaltenos, resinas y parafinas. Las impurezas insolubles son: sal mineral (agua y sales inorgánicas), sedimentos (arena, arcillas) y sólidos filtrables (sulfuros, metales y óxidos).

La primera etapa de refinación la constituyen las unidades Topping; las cuales reciben este nombre porque operan a presiones cercanas a la atmosférica (14,7 psig). En las Topping se obtienen combustibles terminados y cortes de hidrocarburos que son procesados en otras unidades para convertirlos en combustibles más valiosos (naftas, Jet A1 y ACPM).

En la refinería de Barrancabermeja la Topping denominada Unidad U-150, procesa crudo con características especiales y con destino a la producción de bases lubricantes y ceras, crudos de base parafínica y nafténica. El funcionamiento de la U-150 se presenta en la figura 1 “*Diagrama de bloques de la Unidad Topping 150.*”. La U-150 empieza con un proceso de calentamiento compuesto por dos intercambiadores de calor que aumentan la temperatura del crudo, desde 89°F hasta 273°F, condiciones necesarias para entrar al desalado. En el desalador el crudo es mezclado con agua de lavado, que ingresa a 300°F, 280 psig, y un caudal con una relación de 4,5% agua-crudo; y luego es separado, para retirar la mayoría de sales e impurezas².

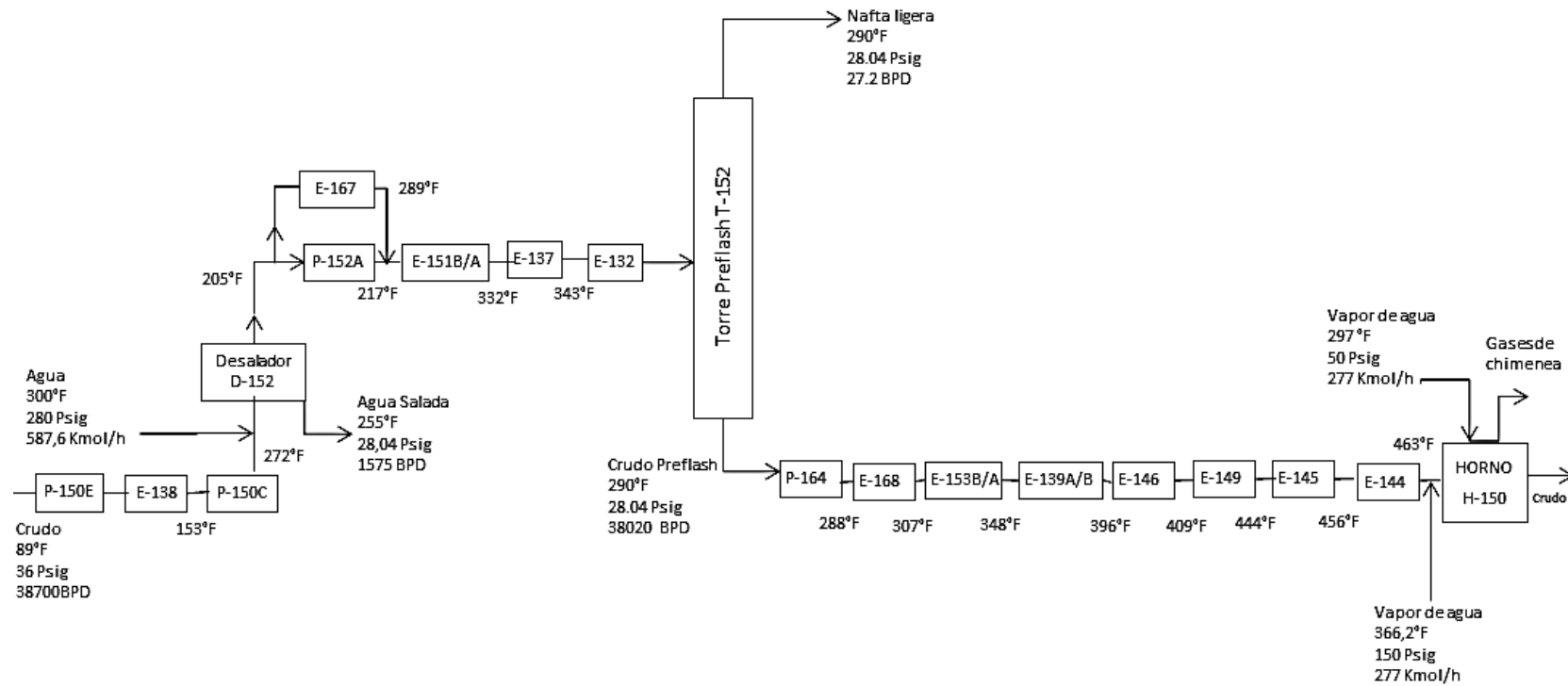


Figura 1. Diagrama de bloques de la Unidad Topping 150.

El crudo proveniente del desalador ingresa a un tren de calentamiento que aumenta su temperatura de 205°F a 343°F y es parcialmente vaporizado en la Torre Pre-Flash T-152, en donde los vapores ascienden a través de los platos de rectificación y la parte líquida se va a los platos de despojo ubicados en el fondo. Estos vapores ascendentes intercambian calor con el líquido de los platos y reflujo de cima de la torre, y disminuyen su temperatura hasta 290 °F. Posteriormente, estos vapores pasan a intercambiar calor con crudo y son condensados con agua de enfriamiento antes de entrar a un Drum de Nafta Liviana. Al entrar la mezcla de gases y líquido al Drum, se separan las fases y la fracción que no se condensó (gases), sale por la parte superior del tambor.

En el fondo de la Torre Preflash T-152, el líquido va a los platos del fondo y es despojado de la fracción liviana (gases y nafta) con vapor de 50 psig. El crudo que sale del fondo de la Torre Pre-Flash T-152 pasa por una válvula y se mezcla con soda. Las bombas reforzadoras envían esta mezcla, a través de un indicador de flujo, hacia otro tren de intercambio de calor.

El crudo recorre un segundo tren de intercambiadores en serie, con el propósito de elevar su temperatura, aprovechando el calor entregado por las corrientes laterales y de salida de las torres. La temperatura que alcanza el crudo precalentado antes de llegar al horno atmosférico H-150 es de 450 a 500 °F y ésta depende en parte del grado de limpieza de los intercambiadores de calor².

En una refinería la energía representa el 40% del costo total de operación, por lo cual es necesario la implementación de estrategias para aumentar la eficiencia energética. El uso de trenes de calentamiento y/o la reutilización de energía residual aseguran la disminución del consumo de gas combustible en el horno.

La refinería de Barrancabermeja utiliza como fuente principal de energía una mezcla de gas natural (GN) y gas residual del proceso. La unidad de cracking catalítico (Modelo IV y Orthoflow), la unidad de desulfuración o hidrotratamiento y el cabezal de gas de aromáticos son unidades generadoras de gas residual conocido como "Gas de Refinería" (GR), el cual es utilizado como sustituto del gas natural. El GR presenta una composición variable dependiente del proceso del cual provenga,

puede contener mezclas de etano, etileno, propano, propileno y butano que presentan alto poder calorífico, o mezclas de hidrógeno y metano que poseen bajo poder calorífico.

La composición del GR causa variaciones en el poder calorífico, lo cual genera impactos sobre la operación. Se ha estudiado el efecto de quemar gas combustible rico en hidrógeno (50-80%) en los procesos de refinería, dando como resultado reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (NO_x, CO). Sin embargo, un alto porcentaje de hidrógeno en las corrientes de gas combustible disminuye la eficiencia del gas en un 2%³ y provoca limitación en la carga debido a requerimientos de mayor volumen de gas, lo que ocasiona mayores costos, alta presión y alta temperatura de piel de tubos y genera altos riesgos sobre la integridad de los equipos⁴.

Los simuladores son una herramienta para la evaluación de un proceso con base en la representación del mismo, mediante modelos matemáticos. La solución de éstos se lleva a cabo por medio de programas computacionales, permitiendo así tener un mejor conocimiento del comportamiento del proceso representado.

Existe una gran variedad de simuladores de procesos los cuales son poderosas herramientas de cálculo en procesos industriales, con enormes bases de datos y un fuerte respaldo matemático para cálculos de equipos y modelos termodinámicos, que le dan al simulador una gran versatilidad. Algunos de estos simuladores de procesos son: Aspen Plus y Speedup (de Aspen Technology, USA), Pro II (de Simulations Sciences, USA), Hysys (de Hyprotech, Canadá), Chemcad (de Chemstations, USA), etc. Aspen Plus, Pro II y Chemcad son simuladores de procesos en estado estable, Speedup es un simulador de procesos dinámico y Hysys es útil para los dos tipos de simulación⁵.

Por lo anterior el objetivo de este trabajo de aplicación se centró en evaluar las condiciones de operación del segundo tren de calentamiento de la U-150 del complejo industrial de la refinería de Barrancabermeja, identificando la influencia del componente hidrógeno, presente en el gas de refinería, sobre el poder calorífico del combustible y adicionalmente estudiar el impacto de la inyección de gas Guajira en la corriente de suministro energético del tren de Topping U-150. Como variable de respuesta, para evaluar los cambios en la composición del GR, se seleccionó la temperatura que alcanza el crudo a la salida del horno.

Teniendo en cuenta que los simuladores deben permitir la selección de propiedades termodinámicas adecuados para la naturaleza de los componentes químicos, estado de agregación y condiciones de operación, se escoge el simulador de procesos Hysys (de Hyprotech, Canadá), V. 8.4, el cual tiene un gran respaldo para la industria de hidrocarburos.⁵

Mediante la simulación computacional con Hysys se logra evaluar las condiciones de operación del segundo tren de calentamiento, identificar la influencia del componente hidrógeno presente en la composición del gas de refinería sobre el poder calorífico del combustible presente en el horno y estudiar el impacto de la inyección de gas Guajira en la corriente de suministro energético del tren de Topping U-150 para aumentar la capacidad calorífica del gas de combustión.

1. OBJETIVOS

1.1. GENERAL

- Realizar una evaluación técnica de la inyección de gas Guajira en la corriente de suministro energético del tren de Topping U-150 de la refinería de Barrancabermeja – Ecopetrol

1.2. ESPECÍFICOS

- ✓ Apropriación teórico – Práctica del proceso de Topping de la Unidad 150 de la refinería de Barrancabermeja de la empresa Ecopetrol.
- ✓ Simular el tren de calentamiento del proceso de Topping U-150 de la refinería de Barrancabermeja - Ecopetrol.
- ✓ Determinar la influencia del componente Hidrógeno presente en la composición de gas de refinería sobre la energía del horno de la unidad Topping U-150.
- ✓ Determinar la influencia en la temperatura de salida del horno al utilizar gas Guajira como gas de combustión.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. SIMULADOR ASPEN HYSYS

Aspen HYSYS es un simulador de procesos de fuerte aplicación a nivel industrial, principalmente en las fases de diseño conceptual, control, optimización y monitoreo de procesos químicos. Las aplicaciones más importantes desarrolladas de éste simulador son enfocadas a la industria del crudo, procesamiento de gas y la refinería. Representa un proceso en forma de modelo matemático en el que se involucran tanto balances de masa como de energía, éstos, acoplados con el equilibrio de fases y las ecuaciones de fenómenos de transporte.

A continuación se describen las etapas realizadas para realizar una simulación en HYSYS

2.1.1. Lista de Componentes.

Antes de iniciar la simulación, en la sección de “*Properties*”, se debe generar una lista de componentes, los cuales son seleccionados de un catálogo de componentes puros que está disponible en Aspen HYSYS.

2.1.2. Paquete de Fluidos

Dentro del “*Simulation Basis Manager*” se crean y manipulan los modelos termodinámicos para la simulación. La adecuada selección de estas técnicas será crucial para un cálculo preciso de los equipos y corrientes de la planta simulada.

El equilibrio termodinámico entre las fases líquido-vapor de un sistema multi-componente requiere tres condiciones:

- Equilibrio térmico, para lo cual la temperatura debe ser igual en ambas fases.
- Equilibrio mecánico, que implica igualdad de la presión en ambas fases.

- Equilibrio químico, que exige la igualdad de la fugacidad en la mezcla de cada componente en cada fase.

Para satisfacer estas necesidades se cuenta con una herramienta que es el paquete de fluido o “*Fluid package*”, en el cual está contenida toda la información necesaria para desarrollar cálculos de las propiedades físicas y evaporaciones espontáneas de las corrientes.

Los errores en la simulación por una mala decisión del modelo de propiedades físicas inciden directamente en los resultados de la simulación.

Actualmente el simulador cuenta con más de 35 modelos matemáticos, entre ellos están: Antoine, WILSON, NRTL, Amina PKG, Lee-Kesler Plocker, UNIQUAC, Sour SRK, Peng Robinson entre otros⁶.

2.1.3. Oil Manager

El ambiente principal para la simulación es el “*Oil Characterization Environment*” el cual permite caracterizar el crudo creando y definiendo ensayos “*Assays*” y mezclas “*Blends*”.

Para la caracterización del crudo es necesaria información global (peso molecular, densidad másica y viscosidad), también se requiere datos del Assay, éstos se encuentran como curvas de destilación TBP, D-86, D1160, D-86/D-1160, D2887, EFV ó cromatografías; por último se debe indicar la dependencia de las curvas (*Molecular weight, Mass Density & Viscosity*) con la información del destilado.

2.1.4. Ambiente de simulación

Es la plataforma para simular las corrientes y equipos. Allí se especifican las condiciones de entrada a cada unidad como flujo, presión, temperatura. Cada equipo basa su funcionamiento en balances energéticos, balances de masa, ecuaciones de potencia y de fenómenos de transporte, entre otras. Para información detallada de la simulación de cada equipo, ver *Anexo 1, “Especificaciones del ambiente de simulación”*.

2.2. Conceptos del calentamiento en el horno atmosférico, Furnace

El calentador dinámico Fired (Horno) realiza balances de masa y energía para modelar un tipo de calentador de fuego directo homo. Este tipo de equipo requiere una gran cantidad de energía en forma de calor a la entrada. Ésta energía interna es propia de cada combustible y es definida como el poder calorífico. (Ver Anexo 2 “Definición Poder Calorífico”) El calor se genera por la quema del combustible y se transfiere para procesar las corrientes que pasan a través de él.

El horno se divide en tres zonas:

- Zona Radiante
- Zona Convectiva
- Zona del Economizador⁶

En el interior ocurre una reacción de combustión, ésta depende de la disponibilidad de oxígeno que se rige por la relación de aire-combustible; definida:⁶

$$AF = \frac{\left(\frac{\text{Flujo de oxígeno}}{\sum \text{Flujo de combustible}} \right)}{\text{Radio de oxígeno en el Aire}}$$

Para ampliación Ver Anexo 3 “Fundamentos de operación del horno”

El horno atmosférico (H-150), tiene como función transmitir la energía necesaria al crudo desalado para facilitar la destilación en la torre atmosférica y de esta manera recuperar productos valiosos. La carga precalentada por los intercambiadores fluye hacia el horno donde la temperatura se incrementa hasta alcanzar valores necesarios para la alimentación de la Torre Atmosférica T-150.¹

Éste opera con una corriente de gas combustible (Gas de Refinería), el cual está compuesto en su gran mayoría por hidrógeno y metano con 34% y 32% (fracción molar). En él se inyecta una corriente de vapor de agua a de alta presión y el crudo que ingresa al horno es dividido en dos corrientes de igual caudal, una que ingresa

por la zona radiante y otra por la zona convectiva. Como parámetro de operación el horno maneja un bajo porcentaje de oxígeno en exceso.

Basándose en el Datasheet del horno (H-150) y tratando de asemejar la simulación lo más posible a la realidad se toma una eficiencia del 77%.

2.3. Factores que disminuyen el poder calorífico

El poder calorífico del combustible se ve afectado por diversos factores, grados de libertad, la masa molar, puentes de hidrógeno e impurezas que pueda contener el combustible.¹ Las moléculas con mayor atomicidad poseen varios grados de libertad debido a que son “objetos” complejos, lo que conllevan a que almacenen energía interna para el movimiento de traslación.

La energía calorífica se almacena gracias a la existencia de átomos o moléculas vibrando. Si una sustancia tiene una masa molar más ligera, entonces cada gramo de ella tiene más átomos o moléculas disponibles para almacenar energía. Es esta la razón por la que el hidrógeno, la sustancia con la menor masa molar, tiene un calor específico tan elevado; porque un gramo de esta sustancia contiene una cantidad muy grande de moléculas.

Las moléculas que contienen enlaces polares de hidrógeno tienen la capacidad de almacenar energía calorífica en éstos enlaces, conocidos como puentes de hidrógeno.¹²

3. METODOLOGÍA

Secuencialmente, el desarrollo de este trabajo de aplicación se podría describir de la siguiente manera:

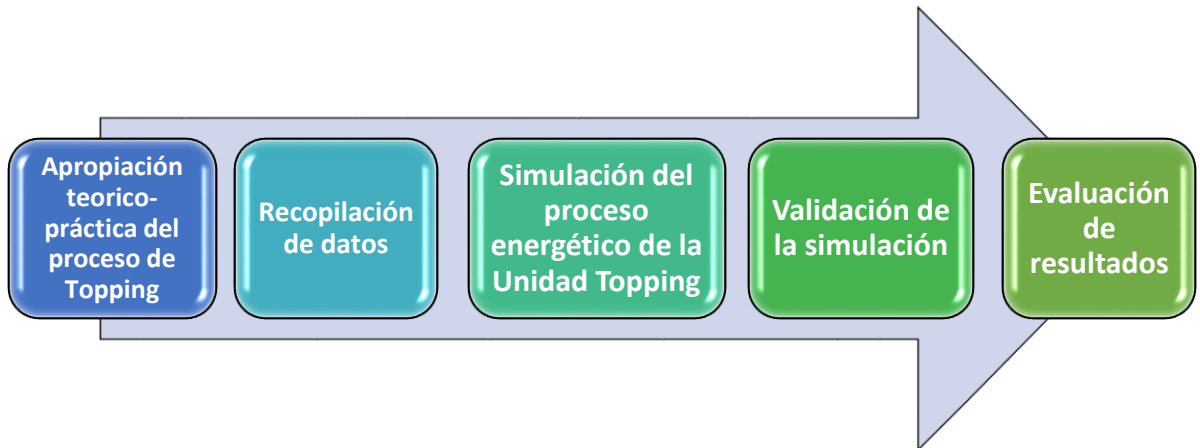


Figura 2. Metodología a desarrollarse.

3.1. Apropiación teórico-práctica del proceso de topping:

Para la apropiación teórico- práctica del proceso, se realizaron tres visitas programadas al Complejo Industrial de Barrancabermeja, específicamente a la Topping U-150. Por medio de recorridos por la unidad y con revisión bibliográfica se logró la apropiación teórica del proceso de Topping. Este proceso se fundamenta en realizar al crudo una destilación atmosférica y una destilación al vacío, para obtener una separación en cortes o fracciones de diferente intervalo de ebullición, que se procesan posteriormente en otras unidades. Los productos obtenidos en el proceso de Topping son Naftas livianas y pesadas, Jet A1, ACPM y Asfalto.

Además, se establecen las actuales condiciones de los equipos y el funcionamiento de la Topping U-150 (las condiciones de operación se especifican en el *Anexo 4 Condiciones de operación Topping U-150*) y se identificó que la unidad tiene limitaciones en el sistema de precalentamiento del crudo, lo que implica una baja temperatura en la salida del horno H-150. Dado que hay la necesidad de asegurar que el crudo sale del horno en las condiciones adecuadas para entrar a la torre de

destilación atmosférica T-150, se estima conveniente realizar un estudio sobre la influencia que tiene el hidrógeno presente en el gas combustible y su efecto en la temperatura suministrada al crudo por el horno H-150.

Por consiguiente es necesario mediante simulaciones (utilizando el software Aspen Hysys V.8.4) conocer el comportamiento de la temperatura a la salida del horno, cuando se alimenta con gas combustible de composición variable.

3.2. Recopilación de datos

Para el desarrollo de este trabajo de aplicación se requirió del PFD de la Unidad de Topping U-150 y los parámetros de diseño o Datasheets (Hoja de información) de la planta, los cuales fueron suministrados por ECOPETROL. . El diagrama de Flujo de Procesos (PFD) es una representación esquemática del proceso, sus condiciones de operación normal y su control básico. Este diagrama indica los efluentes (líquidos, gases o sólidos) emanados del proceso y su disposición.

La observación de un PFD en ingeniería ayuda a visualizar y comprender el proceso de una manera más rápida y directa. (*Ver Anexo 5 Diagrama de Flujo de Proceso Topping U-150*)

Con respecto a los Datasheets, Ecopetrol suministró los correspondientes al tren de calentamiento, entre ellos intercambiadores de calor, desalador, torre preflash, bombas, válvulas y el horno, lo anterior con el fin de tener la mayor cantidad de información para que la simulación sea una representación muy cercana del proceso real. (*Ver Anexo 6 Data Sheet Equipos Topping U-150*) (*Ver anexo 7 Tabla de resumen de parámetros de los intercambiadores de calor*)

Además se recopilan datos de caracterización mostrado en *la tabla 3 "Caracterización del crudo"*, gravedad específica (*Anexo 8 Descripción de gravedad específica*) viscosidad (*Anexo 9 Descripción de la viscosidad*) y curva de destilación TBP (*Anexo 10 Descripción de la curva TBP*). Conocer éstas propiedades permite

diferenciar la calidad de los crudos, los rendimientos en destilación y el contenido de impurezas.

Para el gas combustible que se suministra al horno se dispone de la composición del Gas de refinería mostrado en el **Tabla 5. Composición de Gas de Refinería.**

Por último, se conocen los flujos y condiciones de operación del proceso de la Topping U-150. Se especifican, entonces, las unidades generadoras de GR con variabilidad de composición que son:

Tabla 1. Unidades generadoras de GR y porcentaje de Hidrógeno que provee*

Unidad generadora de GR	% Hidrógeno
HDT	60,8
HDT(ROG)	32.1
MODELO IV	40.9
ORTHOFLOW	44.2

***Fuente: Ecopetrol S.A.**

3.3. Simulación del proceso energético de la unidad topping.

3.3.1. Caracterización del crudo

Se definió toda la información (componentes puros e hipotéticos, modelo termodinámico, parámetros de interacción, datos tabulados, etc) en Aspen Hysys. Dentro del “*Simulation Basis Manager*” se crean y manipulan los modelos termodinámicos para la simulación.

El ambiente principal para éste trabajo de grado es el “*Oil Characterization Environment*” el cual permite caracterizar el crudo creando y definiendo ensayos “*Assays*” y mezclas “*Blends*”. Cada Assay contiene información específica con respecto a las propiedades globales (Bulk Properties), la curva de puntos de ebullición (Boiling Point Curve) y las curvas de propiedades (Property Curves).

Para las propiedades globales se suministró el peso molecular, la densidad másica, y/o la viscosidad. La curva de los puntos de ebullición se suministró de la forma TBP.

A partir de los reportes entregados por ECOPETROL, se establecieron los parámetros para realizar la caracterización simulada de los fluidos en HYSYS. Con el procedimiento para caracterización de un crudo se generan pseudocomponentes de petróleo para usarlos en los paquetes de propiedades. En la **Figura 3**, se resume una secuencia de condiciones que se establecidas para dar inicio a la simulación

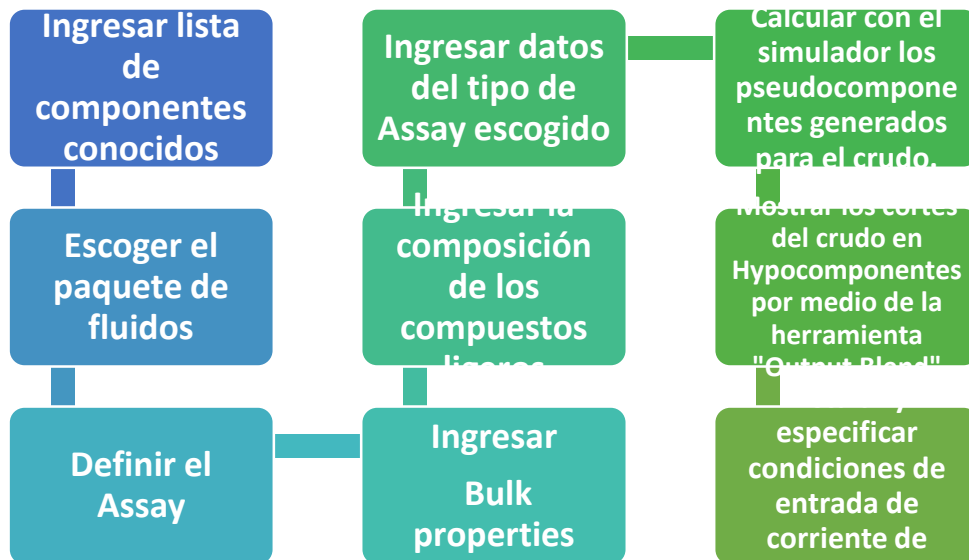


Figura 3. Etapas para caracterizar el crudo en Aspen Hysys.

Los pasos para dar inicio a la simulación se describen a continuación:

3.3.1.1. Ingresar lista de componentes conocidos

El crudo viene acompañado de componentes livianos (metano, etano, propano, butanos y pentanos) cuya composición está en el Assay tipo TBP. Estos componentes son seleccionados de una base de datos disponible en Aspen HYSYS.

3.3.1.2. Escoger el paquete de fluidos

En la aplicación práctica de ingeniería química, interesa el comportamiento de fase de la mezcla de hidrocarburos líquidos, la cual a una temperatura y presión específica, está en equilibrio con una mezcla de hidrocarburos gaseosa a la misma presión y temperatura.

El paquete termodinámico empleado en la caracterización de los fluidos fue la ecuación de estado de Peng-Robinson, la cual ha sido ampliamente utilizada en la industria petrolera) para predecir el comportamiento de los sistemas de hidrocarburos naturales.

3.3.1.3. Definir el Assay

La curva de los puntos de ebullición puede ser suministrada de cualquiera de las formas que se muestra a continuación:

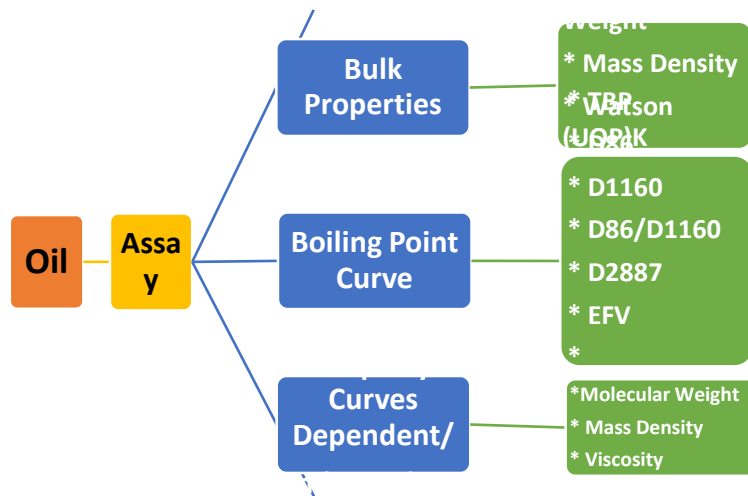


Figura 4. Información contenida en la TBP

Para el desarrollo de éste trabajo de aplicación, el Assay fue caracterizado por medio de las curvas TBP.

3.3.1.4. Ingresar Bulk Properties

En éste subíndice se especifica al simulador el peso molecular y la densidad másica del crudo.

3.3.1.5. Ingresar la composición de los compuestos ligeros

En éste paso se ingresa la composición de los componentes ligeros escogidos en la base de datos de HYSYS en el ítem 1, dicha composición puede ser especificada en porcentaje molar, porcentaje másico o porcentaje volumétrico.

3.3.1.6. Ingresar datos del tipo de Assay escogido (TBP)

El Assay fue caracterizado por medio de las curvas TBP, donde se ingresan: porcentaje de destilado con el peso molecular de cada corte, porcentaje de destilado con densidad de cada corte y porcentaje de destilado con la viscosidad de cada corte tomadas a dos temperaturas diferentes (122°F y 210°F)

3.3.1.7. Calcular con el simulador los pseudocomponentes generados para el crudo.

Al definir el crudo con los datos mencionados anteriormente, se hace uso de la opción "Calcular", por medio de la cual se obtienen los pseudocomponentes generados para ese crudo con características y composición muy similar al crudo real.

3.3.1.8. Mostrar los cortes del crudo en Hypocomponentes por medio de la herramienta "Output Blend"

Por medio de la opción "Output Blend" se definen los cortes del crudo y se define la mezcla de dos o más Assay's en un conjunto de hypocomponentes. Ésta herramienta es útil cuando ingresa a la refinería una mezcla de crudos proveniente de diferentes campos, los cuales tendrán cada uno una caracterización diferente.

3.3.1.9. Instalar y especificar condiciones de entrada de corrientes de crudo

Al definir el crudo a simular, se instala la corriente que representa el flujo de entrada, y se especifican las condiciones como presión, temperatura y caudal.

4.3.2 Simulación de Equipos

A partir de la información suministrada por los PFD, los diseños de los equipos de la unidad de Topping U-150 y las condiciones de operación, se simulan los equipos que intervienen en el proceso de Topping y el tren de calentamiento. En el *Anexo 11 “Descripción de la simulación de Equipos”* se encuentra la información detallada de cada unidad.

Con base en el Datasheet del horno (H-150) y tratando de asemejar la simulación lo más posible a la realidad se toma una eficiencia del 77%.

La composición de los gases utilizada para el gas combustible que se quema en el horno son datos promedio de todas las mediciones que se hicieron durante el año 2013

Como el objetivo de interés es investigar el efecto de la composición del gas combustible en el poder calorífico que suministra el horno al crudo, se decide comparar los resultados al usar Gas Guajira como sustituto del Gas de Refinería.

Se opta por reemplazar al gas de refinería por un gas natural debido a su composición rica en metano (con un 98% aproximadamente) y pobre en hidrógeno, lo cual permite evaluar la forma en que incide el componente hidrógeno sobre el poder calorífico.

4. VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN

La respuesta de la simulación de este trabajo va a ser utilizada por Ecopetrol, por consiguiente es importante garantizar la confianza del modelo; por medio de una validación de los resultados.

Inicialmente, el modelo es una abstracción del sistema real, por tanto se debe crear una correspondencia entre el sistema real y la simulación. Se utilizan los términos

de verificación y validación del modelo para confirmar que la simulación es una representación creíble. La verificación es la construcción correcta de un modelo o simulación. Es el proceso de determinar si la lógica operacional del modelo o simulador corresponde con la lógica del diseño. En otros términos, es determinar si se presentan errores en el programa.

La validación se refiere a la construcción de un modelo correcto, es decir, si es una buena representación del sistema.

Esto se consigue a través de la calibración del modelo, es un proceso de comparación del comportamiento del modelo con el del sistema y usar las diferencias para mejorar el modelo. Para ello, se calcula el porcentaje de error que existe entre los datos reales y los datos simulados.

$$\%ERROR = (|Datos reales - Datos simulados| / Datos reales) * 100\%$$

4.1. Evaluación de resultados.

Valoración de la dificultad durante el procesamiento del mismo.

4.1.1. Simulación del proceso

Para la evaluación fueron considerados dos aspectos técnicos importantes, el primero la composición del gas combustible (GR), ya que contiene un alto porcentaje de hidrógeno; el otro aspecto es el comportamiento de la temperatura de la corriente de crudo que sale del horno H-150. Estos dos aspectos están relacionados entre sí, esto se debe a que la presencia de hidrógeno afecta el poder calorífico del gas combustible, lo que implica un descenso en la temperatura.

RESULTADOS

En la siguiente tabla se presentan los datos correspondientes a la caracterización del crudo.

Tabla 2. Datos de Caracterización del Crudo*

Cortes (F)	Frac.Mass	% Mass	Frac. Volum.	% Volum.	Grav. Espec.	WM (g/mol)	Visc. (122F) cP	Visc. (210 F) cP
200	0,02856	2,86	0,0374	3,7393	0,688	88,509	0,437	-----
250	0,05560	5,56	0,0703	7,0256	0,742	105,408	0,532	0,384
300	0,07915	7,91	0,0980	9,7983	0,769	121,223	0,650	0,441
350	0,10644	10,64	0,1293	12,9293	0,789	138,040	0,813	0,521
400	0,13734	13,73	0,1638	16,3797	0,811	155,334	1,043	0,626
450	0,17271	17,27	0,2023	20,2268	0,833	173,951	1,381	0,771
500	0,21268	21,27	0,2448	24,4832	0,851	194,137	1,893	0,971
550	0,25755	25,76	0,2918	29,1793	0,866	216,704	2,699	1,248
600	0,30952	30,95	0,3454	34,5414	0,879	240,864	3,997	1,640
650	0,36520	36,52	0,4020	40,1974	0,892	266,168	6,465	2,265
750	0,45550	45,55	0,4917	49,1721	0,913	304,675	16,404	4,056
850	0,55190	55,19	0,5856	58,5601	0,931	368,969	60,553	9,019
950	0,66578	66,58	0,6952	69,5217	0,942	433,452	199,258	19,567
1050	0,75378	75,38	0,7782	77,8219	0,962	498,558	1790,497	74,913
1150	0,81930	81,93	0,8388	83,8769	0,982	566,142	35463,740	445,948
1300	0,89080	89,08	0,9031	90,3077	1,009	644,651	5319370,333	7870,793

***Fuente: Ecopetrol S.A.**

Al realizar la caracterización, el simulador ejecuta la gráfica de temperatura de destilación en función de su fracción másica (*Ver Anexo 12 Curva de destilación TBP*) La curva TBP (True Boiling Point) permite evaluar los derivados que se pueden obtener en la refinería a partir de un crudo. En la tabla 3 se especifican los datos de temperatura de los cortes Vs Fracción másica para la curva TBP.

Tabla 3. Datos de Temperatura Vs Fracción másica para curva TBP*

Temperatura [°F]	Fracción másica
200	0,029
250	0,027
300	0,0024
350	0,0027
400	0,031
450	0,035
500	0,04
550	0,045
600	0,052
650	0,056
750	0,09
850	0,096
950	0,114
1050	0,088
1150	0,066
1300	0,072

***Fuente: Ecopetrol S.A.**

Las características y componentes del crudo simulado se muestran a continuación en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Características del crudo simulado

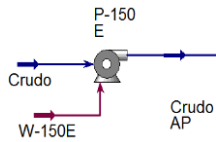
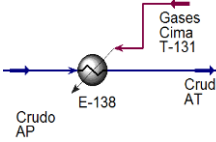
CARACTERISTICAS DEL CRUDO SIMULADO						
	Componente	Moles	Acumulado Moles	NBP [F]	Peso Molecular	Densidad [API]
COMPUESTOS LIGEROS	Methane	1,04E-05	1,04E-05	-258,75	16,0429	340,170
	Ethane	7,06E-06	1,74E-05	-127,48	30,0699	265,526
	Propane	0,000	3,33E-04	-43,78	44,0970	147,208
	i-Butane	0,004	4,70E-03	10,89	58,1240	119,788
	n-Butane	0,014	0,0187	31,10	58,1240	110,629
	i-Pentane	0,006	0,0250	82,18	72,1510	95,009
	n-Pentane	0,009	0,0338	96,91	72,1510	92,748
	H2O	0,000	0,0338	212,00	18,0151	10,000
	Nitrogen	0,000	0,0338	-320,44	28,0130	43,624
	Oxygen	0,000	0,0338	-297,31	32,0000	-7,374
	CO2	0,000	0,0338	-109,39	44,0097	39,601
	CO	0	1,00E+00	-312,61	28,0109	45,154
COMPUESTOS HIPOTÉTICOS (Creados por el simulador)	NBP[0]114*	0,007	0,0409	114,27	90,4561	82,395
	NBP[0]140*	0,007	0,0479	140,40	92,0170	80,832
	NBP[0]163*	0,013	0,0614	162,81	94,3166	78,646
	NBP[0]191*	0,022	0,0838	191,46	98,4297	75,066
	NBP[0]213*	0,029	0,1130	212,65	104,5132	70,485
	NBP[0]237*	0,041	0,1544	237,17	113,1975	65,328
	NBP[0]260*	0,034	0,1880	260,36	123,1292	61,317
	NBP[0]287*	0,027	0,2154	286,61	132,1099	58,594
	NBP[0]312*	0,028	0,2437	311,88	141,2457	56,243
	NBP[0]338*	0,035	0,2790	337,53	152,8232	53,530
	NBP[0]362*	0,025	0,3037	361,51	163,7386	50,886
	NBP[0]388*	0,027	0,3304	387,68	173,1604	48,623
	NBP[0]412*	0,029	0,3590	412,21	183,5857	46,315
	NBP[0]437*	0,029	0,3881	437,22	194,8593	44,137
	NBP[0]462*	0,029	0,4172	462,25	206,5769	42,242
	NBP[0]487*	0,029	0,4463	487,31	218,8286	40,572
	NBP[0]512*	0,029	0,4754	512,40	231,7979	39,077
	NBP[0]538*	0,029	0,5048	537,52	245,4072	37,723
	NBP[0]563*	0,030	0,5348	562,61	259,5125	36,467
	NBP[0]588*	0,030	0,5652	587,65	274,0401	35,250
NBP[0]613*	0,030	0,5952	612,59	288,8506	34,006	
NBP[0]637*	0,028	0,6228	637,33	303,8846	32,661	
NBP[0]662*	0,024	0,6465	662,35	318,7164	31,297	
NBP[0]688*	0,021	0,6675	687,60	333,0835	30,088	
NBP[0]713*	0,020	0,6871	712,82	348,1842	29,084	

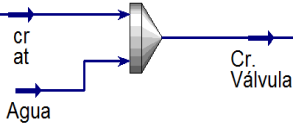
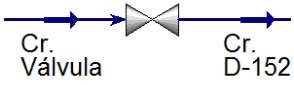
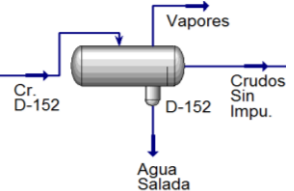
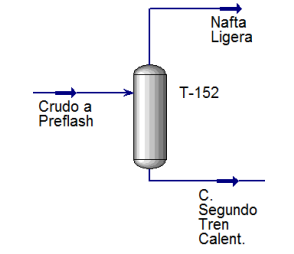
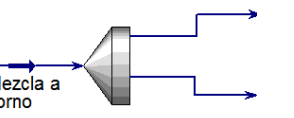
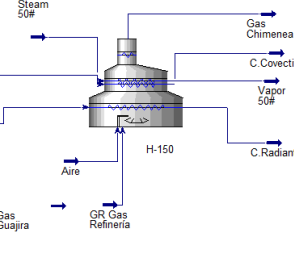
NBP[0]738*	0,019	0,7060	738,01	364,7852	28,240
NBP[0]763*	0,019	0,7246	763,12	382,7919	27,488
NBP[0]788*	0,018	0,7429	788,12	401,8496	26,811
NBP[0]826*	0,036	0,7788	826,27	429,9963	26,026
NBP[0]876*	0,038	0,8168	875,98	467,6579	25,143
NBP[0]925*	0,034	0,8508	924,66	506,6274	23,823
NBP[0]974*	0,027	0,8777	974,29	544,2471	22,124
NBP[0]1024*	0,022	0,8992	1024,35	582,0661	20,531
NBP[0]1074*	0,017	0,9167	1074,31	620,2582	18,980
NBP[0]1124*	0,014	0,9309	1123,91	658,0547	17,348
NBP[0]1175*	0,011	0,9423	1174,77	694,1104	15,728
NBP[0]1250*	0,020	0,9621	1249,53	746,5296	13,341
NBP[0]1352*	0,014	0,9764	1351,71	814,7676	10,230
NBP[0]1459*	0,009	0,9850	1458,63	868,9889	7,784
NBP[0]1558*	0,006	0,9913	1557,57	908,8970	6,009
NBP[0]1665*	0,004	0,9949	1664,96	937,5462	4,869
NBP[0]1778*	0,002	0,9974	1778,00	955,9328	3,520
NBP[0]1881*	0,003	1	1880,60	971,8543	2,030

Fuente: Autores

En la **Tabla 5.** se presenta un resumen de los equipos, los datos de entrada, y las consideraciones que se tuvieron en cuenta para la simulación.

Tabla 5. Datos de entrada y consideraciones para equipos simulados

EQUIPO	Datos de Entrada	Consideraciones
Bombas 	Definir corriente entrada y salida Definir corriente de Potencia ΔP	Equipo adiabático
Intercambiadores de Calor 	Definir corrientes de entrada y salida Número de Tubos ΔT	No hay caída de Presión

<p>Mezcladores</p> 	<p>Definir corrientes de entrada y salida</p>	
<p>Válvulas</p> 	<p>Definir corrientes de entrada y salida Caída de Presión</p>	<p>Adiabática</p>
<p>Desalador D-152</p> 	<p>Definir corrientes de entrada y salida</p>	<p>Separador Trifásico</p>
<p>Torre Preflash T-152</p> 	<p>Definir corrientes de entrada y salida</p>	<p>Separador Bifásico</p>
<p>Divisor de Corrientes</p> 	<p>Definir corrientes de entrada y salida Indicar la fracción de Flujo para cada corriente de salida</p>	
<p>Horno H-150</p> 	<p>Definir corrientes de entrada zona convectiva Definir corrientes de entrada zona radiante Definir corrientes de suministro de combustible Definir corrientes de suministro de aire Porcentaje de Oxígeno en exceso</p>	<p>Combustión completa</p>

Fuente: Autores

La composición del gas combustible (GR), utilizada para la simulación del horno, se especifica en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Composición del Gas de Refinería*

Composición GR		
COMPONENTES	UNIDADES	Prom.2013
DIOXIDO DE CARBONO	% mol	0,85
ETANO	% mol	6,27
ETILENO	% mol	3,50
GRAVEDAD ESPEC. GAS	N/A	0,65
H2S	% mol	0,29
HIDROGENO	% mol	34,40
ISO-BUTANO	% mol	2,44
ISO-PENTANO	% mol	0,92
METANO	% mol	32,28
MONOXIDO DE CARBONO	% mol	1,87
N-BUTANO	% mol	1,39
NITROGENO	% mol	2,65
OXIGENO	% mol	0,10
PESO MOLECULAR	gr/mol	18,89
PROPANO	% mol	4,32
PROPILENO	% mol	6,42
TOTAL OLEFINAS	% mol	2,42

***Fuente: Ecopetrol S.A.**

Los valores de la Tabla 6 son el promedio de los datos de la composición del GR reportados para un periodo de un año, (Para ver el reporte de datos mes a mes dirigirse al *Anexo 14 Composición del GR para el año 2013*)

La simulación del proceso de Topping, hasta el caso de estudio la unidad (H-150), se presenta en la **Figura 5**.

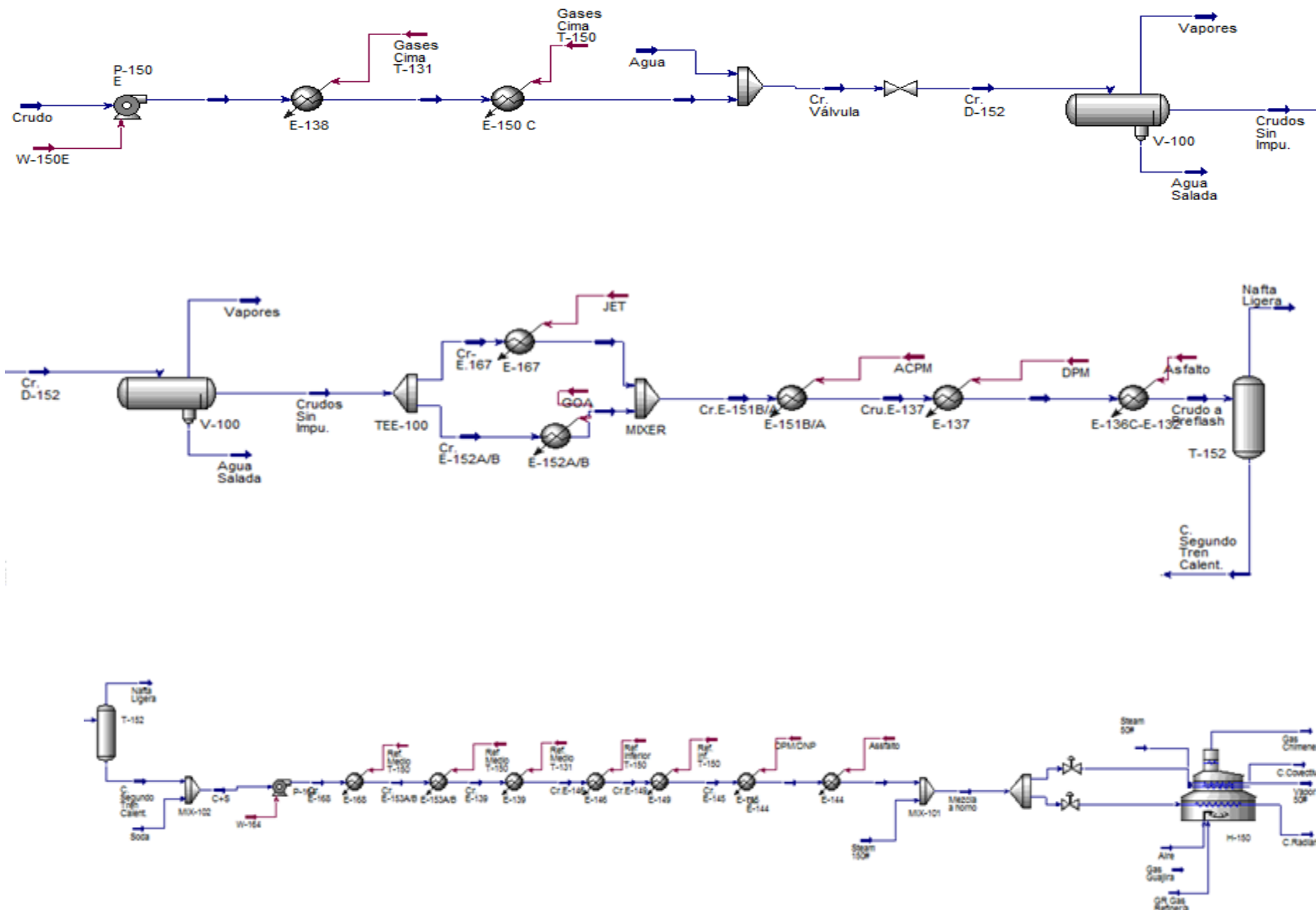


Figura 5. Simulación del proceso de Topping hasta el caso de estudio, la unidad (H-150)

La **Figura 6.** muestra las conexiones y corrientes de proceso para el Horno H-150 y los resultados para el modelo de simulación realizado se presentan en la tabla #

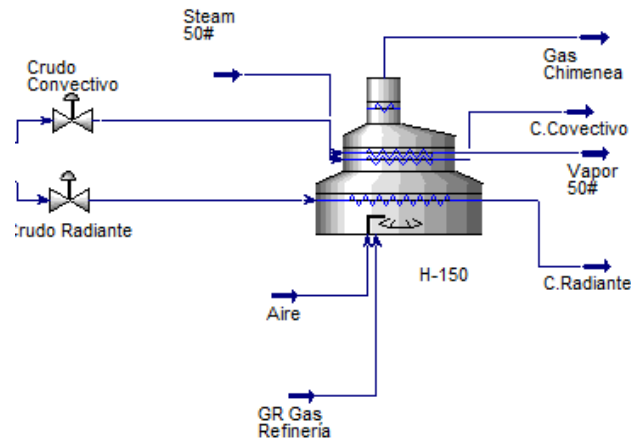


Figura 6. Conexiones y corrientes de proceso para el H-150 con GR

Tabla 7. Resultados de simulación H-150 con Gas de Refinería

Resultados Simulación Horno H-150 con Gas de Refinería							
Nombre corriente	Crudo Radiante	Crudo Convectivo	Steam #50	Aire	GR Gas Refinería	C. Radiante	Datos Reportados
Vapor	0,3543	0,3543	1	1	1	0,4805	
Temperatura [F]	457,0035	457,0035	297,6461	100	90	613,66*	602.5**
Presión [psig]	120	120	50	120	120	120	160
Flujo Molar [Kmol/h]	488,79	276,966	25928,45	1666736762,3798*	1454241,5	248961,38	
Flujo Volumétrico [USGPM]	564,3877	564,3977	22,0127	37469,3364*	9146	564,3877	

Fuente: Autores

*Los valores en rojo son los datos arrojados por el simulador.

** El valor en verde es el dato reportado por Ecopetrol

Los valores de la columna de crudo radiante y crudo convectivo son datos proporcionados al simulador. La columna de Steam #50 es una corriente de vapor de agua que ingresa a 50 psig y se mezcla con el crudo que ingresa a la zona convectiva del horno. La columna de aire muestra las condiciones y cantidad de comburente necesario para llevar a cabo la combustión.

El GR tabula las condiciones y flujos del combustible que ingresa al horno.

Por últimos se presentan los valores del crudo que sale por la zona radiante del horno H-150, dando como variable de respuesta la temperatura. El valor de la temperatura del crudo a la salida del horno reportado por Ecopetrol tiene un 1,85% de error con respecto al valor arrojado por el simulador. La diferencia puede

deberse a la variabilidad de composición y de porcentaje de hidrógeno presente en el GR.

Esto puede observarse en la siguiente tabla 8 “*Resultados análisis de varianza y desviación estándar para el GR*” la cual fue elaborada con la ayuda de herramientas estadísticas y haciendo uso de las ecuaciones de varianza y desviación estándar. Con ella, podemos deducir que existe una variación de los datos reportados mes a mes para el año 2013 con el promedio que se tomó en cuenta para realizar la simulación.

Tabla 8. Resultados análisis de varianza y desviación estándar para el GR

Composición GR				
COMPONENTES	UNIDADES	Prom.2013	Varianza	Desviación
DIOXIDO DE CARBONO	% mol	0,85	0,30	0,55
ETANO	% mol	6,27	1,05	1,03
ETILENO	% mol	3,50	0,27	0,52
GRAVEDAD ESPEC. GAS	N/A	0,65	0,00	0,06
H2S	% mol	0,29	0,04	0,20
HIDROGENO	% mol	34,40	11,22	3,35
ISO-BUTANO	% mol	2,44	1,07	1,04
ISO-PENTANO	% mol	0,92	0,17	0,41
METANO	% mol	32,28	24,40	4,94
MONOXIDO DE CARBONO	% mol	1,87	2,54	1,59
N-BUTANO	% mol	1,39	0,21	0,46
NITROGENO	% mol	2,65	0,30	0,55
OXIGENO	% mol	0,10	0,00	0,06
PESO MOLECULAR	gr/mol	18,89	3,01	1,73
PROPANO	% mol	4,32	1,70	1,30
PROPILENO	% mol	6,42	3,45	1,86
TOTAL OLEFINAS	% mol	2,42	1,52	1,23

Fuente: Autores

Teniendo un porcentaje de error muy pequeño entre los valores podemos concluir que las condiciones de entrada y suposiciones hechas para la simulación fueron acertadas, el modelo representa muy bien el proceso de Topping y proporciona una respuesta confiable que puede ser utilizada como herramienta de predicción de la temperatura a la salida del horno por la empresa ECOPETROL.

5. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVA PARA AUMENTAR LA TEMPERATURA A LA SALIDA DEL HORNO H-150-

Una alternativa para evaluar la temperatura de salida del Horno H-150 consiste en reemplazar el gas combustible del horno H-150^o por un gas natural (gas Guajira) el cual posee un mayor poder calorífico y una concentración baja o nula de hidrógeno. *Ver Anexo 15 Composición Gas Guajira)*

De esta forma se puede calcular el comportamiento de la simulación y verificar el efecto de la composición en la temperatura.

La **Figura 7.** muestra las conexiones y corrientes de proceso para el Horno H-150

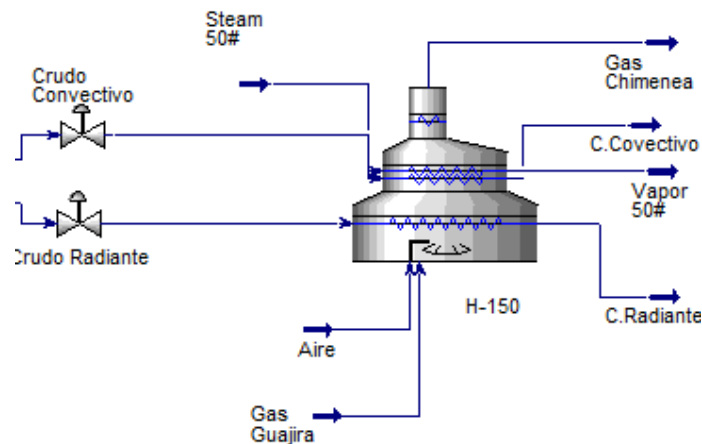


Figura 7. Conexiones y corrientes de proceso para el H-150 con GN

Los resultados para la simulación utilizando gas Guajira están en la **Tabla 9.**

Tabla 9. Resultados de simulación H-150 con gas Guajira

Resultados Simulación Horno H-150 con Gas Guajira						
Nombre corriente	Crudo Radiante	Crudo Convectivo	Steam #50	Aire	GR Gas Refinería	C. Radiante
Vapor	0,3543	0,3543	1	1	1	0,4805
Temperatura [F]	457,0035	457,0035	297,6461	100	90	682,47*
Presión [psig]	120	120	50	120	120	120
Flujo Molar [Kmol/h]	488,79	276,966	25928,45	39799,0	9146*	248961,38
Flujo Volumétrico [USGPM]	564,3877	564,3977	22,0127	37469,3364	9146	564,3877

Fuente: Autores

Al remplazar el GR por GN se comprobó que la alternativa propuesta es viable, pues se pudo observar que la variable evaluada que es la temperatura en la corriente de salida del horno H-150 al simularse con los mismos parámetros de diseño, aumentó un 11% con respecto a la simulación hecha utilizando gas de refinería.

El gas Guajira es un gas Natural (GN) que presenta una mezcla de hidrocarburos livianos en estado gaseoso, y en su mayor parte está compuesto por metano y etano, en menor proporción por propano, butanos, pentanos e hidrocarburos más pesados. El contenido de metano del gas Guajira es muy alto,(98%) por lo cual se le denomina gas rico y proporciona un mayor poder calorífico que otros gases. El GR por contener una composición alta de hidrógeno presenta particularidades que lo diferencia considerablemente de otros combustibles. Por ejemplo, el poder calorífico por unidad de volumen del hidrógeno es inferior al de otros, lo cual implica que se debe suministrar una mayor cantidad de flujo para proporcionar los mismos resultados que un gas sin hidrógeno en su composición como el Ga Guajira.

Además, un aspecto negativo del hidrógeno es su baja energía de ignición, que hace que éste sea propenso a autoencenderse, por lo que la sola presencia de puntos calientes puede provocar el encendido prematuro de la mezcla antes de aplicar la chispa, lo cual es un riesgo para la seguridad de la operación.

5.1. VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Al lograr realizar toda la simulación se hace como primer paso una verificación del PFD de la Topping U-150 (*Ver Anexo 16 Diagrama de simulación total del proceso*) Con un análisis de la información reportada por ECOPETROL, se evaluaron los datos reales y los reportados o entregados por la simulación y se reajustan algunos parámetros de operación a fin de simular las condiciones reales de operación. Por tanto, es necesario realizar varias corridas y así comparar los datos de salida del simulador con los datos recopilados en la refinería, para obtener el porcentaje de error de la simulación del proceso.

A continuación se muestra la tabla 10 de validación de datos para éste trabajo de aplicación, donde se escogieron algunas de las variables más influyentes del proceso como parámetros a evaluar:

Tabla 10. Validación de datos para la simulación de la Topping U-150

Equipo	Parámetro a Validar	Unidad	Simulado	Reporte Ecopetrol	% Error
Desalador D-152	Flujo de Crudo Libre de impurezas y Sales	Barril/día	38050	38223	0.453%
	Presión en el D-152	PSIG	246	238.6	3.106%
Torre Preflash T-152	Temperatura de Entrada	°F	315	315.11	0.035%
	Presión de Cima	PSIG	20.2	14.7	37.415%
	Temperatura de Cima	°F	290	257.5	12.621%
Horno H-150	Composición en los gases de chimenea (CO ₂)	% mol	12.14	8.49	42.992%
	Composición en los gases de chimenea (CO)	% mol	0	0.5	100.000%
	Temperatura de salida del crudo	°F	613.66	602.5	1.852%

Fuente: Autores

5.1.1. Análisis de la validación:

5.1.1.1. Desalador

- ✓ Flujo de Crudo libre de impurezas y Sales: El flujo de crudo saliente de este equipo en la simulación tiene una gran similitud con los datos reportados por Ecopetrol. La diferencia se debe a que una de las consideraciones tomadas para la simulación fue simularlo como un separador trifásico, ya que HYSYS no cuenta con una unidad que represente propiamente este tipo de equipo.

- ✓ Presión en el D-152: el porcentaje de error se debe a la consideración de simular el desalador como un separador trifásico, y además, a que en la simulación no se está teniendo en cuenta la pérdida de carga por las tuberías.

5.1.1.2. Torre Preflash T-152

- ✓ Temperatura de Entrada: El porcentaje de error es despreciable, lo que significa que el primer tren de intercambio de calor está funcionando de forma correcta, y se está garantizando las condiciones de entrada al crudo para el ingreso a la torre preflash T-152.
- ✓ Presión y Temperatura de Cima: El porcentaje de error es debido a la consideración de simular la torre preflash T-152 como un separador bifásico. Se simuló de ésta manera pues no se contó con los parámetros necesarios para simular el equipo en forma de torre destiladora, lo que hubiese permitido ingresar un mayor número de parámetros tales como dimensiones, número de platos y plato de alimentación.

5.1.1.3. Horno Atmosférico H-150

- ✓ Composición: Aunque el porcentaje de error en estos ítems es demasiado alto, estos valores se deben a que durante la simulación se consideró combustión completa, lo cual significa que ingresa una cantidad en exceso de comburente "aire" en exceso. Esta consideración se realizó por abreviación del modelo, pero cabe resaltar que la combustión completa es un proceso ideal, por tanto, en el simulador no hay generación del componente CO que se obtiene generalmente al darse la reacción de combustión.

- ✓ Temperatura de salida del crudo: El porcentaje de error de éste parámetro de salida, el cual es el de mayor importancia dentro de la simulación es pequeño y proporciona buena confiabilidad.

Al salir de servicio debido a razones de seguridad o mantenimiento una de las unidades de Cracking como la Modelo IV u Orthoflow que alimenta al horno de la unidad de destilación U-150, se presenta una baja significativa en el poder calorífico del gas combustible debido a la ausencia de gases pesados de capacidad calorífica y a la alta concentración de hidrógeno. Además, éste error puede deberse a que la temperatura que alcanza el crudo

calentado por el horno depende no sólo del gas de combustión, sino también de factores como el grado de limpieza de los serpentines dentro del horno y pérdidas de calor en las tuberías.

6. CONCLUSIONES

- ❖ El modelo de la simulación obtenido del horno H-150 del proceso de Topping de la refinería de Ecopetrol- Barrancabermeja, es un modelo confiable, que se acerca de forma adecuada a la operación promedio real de la planta y que puede ser utilizado para realizar otro tipo de estudios más avanzados.
- ❖ Se comprobó que el horno H-150 sí es capaz de proporcionar una mayor temperatura al crudo pero solo si quema un gas combustible que tenga un alto poder calorífico. Mientras el horno opere con gas de refinería con alto contenido de hidrógeno, el equipo se verá limitado a superar las condiciones en el sistema de precalentamiento del crudo y no se aseguran las condiciones para entrar a la torre de destilación atmosférica T-150.
- ❖ Algunas de las desviaciones entre los datos de la simulación y los datos reales aunque fueron pequeños, pueden ser ocasionadas por consideraciones tomadas para la simulación como la adaptación de unidades según el proceso, ya que HYSYS no cuenta con ciertos equipos que los represente propiamente.
- ❖ Éste trabajo puede ser el punto de partida para nuevos trabajos que quieran mejorar la eficiencia en el tren de calentamiento del horno H-150 por medio de mezclas de flujos de gases con altos poderes caloríficos con el gas de refinería para minimizar el efecto del hidrógeno.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda llevar un mejor control y biblioteca de los datos al momento de llevar a cabo las mediciones de las variables en el complejo de Ecopetrol-Barrancabermeja.
- No se recomienda usar corrientes de gas combustible con alto porcentaje de hidrógeno, ya que esto implica mayores costos debido a requerimientos de mayor volumen de gas. Además, genera altos riesgos sobre la integridad de los equipos, pues, por su baja energía de ignición puede provocar incendios en puntos calientes de tuberías o equipos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Campodocs.2013. Capacidad calorífica. [<http://campodocs.com>] de [http://campodocs.com/articulos-para-saber-mas/article_46061.html]
- [2] ECOPETROL. Editor2, 2014, (9 de Noviembre). Refinación [Ecopetrol.com.co] de: <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos/refinacion>
- [3] ECOPETROL. Manual de descripción de proceso de la Unidad de crudo U-150.Barrancabermeja. Pág. 1-13.
- [4] Escuelapedia, 2012. PODER CALORIFICO. [<http://www.escuelapedia.com>] de [<http://www.escuelapedia.com/el-poder-calorifico-de-los-combustibles/>]
- [5] Inzunza, J. 2007. FÍSICA: INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA Y CALOR, CAPÍTULO 14: MÉCANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR. [<http://www.sibudec.cl>] de [http://www.sibudec.cl/ebook/UDEC_Introduccion_a_la_Mecanica_y_Calor.pdf]
- [6] Jamanca, E., 2011. SIMULACIÓN DE PROCESOS APLICADO A LA INDUSTRIA USANDO ASPEN HYSYS V8.0. [www.es.scribd.com] de [<https://es.scribd.com/doc/227085576/16/Horno-Furnace>], páginas 63-69.
- [7] Maldonado D, “Modelación del proceso de separación de Gas-Crudo en la industria petrolera” Escuela de Ingeniería de Petróleos 2010, Universidad del ISTMO; Santo Domingo, Tehuantepec.

- [8] Martínez V, Alonso P, López J, Salado M, Rocha J. Simulación de Procesos en Ingeniería Química. 1 ed. México; Editorial Plaza y Valdés. 2000. Pág. 34-37
- [9] Ministerio de Minas y energía. Godoy. A. 2010. [minminas.gov.co] de [http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Grupo%20de%20Participacion%20Ciudadana/PresentacionSimposioVIII-I.pdf]
- [10] Montaña, D., “Determinación de las propiedades de combustión e identificación de problemas de intercambiabilidad de las mezclas de gas natural con otros combustibles de refinería”, Escuela de Ingeniería Química 2011, Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga, Colombia.
- [11] OM Cala, L Meriño, V Kafarov Revista Ingenierías 2014 - revistas.udem.edu.co Efecto de la composición del gas de refinería sobre las características del proceso de combustión.
- [12] UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. 2010. Simulación de Proceso en Ingeniería Química. [http://www.virtual.unal.edu.co] de [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/ana_sim/mod_1/html/contenido07.html]

ANEXOS

ANEXO 1 Especificaciones ambiente de Simulación

➤ **Simulación del tren de calentamiento**

Tras la caracterización del crudo, en el espacio de simulación encontramos la corriente para iniciar el proceso. Allí se especifican las condiciones de entrada del flujo, como el caudal, la presión y la temperatura de entrada.

El proceso inicia con un aumento de presión y aumento de temperatura por medio de una bomba y dos intercambiadores de calor.

En el intercambiador de calor se realizan balances de materia y energía, y es posible calcular temperaturas, presiones, flujos de calor y flujos de corriente de masa o UA. Los cálculos del intercambiador de calor se basan en balances energéticos para los fluidos caliente y frío. En las relaciones generales, el fluido caliente suministra calor al fluido frío:

$$\text{Balance Er.} = (M_{cold}[H_{out} - H_{in}]_{cold} - Q_{leak}) - (M_{hot}[H_{in} - H_{out}]_{hot} - Q_{loss})$$

Donde:

M : caudal másico del fluido

H : Entalpía

Q_{leak} : Fuga de calor

Q_{loss} : pérdida de calor

Balance Er: Especificación del intercambiador generalmente igual a cero.

Hot, cold : Fluidos calientes y fríos

In, out : corriente de entrada y de salida

El calor total transferido entre los lados del tubo y la carcasa, se puede definir en términos del coeficiente de transferencia de calor global, el área disponible para el intercambio de calor, y el delta de temperaturas.⁷

$$Q = UA\Delta T_{LM}F_t$$

Donde:

U = Coeficiente Global de transferencia de calor W/m^2K

A = Superficie del área disponible de transferencia de calor m^2

ΔT_{LM} = Diferencia logarítmica de temperatura (LMTD)

F_t : factor de corrección (LMTD)

➤ Simulación de Bombas

Los cálculos se basan en la ecuación de la bomba estándar de potencia, que utiliza el aumento de la presión, el caudal del líquido y la densidad.

$$Potencia\ requerida_{ideal} = \frac{(P_{out} - P_{in}) * velocidad\ del\ flujo}{densidad\ del\ liquido}$$

P_{out} : Presión de salida de la bomba

P_{in} : Presión de entrada a la bomba

La ecuación anterior define la potencia ideal necesaria para elevar la presión del líquido, la potencia real de la bomba se define en términos de la eficiencia de la bomba.⁷

$$Eficiencia_{(\%)} = \frac{Potencia\ requerida_{ideal}}{Potencia\ requerida_{real}} * 100\%$$

Cuando la corriente está completamente definida, solo dos de las siguientes variables deben ser especificadas en el simulador HYSYS para que se calculen las incógnitas de las bombas usadas durante éste trabajo:

- Presión o caída de presión de salida
- Eficiencia
- Energía de la bomba

La potencia ideal requerida W , para aumentar la presión de un fluido incompresible es:

$$W = \frac{(P_2 - P_1) * F * (MW)}{\text{densidad de la corriente}}$$

Luego el crudo es mezclado con una corriente de agua y es conducida hacia un desalador.

➤ **Simulación de Mezclador de Corrientes**

El mezclador de corrientes combina dos más flujos de entrada para producir una corriente única de salida. Se presenta un equilibrio de calor y materia en el mezclador. Si se conocen las propiedades de las corrientes de entrada al mezclador (temperatura, presión, composición), las propiedades de la corriente de salida es calculado automáticamente por el simulador.

➤ **Simulación del Desalador**

El desalador en una unidad de destilación de crudo es una sección crítica de la planta. Su propósito es remover sales y agua del crudo mediante fuerzas electrostáticas y permitir un mayor tiempo de residencia para la separación. Un buen desempeño en la desaladora podría mejorar el funcionamiento de la planta reduciendo el arrastre de sales corriente abajo y reduciendo el arrastre de crudo en la salmuera.

Adición de Agua de Lavado

El agua de lavado es ingresada a la corriente de crudo antes de entrar a la desaladora para remover sales del mismo. La cantidad de agua recomendada a adicionar es el 3-4.5% del flujo de crudo. Mientras mayor sea la cantidad de agua adicionada, mejor será el lavado y mayor la remoción de sales del crudo. Un flujo de agua superior al 4.5% puede acarrear arrastre de agua junto con el crudo.

➤ **Simulación de la válvula de mezclado**

Una válvula de mezclado es ubicada antes de la desaladora para facilitar una mezcla apropiada entre el crudo y el agua de lavado. A un mayor diferencial de presión a través de la válvula, mejor será el mezclado.

Un diferencial de presión muy elevado puede reducir la carga debido a limitaciones en el bombeo de la alimentación.

Al terminar el proceso en la desaladora, nuevamente el crudo pasa por un aumento de temperatura, éste finaliza en una Torre Pre-flash. La corriente que sale por el fondo de la torre se mezcla con una corriente de Soda comercial, seguidamente es sometida a un aumento de presión y pasada nuevamente por un tren de calentamiento el cual termina en un horno atmosférico.

Simulación de Torre Pre-flash

El crudo parcialmente vaporizado proveniente del primer tren de intercambio de calor entra a la Torre Preflash T-152. Los vapores ascienden en la torre a la zona de rectificación y la parte líquida se dirige hacia la zona de despojo ubicada en el fondo de la torre. Los gases y la nafta virgen contenidos en el crudo ascienden hacia la cima. Por el fondo se obtiene un crudo separado o estabilizado que evita que se congestionen el tren de precalentamiento.⁸

ANEXO 2 Definición Poder Calorífico

El poder calorífico del combustible se define como la cantidad de energía interna contenida en el combustible, es decir, la relación que existe entre la capacidad calorífica del combustible y la masa de el mismo; siendo que cuanto más alto sea el poder calorífico, mayor será la energía contenida.

$$C = \frac{Cp}{M}$$

C = Poder calorífico

Cp = Capacidad Calorífica

M = Masa de Combustible

Existen dos tipos de poder calorífico, el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI).

El PCS es la cantidad de calor producida por 1 kg de combustible cuando este entra en combustión en exceso de aire y los gases de descarga son enfriados de modo que el vapor de agua en ellos sea condensado; y el PCI, el cual es la cantidad de calor que puede producir 1 kg de combustible, cuando esta quema con gases exceso de aire y tubo de escape se enfrían a la temperatura de ebullición del agua, evitando que el agua contenida en la combustión se condense.¹¹

ANEXO 3. Fundamentos de operación del horno

La transferencia de calor se da a través de todo el horno y se distribuye en cinco (5) maneras:

- Tres por la zona radiante
- Una por la zona convección
- Una por la zona del economizador⁶

Transferencia de calor por radiación.

La radiación térmica es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. La distribución de calor en esta sección se rige por la siguiente ecuación:

$$Q_{radiante} = \delta A_{\varepsilon} (T_1^4 - T_2^4)$$

$$\delta = \text{Const. Stefan - Boltzmann} = 5,6669 \times 10^{-8}$$

$$\varepsilon = \text{Emisividad (0 - 1)}$$

$$A = \text{Area transferencia de calor radiante}$$

Transferencia de calor por convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro.

El flujo de calor por convección en el que participa un fluido y un metal se da en la siguiente forma:

$$Q_{Convectivo} = UA(T_1 - T_2)$$

$$U = \text{Coeficiente de transferencia de calor}$$

$$A = \text{Area de transf. de calor convectivo}$$

$$T_1 = \text{Temperatura de la superficie caliente}$$

$$T_2 = \text{Temperatura de la superficie a calentar}$$

Transferencia de calor en la zona del economizador

El economizador es básicamente un intercambiador de calor que se ubica en la chimenea del horno para transferir el calor contenido en los gases de combustión a otros fluidos que necesiten de dicha energía.⁹

ANEXO 4 condiciones de operación Topping U-150

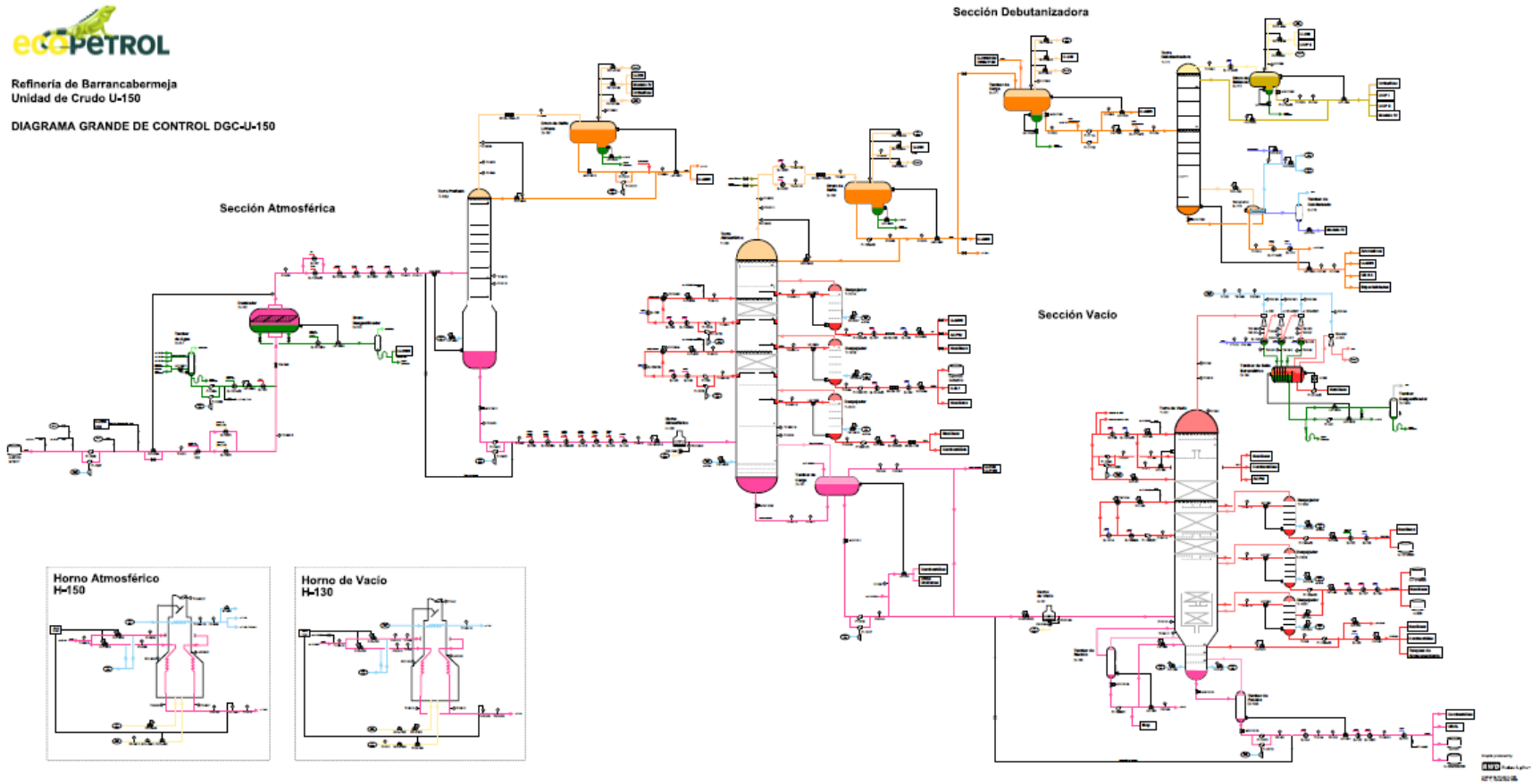
ENTRADA DE CRUDO			
ITEM	Equipo	Valor	Unidades
Flujo de entrada de Crudo		38700	BPD
Temperatura de entrada		89	°F
Presión de entrada del crudo		32.44	PSIA
Presión de operación de las bombas (succión)	P-150E	17.64	PSIA
Temp. Salida E-138	E-138	153	°F
Temp. Salida E-150C	E-150C	272	°F
Flujo de Agua que se Mezcla con el crudo		1575	BPD
Temperatura Agua		300	°F
Presion Agua		280	PSIG
Caida de presion de la válvula	PDI 15001	7.34	PSIA
DESALADOR			
Presión de operación Desalador	D-152	237.23	PSIA
Temperatura de operación Desalador	D-152	210.18	°F
Presion de salida del Desalador	D-152	223.04	PSIG
Temperatura de salida del Desalador	D-152	255.5	°F
Flujo Salida Desalador	D-152	38050	BPD
PRIMER TREN DE CALENTAMIENTO			
Intercambiador de calor	E-167	289	°F
Intercambiador de calor	E-152A/B	217	°F
Intercambiador de calor	E-151B/A	332	°F
Intercambiador de calor	E-137	343	°F
Intercambiador de calor	E-132	315	°F
TORRE PREFLASH			
Temperatura de operación Preflash		244.36	°F
Presión de operación Preflash		15.64	PSIG
Flujo Salida Preflash (Fondo)		38020	BPD
Presión de operación de las bombas	P-164	92	PSIG
SEGUNDO TREN DE CALENTAMIENTO			
Intercambiador de calor	E-168	307	°F
Intercambiador de calor	E-153B/A	348	°F
Intercambiador de calor	E-139A/B	396	°F
Intercambiador de calor	E-146	409	°F
Intercambiador de calor	E-149	444	°F
Intercambiador de calor	E-145	456	°F
Intercambiador de calor	E-144	463.5	°F
Flujo combustible de entrada al horno		9146	USGPM
HORNO ATMOSFÉRICO			
Temperatura entrada al horno	H-150	456	°F
Temperatura salida horno	H150	602.5	°F
Temperatura zona flash	H-150	599.47	°F

ANEXO 5 Diagrama de Flujo de Procesos (PFD) Topping U-150



Refinería de Barrancabermeja
Unidad de Crudo U-150

DIAGRAMA GRANDE DE CONTROL DGC-U-150



ANEXO 7 Resumen de parámetros de los intercambiadores de calor)

HEAT EXCHANGER				
Unid: E-138				
Tube No:	1153	Shell Side (in/out)		Tube Side (in/out)
		REFLUJO DE CIMA T-131		CRUDE
Total Fluid	(lb/h)	327950		449277
Operating Temperature	(F)	246	163	90 153
Unid: E-150C				
Tube No:	1505	Shell Side (in/out)		Tube Side (in/out)
		REFLUJO DE GASES DE CIMA T-150		CRUDE
Total Fluid	(lb/h)	206614		449277
Operating Temperature	(F)	311	230.7	153.1 272.2
Unid: E-152A/B				
Tube No:	321	Shell Side (in/out)		Tube Side (in/out)
		REFLUJO GASOIL ATM. + GLV		CRUDE
Total Fluid	(lb/h)	90944		269553
Operating Temperature	(F)	378	290	267 297
Unid: E-167				
Tube No:	486	Shell Side (in/out)		Tube Side (in/out)
		REFLUJO JET A		CRUDE
Total Fluid	(lb/h)	58497		179701
Operating Temperature	(F)	354	289	267 289
Unid: E-151B/A				
Tube No:	902	Shell Side (in/out)		Tube Side (in/out)
		REFLUJO ACPM		CRUDE
Total Fluid	(lb/h)	92824		449255
Operating Temperature	(F)	476	300	289 332
Unid: E-137				
Tube No:	666	Shell Side (in/out)		Tube Side (in/out)
		CRUDO		DPM
Total Fluid	(lb/h)	449253		47094
Operating Temperature	(F)	332	343	460 352
Unid: E-132				
Tube No:	1101	Shell Side (in/out)		Tube Side (in/out)
		ASFALTO		CRUDE
Total Fluid	(lb/h)	92270		449253
Operating Temperature	(F)	493	362	343 290

HEAT EXCHANGER					
Unid: E-168					
Tube No:	610	Shell Side (in/out)		Tube Side (in/out)	
		REFLUJO MEDIO T-150		CRUDE	
Total Fluid	(lb/h)	187752		368959	
Operating Temperature	(F)	353	321	290	307
Unid: E-153					
Tube No:	391	Shell Side (in/out)		Tube Side (in/out)	
		REFLUJO MEDIO T-150		CRUDE	
Total Fluid	(lb/h)	187752		368959	
Operating Temperature	(F)	428	357	307	348
Unid: E-139					
Tube No:		Shell Side (in/out)		Tube Side (in/out)	
		REFLUJO MEDIO T-150		CRUDE	
Total Fluid	(lb/h)			368959	
Operating Temperature	(F)	378	290	348	396
Unid: E-146					
Tube No:	321	REFLUJO INFERIOR T-150		Tube Side (in/out)	
		REFLUJO JET A		CRUDE	
Total Fluid	(lb/h)	135838		368959	
Operating Temperature	(F)	471	438	396	409
Unid: E-149					
Tube No:	753	Shell Side (in/out)		Tube Side (in/out)	
		REFLUJO INFERIOR T-150		CRUDE	
Total Fluid	(lb/h)	135838		368959	
Operating Temperature	(F)	557	460	407	444
Unid: E-145					
Tube No:	513	Shell Side (in/out)		Tube Side (in/out)	
		CRUDE		DPM/DNP	
Total Fluid	(lb/h)	368958		47094	
Operating Temperature	(F)	442	456	566	460
Unid: E-144					
Tube No:	687	Shell Side (in/out)		Tube Side (in/out)	
		ASFALTO		CRUDE	
Total Fluid	(lb/h)	20679		368956	
Operating Temperature	(F)	600	462	455	463

ANEXO 8 Descripción de Gravedad Específica

La gravedad específica o densidad relativa de una sustancia es la relación entre la masa de un volumen dado de líquido a 15,6°C (60°F) y la masa de un volumen de agua pura a la misma temperatura. La gravedad específica de las sustancias con menor peso que el agua, como el petróleo, tiene valor menor a uno.

Presenta un comportamiento ascendente a medida que aumenta la temperatura de corte del crudo, es decir, aumenta hacia los cortes más pesado. A medida que aumenta la gravedad específica, el punto de ebullición se hace más alto y el producto se hace menos parafínico.

Para mediar la gravedad del petróleo y de sus productos, generalmente se utiliza la escala de gravedad denominada Gravedad API (American Petroleum Institute), en lugar de la gravedad específica. La gravedad API se determina usando el método COVENIN 1143.80 (A.S.T.M. D-1298):

$$^{\circ}\text{API} = (141,5/\text{SPG}) - 131,5$$

El valor numérico de la densidad en °API tiene sentido inverso a la densidad relativa, de esta forma cuanto mayor es el °API de un crudo más ligero será y tendrá una mayor proporción de destilados ligeros con obtención de productos de mayor valor añadido como gasolinas y gasóleos mediante un esquema de refino simple, mientras un crudo con menor valor de °API, será más pesado, por lo que necesitará de un esquema de refino complejo que incluya procesos de conversión para obtener los mismos destilados. Los crudos se sitúan entre un °API de 10 y 40.

>30	°API	Petróleo ligero
20-30	°API	Petróleo medio
10-20	°API	Petróleo pesado
<10	°API	Petróleo extra pesado

ANEXO 9 Descripción de viscosidad

Se determina normalmente la viscosidad cinemática, que puede describirse como una medida de la resistencia de un líquido a su flujo y se mide como el tiempo que un líquido tarda en descender en condiciones de gravedad a través de una restricción calibrada (capilar de cristal). Se realiza mediante el ensayo normalizado **ASTM-D 445**, *Test for Determinación of Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids*, (líquidos transparentes y opacos). La viscosidad es función de la temperatura, de forma que a mayor temperatura del fluido menor es su viscosidad. La determinación se realiza con un elemento denominado viscosímetro y a dos temperaturas distintas, ya que existen correlaciones gráficas viscosidad temperatura, en el **ASTM D 341**, que permite conocer la viscosidad de un líquido a una temperatura cualquiera a partir de los datos de dos temperaturas diferentes, normalmente a 38°C (100°F) y 99°C (210°F).

Anexo 10 Descripción de la curva de destilación TBP

Al ser el crudo una mezcla de diferentes puntos de ebullición, la manera más simple de procesamiento será su separación por destilación en cortes o fracciones de diferente intervalo de ebullición y de diferente aplicación. El conocimiento previo de los rendimientos que se obtendrán, mediante una destilación en condiciones atmosféricas y a vacío, permitirá diferenciar entre sí a los crudos.

La cantidad de cortes o fracciones que se utilicen pueden variar desde 4 hasta incluso 24, según las necesidades de las refinerías, pero las siguientes 8 fracciones proveen una adecuada base para la evaluación de un crudo.

C ₂ – C ₅	Gas	191 – 277°C	Keroseno
C ₅ – 79°C	Nafta ligera	277 – 343°C	Gas Oil
79 – 121°C	Nafta media	343 – 566°C	Fuel Oil
121 – 191°C	Nafta pesada	566°C +	Residuo

La curva TBP (True Boiling Point) representa el volumen de líquido recogido en función de la temperatura de destilación de una columna estándar predefinida, a presión atmosférica hasta unos 350 – 370°C, temperatura en la que en las condiciones descritas puede empezar a aparecer craqueo térmico de las moléculas más pesadas. Consiste en una prueba usada a escala laboratorio con una columna de 15 platos teóricos en la cual se definen las características de volatilidad de fracciones de petróleo y otras mezclas complejas. Éste método permite el trazado de curvas de temperaturas de destilación en función del porcentaje en volumen o en peso de destilado (Curvas TBP).

ANEXO 11 “Descripción de la simulación de equipos”

- ✓ **Corrientes de flujo de proceso:** Luego de crear la caracterización del crudo, ingresamos la corriente del mismo, en la cual especificamos los datos requeridos para la misma, entre ellas la temperatura de entrada del crudo (89°F), la presión de entrada (32,44 PSIA) y el flujo (38700 BPD).
- ✓ **Bombas:** Se especifica la corriente de entrada y salida de la bomba, si existe caída de presión, y el delta de presión a la que operará el equipo. En la simulación contamos con 2 bombas, la primera al inicio de la operación, con un delta de presión de 18 psia, y la segunda bomba situada a la salida de fondos de la torre preflash, con un delta de presión de 97 psia.
- ✓ **Mezclador de corrientes:** El mezclador de corrientes combina dos más flujos de entrada para producir una corriente única de salida. En la simulación hay cuatro mezcladores de corrientes, el primero de ellos mezcla el crudo con agua, antes de ingresar al desalador D-152, el segundo mezcla dos corrientes de crudo que salen de dos intercambiadores en paralelo del primer tren de calentamiento. El tercero mezcla los fondos de salida de la torre preflash T-152 con un flujo de soda. Por último, el cuarto mezcla la corriente de crudo con vapor de agua antes de su ingreso al horno.
- ✓ **Desalador:** El desalador remueve sales y agua del crudo. El desalador fue simulado como un separador trifásico, el cual tiene una entrada de mezcla agua-crudo en una relación aproximada de 4.5% de agua. El Crudo sale por la parte superior con bajo contenido de sal y bajo contenido de agua y sólidos (BSW) y el agua (salmuera) sale por la parte inferior. Además hay una salida de vapor.
Al desalador solo es necesario especificar la corriente de entrada.
- ✓ **Diferencial de Presión en la válvula de mezclado:** Una válvula de mezclado es ubicada antes de la desaladora para facilitar una mezcla apropiada entre el

crudo y el agua de lavado. La válvula PDI-15001, simulada en nuestro proyecto, tiene una caída de presión de $0,52 \text{ kg/cm}^2$ (7,3 psi).

- ✓ **Intercambiadores de Calor:** En el intercambiador de calor se realiza balances de materia y energía, y es posible calcular temperaturas, presiones, flujos de calor y flujos de corriente de masa o UA. En este trabajo de aplicación hubo la necesidad de simular 14 intercambiadores de calor. Para simularlos es necesario especificar las corrientes de entrada y salida, el delta de temperatura, caída de presión, y parámetros de diseño de cada intercambiador, como la longitud y el número de tubos.

- ✓ **Torre Preflash:** El crudo parcialmente vaporizado proveniente del primer tren de intercambio de calor entra a la Torre Preflash T-152. Los vapores ascienden en la torre a la zona de rectificación y la parte líquida se dirige hacia la zona de despojo ubicada en el fondo de la torre. La torre preflash T-152 fue simulada como un separador vertical, y se especifica la corriente de entrada.

- ✓ **Horno:** Este tipo de equipo requiere una gran cantidad de calor de entrada. El calor es generado por combustión de un gas combustible, el cual está compuesto por gases de refinería y/o gas natural, y transfiere el calor a las corrientes de crudo.
El horno atmosférico (H-150), opera con una corriente de gas combustible (Gas de Refinería), el cual está compuesto en su gran mayoría por hidrógeno y metano. En el horno se inyecta una corriente de vapor de agua a una presión de 50 psig, el crudo que ingresa al horno se divide en dos corrientes de igual caudal, una que ingresa por la zona radiante y la otra por la zona convectiva. El horno opera con oxígeno en exceso.

ANEXO 12 Curva de Destilación TBP

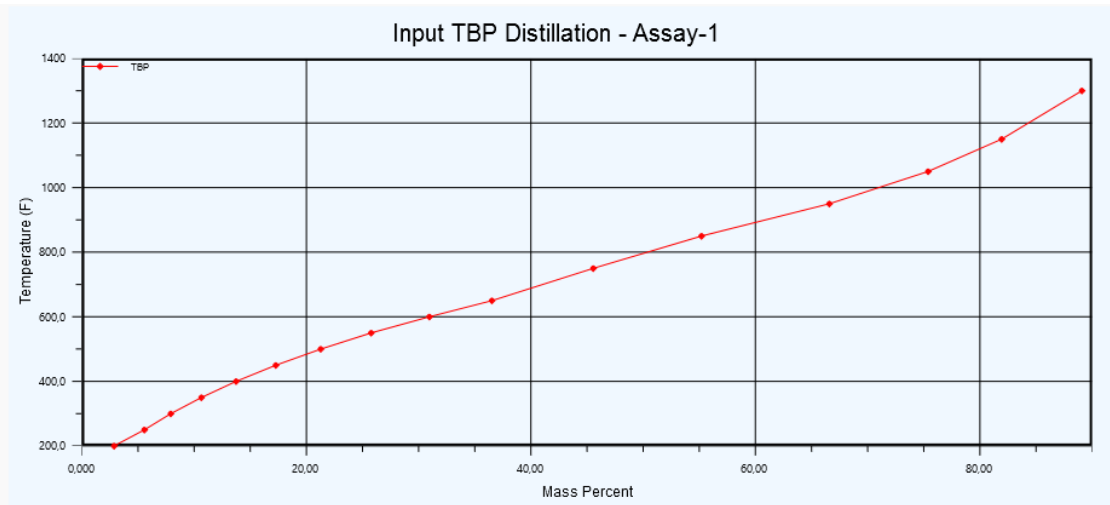


Figura 9 Curva de destilación de Crudo TBP

ANEXO 14 Composición de GR para el año 2013

COMPOSICIÓN DE GAS DE REFINERÍA																
COMPONENTE	UNIDADES	DIC	NOV	OCT	SEPT	AGO	JUL	JUN	MAY	ABR	MAR	FEB	ENE	Prom. 2013	Varianza	Desviación
DIOXIDO DE CARBONO	% mol	0,68	0,38	0,59	0,71	0,63	1,12	0,89	2,44	1,24	0,30	0,51	0,66	0,85	0,30	0,55
ETANO	% mol	5,37	5,22	5,28	4,95	6,74	6,08	7,07	5,03	7,07	8,06	7,03	7,33	6,27	1,05	1,03
ETILENO	% mol	3,78	3,52	3,67	3,23	4,05	3,18	3,08	2,64	2,83	3,53	3,93	4,55	3,50	0,27	0,52
GRAVEDAD ESPEC. GAS	N/A	0,64	0,63	0,60	0,62	0,67	0,78	0,72	0,55	0,70	0,62	0,62	0,70	0,65	0,00	0,06
H2S	% mol	0,30	0,08	0,17	0,35	0,15	0,42	0,95	0	0,13	0,20	0,24	0,24	0,29	0,04	0,20
HIDROGENO	% mol	33,82	33,92	35,05	36,16	38,75	29,65	27,49	33,89	34,72	35,64	40,55	33,11	34,40	11,22	3,35
ISO-BUTANO	% mol	2,40	2,18	1,64	1,88	3,38	5,01	3,19	0,91	2,79	1,75	1,55	2,65	2,44	1,07	1,04
ISO-PENTANO	% mol	0,64	1,23	1,77	1,69	0,55	0,77	0,81	0,96	0,87	0,60	0,62	0,55	0,92	0,17	0,41
METANO	% mol	33,89	37,74	37,79	32,45	25,70	28,55	34,62	41,86	25,60	32,46	28,55	28,17	32,28	24,40	4,94
MONOXIDO DE CARBONO	% mol	2,33	0,26	1,65	5,00	0,51	0,36	0,54	1,54	2,01	2,30	5,10	0,80	1,87	2,54	1,59
N-BUTANO	% mol	1,36	1,29	0,92	1,24	1,65	2,10	1,29	0,74	2,32	1,71	1,24	0,88	1,39	0,21	0,46
NITROGENO	% mol	2,23	2,45	1,91	3,01	2,25	3,53	3,26	2,43	3,67	2,25	2,29	2,53	2,65	0,30	0,55
OXIGENO	% mol	0,10	0,04	0,09	0,09	0,08	0,14	0,10	0,03	0,27	0,02	0,10	0,15	0,10	0,00	0,06
PESO MOLECULAR	gr/mol	18,61	18,20	17,36	17,87	19,30	22,45	20,79	15,79	20,41	17,85	17,90	20,21	18,89	3,01	1,73
PROPANO	% mol	4,46	4,09	3,34	2,83	5,02	5,69	6,49	2,14	3,79	3,70	3,89	6,44	4,32	1,70	1,30
PROPILENO	% mol	6,69	5,89	5,05	4,16	7,10	9,14	8,31	3,83	5,78	4,98	6,00	10,06	6,42	3,45	1,86
TOTAL OLEFINAS	% mol	1,93	1,72	1,08	2,26	3,42	4,25	1,91	1,47	5,43	1,91	1,60	2,02	2,42	1,52	1,23

ANEXO 15 Composición Gas Guajira

Gas Guajira		
Componente	Fórmula	Guajira
Hidrógeno	H2	
Helio	He	
Agua	H2O	
Monóxido de Carbono	CO	
Nitrógeno	N2	0,01537
Oxígeno	O2	
Sulfuro de Hidrógeno	H2S	
Argón	Ar	
Dioxido de Carbono	CO2	0,00049
Aire		
Metano	CH4	0,98054
Etano	C2H6	0,00263
Propano	C3H8	0,00049
iso-Butano	C4H10	0,00016
n-Butano	C4H10	0,00007
iso-Pentano	C5H12	0,00006
n-Pentano	C5H12	0,00002
n-Hexano	C6H14	
n-Heptano	C7H16	
n-Octano	C8H18	
n-nonano	C9H20	
n-decano	C10H22	
Z=		0,998935
Gravedad Específica Real Gr =		0,5644

Nota: Los datos de la tabla anterior son promedios de muestras tomadas por ECOPETROL S.A.

ANEXO 16 Diagrama de Simulación Total del Proceso

