

Análisis del comportamiento de la unidad U1000 de la GRB mediante su modelado con la herramienta ASPEN HYSYS® para evaluar la factibilidad de cargar aceite desmetalizado.

Adrián Tristancho Muñoz

Trabajo de aplicación para optar al título de Magister en Ingeniería Química

Director:

Víctor Gabriel Baldovino Medrano

Ingeniero Químico

Codirector:

Germán Emilio Castellanos Romero

Ingeniero Químico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Maestría en Ingeniería Química

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A DIOS, que por todo el amor que él siente por mí, me ha dado la capacidad de cosechar un logro más en mi vida.

Para mi madre Flor, mi esposa Beatriz y mis hijos Natalia y Cristian, a quienes amo y les doy las gracias por su apoyo y dedicación.

Adrian Tristancho Muñoz

Agradecimientos

Doy mis agradecimientos a la empresa colombiana de petróleos ECOPETROL S.A, en cabeza del ingeniero Orlando Díaz Montoya, Ángela María Corrales Vélez, Edna Esperanza Guerra Pacheco y demás profesionales que han creído que lo más importante son las personas y le apuntan al desarrollo de las mismas.

Al personal del Departamento de Parafinas y Fenol, los cuales no escatimaron en brindarme todo su conocimiento y experiencia para llevar a cabo el cumplimiento de los objetivos trazados en este trabajo.

A mis compañeros del departamento de Refinación de Fondos, de los que siempre sentí su apoyo incondicional. Muchas bendiciones.

Al cuerpo de educadores de la escuela de Ingeniería Química de la universidad Industrial de Santander, los cuales me ofrecieron esta oportunidad aprender y mejorar.

Contenido

	Pág.
Introducción	22
1. Objetivos	25
1.1 Objetivo General.....	25
1.2 Objetivos Específicos.....	25
2. Marco Conceptual.....	26
2.1 Descripción General.....	26
2.2 Unidad CDU U150.	27
2.3 Unidad U2500: Demex	28
2.4 Unidad U1000: desasfaltado con propano.	29
2.4.1 Descripción General Del Proceso Dap.	30
2.4.2 Variables Influyentes En El Proceso.....	31
2.4.2.1 Efecto De La Temperatura De Cima T1001.	31
2.4.2.2 Efecto de la relación solvente/carga.	32
2.4.2.3 Gradiente de temperatura en la torre T1001.	32
3. Marco Teórico.....	32
3.1 Generalidades de la extracción líquido - líquido.	32
3.1.1 Efecto de la temperatura.	34
3.1.2 Naturaleza del disolvente de extracción	35

3.2 Caracterización de los crudos	36
3.2.1 Curva real de destilación (TBP).....	36
3.2.2 Pseudocomponentes.....	37
3.2.3 Gravedad específica y gravedad API.....	37
3.3 Fundamentos para el modelado en Aspen HYSYS®.....	38
3.3.1 Entorno De Simulación.....	38
3.3.2 Clases De Corrientes En Aspen HYSYS®.....	39
3.3.3 Propiedades Termodinámicas.....	39
3.3.4 Elección Del Modelo Termodinámico.....	41
3.4 Información Estadística.....	45
3.4.1 Hipótesis nula y alternativa.....	45
3.4.2 Análisis De Varianza.....	47
3.4.3 Manejo de datos atípicos.....	51
3.5 Revisión del estado del arte.....	52
4. Metodología para el desarrollo del modelo	59
4.1 Adquisición de los datos del proceso.....	60
4.1.1 Recolección De Datos.....	60
4.1.2 Selección De Datos.....	62
4.2 Desarrollo del modelo unidad U1000 en Aspen HYSYS®.....	63
4.2.1 Esquemático de la unidad U1000.....	63
4.2.2 Selección de los parámetros.....	64
4.2.3 Implementación del paquete termodinámico.....	64
4.2.4 Implementación de los equipos.....	66

4.2.5 Caracterización e implementación de las corrientes.....	68
4.2.6 Validación del modelo.....	70
4.3 Análisis de las variables del proceso	71
4.4 Evaluación del modelo con DMO.....	72
4.4.1 Implementación De La Nueva Corriente.....	72
4.4.2 Comportamiento Del Modelo Cargando DMO.....	73
4.4.3 Balance Económico.....	74
5. Análisis de Resultados	76
5.1 Desarrollo del modelo en Aspen HYSYS®.....	76
5.1.1 Análisis De Los Paquetes Termodinámicos.....	76
5.1.2 Validación Del Modelo con Fondos de vacío.....	81
5.1.3 Validación del modelo con Slurry.....	82
5.2 Análisis de las variables del proceso.....	83
5.2.1 Comportamiento del rendimiento vs temperatura de cima T1001.....	83
5.2.2 Comportamiento del rendimiento vs relación solvente/carga.....	85
5.2.3 Comportamiento del contenido de CCR en el extracto.....	87
5.3 Evaluación del modelo de la unidad U1000 con DMO	89
5.3.1 Resultados de los Ensayos De Evaluación.....	89
5.3.2 Análisis De Resultados De Las Simulaciones Con Dmo.....	93
5.3.3 Comparación de los resultados desde el aspecto económico.....	95
5.3.4 Cálculo del balance económico.....	96
6. Conclusiones	97
7. Recomendaciones	98

Referencias Bibliográficas	100
Apéndices.....	103

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Diagrama de flujo general refinería de Ecopetrol S.A.....	27
<i>Figura 2.</i> Proceso de extracción líquido-líquido unidad U1000.....	31
<i>Figura 3.</i> Principales etapas del proceso de extracción líquida.....	33
<i>Figura 4.</i> Diagrama de solubilidad líquido-líquido a presión constante	34
<i>Figura 5.</i> Entornos de la herramienta Aspen HYSYS.....	38
<i>Figura 6.</i> Árbol de decisión de modelos termodinámicos	43
<i>Figura 7.</i> Diagrama de caja con los rangos intercuartílicos	52
<i>Figura 8.</i> Etapas del proceso patentado	54
<i>Figura 9.</i> Columna RDC con el detalle de internos.....	55
<i>Figura 10.</i> Modelo torre RDC. (a) Modelo FANN, (b) Modelo KUOP	56
<i>Figura 11.</i> Metodología para el desarrollo del modelo	60
<i>Figura 12.</i> Etapas y variables del proceso U1000	61
<i>Figura 13.</i> Esquemático unidad U1000.....	63
<i>Figura 14.</i> Sistema de Unidades (a), componentes (b) Paquete de Fluidos (c).....	64
<i>Figura 15.</i> Cambio de los paquetes termodinámicos en el modelo.....	65
<i>Figura 16.</i> Implementación de equipos al modelo	67
<i>Figura 17.</i> Implementación módulo “PETROLEUM FEEDER”	69
<i>Figura 18.</i> Implementación de una corriente en la simulación	70

<i>Figura 19.</i> Diagrama de flujo para la validación del modelo	71
<i>Figura 20.</i> Comportamiento de las variables del proceso.	72
<i>Figura 21.</i> Simulación aplicando el modelo de actividad UNIQUAC.....	78
<i>Figura 22.</i> Comportamiento rendimiento vs relación S/C.....	79
<i>Figura 23.</i> Comportamiento rendimiento vs Temperatura de cima T1001.....	80
<i>Figura 24.</i> Curva Temperatura -Fracción molar de los modelos.....	80
<i>Figura 25.</i> Rendimiento vs Temperatura de cima T1001 con Fondos de vacío.....	83
<i>Figura 26.</i> Curva de temperatura vs fracción molar.....	84
<i>Figura 27.</i> Rendimiento vs Temperatura de cima T1001 con Slurry.....	85
<i>Figura 28.</i> Rendimiento vs relación solvente/carga con fondos de vacío (a) y Slurry (b).	85
<i>Figura 29.</i> Balance de masa para la extracción líquido-líquido.	86
<i>Figura 30.</i> Distribución del asfalteno en la alimentación.....	87
<i>Figura 31.</i> CCR vs Relación solvente/carga con fondos de vacío (a) y Slurry (b).	88
<i>Figura 32.</i> Comportamiento Rendimiento en el ensayo N°1	90
<i>Figura 33.</i> Comportamiento Rendimiento vs relación S/C con solvente-2.....	91
<i>Figura 34.</i> Comportamiento Rendimiento vs relación S/C con solvente-5.....	92
<i>Figura 35.</i> Resumen de resultados de los ensayos	93

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Análisis comunes realizados al petróleo</i>	36
Tabla 2. <i>Ecuaciones de Estado ofrecidas en Aspen HYSYS®</i>	40
Tabla 3. <i>Algunos modelos de Actividad aplicados en Aspen Hysys</i>	41
Tabla 4. <i>Paquetes termodinámicos aplicable a cada tipo de proceso.</i>	44
Tabla 5. <i>Aplicabilidad de los coeficientes de actividad.</i>	45
Tabla 6. <i>Análisis estadístico con tabla ANOVA.</i>	50
Tabla 7. <i>Datos de laboratorio aplicados al modelo</i>	61
Tabla 8. <i>Puntos críticos de control para la simulación</i>	62
Tabla 9. <i>Equipos unidad U1000 requeridos para la simulación.</i>	66
Tabla 10. <i>Composición del solvente para cada tipo de carga.</i>	69
Tabla 11. <i>Destilación simulada DMO</i>	73
Tabla 12. <i>Diferentes tipos de solventes de la GRB</i>	74
Tabla 13. <i>Tabla de ecuaciones de balance económico bruto</i>	75
Tabla 14. <i>Datos comparativos paquetes termodinámicos</i>	78
Tabla 15. <i>Resumen de comparación media y desviación estándar con fondos de Vacío</i>	82
Tabla 16. <i>Comparación de la media y desviación estándar con Slurry.</i>	82
Tabla 17. <i>Condiciones operacionales aplicados a los ensayos de evaluación.</i>	89
Tabla 18. <i>Resultado del ensayo de evaluación N°3</i>	91

Tabla 19. <i>Resultado del ensayo de evaluación N°4</i>	92
Tabla 20. <i>Parámetros operativos planteados para cargar DMO</i>	95
Tabla 21. <i>Balance de utilidades Brutas U1000</i>	96

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Modelo completo U1000 para las simulaciones.....	103
Apéndice B. Interfase EDR para I.C. en Aspen HYSYS®.	104
Apéndice C. Creando una corriente con “Oil Manager”	106
Apéndice D. Creando una corriente con “Assay Management”	107
Apéndice E. Tabla datos U1000 con fondos de vacío (sección).....	108
Apéndice F. Tabla de datos U1000 con Slurry (sección)	110
Apéndice G. Ensayos de evaluación del modelo con DMO.....	112

Abreviaturas

ALC: Aceite Liviano de Ciclo.

ANOVA: Análisis de varianza (Analysis of variance).

BLENDING: Mezcla.

CDU: Unidad de Destilación de crudo (Crude Destillation Units).

DAO: Aceite Desasfaltado (Deaphalting Oil).

DAP: Desasfaltado con Propano.

DCS: Sistema de control distribuido (Distributed Control System).

DEMEX: Unidad de Desmetalización (Tecnología PEMEX).

DMO: Aceite Desmetalizado (Demetalation Oil).

ELL: Equilibrio Líquido-Líquido.

EoS: Ecuación Cúbica de estado (Cubic Ecuation of state).

EVL: Equilibrio Vapor-líquido.

FBP: Punto Final de Ebullición (Final Boilling Point).

FCC: Craqueo catalítico Fluidizado (Fluid Catalytic Cracking).

GRB: Gerencia Refinería Barrancabermeja.

IBP: Punto Inicial de Ebullición (Initial Boilling Point).

IC: Intercambiador de Calor.

LKP: Lee-Kesler-Plocker.

NRTL: Non Randon Two Liquid.

PI: Plant Information.

PR: Peng Robinson.

PRSV: Peng Robinson Stryjek Vera.

SDA: Slurry desasfaltado.

SRK: Soave Redlich Kwong.

U1000: Unidad de Desasfaltado con propano.

UNIQUAC: Universal Quasi Chemical Activity Coefficient.

Glosario

ALC: El Aceite Liviano de Ciclo es un producto de las FCC obtenido en el mismo intervalo de ebullición del diesel. Se caracteriza por presentar en su composición química altas concentraciones de compuestos de azufre, nitrógeno, oxígeno y poliaromáticos, lo que lo hace poco atractivo para ser utilizado como combustible diesel desde el punto de vista ambiental y operacional (Ecopetrol S.A., 2000).

ASFALTENOS: son compuestos de estructura compleja y altos pesos moleculares, constituidos por anillos de carbono enlazados a cadenas alquílicas y cicloalcanos, además de compuestos heterocíclicos que poseen nitrógeno, azufre y oxígeno (Torres, 2015).

ASTM-D86: Método de prueba estándar para destilación a presión atmosférica de productos derivados del petróleo y combustibles líquidos.

ASTM-D1160: Método de prueba estándar para destilación al vacío (o bajas presiones) de los productos del petróleo que pueden vaporizarse parcial o completamente a una temperatura máxima del líquido de 400 ° C.

ASTM-D2887: Método de prueba estándar para la distribución del intervalo de ebullición de las fracciones del petróleo mediante cromatografía de gases (Destilación simulada). El método es aplicable a los productos derivados del petróleo y las fracciones con un punto de ebullición final máxima de 538 °C.

ECUACION DEL MODELO AJUSTADO: Describe la relación entre la respuesta y los términos de un modelo de regresión lineal. El signo del coeficiente indica la dirección de la

relación entre el término y la respuesta. Si el coeficiente es negativo, a medida que el término aumenta, el valor medio de la respuesta disminuye. Si el coeficiente es positivo, a medida que el término aumenta, el valor medio de la respuesta se incrementa.

EDR (Exchanger Design and Rating): Es una extensión de Aspen HYSYS® para realizar el dimensionamiento del intercambiador de calor desde una simulación de Aspen. Utiliza ecuaciones estándar de medición y evaluación de intercambiadores de calor. Como parte del paquete de Aspen, usa *Aspen Properties* para calcular todas las propiedades del fluido y los coeficientes de transferencia de calor.

DEMEX: Unidad de la GRB, referenciada como U2500, que usa el proceso de extracción líquido-líquido para obtener Aceite Desmetalizado (DMO)

EXTRACTO: Es el producto valioso de la operación de ELL, rico en solvente y bajo en soluto.

GUÍAS DE CONTROL: Corresponde a los valores límites de los puntos críticos de control que hacen que la operación se ejecute dentro de un rango que garantice una operación segura, confiable y rentable, incluyendo siempre el aseguramiento de las especificaciones de calidad de los productos (ECOPETROL S.A., 2015).

OPTIMIZACIÓN: Su objetivo es encontrar el valor que deben tomar las variables independientes para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo un conjunto de restricciones. La función objetivo es una medida cuantitativa del funcionamiento de un sistema que se desea maximizar y las restricciones son un conjunto de relaciones que las variables están obligadas a satisfacer.

REFINADO: O refinato, es el residuo del proceso ExLL, bajo en solvente y rico en soluto.

SLURRY: Producto de fondo en la fraccionadora principal de la FCC, normalmente ebulle por encima de 842 °F (450 °C). Contiene gran parte de las partículas de catalizador que han escapado con los productos de la reacción de cracking.

SRK-Twu: Ecuación de estado resultado de fusión de reglas de la EoS SRK con la EoS Twu-Coon.

VENTANAS OPERATIVAS: Describe los valores límites de los puntos críticos de control que garantizan la integridad mecánica de los equipos, sistemas, plantas, estaciones y facilidades en los escenarios de operación continua o discontinua de acuerdo al área, minimizando la posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados. Estos valores se establecen a partir de la información de diseño del proceso (ECOPETROL S.A., 2015).

Resumen

Título: Análisis del comportamiento de la unidad U1000 de la GRB mediante su modelado con la herramienta Aspen HYSYS® para evaluar la factibilidad de cargar Aceite Desmetalizado*.

Autor: Adrian Trisancho Muñoz**

Palabras Claves: Simulación, Torre de desasfaltado, Carbón Conradson, Extracción líquido-líquido, Aceite desmetalizado, Aceite Desasfaltado, Slurry, Fondos de Vacío, Rendimiento, Solvente, propano, Butano, Extracto, Refinado, Aspen HYSYS®, Ecuaciones de Estado, Modelos de Actividad, Paquetes Termodinámicos.

Descripción:

En el presente trabajo de aplicación se desarrolló un modelo, por medio de la herramienta Aspen HYSYS®, de la unidad de desasfaltado con propano U1000 de la refinería de Ecopetrol S.A. en Barrancabermeja. En él se analizó el comportamiento de la producción y calidad del extracto, enfocados en su rendimiento y contenido de Carbón Conradson (CCR), simulando como corriente de carga DMO. El modelo inicialmente fue validado al comparar los registros históricos del proceso con los datos arrojados por la simulación con carga de Fondos de Vacío y Slurry. Las pruebas se realizaron con diferentes paquetes termodinámicos siendo el más apropiado la ecuación de estado Pen Robinson Stryjek Vera (PRSV).

Luego se procedió a implementar el DMO como nueva corriente de carga al modelo, evaluando el comportamiento del extracto y las condiciones operacionales del proceso en la simulación. Esta valoración se hizo por medio de ensayos de evaluación, cada una con un tipo diferente de solvente de extracción y ajustando las variables independientes: relación solvente carga y la temperatura de cima de la torre de desasfaltado. Los mejores resultados se obtuvieron en la corrida que utilizó el solvente de extracción con una composición de 57% de propano, 24% de propileno, 10% de Butano más otros, con datos promedios de rendimiento en 49.64% y CCR en 1.58%w.

Con un intervalo de confianza del modelo de un 95%, esta propuesta de aplicación concluye que la unidad de desasfaltado con propano U1000, bajo ciertos ajustes operacionales, puede cargar DMO y obtener un alto rendimiento de extracto y bajo contenido de Carbón Conradson en el mismo.

* Trabajo de Aplicación Final.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química Maestría en Ingeniería Química, Director: Prof. Victor Gabriel Baldovino Medrano, I.Q.

Abstract

Title: Behavior analysis of GRB unit's U1000 by its modeling with Aspen HYSYS® tool to evaluate feasibility of load Demetalized Oil up*

AUTHOR: Adrian Trisancho Muñoz**

Key Words: Simulation, Deasphalting Tower, Conradson Coal, Liquid-liquid Extraction, Demetallized Oil, Deasphalted Oil, Slurry, Empty Funds, Performance, Solvent, Propane, Butane, Extract, Refined, Aspen HYSYS®, State Equations, Activity models, Thermodynamic Packages.

Description:

In the present application work, a model was developed, using Aspen HYSYS® tool, of the U1000 propane deasphalting unit of the Barrancabermeja ECOPETROL SA's refinery. It analyzed production behavior and extract quality, focused on its performance and Conradson Coal content (CCR), simulating DMO loading current. Initially, model was validated when comparing the process historical record with generated data by the simulation with load slurry and empty Funds up. The tests were carried out with different thermodynamic packages, being Pen Robinson Stryjek Vera equation (PRSV) the most appropriate.

Then we proceeded to implement the BMD as a new loading current to the model, evaluating extract behavior and the process operational conditions in the simulation. This assessment was made by evaluation tests, each one with a different extraction solvent type and adjusting independent variables: solvent charge ratio and the top deasphalting tower temperature. The best results were obtained in the run that used 57% propane composition extraction solvent, 24% propylene, 10% Butane and others, with performance data in 49.64% and CCR in 1.58%w.

With a 95% model confidence interval, this application proposal concludes that U1000 propane deasphalting unit, under certain operational adjustments, can load DMO up and obtain a high extract performance and, in the same, low Conradson Coal content.

* Trabajo de Aplicación Final.

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química Maestría en Ingeniería Química, Director: Prof. Victor Gabriel Baldovino Medrano, I.Q.

Introducción

Es de amplio conocimiento que la mayoría del petróleo que se extrae en el país es pesado o extra pesado. Según información de la ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos), en Colombia existen 23 cuencas hidrográficas, de las cuales 9 son productivas (maduras). Siete de estas con producción petrolera y dos con producción de gas. La producción total de petróleo en Colombia está concentrada en tres cuencas: En los Llanos orientales, Magdalena Medio y Alto Magdalena (Agencia Nacional de Hidrocarburos, s.f.). Por sus características estos crudos afectan los desempeños de las operaciones industriales y el margen de refinación; en especial, el contenido de metales y residuo carbonoso los cuales impactan sobre equipos y sistemas usados para la refinación y a su vez sobre los costos de capital.

Por esta razón, la refinería de Ecopetrol S.A. ubicada en Barrancabermeja opera acorde con esta realidad cumpliendo con los objetivos de la organización. Este complejo industrial procesa crudos de varias calidades para extraer diferentes tipos de productos requeridos por el mercado nacional (Ecopetrol S.A., 2000). Por la diversidad y complejidad en sus procesos, afectado por los cambios permanentes en los crudos de carga, la calidad de sus productos sufre modificaciones trayendo como consecuencia degradación de su valor a raíz del incumplimiento de las especificaciones requeridas. Sumado a lo anterior, romper las cadenas hidrocarbonadas largas y pesadas de estos crudos implica la obtención de productos que requieren ser sometidos a otros procesos de mejoramiento, como el caso del aceite desmetalizado (DMO), obtenido por extracción líquido-líquido en la unidad U2500 DEMEX. Este producto contiene altos valores de Carbón Conradson (CCR) influyendo en la capacidad para cargarlo en las unidades de rompimiento

catalítico en lecho fluidizado (FCC, por sus siglas en inglés). Por esta razón es necesario asegurar, o mejor, anticipar el comportamiento de las variables involucradas en un proceso que impactan directa o indirectamente con la calidad de dichos productos. Esto se puede lograr con la ayuda de programas diseñados para el modelamiento y simulación de las unidades, tales como PRO-II y Aspen Hysys con los cuales Ecopetrol cuenta con licencia (Luque Rodriguez, 2005). Estos simuladores facilitan la toma de decisiones cuando se refiere a temas operacionales. Sin embargo no todos los procesos cuentan con sus modelos, y en ocasiones esto dificulta la ejecución de mejoras o cambios. Este ha sido el caso de la unidad U1000, que utiliza la extracción líquido-líquido aplicando el proceso de desasfaltado con propano y que está actualmente fuera de servicio porque los crudos no están generando fondos de vacío tipo parafínico. A su vez, dicha unidad no cuenta con un modelo que pueda ser usado para reflejar su comportamiento al simular el cargue con otros productos.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario evidenciar si es posible aprovechar este recurso disponible para mejorar la calidad de productos, como el caso del aceite desmetalizado, e intentar maximizar su consumo en las plantas de craqueo catalítico. Es ahí donde este trabajo enfoca su aplicación planteando el desarrollo de un modelo de la unidad de desasfaltado con propano U1000, usando como herramienta el software Aspen HYSYS® evaluando diferentes paquetes termodinámicos, acertando con aquel que se ajuste mejor al proceso, para luego dimensionar el comportamiento del modelo al implementar como carga aceite desmetalizado y al final evaluar la producción y calidad del extracto producto reflejado en el rendimiento y contenido de Carbón Conradson.

Alcance.

Este trabajo de aplicación tiene como alcance desarrollar un modelo de la unidad U1000 de la GRB que emplea el proceso de desasfaltado con propano, usando como herramienta el software *Aspen HYSYS*®, para analizar su comportamiento al implementar como carga el aceite desmetalizado y así evidenciar la producción y calidad del extracto (aceite desmetalizado desasfaltado), en términos de rendimiento DMO y contenido de carbón Conradson, que se obtendría como producto en la simulación.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar el comportamiento de la unidad U-1000 que aplica el proceso de Desasfaltado con Propano, ubicada en la Gerencia Refinería Barrancabermeja, mediante su modelado, usando como herramienta el software *Aspen HYSYS*® para evaluar la factibilidad de cargar y procesar Aceite Desmetalizado

1.2 Objetivos Específicos

Elaborar una metodología para la selección adecuada de los parámetros operativos y composiciones de las corrientes involucradas al proceso DAP, en aras de realizar un modelo de la unidad usando como herramienta el software *Aspen HYSYS*®.

Desarrollar el modelo, en estado estacionario, de la unidad de desasfaltado con propano en la herramienta *Aspen HYSYS*® Implementando los parámetros operativos y composiciones de las cargas.

Validar el modelo al ejecutar la simulación, en estado estacionario, de la unidad de desasfaltado con propano seleccionando el paquete termodinámico más apropiado al cargar fondos de vacío contrastando los resultados obtenidos con los datos reales.

Evaluar el comportamiento del modelo de la planta de desasfaltado con propano frente al procesamiento de aceite desmetalizado ajustando los nuevos parámetros operativos a dicho modelo, evidenciando el comportamiento en la calidad en el DMO producto.

2. Marco Conceptual

2.1 Descripción General

La refinería de Ecopetrol S.A. ubicada en la ciudad de Barrancabermeja, tiene una capacidad instalada para procesar 250.000 barriles día (B/D) de crudo procedentes de diferentes partes de Colombia. Cuenta con cinco unidades de destilación (CDU), cuatro unidades de ruptura catalítica (FCC), una unidad DEMEX, una unidad de desasfaltado con propano (DAP), entre otras (Ecopetrol S.A., 2000). En la figura 1 se observa el diagrama general de la refinería, sus corrientes y productos principales.

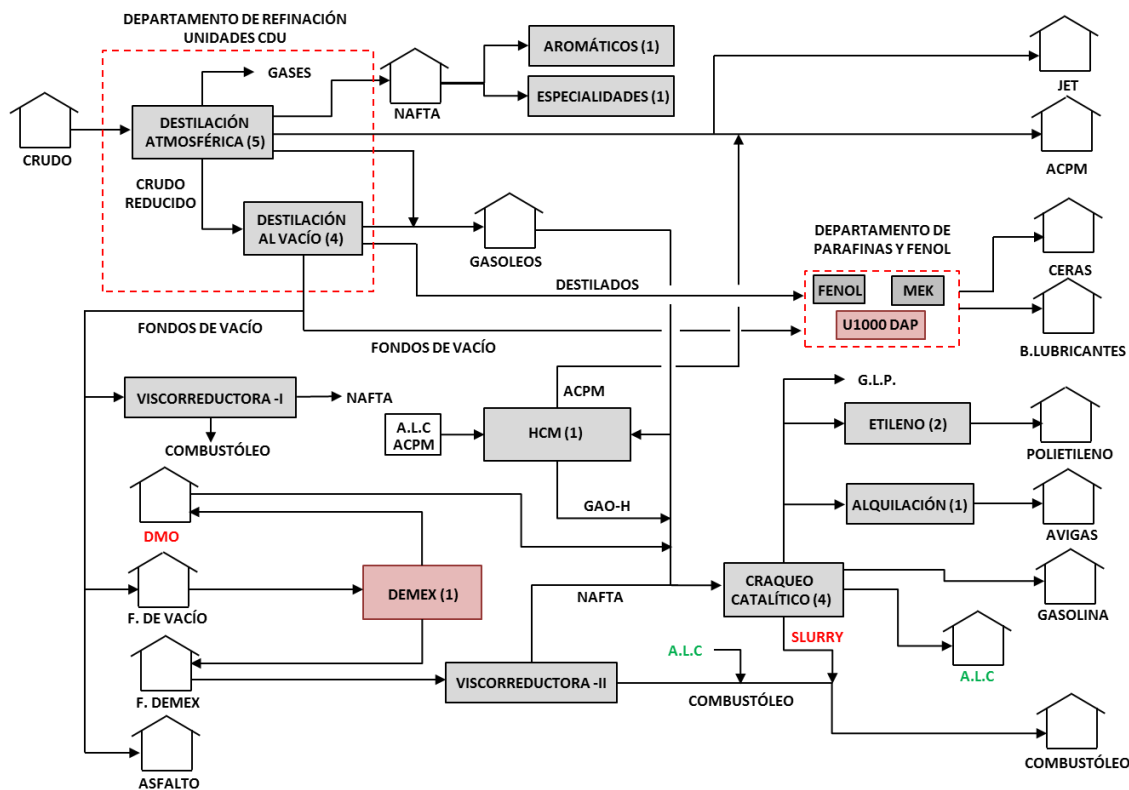


Figura 1. Diagrama de flujo general refinería de Ecopetrol S.A.

También cuenta con otras unidades que generan los servicios industriales requeridos como son: energía, vapor, agua potable, hidrógeno, aire comprimido y una unidad de tratamiento de aguas residuales (Ecopetrol S.A., 2000).

2.2 Unidad CDU U150.

El flujo de crudo de alimentación a la unidad de destilación combinada (CDU) U150 es de aproximadamente 38.000 B/D, que entran inicialmente a la sección de fraccionamiento, la cual trabaja a presiones cercanas a la atmosférica y donde se realiza una destilación primaria, obteniéndose como productos: gases, naftas, jet-A1, ACPM, gasóleos y **crudo reducido**. Este

último pasa como alimento a la sección de vacío, que opera a presiones por debajo de la atmosférica, y se realiza una destilación secundaria. Los productos obtenidos en esta sección son: gasóleos de cima y liviano, destilados medio y liviano, y **fondos de vacío**.

La corriente de **fondos de vacío** tiene varias disposiciones dependiendo del tipo de crudo cargado y de los objetivos de la unidad, pero, principalmente, sirven como alimento a las unidades U1000 desasfaltado con propano y U2500 DEMEX (Ecopetrol S.A., 2000).

2.3 Unidad U2500: Demex

Esta unidad está diseñada para cargar 45.000 BPD de **fondos de vacío**, provenientes de las unidades de destilación CDU. Usando el proceso de **extracción líquido-líquido** se obtienen los productos por contacto de la carga con un **solvente** compuesto principalmente por **n-butano, iso-butano y propano**. El **extracto** o producto principal es el **aceite desmetalizado** (DMO, por sus siglas en ingles) y su calidad está sujeta al contenido de **Carbón Conradson (CCR)**, el cual debe estar por debajo de 6,0 porcentaje en peso (%w). Después del almacenamiento, el DMO se envía a las unidades FCC (Ecopetrol S.A., 2000). Esta unidad opera bajo la condición de obtener un **rendimiento de DMO** aproximado del 50%. Este indicador se obtiene al realizar una relación entre los flujos de producción de DMO y de carga, dada en porcentaje, y está representado en la ecuación 1 (Ecopetrol S.A., 2000).

$$REND [\%] = \frac{\text{Flujo Extracto [B/D]}}{\text{Flujo Fondos de vacío [B/D]}} * 100$$

Ecuación 1 Cálculo del Rendimiento de DMO (Ecopetrol S.A., 2000).

Las características del DMO (rendimiento y calidad) están ligadas a parámetros operativos como: la temperatura del proceso, y las propiedades físicas, químicas y la relación de mezcla de los fluidos de carga y extracción. Esta relación de mezcla, también llamada relación solvente/carga se calcula según la ecuación 2.

$$REL\ S/C = \frac{Flujo\ total\ de\ solvente\ [B/D]}{Flujo\ de\ Fondos\ de\ Vacío\ [B/D]}$$

Ecuación 2 Cálculo de la relación Solvente/carga (Ecopetrol S.A., 2000).

En general la unidad DEMEX opera manteniendo el control sobre el rendimiento en el DMO y su parámetro de calidad, enfocado en el contenido de CCR y los ajustes se hacen sobre la relación solvente/carga, composición química del solvente y la temperatura de extracción (Ecopetrol S.A., 2000).

2.4 Unidad U1000: desasfaltado con propano.

La unidad U1000, o unidad de desasfaltado con propano (DAP, por sus siglas en inglés), pertenece al departamento de parafinas y fenol y su propósito general es separar el DAO del asfalto presentes en la carga a la unidad. El proceso de desasfaltado con propano también involucra la extracción líquido-líquido, utilizando **propano** como **solvente**, para separar el material parafínico del aromático y asfáltico presente en los **fondos de vacío** provenientes de la Unidad de Destilación CDU150. De aquí se obtiene como extracto un **aceite desasfaltado** (DAO, por sus siglas en inglés) con bajo contenido de contaminantes y rico en cera, y un residuo o fondos DAP en el cual se concentran los asfáltenos contenidos en la carga (Ecopetrol S.A., 2000).

2.4.1 Descripción General Del Proceso Dap. La carga de Fondos de vacío a la unidad se mezcla con un flujo de solvente usado para predilución. Esta corriente prediluída pasa por un control de temperatura y entra como alimento a la torre de extracción, identificada como T-1001, haciendo contacto con un solvente que entra a esta misma torre desde la parte inferior. Luego esta mezcla se separa, por **diferencia de densidades**, en una fase liviana (**extracto**) que consiste principalmente de **DAO** con la mayor cantidad de solvente y una fase pesada (**refinado**) que consiste en asfalto y trazas de solvente. La desolventización y recuperación del DAO y el asfalto se realiza por diferencia de presión y aumento de temperatura en unos calentadores y torres despojadoras con vapor, obteniéndose al final del proceso el DAO y asfalto producto (Ecoprteol S.A., 2000). En la Figura 2 está representado el diagrama general del proceso de desasfaltado con propano de la unidad U1000. Los datos de presión (PSIG), flujo (B/D) y temperaturas (°F) reflejados ahí son los valores típicos con carga de fondos de vacío tipo parafínicos.

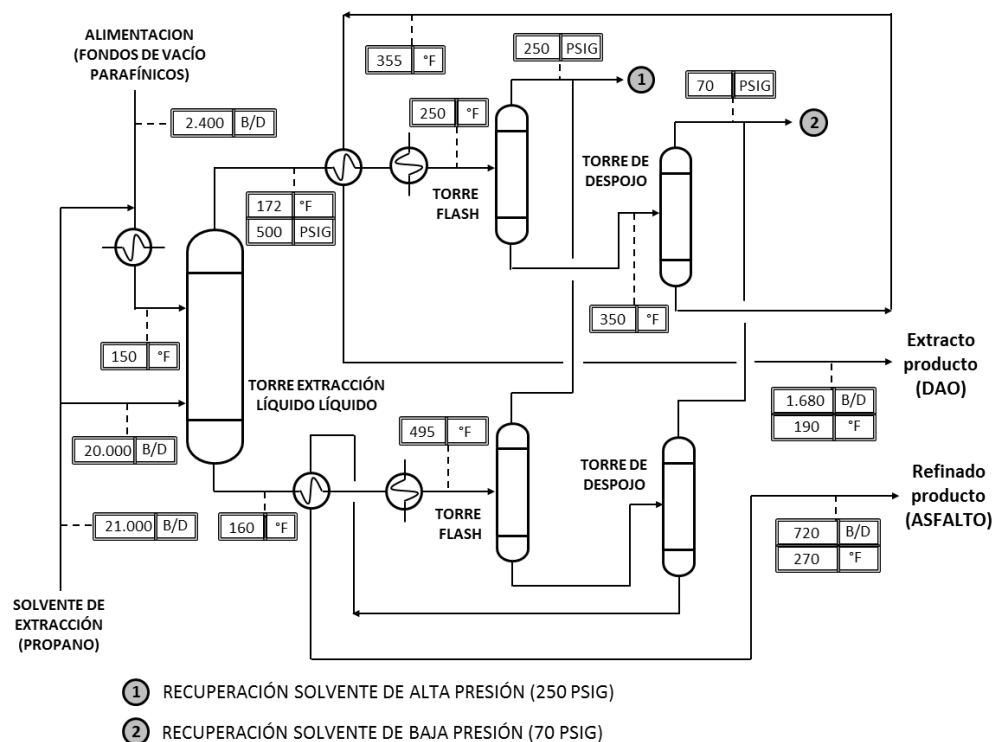


Figura 2. Proceso de extracción líquido-líquido unidad U1000 Adaptado de: (Ecoprteol S.A., 2000).

2.4.2 Variables Influyentes En El Proceso. Entre las variables operacionales de la unidad U1000 son prioritarias: la temperatura de cima torre T1001, la relación solvente/carga y el gradiente de temperatura de la torre T1001.

2.4.2.1 Efecto De La Temperatura De Cima T1001. El poder de disolución de los alcanos, como el propano y el butano, es proporcional a la densidad bajo condiciones (p, T) cercanas al punto crítico. La densidad disminuye fuertemente cuando se incrementa la temperatura. A menor temperatura de cima, mayor rendimiento de DAO pero a su vez menor calidad del mismo. La temperatura de cima es la variable más fuerte y ofrece el control más efectivo; este control se

realiza por medio del calor que transfiere el serpentín de cima de la torre al extracto (Ecoprteol S.A., 2000).

2.4.2.2 Efecto de la relación solvente/carga. A mayor relación solvente/carga se disuelven más compuestos aumentando el rendimiento de DAO. La relación solvente/carga se debe optimizar teniendo en cuenta la temperatura de cima T1001. Si esta relación es muy alta, se incrementan los costos operacionales de la unidad (Ecoprteol S.A., 2000).

2.4.2.3 Gradiente de temperatura en la torre T1001. El gradiente de temperatura en la torre de extracción torre T1001 origina un reflujo interno que favorece la selectividad de la extracción. A mayor gradiente de temperatura mejor calidad del DAO. El tráfico interno entre la fase dispersa y la fase continua es mejor. El delta de temperatura recomendado es +/- 12°F (Ecoprteol S.A., 2000).

3. Marco Teórico

3.1 Generalidades de la extracción líquido - líquido.

El proceso de extracción líquido-líquido se desarrolla bajo el fenómeno de equilibrio de fases o Equilibrio líquido-líquido (ELL). Es una operación unitaria de **transferencia de masa**¹ que se

¹ La **transferencia de masa** usa como mecanismo impulsor el movimiento de **difusión**. Éste es el movimiento, bajo la influencia de un estímulo físico, de un componente individual a través de una mezcla (McCabe, 1991).

aplica para separar componentes en solución mediante su distribución en dos fases líquidas inmiscibles. Este proceso se conoce también como extracción con disolvente (Perry, 1999), y en el cual la alimentación es la solución que contiene los componentes a separar. El disolvente de extracción o simplemente el disolvente es el líquido inmiscible que se agrega al proceso con objeto de extraer uno o varios solutos de la corriente de alimentación. Tal como lo ilustra la figura 3, Normalmente un proceso de extracción requiere: una etapa de extracción líquido-líquido, una etapa de desolventización del extracto/refinado, y una última etapa de recuperación del disolvente (Perry, 1999).

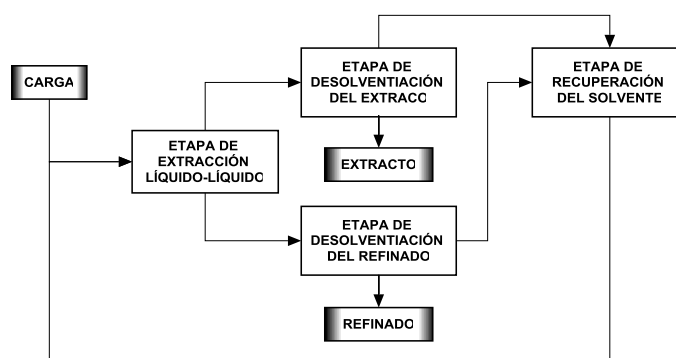


Figura 3. Principales etapas del proceso de extracción líquida

La separación de los componentes entre las dos fases líquidas depende básicamente de su distribución en equilibrio; lo cual está determinado por la **temperatura de la mezcla, la razón de mezclado entre el disolvente de extracción y el de alimentación, así como sus características físicas y composiciones químicas**. El conocimiento de estas propiedades son esenciales para evaluar el comportamiento del proceso (Perry, 1999). La fase disolvente de extracción que sale por la cima de un contactor líquido-líquido se llama **extracto** (producto valioso). El **refinado** o residuo es la fase líquida que sale por el fondo.

3.1.1 Efecto de la temperatura. Como se esboza en la figura 4, un sistema binario en ELL se despliega de manera conveniente en un diagrama de solubilidad; este es una gráfica de temperatura (T) en función de la composición molar.

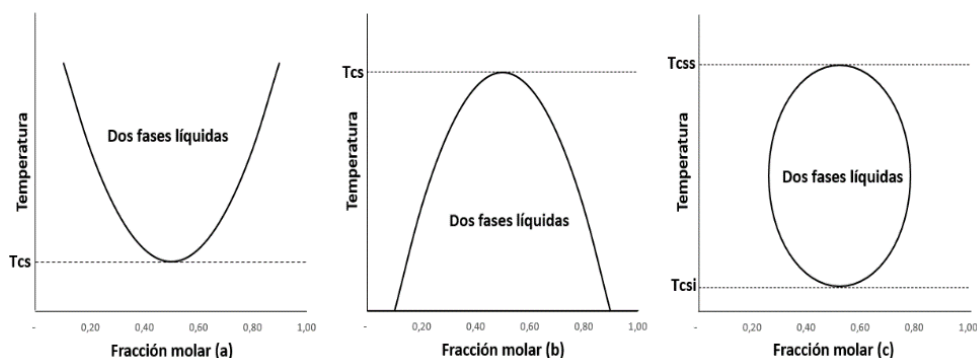


Figura 4. Diagrama de solubilidad líquido-líquido a presión constante (Atkins, 1999).

Las composiciones de las dos fases en equilibrio varían con la temperatura, cambiando la miscibilidad de la mezcla. El sistema de dos fases se mantiene en un intervalo de condiciones más estrecho, al ser cada fase más rica en el componente minoritario. El diagrama de fases completo se obtiene repitiendo las observaciones a diferentes temperaturas y dibujando la envolvente de la región de dos fases hasta llevar el sistema a una sola fase, esto quiere decir hasta llevar la mezcla a la Temperatura Crítica de Disolución (T_{CS}). Por fuera de esta temperatura, los dos componentes son totalmente miscibles (Atkins, 1999).

En la figura 4(a), cuando aumenta la temperatura, la zona de inmiscibilidad líquido-líquido disminuye, hasta alcanzar T_{CS} . El diagrama de la figura 4(b) corresponde a pares de líquidos para los cuales al disminuir la temperatura aumenta la miscibilidad (Atkins, 1999). Este tipo de equilibrio es el que se presenta en los procesos de la unidad U1000. Finalmente, el comportamiento mostrado en la figura 4(c), no es observado muy frecuentemente. Sistemas como

éstos tienen temperaturas críticas inferiores (T_{csi}) y superiores (T_{css}) de disolución. Un ejemplo de lo anterior es la mezcla de nicotina y agua; que son parcialmente miscibles entre 61°C (T_{css}) y 210°C (T_{csi}) (Atkins, 1999).

3.1.2 Naturaleza del disolvente de extracción Es poco probable que cualquier líquido particular exhiba todas las propiedades que se consideran deseables para una extracción. Las siguientes características del solvente deben considerarse antes de elegirlo: solubilidad, recuperabilidad, densidad, tensión interfacial, reactividad química, viscosidad, presión de vapor, punto de congelamiento, toxicidad, selectividad y coeficiente de distribución, siendo estas dos últimas de gran importancia.

Selectividad (β): Es la efectividad del disolvente de extracción para separar los solutos presentes en el disolvente de alimentación. Esta efectividad está dada al comparar la relación en peso de los solutos obtenidos en el extracto (o fase rica en disolvente de extracción) con la relación a los mismos solutos en la fase del refinado.

Coefficiente de distribución (k): Es la relación de distribución de equilibrio termodinámico de los componentes entre las dos fases líquidas. Para calcular el Coeficiente de distribución, se hace una relación entre la fracción en peso del soluto en la fase del extracto (y) y la fracción en peso del soluto en la fase de refinado (x) en el equilibrio ($K = y^*/x$). El coeficiente de distribución de un soluto debe ser grande, para que se pueda utilizar una razón baja del solvente de extracción respecto a la alimentación (Perry, 1999).

3.2 Caracterización de los crudos

Un ensayo de un crudo (Crude assay en inglés) es una compilación de datos de laboratorio sobre diversas fracciones de petróleo crudo. Constituye un análisis completo de sus propiedades físicas y composición hidrocarbonada. La información se publica en dos categorías básicas: cortes de destilados y cortes de residuos. Los datos recopilados en las pruebas se presentan en tablas, gráficas, o ambos (UOP Engineering Design Seminar, 1990). La Tabla 1 relaciona algunos de los análisis más comunes que se les realizan a los crudos.

Tabla 1

Análisis comunes realizados al petróleo

N°	ENCABEZADO DE COLUMNA
1	Curva TBP, en °F
2	Curva TBP corregida, en °F
3	Factor de corrección
4	Gravedad API
5	Punto inicial de ebullición estimado, en °F
6	Punto final de ebullición estimado, en °F
7	Factor de caracterización Kuop
8	Peso molecular
9	Porcentaje en peso de azufre
10	Porcentaje en peso de Carbón Conradson

Nota. Adaptado de: (UOP Engineering Design Seminar, 1990)

3.2.1 Curva real de destilación (TBP). El uso primario de una destilación del petróleo crudo es predecir los rendimientos y propiedades del producto comercial. Los rendimientos se obtienen a partir de la curva de destilación llamada TBP (True Boilling Point). Las propiedades se obtienen a partir de los cortes teóricos producidos en el laboratorio (UOP Engineering Design Seminar, 1990).

3.2.2 Pseudocomponentes. Debido a que el petróleo crudo contiene demasiados componentes, es imposible obtener la información de detalle para cada componente y es dispendioso contar con todos los componentes en los cálculos de propiedades o simulaciones de procesos, usualmente, se debe reunir un grupo de componentes en un pseudocomponente para reducir su número total. Para los pseudocomponentes agrupados, debemos determinar sus propiedades de caracterización como son: temperatura de destilado-recobrado, gravedad específica y peso molecular promedio, todos dentro de un mismo rango o curva de comportamiento (UOP Engineering Design Seminar, 1990).

3.2.3 Gravedad específica y gravedad API. La gravedad específica (SG) se define como la relación entre la densidad de un fluido (ρ_L) y la densidad del agua (ρ_w), ambos medidos a 60°F . Para el petróleo, a menudo se reporta como grado API. La $^\circ\text{API}$ está relacionado con la gravedad específica $SG^{60/60}$ y las dos unidades se pueden convertir entre sí, con las ecuaciones 3 y 4 (UOP Engineering Design Seminar, 1990):

$$API = \frac{141.5}{SG^{60/60}} - 131.5$$

Ecuación 3 Ecuación de Grado API en función de la SG.

$$SG^{60/60} = \frac{141.5}{API + 131.5}$$

Ecuación 4 Ecuación gravedad específica en función del $^\circ\text{API}$.

3.3 Fundamentos para el modelado en Aspen HYSYS®.

ASPEN (Advanced System for Process Engineering, por sus siglas en inglés), fue desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en 1970 como prototipo para la simulación de procesos (Moncada, 2011), y su base de diseño es aplicado en la herramienta Aspen HYSYS®. A continuación se examinarán brevemente las aplicaciones básicas que contiene la herramienta Aspen HYSYS® versión 9.

3.3.1 Entorno De Simulación. Aspen HYSYS® es un programa de simulación de procesos químicos orientado a objetos, que trabaja sobre sistemas operativos Windows. Puede ser usado en casi todos los aspectos de ingeniería de proceso (Tech, 2004) y utiliza una arquitectura de diagrama de flujo (flowsheet) que facilita al usuario a enfocarse en la tarea de diseño (Aspentech, 2004). En la figura 5 se describe los entornos aplicados para la implementación de la simulación en esta herramienta.

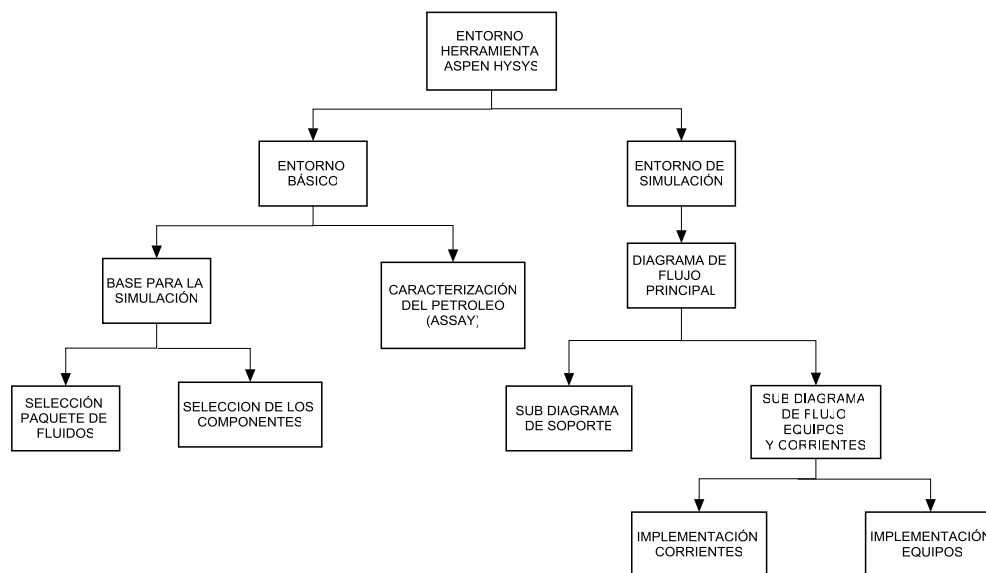


Figura 5. Entornos de la herramienta Aspen HYSYS. Adaptado de: (Aspentech, 2004).

3.3.2 Clases De Corrientes En Aspen HYSYS®. Aspen HYSYS® utiliza el concepto de corrientes de materia, representada en color azul, y corrientes de energía, de color rojo (Aguilar, 2006) .

Corrientes de materia: Estas corrientes requieren, para su completa definición, de las especificaciones del flujo y aquellas variables que permitan la estimación de todas las propiedades físicas y termodinámicas tales como: composición, temperatura, presión, fracción de vapor, entalpía, entropía, entre otras. El elemento más sencillo que un diseñador de proceso debe especificar es una simple corriente homogénea. La veracidad de que Aspen HYSYS® tiene la información suficiente para caracterizar completamente las corrientes (convergencia de datos) es el siguiente código de color: **Azul oscuro**, correctamente especificada y completamente resuelta, **Azul claro**, especificada incompletamente, las propiedades no han sido resueltas (Universidad Nacional de Cuyo, 2010).

Corriente de energía: Las corrientes de energía se utilizan para representar los requerimientos energéticos en unidades como intercambiadores de calor, bombas, entre otras, y solo se necesita que se especifique el flujo calórico o energético requerido para el proceso en la simulación.

3.3.3 Propiedades Termodinámicas. Aspen HYSYS® determina las propiedades termodinámicas de los procesos químicos por medio de ecuaciones de estado o modelos de actividad.

Ecuaciones de estado: Los procedimientos de diseño del equipo para las operaciones de separación requieren el conocimiento de entalpías y densidades, además de las relaciones de equilibrio entre fases. La termodinámica clásica proporciona un medio de obtener todas estas

magnitudes a partir de las relaciones **PVT**, que se conocen como **ecuaciones de estado** (Luque Rodriguez, 2005). La más sencilla y mejor conocida para sustancias en la fase gaseosa es la ecuación de estado de gas ideal². Debido a que la ecuación de gas ideal no considera la interacción molecular, no representa con exactitud el comportamiento PVT de las sustancias. Por tanto fue necesario desarrollar ecuaciones de estado que reflejaran de manera más fiel comportamiento termodinámico de los fluidos. En la Tabla 2 están definidas algunas de las ecuaciones ofrecidas en Aspen HYSYS® (Luque Rodriguez, 2005).

Tabla 2.

Ecuaciones de Estado ofrecidas en Aspen HYSYS®

ECUACION DE ESTADO	DESCRIPCIÓN
Peng-Robinson (PR)	Este es el método ideal para cálculos de EVL como también para cálculos de densidad de líquido de sistemas de hidrocarburos. Se incluyen varias modificaciones y mejoras efectuadas con el fin de extender su rango de aplicabilidad y precisión de predicción para algunos sistemas no ideales. Sin embargo, para algunas situaciones de alta no idealidad encontrada, se recomienda el uso de Modelos de Actividad.
Peng-Robinson-Stryek-Vera (PRSV)	PRSV es una modificación en dos planos de la EoS PR para extender su aplicabilidad a sistemas moderados de no idealidad.
Soave-Redlich-Kwong (SRK)	En muchos casos, la ecuación de estado SRK provee resultados comparables a la EoS PR, pero su rango de aplicabilidad es mucho más limitado. Este método no es nada confiable para sistemas no ideales.
Lee-Kesler Plocker	Este modelo es el método general de mayor precisión para sustancias no polares y mezclas de las mismas.

Nota. Adaptado de: (Aspentech, 2004).

Modelos de actividad: También son llamados modelos de composición. Estos modelos, basados en los desarrollos teóricos de la termodinámica molecular, asumen que, dentro de una solución líquida, las composiciones locales, diferentes de la composición global de las mezclas, explican las orientaciones moleculares no aleatorias que resultan de las diferencias en el tamaño

² ($PV_m = RT$). En esta ecuación, P es la presión absoluta, T es la temperatura absoluta y V_m es el volumen molar (Levine, 2002).

molecular y de las fuerzas intermoleculares. El concepto lo introdujo G. M. Wilson en 1964 con la publicación de un modelo de comportamiento de soluciones conocido como la ecuación de Wilson (Smith, Van Ness, & Abbott, 2005).

Aunque las ecuaciones de estado han demostrado ser muy fiables al ser aplicadas en los sistemas constituidos por hidrocarburos en un amplio intervalo de condiciones de operación, la predicción de las propiedades en sistemas químicos no ideales está dominada principalmente por los modelos de actividad. Los modelos de actividad son de naturaleza mucho más empírica que los modelos de ecuaciones de estado (Luque Rodriguez, 2005). Para el cálculo de coeficientes de actividad, Aspen HYSYS® dispone, en general, de varias alternativas, algunas de ellas están representadas en la Tabla 3.

Tabla 3.

Algunos modelos de Actividad aplicados en Aspen Hysys

MODELO DE ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
Non Random Two Liquids (NRTL)	Utiliza mecánica estadística y la teoría de celda líquida para representar la estructura líquida. Es capaz de representar el comportamiento de fases de sistemas de equilibrio vapor-líquido, líquido-líquido, y vapor-líquido-vapor (EVL, ELL, EVLL).
Margules	Esta fue la primera representación desarrollada del exceso de energía de Gibbs. Esta ecuación no tiene ninguna base teórica, pero es muy útil para estimados rápidos e interpolación de datos.
Universal Quasi-Chemical Activity Coefficient (UNIQUAC)	Utiliza mecánica estadística y la teoría pseudoquímica de Guggenheim para representar la estructura líquida. Esta ecuación es capaz de representar sistemas de equilibrio VL, LL, y VLL con mayor precisión que el modelo NRTL, y además sin la necesidad de usar el factor de distribución aleatoria.

Nota. Adaptado de: (Aspentech, 2004).

3.3.4 Elección Del Modelo Termodinámico.

Árbol de decisión de los modelos termodinámicos: Cuando el diseñador se enfrenta con la elección de un modelo termodinámico para la simulación en Aspen HYSYS®, es útil elaborar un

procedimiento lógico para decidir qué modelo se debe aplicar primero. Eric C. Carlson de Aspen Technology Inc afirma la importancia de elegir el modelo termodinámico más apropiado, y sugirió un árbol de decisión (Carlson, 1996). Este árbol está dividido en tres secciones y se describen en la figura 6.

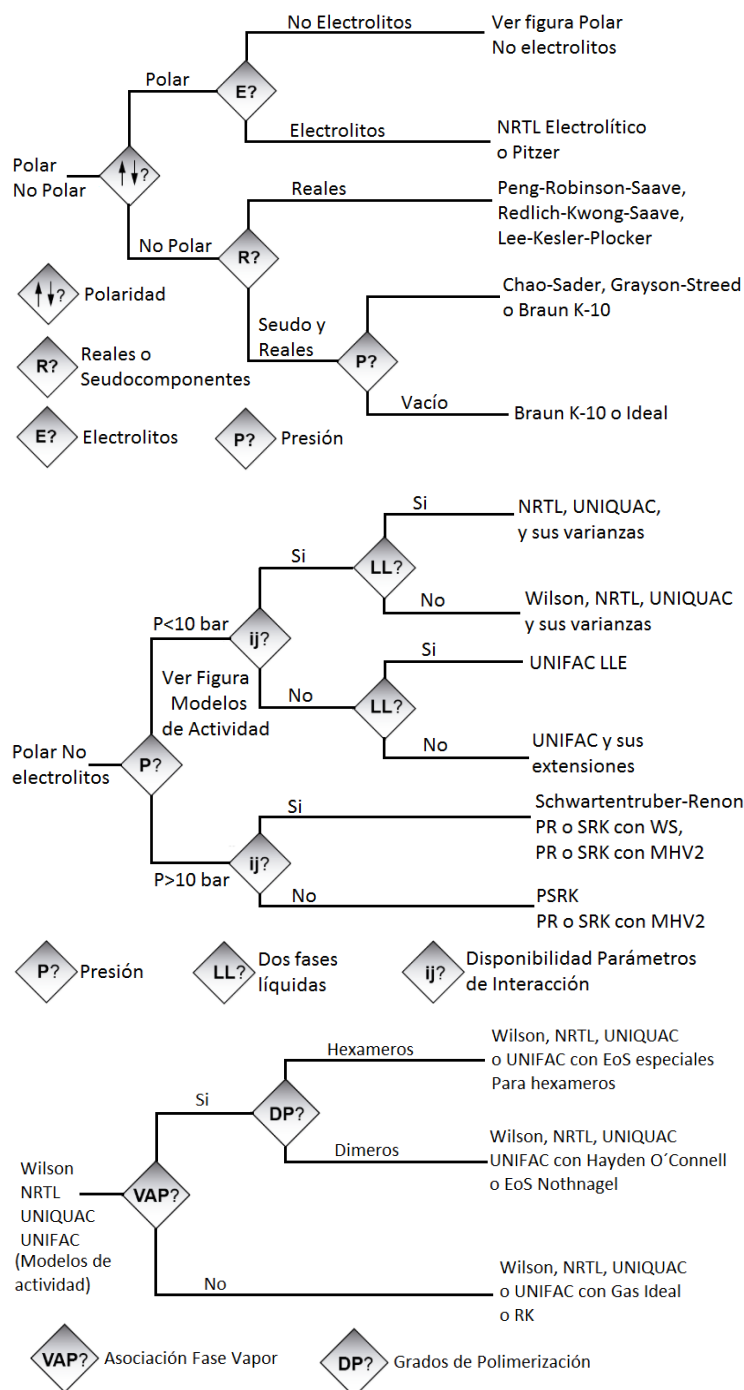


Figura 6. Árbol de decisión de modelos termodinámicos Adaptado de: (Tecnológico de Energía e Innovación, s.f.).

Tabla auxiliar de selección teniendo en cuenta el proceso: Aspen HYSYS® proporciona ecuaciones de estado mejoradas para un tratamiento riguroso del sistema de hidrocarburos;

modelos semi-empíricos y de presión de vapor para los hidrocarburos extra-pesados; correlaciones de vapor para predicciones precisas de propiedades de vapor; y modelos de coeficientes de actividad para sistemas químicos. Todas estas ecuaciones tienen sus propias limitaciones inherentes y es necesario familiarizarse con la aplicación de cada una de ellas (Kamaruddin, s.f.). La Tabla 4 muestra los paquetes básicos recomendados en función del tipo de proceso.

Tabla 4.

Paquetes termodinámicos aplicable a cada tipo de proceso.

Tipo de proceso	Paquete Termodinámico recomendado
Deshidratación de TEG	PR
Acuoso ácido	Sour PR
Procesamiento de gas criogénico	PR, PRSV
Separación de aire	PR, PRSV
Torres atmosféricas de crudo	PR y sus variantes, Grayson Streed (GS)
Torres a vacío	PR y sus variantes, GS, Braun K10, Esso
Torres de etileno	Lee Kesler Plocker
Sistemas con alto contenido de H ₂	PR, Zudkevitch-Joffe (ZJ), GS
Reservorios	PR y sus variantes
Sistemas de vapor	ASME Steam, Chao Seader, GS
Inhibición de hidratos	PR
Productos químicos	Modelos de actividad, PRSV
Alquilación de HF	PRSV, NRTL
Hidrocarburos-agua (alta solubilidad del agua en HC)	Kabadi Danner
Separaciones de hidrocarburos	PR, SRK
Aromáticos	Wilson, NRTL, UNIQUAC
Hidrocarburos sustituidos (cloruro de vinilo, acrilonitrilo)	PR, SRK
Producción de éter (MTBE, ETBE, ter-amil metil eter TAME)	Wilson, NRTL, UNIQUAC
Plantas de etilbenceno / estireno	PR, SRK o Wilson, NRTL, UNIQUAC (según la tecnología de producción)
Producción de ácido tereftálico	Wilson, NRTL, UNIQUAC
Planta de amoníaco	PR, SRK

Nota. Adaptado de: (Luque Rodriguez, 2005)

Tabla auxiliar de selección enfocada a los modelos de actividad.

Los modelos de actividad con que cuenta Aspen HYSYS® requieren, para su aplicación, valores experimentales de parámetros de interacción entre los compuestos de la mezcla (Luque Rodriguez, 2005). La Tabla 5 se refiere a la aplicabilidad de métodos de coeficientes de actividad en distintos sistemas.

Tabla 5.

Aplicabilidad de los coeficientes de actividad

Aplicación	Margules	van Laar	Wilson	NRTL	UNIQUAC
Mezclas binarias	A	A	A	A	A
Mezclas multicomponentes	AL	AL	A	A	A
Sistemas azeotrópicos	A	A	A	A	A
Equilibrio líquido-líquido	A	A	NA	A	A
Sistemas diluidos	?	?	A	A	A
Sistemas autoasociativos	?	?	A	A	A
Polímeros	NA	NA	NA	NA	A
Extrapolación	?	?	B	B	B

A: aplicable NA: no aplicable AL: aplicación limitada ?: cuestionable B: bueno

Nota. Adaptado de: (Rodriguez, 2005).

3.4 Información Estadística.

3.4.1 Hipótesis nula y alternativa. En una prueba de hipótesis, se debe establecer el valor supuesto o hipotético del parámetro de población antes de comenzar a tomar la muestra. La suposición que se desea probar se conoce como hipótesis nula y se simboliza H_0 , o “H sub-cero” (David R. Anderson, 2008)

El término hipótesis nula surge de las primeras aplicaciones agrícolas y médicas de la estadística. Con el fin de probar la efectividad de un nuevo fertilizante o de una nueva medicina, la hipótesis que se probaba era que no hubo efecto, es decir, no hubo diferencia entre las muestras tratadas y las no tratadas. Si en un problema se usara un valor hipotético de una media de población, en símbolos sería μH_0 . Esto se lee, “valor hipotético de la media de la población”. Si los resultados de las muestras no respaldan la hipótesis nula, se debe concluir que se cumple alguna otra cosa. Siempre que se rechaza la hipótesis nula, la conclusión que sí se acepta se llama hipótesis alternativa cuyo símbolo es H_1 (“H sub-uno”). El propósito de la prueba de hipótesis no es cuestionar el valor calculado del estadístico de la muestra, sino hacer un juicio respecto a la diferencia entre ese estadístico y un parámetro hipotético de la población. El siguiente paso, después de establecer las hipótesis nula y alternativa, consiste en decidir qué criterio utilizar para confirmar si se acepta o se rechaza la hipótesis nula. Si suponemos que la hipótesis es correcta, entonces el nivel de significancia indicará el porcentaje de medias muestrales que están fuera de ciertos límites. El empleo del término *aceptar*, en vez de *no rechazar*, se ha convertido en el estándar. Significa que cuando los datos de la muestra no hacen que se rechace una hipótesis nula, se comporta como si esa hipótesis fuera cierta (David R. Anderson, 2008).

En una prueba de hipótesis, para la media poblacional en el caso en que la desviación estándar (σ) sea conocida, se emplea la variable aleatoria normal estándar z como *estadístico de prueba* para determinar si se desvía lo suficiente del valor hipotético de μ como para justificar el rechazo de la hipótesis nula. Como $\sigma_{\bar{x}} = \sigma/\sqrt{n}$, el estadístico de prueba es el siguiente:

$$z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}$$

Ecuación 5 Prueba de hipótesis para la media poblacional.

En muchas situaciones de toma de decisiones, se necesita determinar si los parámetros de dos poblaciones son iguales o diferentes. Debido a que ahora el deseo es estudiar dos poblaciones, la distribución de muestreo que nos interesa es la distribución muestral de la diferencia entre medias muestrales. Ahora bien, suponga que se toma una muestra aleatoria de la distribución de la población 1 y otra muestra aleatoria de la distribución de la población 2. Luego se resta las dos medias de las muestras, así: $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$. Con esto se construye una distribución muestral de la diferencia entre los promedios de las muestras. Entonces, la desviación estándar de la distribución de las diferencias entre los promedios de las muestras se conoce como error estándar de la diferencia entre dos promedios y se calcula con la siguiente fórmula:

$$\sigma_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$$

Ecuación 6 Error estándar entre dos medias.

Donde,

- σ_1^2 → Varianza de la población 1.
- σ_2^2 → Varianza de la población 2.
- n_1 → Tamaño de la muestra de la población 1.
- n_2 → Tamaño de la muestra de la población 2.

3.4.2 Análisis De Varianza. El análisis de varianza es una técnica que se puede utilizar para decidir si las medias de dos o más poblaciones son iguales. La prueba se basa en una muestra única, obtenida a partir de cada población. El análisis de varianza puede servir para determinar si las diferencias entre las medias revelan las verdaderas diferencias entre los promedios de cada una de

las poblaciones, o si las diferencias entre los promedios de la muestra son más indicativas de una variabilidad de muestreo. Si el valor estadístico de prueba (análisis de varianza) nos impulsa a aceptar la hipótesis nula, se concluiría que las diferencias observadas entre las medias de las muestras se deben a la variación casual en el muestreo. Si se rechaza la hipótesis nula, se concluiría que las diferencias entre los valores medios de la muestra son demasiado grandes como para deberse únicamente a la casualidad (David R. Anderson, 2008).

Los datos para el análisis de varianza se obtienen tomando una muestra de cada población y calculando la media muestral y la variancia en el caso de cada muestra. En la tabla 8 se detalla los cálculos del análisis de varianza.

Análisis de la varianza con dos factores e interacción:

Es del modelo:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + U \quad i = 1,2, \dots, I \quad j = 1,2, \dots, J$$

Ecuación 7 Modelo del análisis de varianza con dos factores de interacción.

Donde:

- Y_{ij} → Representa la respuesta de la variable en el i-ésimo nivel del factor 1 (α) y en el j-ésimo nivel del factor 2 (β).
- μ_{ij} → $E(Y_{ij}) = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij}$ es el valor medio de Y_{ij} .
- α_i → Representa el efecto que sobre la media global μ tiene del nivel i del factor 1.
- β_j → Representa el efecto que sobre la media global μ tiene del nivel j del factor 2.
- $(\alpha\beta)_{ij}$ → representa el efecto de interacción entre el nivel i del factor 1 y el nivel j del factor 2.

- $U \rightarrow$ es la variación aleatoria de la Y_{ij} (igual para todas ellas)

Suponiendo que U sigue la distribución $N(0, \delta)$ lo que implica que Y_{ij} sigue la distribución $N(\mu_{ij}, \delta)$ se tiene:

$$\sum_{i=1}^I \alpha_i = \sum_{j=1}^J \beta_j = \sum_{i=1}^I (\alpha\beta)_{ij} = \sum_{i=1}^J (\alpha\beta)_{ij} = 0$$

Ecuación 8 Suma de factores de la distribución.

SCE(α): Suma de cuadrados explicada (variabilidad debida a que hay distintos niveles de factor 1).

SCE(β): Suma de cuadrados explicada (variabilidad debida a que hay distintos niveles de factor 2).

SCR Suma de cuadrados residual (variabilidad no debida a los factores).

SCT Suma de cuadrados total (variabilidad total en todos los datos)

Tabla 6.

Análisis estadístico con tabla ANOVA

	Suma de Cuadrados	GL	Varianza	Test F	P-V
Factor(α)	$JK \sum_{i=1}^I \hat{\alpha}_i^2 = SCE(\alpha)$	I-1	$\hat{S}_\alpha^2 = \frac{SCE(\alpha)}{I-1}$	$F_\alpha = \frac{S_\alpha^2}{S_R^2}$	¿?
Factor(β)	$IK \sum_{j=1}^J \hat{\beta}_j^2 = SCE(\beta)$	J-1	$\hat{S}_\beta^2 = \frac{SCE(\beta)}{J-1}$	$F_\beta = \frac{S_\beta^2}{S_R^2}$	¿?
Interacción	$K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\hat{\alpha}\hat{\beta})_{ij}^2$ $= SCE(\alpha\beta)$	(I-1)(J-1)	$\hat{S}_{\alpha\beta}^2 = \frac{SCE(\alpha\beta)}{(I-1)(J-1)}$	$F_{\alpha\beta} = \frac{S_{\alpha\beta}^2}{S_R^2}$	¿?
Residual	$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K e_{ijk}^2 = SCR(e)$	IJ(K-1)	$\hat{S}_R^2 = \frac{SCR}{IJ(K-1)}$		
Total	$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (Y_{ijk} - \hat{Y})^2$ $= SCT$	IJK-1			

Nota. Adaptado de: (Montgomery, 2005).

$$SCE(\alpha) = J \sum_i (\hat{y}_i - \hat{y}_{..})^2$$

$$SCE(\beta) = J \sum_j (\hat{y}_j - \hat{y}_{..})^2$$

$$SCR = \sum_i \sum_j (y_{ij} - \hat{y}_{i.} - \hat{y}_{.j} + \hat{y}_{..})^2$$

$$SCT = \sum_i \sum_j (y_{ij} - \hat{y}_{..})^2$$

Se cumple: $SEC(\alpha) + SCE(\beta) + SCR = SCT$

Normalidad: los datos obtenidos en cada nivel de los factores se ajustan razonablemente a una distribución Normal (gráficos y contrastes); i.e. Y_{ij} sigue una distribución $N(\mu_{ij}, \sigma)$ para cada i, j .

Homocedasticidad: la variabilidad de los datos en cada nivel de los factores es similar (contraste de igualdad de varianzas) $\sigma^2 = \text{Var}(Y_{ij})$ igual para todo i, j .

Linealidad: los residuos (diferencia de los datos a su media, en cada nivel de los factores) se distribuyen alrededor del cero $E(U) = 0$.

Independencia: las observaciones se realizan de forma independiente unas de otras (diseño de la obtención de datos).

La técnica conocida como análisis de varianza (a menudo abreviada ANOVA: *analysis of variance*), permite probar la significancia de las diferencias entre más de dos promedios. Usando el análisis de varianza, se puede hacer inferencias acerca de si las muestras seleccionadas se tomaron de poblaciones que tienen la misma media. En cada caso, se pueden comparar los promedios de más de dos muestras (David R. Anderson, 2008). Como resultado, el denominador y el numerador deben ser aproximadamente iguales si la hipótesis nula es verdadera. Cuanto más cercano a 1 esté el cociente F, más es la inclinación a aceptar la hipótesis nula (David R. Anderson, 2008).

3.4.3 Manejo de datos atípicos. Los datos atípicos son observaciones que son sospechosas y que requieren un análisis cuidadoso. Puede tratarse de datos erróneos; si es así, esos datos deben ser corregidos. Puede tratarse de una violación a las suposiciones del modelo; si es así, habrá que considerar otro modelo. Por último, puede tratarse, simplemente, de valores inusuales que se presenten por casualidad. En ese caso, esos valores deberán conservarse (David R. Anderson, 2008). Para identificar un dato atípico se debe hacer uso de las medidas de localización, dispersión, forma y asociación de datos, entre los cuales encuentran los percentiles y cuartiles sumado al uso de diagramas de caja y bigote.

Con frecuencia es conveniente dividir los datos en cuatro partes; así, cada parte contiene una cuarta parte o 25% de las observaciones. A estos puntos de división se les conoce como cuartiles

y están definidos como sigue: Q_1 primer cuartil, o percentil 25, Q_2 segundo cuartil, o percentil 50 y Q_3 tercer cuartil, o percentil 75 (David R. Anderson, 2008).

Diagrama de caja y bigotes: Es un resumen gráfico de los datos con base en el resumen de cinco números. La clave para la elaboración de un diagrama de caja es el cálculo de la mediana y de los cuartiles Q_1 y Q_3 . También se necesita el rango intercuartílico (RIC). En la figura 7 se observa la aplicación del diagrama de caja y bigotes (David R. Anderson, 2008).

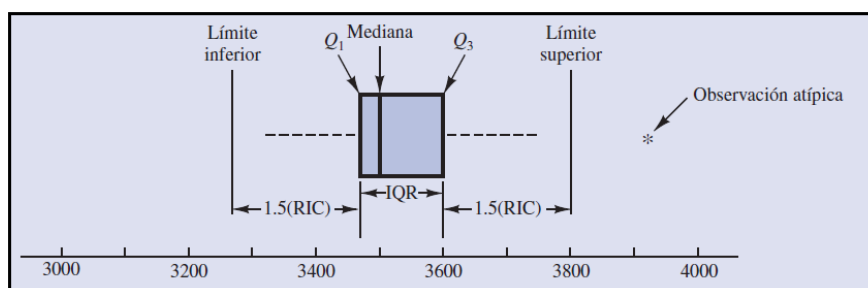


Figura 7. Diagrama de caja con los rangos intercuartílicos Adaptado de: (David R. Anderson, 2008).

Matemáticamente el diagrama de caja se puede representar de la siguiente manera:

$$\text{Rango Intercuartílico RIC} = (Q_3 - Q_1)$$

$$\text{Límite superior: } Q_3 + 1.5 * \text{RIC}$$

$$\text{Límite inferior: } Q_1 - 1.5 * \text{RIC}$$

3.5 Revisión del estado del arte.

Se analizaron artículos de investigación y documentos relevantes que consideraron el proceso de extracción líquido-líquido y que tuvieron en cuenta el comportamiento de las variables del proceso,

la simulación de sistemas de extracción y la condición del CCR como parte de la calidad de los productos.

Comportamiento de variables en el proceso de extracción líquido-líquido: Dentro del estudio cinético del proceso de extracción líquido-líquido, se encuentra el apartado titulado Solvent Deasphalting (United States Patente n° 4,239,616, 1979) del año 1979. El autor propone realizar el proceso de extracción con solvente en varias etapas para efectuar una mayor extracción, sin disminuir la calidad del aceite extraído por arrastre de elementos resinosos. El proceso consta de tres etapas de separación donde se obtienen asfaltenos³, resinas y aceite. La descripción del proceso patentado, representado en la figura 8, es la siguiente: la carga (hidrocarburos pesados) entran con el solvente a una zona de mezclado. Luego la mezcla resultante pasa a una primera zona de separación en donde se obtienen, por la parte inferior asfaltenos con trazas de solvente (en pequeña proporción) y por la parte superior una fase liviana que comprende aceites, resinas y solvente. Estos últimos pasan a la segunda zona de separación en donde se obtiene un producto de fondo que son resinas con trazas de solvente y otra fase liviana, en la parte superior, que contiene aceites y solvente (en mayor cantidad) y luego entran en una tercera etapa. Esta es la etapa final del proceso y las condiciones de operación generan una separación del aceite por el fondo y recuperación del solvente por la parte superior. En el proceso se establece que con un reciclo de los asfaltenos obtenidos en la primera zona hacia la segunda zona de separación se logra una mejor precipitación de las resinas obteniéndose un aceite de mejor calidad. El proceso finaliza con una recuperación de las trazas de solvente de los asfaltenos, resinas y aceite (United States Patente n° 4,239,616, 1979)

³ **ASFALTENOS:** son compuestos de estructura compleja y altos pesos moleculares, constituidos por anillos de carbono enlazados a cadenas alquílicas y cicloalcanos, además de compuestos heterocíclicos que poseen nitrógeno, azufre y oxígeno

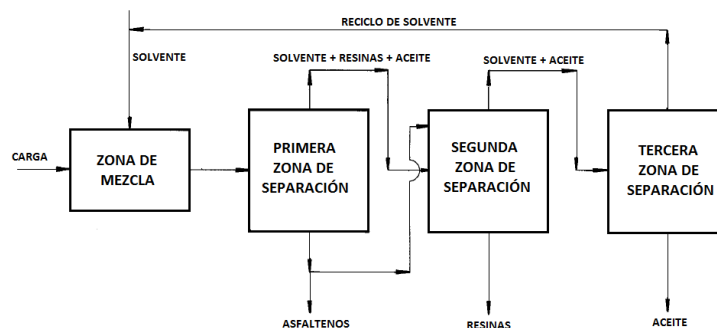


Figura 8. Etapas del proceso patentado Adaptado de: (United States Patente n° 4,239,616, 1979)

La extracción con solvente en Colombia se inició en Ecopetrol S.A. en el año 1967 cuando la empresa puso en servicio la planta de parafinas incluida la unidad de desasfaltado con propano. Luego, en 1979 entró en operación la planta DEMEX (Ecopetrol S.A., 2000). En un artículo titulado “Solventes de Desasfaltado” (Carrillo & Cáceres, 1996), el Instituto Colombiano del petróleo (ICP) realizó una evaluación de solventes en el desasfaltado de fondos de vacío para la producción de DMO, en donde se monitoreó el comportamiento en el rendimiento (porcentaje de producción de extracto en relación a la carga), los contenidos de carbón Conradson, níquel, vanadio y asfaltenos en el DMO. Para cubrir este estudio, usaron una planta piloto de extracción líquido-líquido, propiedad del ICP, con tres tipos de fondos de vacío: mezcla, parafínicos y contaminados con brea. Estos fondos se desasfaltaron usando varias composiciones en los disolventes de extracción con alto contenido de propano (C_3H_8), propileno (C_3H_6), n-butano e i-butano (C_4H_{10}), entre otros, así como varias temperaturas.

Los resultados obtenidos al desasfaltar fondos de vacío mezcla con los solventes llamados UOP, Demex y n-butano mostraron que, bajo las mismas condiciones de temperatura y presión, el comportamiento de los solventes es diferente al momento de las remociones de contaminantes. Para un 50% de rendimiento el solvente n-C₄ produjo los niveles más bajos de contaminantes mientras que los más altos los produjo el solvente UOP. Así mismo, a medida que aumentaron los

rendimientos, aumentaron los contaminantes en el DMO. El solvente n-C₄ lo emplearon para evaluar los fondos de vacío mezcla, manteniendo la presión del sistema constante pero realizaron ajustes a la temperatura del proceso de extracción y la relación solvente carga (S/C).

Se demostró que a medida que aumenta la temperatura de la mezcla se disminuye el rendimiento favoreciendo la calidad en el DMO por la disminución de los contaminantes. Además, a mayor relación solvente carga (S/C) se produjo un aumento en el rendimiento.

Simulación en sistemas de extracción líquido-líquido: Aparicio et al (Aparicio, Jeronimo, & Martins, 2002) plantearon modelos de simulación para el desasfaltado con solvente en una columna RDC (Rotating Disk Contactors), usando simuladores de procesos químicos. El detalle de la columna se observa en la figura 9. En la columna, el proceso de extracción es favorecido por la agitación del conjunto anillo-rotor.

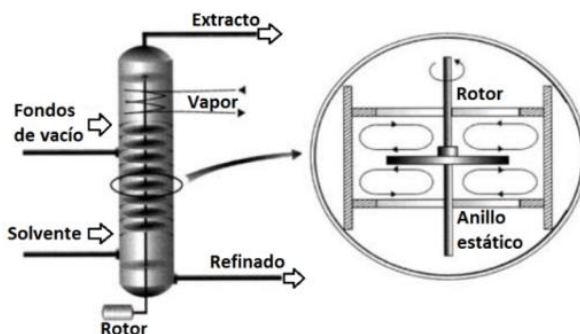


Figura 9. Columna RDC con el detalle de internos Adaptado de: (Aparicio, Jeronimo, & Martins, 2002).

El primer modelo presentado se basó en redes neuronales artificiales FANN (Feedforward Artificial Neural Network) (Aparicio, Jeronimo, & Martins, 2002). Para su desarrollo se requirió determinar las variables de entrada y salida, y luego los autores especificaron la estructura que pudiera simular la columna RDC (capas y número de nodos), la estructura se puede ver en la figura

10(a). El segundo modelo se basó en el cálculo del factor de caracterización (K_{UOP}) o factor Watson, con lo cual determinaron los componentes de la carga al modelo de la columna RDC. Los resultados se usaron en el modelo de extracción del programa SimSi-PRO/II y el esquemático de la columna está representado en la figura 10(b).

El factor de caracterización fue desarrollado por la UOP (Universal Oil Product) y permite ubicar compuestos o fracciones del petróleo, que por sus características físicas y composición química puedan estar dentro del rango de parafínicos, nafténicos, aromáticos o mixtos. Aunque ambos enfoques son interesantes, el modelo de la columna RDC desarrollado bajo el cálculo del factor K_{UOP} aporta ideas claves para esta propuesta, necesarias para **caracterizar los fondos de vacío** parafínicos de carga a la unidad DAP. Al comparar los resultados de ambos enfoques con datos operativos reales, el modelo basado en el cálculo del factor K_{UOP} , conlleva a una mejor precisión en comparación con el modelo FANN

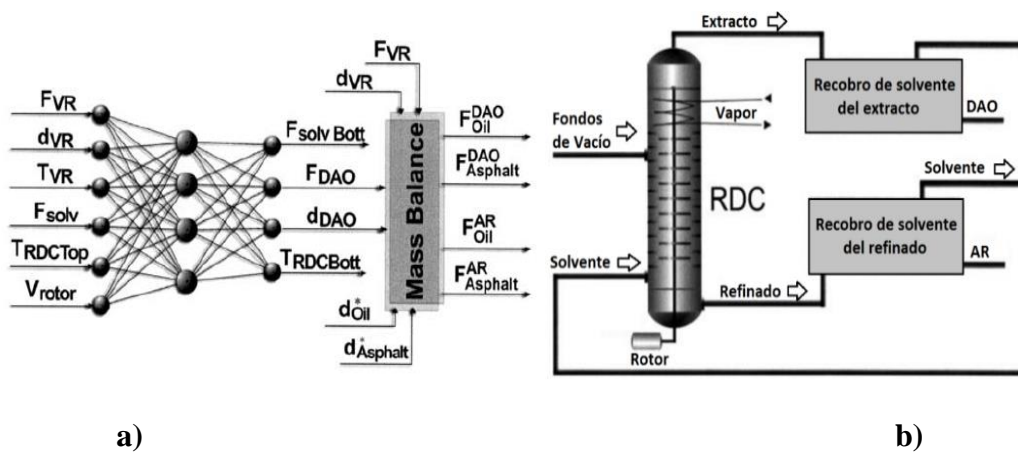


Figura 10. Modelo torre RDC. (a) Modelo FANN, (b) Modelo KUOP Adaptado de: (Aparicio, Jeronimo, & Martins, 2002)

Cao et al (Cao, Jiang, & Li, 2009) también usaron el factor K_{UOP} de manera exitosa en el modelado de una unidad de desasfaltado empleando el módulo EXTRACT del software Aspen Plus y haciendo uso de la ecuación PSRK (Predictive Soave Redlich Kwong). Esto último después de comparar los resultados obtenidos con otras dos ecuaciones de estado. Los autores también hicieron uso del método K_{UOP} para caracterizar los fondos de vacío. Los valores de K_{UOP} fueron iterados por un método de ensayo y error considerando las siguientes variables: **rendimiento de DAO, temperatura superior y fondo de la torre EXTRACT, relación solvente/carga, densidad del DAO y DOA**. Adicionalmente caracterizaron tres tipos de solvente de extracción para usar en el modelo. Los resultados obtenidos fueron: un aumento en el rendimiento que es directamente proporcional al peso molecular del solvente y a la relación solvente/carga, pero inverso a la temperatura del solvente. También, un aumento en el rendimiento está acompañado en la disminución de la calidad del DAO. Los errores relativos de los datos simulados no superaron el 3,94% y fueron comparables con los datos industriales tanto para la materia prima (fondos de vacío y solvente) como para los productos (aceite desasfaltado-DAO y asfalto deshilado-DOA) (Cao, Jiang, & Li, 2009).

Separación del solvente en el proceso de extracción líquido-líquido: Como se ha venido recalando, uno de los factores que afecta la operación en un sistema de extracción líquido-líquido es el tipo de solvente a usarse en el proceso. Esto quiere decir que la composición del solvente es clave para lograr resultados de calidad y rendimientos acordes a la inversión de tiempo y dinero en el proceso. Por esta razón la recuperación del solvente es muy importante y hace parte del ciclo de este proceso.

Lee et al (Lee, Shin, & Ahn, 2013) realizaron experimentos de separación del DAO del solvente utilizando pentano (C_5H_{12}) y hexano (C_6H_{14}). Los experimentos se hicieron en un

intervalo de temperaturas entre 150-350°C y de presión entre 10-70 bares. La separación del DAO del pentano fue superior a la separación del DAO del hexano bajo condiciones similares. De manera general, la recuperación del solvente estuvo fuertemente influenciada por las variaciones de temperatura, pero fue relativamente insensible a cambios en la presión. Disminuir la proporción de solvente en la mezcla de alimentación hizo difícil conseguir una alta recuperación de este.

Medición de CCR como parte del control de calidad de los productos: Carrillo et al (Carrillo & Cáceres, 1996) recalcaron la importancia del control de asfaltenos en el DMO y obtuvieron una correlación de estos y el carbón conradson. En pruebas realizadas en la planta piloto, ellos evidenciaron que la correlación entre asfaltenos y CCR en el DMO depende tanto de la carga del cual proviene el DMO como del solvente empleado.

Como la metodología para determinar con precisión la concentración de asfaltenos en plantas industriales no es confiable, es necesario determinar estos con el análisis rutinario del CCR. La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) tiene establecidas varias normas direccionadas a estandarizar las pruebas del CCR presentes en los hidrocarburos, dentro de las cuales están las normas ASTM- D189 y D4530 que analizan la condición de la cantidad de carbón en una muestra de hidrocarburo (Normas ASTM) independientemente de la formación química y el comportamiento cinético de los asfaltenos. El CCR determinado representa el porcentaje en peso del carbón formado al craquear térmicamente la muestra. Con los resultados de estas pruebas se ajustan condiciones operacionales en las diferentes plantas industriales dependiendo de los valores arrojados. Sámano (2009) estudió el efecto de extractos obtenidos en procesos de desasfaltado en reactores de hidrotreatmento y concluyó que los procesos de extracción con solvente aplicados a los hidrocarburos pesados, usados como carga en las unidades de craqueo catalítico de lecho fluidizado, son eficientes en la disminución de los asfaltenos.

De forma general y después de la revisión documental, quedan claros varios aspectos como son: que el proceso de Desasfaltado con solvente mejora la calidad, enfocado en el contenido de CCR, del extracto producto DMO y DAO, siendo las **características fisicoquímicas de la carga a procesar y del solvente de extracción, la temperatura de la mezcla, y la relación solvente carga (S/C)** las variables más importantes que impactan en la calidad y cantidad (en términos de CCR y rendimiento) del extracto obtenido. También que para desarrollar el modelo de una planta de desasfaltado con solvente, usando la herramienta Aspen HYSYS®, el punto crucial es la selección adecuada del paquete de fluidos o paquete termodinámico (ecuaciones de estado y modelos de actividad). Por último las corrientes de alimentación o corrientes de materia que entran al proceso en la simulación, deben quedar bien definidas y caracterizadas. Esto se logra tomando los datos de los ensayos o análisis de laboratorio (curvas TBP, destilaciones ASTM, factor K_{uop} , entre otros).

4. Metodología para el desarrollo del modelo

El enfoque general dado al presente trabajo de aplicación es desarrollar un modelo de la unidad U1000 en estado estacionario, usando la herramienta Aspen HYSYS® en condiciones de estabilidad operacional cargando DMO, evidenciando los resultados en el **rendimiento de extracto (REN[%])**, y su calidad reflejado en el **contenido de CCR[%w]**. En la figura 11 se plantea la metodología con los pasos usados para el desarrollo de la presente propuesta de aplicación.

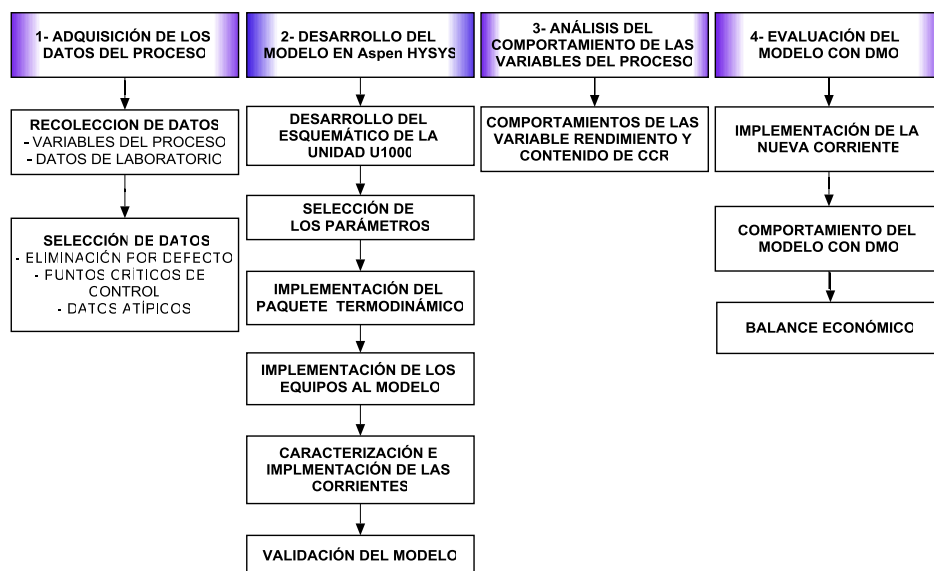


Figura 11. Metodología para el desarrollo del modelo

4.1 Adquisición de los datos del proceso.

Los datos requeridos para el desarrollo del modelo se obtuvieron de las variables del proceso y de los resultados de laboratorio de las corrientes. Se estipuló como tiempo de seguimiento valores promedio de doce (12) horas diarias, con un período de operación de la unidad de cinco años (01/01/2010 hasta 31/12/2015).

4.1.1 Recolección De Datos

Variables del proceso: Inicialmente se plantearon las etapas del proceso de desasfaltado con propano. Luego, se identificaron las variables necesarias para el modelo. En la figura 12 se pueden observar las doce variables del proceso seleccionadas.

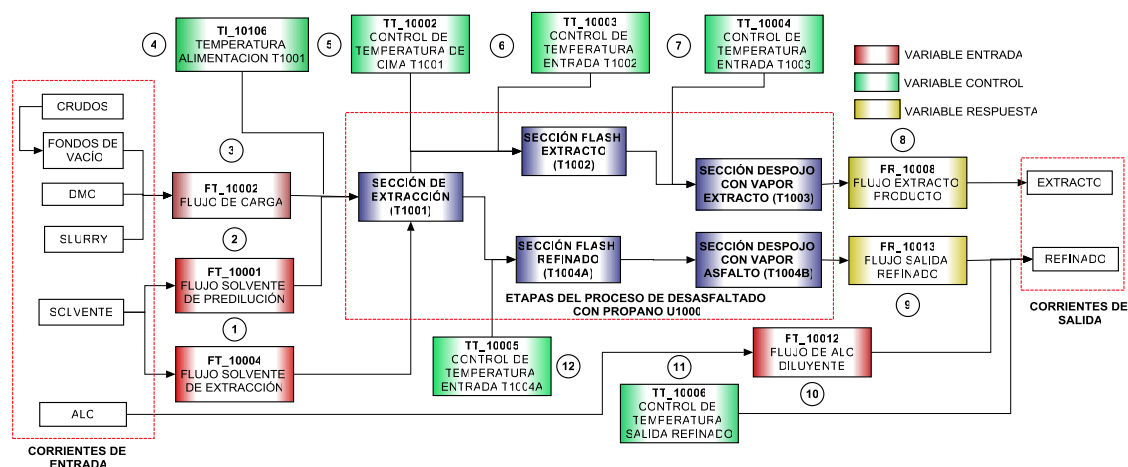


Figura 12. Etapas y variables del proceso U1000

Datos de laboratorio: Así mismo, fue necesario obtener los resultados de laboratorio de las corrientes de entrada y salida. El enfoque se trazó en los ensayos de los crudos, resultados de calidad de los productos de alimentación (carga) y salida, y el solvente de extracción. En la Tabla 7 se reportan las pruebas necesarias para el desarrollo del modelo.

Tabla 7.

Datos de laboratorio aplicados al modelo

TIPO	APLICADO	UN.	DESCRIPCIÓN	ASTM	UN.	DESCRIPCIÓN	ASTM	UN.	DESCRIPCIÓN
VARIABLE DE ENTRADA	CRUDOS	% VOL	DESTILACIÓN	D-7169	%W	CCR	D-4530	Kg/m ³	DENSIDAD
	FONDOS DE VACIO							SSF	VISCOSIDAD
	DMO							°API	GRAVEDAD API
	SLURRY			NA				NA	
	SOLVENTE	% MOL	CROMATOGRAFÍA	D-2163	NA	NA	NA	NA	NA
VARIABLES DE SALIDA	DAO	% VOL	DESTILACIÓN	D-2887	%W	CCR	D-4530	NA	NA
	SLURRY DESASFALTADO							NA	NA

Dado que la presión en los sistemas se mantiene aproximadamente constante durante la operación de la unidad, se usará el promedio de los datos históricos de esta variable para el desarrollo del modelo. Toda la información anterior fue extraída por medio de la herramienta PI

(Process Information), que importa los registros de las variables desde el sistema de control de Ecopetrol hacia el programa Excel.

4.1.2 Selección De Datos. Se realizó en tres etapas: eliminación de datos por defecto, revisión de los puntos críticos de control (PCC) de la unidad, y la identificación y eliminación de datos atípicos.

Eliminación por defecto: Se eliminaron aquellos datos en los que **no se registra ningún valor**, o en su defecto aquella información reportada como **“Bad Input”, “NaN”, y “I/O error”**.

Puntos críticos de control⁴: Todos los datos que estuvieron por fuera de las guías y ventanas de los puntos críticos de control no se tuvieron en cuenta. En la Tabla 8 están relacionadas las variables, con sus puntos críticos de control, aplicadas al modelo.

Tabla 8.

Puntos críticos de control para la simulación

TIPO DE VARIABLE		UNID	DESCRIPCIÓN DE LA VARIABLE	VENTANA MAXIMA	VENTANA MINIMA	GUÍA MAXIMA	GUÍA MINIMA	
VARIABLES DE ENTRADA	FLUJO	[B/H]	FT_10002	Flujo de carga	--	80	150	
		[B/D]			--	1920	3600	
		[B/H]	FT_10004	Flujo de propano	1131	660	1037	754
		[B/D]			27144	15840	24888	18096
VARIABLES DE CONTROL	TEMPERATURA	[°F]	TT_10001	Temperatura de entrada de carga	350	90	280	
		[°F]	TT_10002	Temperatura de cima de T-1001	--	90	--	
		[°F]	TT_10003	Temperatura de salida de E-1010	250	130	240	
		[°F]	TT_10004	Temperatura de salida de E-1003	99999	90	99999	
		[°F]	TT_10005	Temperatura de salida de E-1009	--	90	--	
		[°F]	TI_10106	Temperatura de entrada a T-1001	280	90	250	

Nota. Adaptado de: (Ecoprteol S.A., 2000).

⁴ **PCC:** Son aquellas variables de proceso de una unidad operativa que deben ser monitoreadas y controladas frecuentemente para garantizar que los datos registrados por ellas estén dentro de los intervalos que aseguren un desempeño acorde con las expectativas o metas (ECOPETROL S.A., 2015) . La unidad U1000 cuenta con varios puntos críticos de control con sus ventanas y guías bien definidas.

Datos atípicos: Se descartaron aquellos datos que estuvieron por fuera de los límites (superior e inferior) de los rangos intercuartiles en cada variable. Para la implementación del estudio estadístico básico requerido para el desarrollo del presente trabajo de aplicación se usó el software STATGRAPHICS®.

4.2 Desarrollo del modelo unidad U1000 en Aspen HYSYS®

4.2.1 Esquemático de la unidad U1000. El esquema que se implementó en el modelo se desarrolló tomando como base los planos y el diagrama general de la unidad U1000. En la figura 13 se observa el gráfico con los equipos, corrientes del proceso, e instrumentos principales.

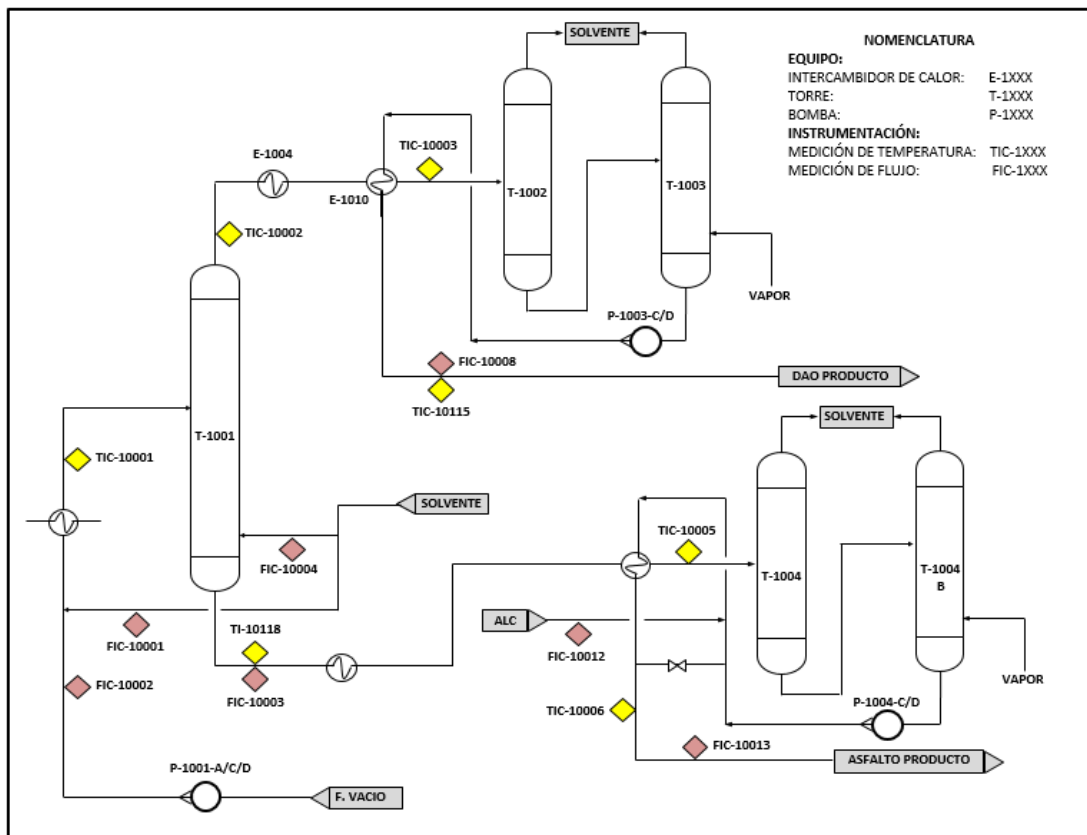


Figura 13. Esquemático unidad U1000

4.2.2 Selección de los parámetros. Se realizó la configuración del sistema de unidades, especificación de los componentes y selección de los paquetes de propiedades termodinámicas. En la figura 14 se representan los diagramas de bloques para la selección de estos parámetros.

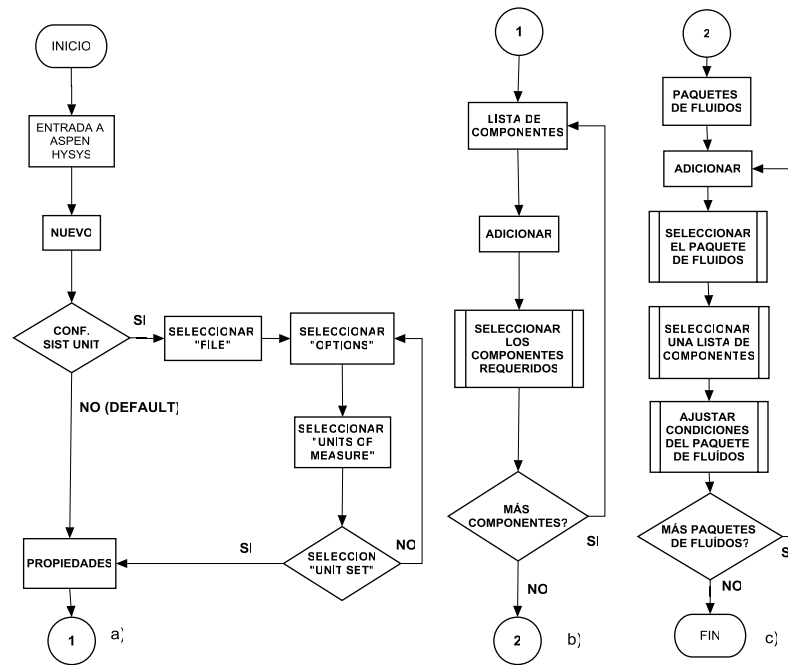


Figura 14. Sistema de Unidades (a), componentes (b) Paquete de Fluidos (c).

4.2.3 Implementación del paquete termodinámico. Para poder evaluar el paquete termodinámico apropiado al modelo de la unidad U1000, fue necesario seleccionar entre las diferentes opciones que ofrece Aspen HYSYS ®. Esto se realizó teniendo en cuenta el árbol y las tablas de decisiones (ver figura 6, Tablas 4 y 5, de las páginas 33, 34, y 35), además de tomar otros puntos de referencia obtenidos del estado del arte, donde se detalla el desarrollo de simulaciones realizadas a procesos de desasfaltado con solventes.

Después de escoger los paquetes termodinámicos, se seleccionó uno de ellos y se implementó en el modelo. Luego, se realizó el paso a paso para incluir las corrientes y los equipos. A

continuación, se desarrolló la simulación, se registraron los datos y se procedió a realizar el cambio del paquete termodinámico para su revisión y comparación. Este procedimiento se repitió hasta que se logró probar todos los paquetes termodinámicos que fueron elegidos. En la figura 15 están representados los pasos empleados para la selección y cambio de los diferentes paquetes termodinámicos aplicados al modelo.

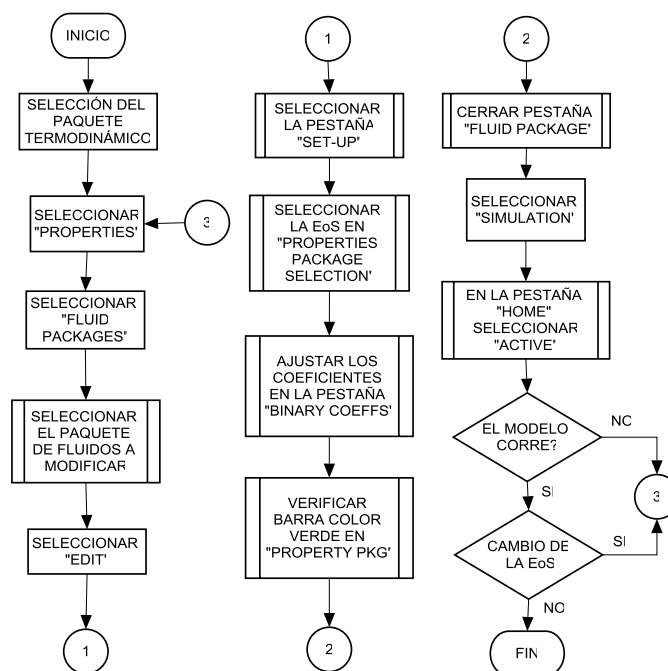


Figura 15. Cambio de los paquetes termodinámicos en el modelo.

El modelo completo de la U1000 planteado para las diferentes simulaciones se puede observar en el apéndice A.

4.2.4 Implementación de los equipos.

Equipos de la unidad: Tomando como base el esquemático de la figura 13 se seleccionaron lo equipos requeridos para desarrollar el modelo. Estos se describen en la Tabla 9.

Tabla 9.

Equipos unidad U1000 requeridos para la simulación.

SECCIÓN	EQUIPO	TIPO	ESPECIFICACIÓN
CARGA	P-1001-A/B/C	BOMBA	BOMBA DE CARGA U1000
	E-1001	INT. DE CALOR	ENFRIADOR ENTRADA DE CARGA
EXTRACCION L-L	T-1001	TORRE	TORRE DESASFALTADO
FLASH SOLVENTE DAO	E-1004	INT. DE CALOR	CALENTADOR SALIDA CIMA T-1001
	E-1010	INT. DE CALOR	CALENTADOR ENTRADA T-1002
	T-1002	SEPARADOR	TORRE VAPORIZACIÓN FLASH DAO
DESPOJO SOLVENTE DAO	T-1003	SEPARADOR	TORRE DESPOJO DAO CON VAPOR
	P-1003-C/D	BOMBA	BOMBA SALIDA DAO
FLASH SOLVENTE ASFALTO	E-1005	INT. DE CALOR	CALENTADOR SALIDA FONDO T-1001
	E-1009	INT. DE CALOR	CALENTADOR ENTRADA T-1004-A
	T-1004-A	SEPARADOR	TORRE VAPORIZACIÓN FLASH ASFALTO
DESPOJO SOLVENTE ASFALTO	T-1004-B	SEPARADOR	TORRE DESPOJO ASFALTO CON VAPOR
	P-1004-C/D	BOMBA	BOMBA SALIDA ASFALTO

Los equipos seleccionados se implementaron al modelo siguiendo los pasos del diagrama de flujos de la figura 16.

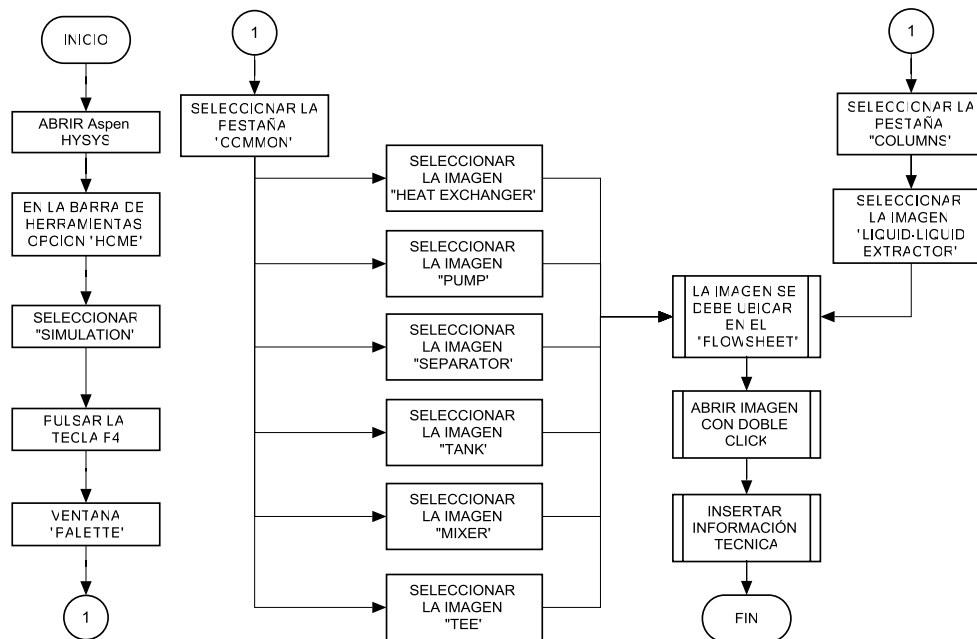


Figura 16. Implementación de equipos al modelo

Intercambiadores de calor: Para su implementación se aprovechó la interface Aspen HYSYS® EDR (Exchange Design and Rating) para poder alimentar especificaciones mecánicas de estos equipos de acuerdo con la hoja de datos de diseño. Con lo anterior se pudo determinar parámetros de restricción hidráulica, vibración, ensuciamiento entre otras condiciones requeridas para el desarrollo de esta simulación, además esto permite ir al detalle del equipo (Ver en el apéndice B).

Separadores flash y torres de despojo: Se incluyeron dentro de sus especificaciones el diámetro de los equipos, la altura, el volumen, entre otros.

Bombas: Se identificaron sus curvas de desempeño y los diferenciales de presión.

Torre de extracción: Para la torre de extracción líquido-líquido se tomó sus especificaciones mecánicas, tales como: diámetro, número de platos, número de paso de los platos, tipo de platos. El programa definió la hidráulica de la torre.

Por último en el modelo también se incluyeron divisores de corrientes (TEE), mezcladores (MIX), módulos de Reciclo (RCY), interacción entre paquetes termodinámicos (CUTTER), y Ajustadores (ADJ). .

4.2.5 Caracterización e implementación de las corrientes.

Caracterización de las corrientes de entrada: Para el modelo de la unidad U1000 se establecieron cinco tipos de corrientes de entrada: Fondos de vacío, Slurry, DMO, solvente, y Aceite Liviano de Ciclo (A.L.C). Para la implementación de estas corrientes se usaron los métodos “Oil Manager” (apéndice C), y “Assay Management” (apéndice D). Las propiedades fisicoquímicas de las corrientes de proceso se obtuvieron de los datos de laboratorio, basados en las curvas dadas por los cortes de destilados. Para el caso de los fondos de vacío, el conjunto de componentes se infirieron, por medio de la herramienta **PETROLEUM FEEDER**, de las mezclas de los crudos HCT, Cusiana, MNI y Cupiagua cargados a la unidad de destilación CDU150. En la Figura 17 se representa el diagrama de flujo para el uso de dicha herramienta.

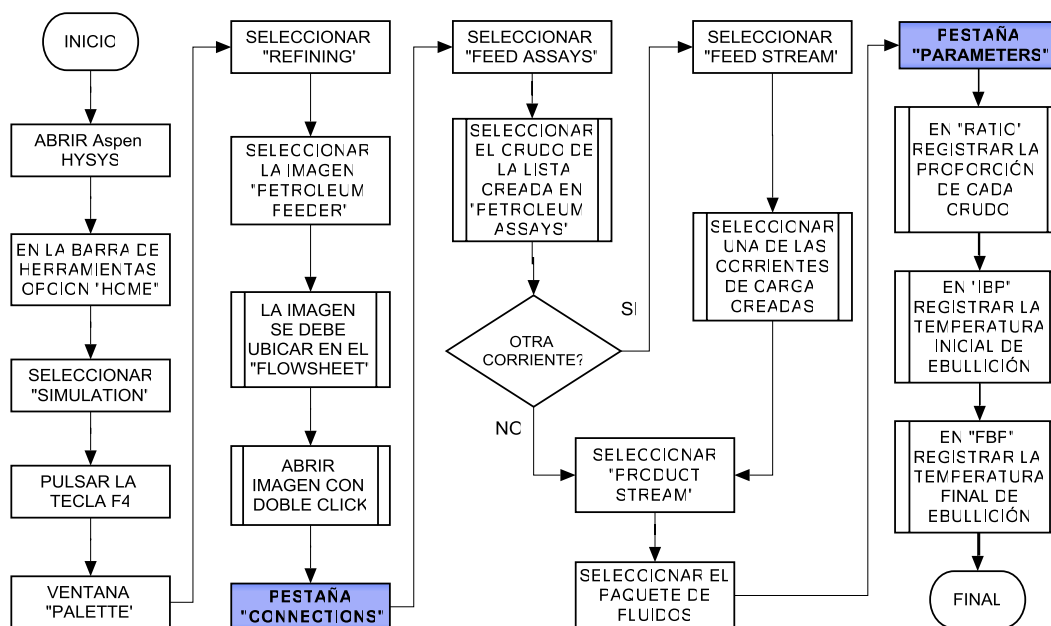


Figura 17. Implementación módulo “PETROLEUM FEEDER”.

Las proporciones de mezcla de los crudos obedecen a una planeación de cargas a la refinería y son ajustadas dependiendo de los objetivos trazados cada semana.

Para la caracterización de la corriente de solvente de extracción, se usó su composición molar dependiendo el tipo de corriente de carga (ver Tabla 10).

Tabla 10.

Composición del solvente para cada tipo de carga

TIPO DE CARGA	PROPILENO	PROPANO	ISO-BUTANO	NORMAL BUTANO	TRANS-2-BUTENO	1-BUTENO	ISO-BUTILENO
FONDOS DE VACÍO	5,00	85,00	10,00	-	-	-	-
SLURRY	24,00	57,00	10,00	2,00	1,70	2,00	3,30

Implementación de las corrientes: La figura 18 representa el diagrama de flujo para la implementación de las corrientes en la simulación.

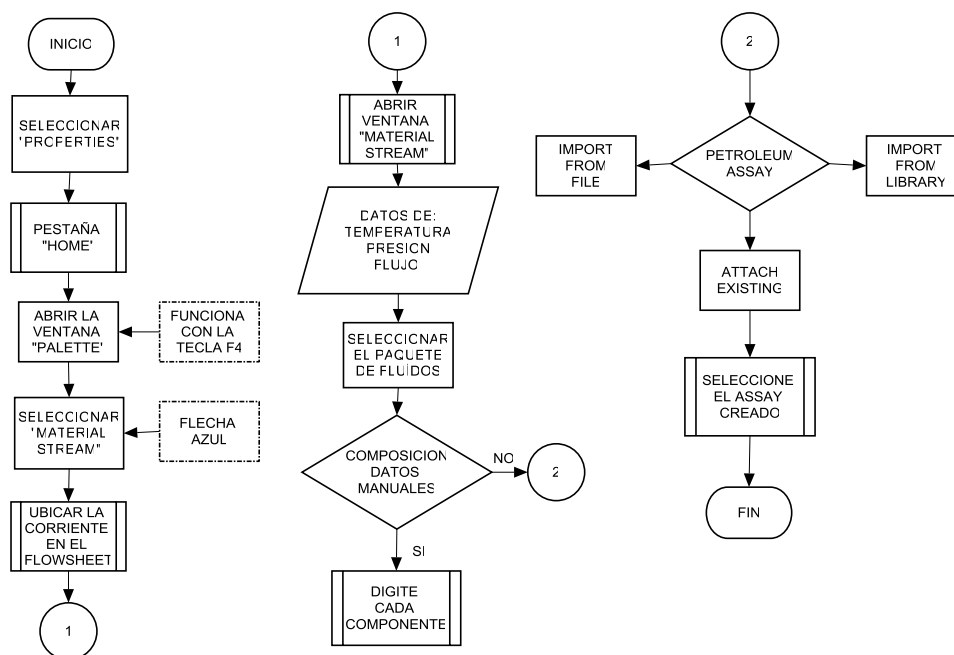


Figura 18. Implementación de una corriente en la simulación

Para el caso del solvente de extracción, se usó el método de implementación de la corriente directamente en la simulación y se modificaban los componentes de la misma de forma manual, de esta manera facilitó los cambios en la composición del mismo para los diferentes ensayos de evaluación.

4.2.6 Validación del modelo. Con los datos históricos de la unidad U1000 con fondos de vacío registrados en Excel, y haciendo uso de la herramienta **WORKBOOK** de Aspen HYSYS®, fueron cargados al modelo y este los aplicó en la simulación con cada uno de los paquetes termodinámicos seleccionados. Los resultados de las variables respuesta de la simulación son devueltos a Excel creando un banco de datos. Luego se procedió a validar la información por medio de un ANOVA. En la figura 19 se observa el diagrama de flujo aplicado a la validación del modelo.

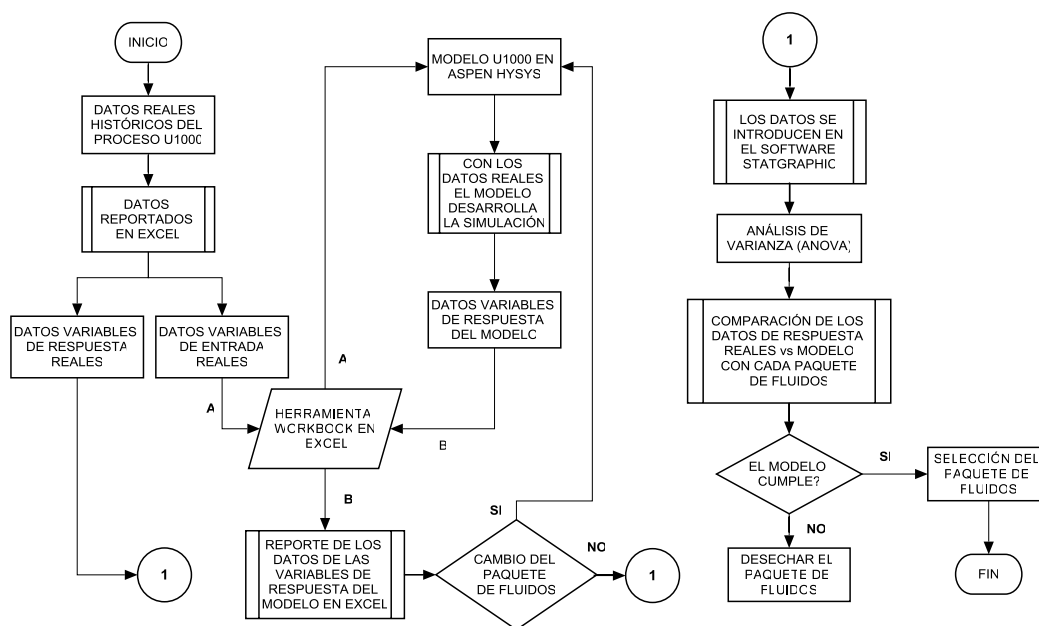


Figura 19. Diagrama de flujo para la validación del modelo

Luego, se compararon los valores de los resultados del promedio y la desviación estándar de los datos del rendimiento del proceso real y el simulado con cada paquete termodinámico y se dio por aceptado aquel que predijo, bajo un intervalo de confianza del 95%, los datos de las variables del proceso real. Con el paquete termodinámico seleccionado, se aplicó también el ANOVA, comparando de nuevo el rendimiento, pero ahora a los datos de la unidad U1000 cargando slurry. Con esto se consiguió mayor aceptación y confianza al modelo desarrollado. Parte de los datos históricos de la unidad están registrados en los apéndices E y F.

4.3 Análisis de las variables del proceso

Para poder analizar el comportamiento del rendimiento y el contenido del CCR en el extracto (DAO y SDA) con respecto a los cambios en la temperatura de cima de la T1001 y la relación solvente carga, se graficaron los datos reales de la unidad con carga de fondos de vacío y Slurry.

Esta información fue la que se obtuvo y se aplicó para la validación del modelo. En la figura 20 está el diagrama de flujo con los pasos usados para el análisis del comportamiento de las variables del proceso.

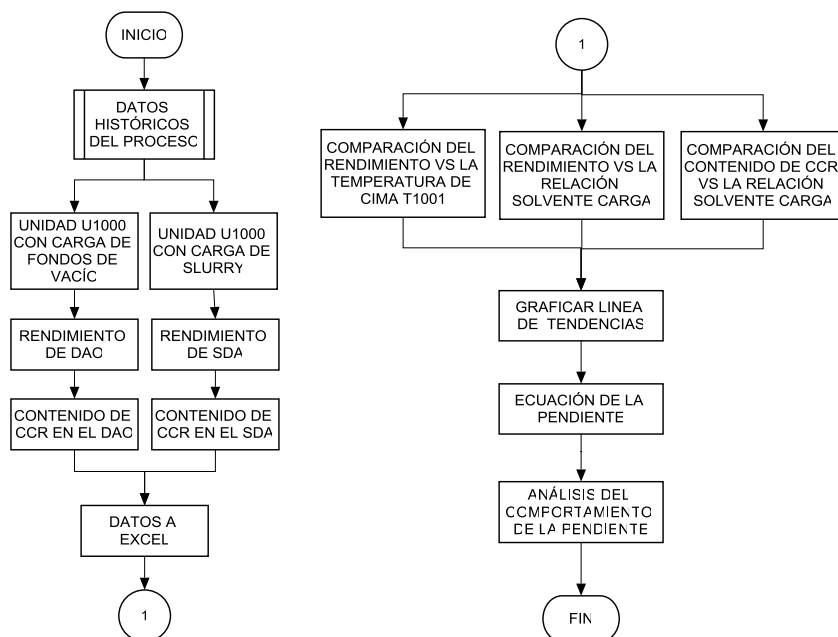


Figura 20. Comportamiento de las variables del proceso.

4.4 Evaluación del modelo con DMO

Ahora, el próximo paso fue evaluar el modelo implementando como nueva corriente de carga el DMO, analizando el comportamiento en las variables de respuesta de la simulación.

4.4.1 Implementación De La Nueva Corriente. Se procedió a crear el DMO como una nueva corriente de carga al modelo. Para esto fue necesario la información de la destilación simulada de la Tabla 11.

Tabla 11.

Destilación simulada DMO .

DATOS	DMO-1	DMO-2	UNID.
API	15,53	15,60	°API
DENSIDAD	60,05	60,01	lb/ft ³
IBP	394,60	354,00	°F
5% RECOBRADO	665,50	590,90	°F
10% RECOBRADO	873,00	833,80	°F
20% RECOBRADO	995,00	967,30	°F
30% RECOBRADO	1.053,10	1.029,90	°F
40% RECOBRADO	1.094,80	1.074,00	°F
50% RECOBRADO	1.132,30	1.111,80	°F
60% RECOBRADO	1.169,40	1.149,30	°F
70% RECOBRADO	1.207,90	1.187,50	°F
80% RECOBRADO	1.255,60	1.232,10	°F
90% RECOBRADO	1.312,10	1.291,20	°F
95% RECOBRADO	1.360,40	1.330,50	°F
FBP	1.476,20	1.439,40	°F

Para la creación de la nueva corriente de alimento al modelo se usaron los pasos para tal fin descritos en el diagrama de flujos del apéndice C.

4.4.2 Comportamiento Del Modelo Cargando DMO. Para observar el comportamiento de la unidad, enfocados en los resultados de rendimiento y CCR ahora con carga de DMO, se realizó un análisis de sensibilidad por medio de ensayos de evaluación, cada uno con un tipo de solvente diferente, y en donde se ajustaron los parámetros de relación solvente/carga y temperatura cima torre T1001. En la Tabla 12 se representan los cinco tipos de solventes usados, con los porcentajes molares de sus componentes, que se tiene en la GRB.

Tabla 12.

Diferentes tipos de solventes de la GRB

TIPOS DE SOLVENTE DE LA GRB	PROPILENO	PROPANO	ISO-BUTANO	NORMAL BUTANO	TRANS-2-BUTENO	1-BUTENO	ISO-BUTILENO	CIS-2-BUTENO
1 SOLV U1000 FVACIO	5,00	85,00	10,00	-	-	-	-	-
2 ORTOFLOW	28,50	70,50	1,00	-	-	-	-	-
3 UOP-I	-	-	29,00	15,00	12,00	14,00	23,00	7,00
4 MODELO IV	4,00	3,00	27,00	18,00	14,00	11,00	15,00	8,00
5 SOLV U1000 SLURRY	24,00	57,00	10,00	2,00	1,70	2,00	3,30	-

En cada ensayo se mantuvieron unas condiciones de carga, se ajustó la composición del solvente (según la Tabla 12) y se variaron los parámetros de relación solvente/carga y la temperatura de la cima torre T1001. Se observó el comportamiento del rendimiento y CCR trazando los rangos máximos y mínimos para cada uno. Todo lo anterior para determinar la viabilidad de cargar DMO en la unidad de desasfaltado U1000 y bajo qué condiciones operativas se presentan los mejores resultados.

4.4.3 Balance Económico. Para este trabajo de aplicación se planteó un balance económico bruto de la unidad de desasfaltado con propano U1000 con carga de DMO, proyectando el potencial que tendrían los productos obtenidos, así: el DMO desasfaltado se evaluó como un gasóleo (59,8 *US\$/B*), y el producto de fondo se evaluó como asfalto (55,7 *US\$/B*). En el balance también se incluye el valor de la materia prima (66,01 *US\$/B*) y los costos operacionales (3,2 *MUS\$/A*). Para los cálculos se tuvieron en cuenta las ecuaciones planteadas en la tabla 13.

Tabla 13.

Tabla de ecuaciones de balance económico bruto

DETALLE	UNIDAD	ECUACIÓN
COSTO MATERIA PRIMA	MUS\$/A	$CP = [(Flujo\ Materia\ prima\ [B/D] * Valor\ Materia\ prima [US\$/B])/10^6] * 365$
FLUJO DE EXTRACTO	B/D	$FE = Flujo\ Materia\ prima\ [B/D] * Rendimiento\ unidad\ [%]$
VALOR DEL EXTRACTO	MUS\$/A	$VE = [(FE * Valor\ producto\ [US\$/B])/10^6] * 365$
FLUJO DEL RESIDUO	B/D	$FR = Flujo\ Materia\ prima [B/D] - FE$
VALOR DEL RESIDUO	MUS\$/A	$VR = [(FR * Valor\ producto\ [US\$/B])/10^6] * 365$
INGRESO POR PRODUCTOS	MUS\$/A	$IP = VE + VR$
MARGEN DE HIDROCARBUROS	MUS\$/A	$MH = IP - CP$
UTILIDAD BRUTA	MUS\$/A	$UB = MH - Costos\ operacionales\ [US\$/A]$
PUNTO DE EQUILIBRIO		$PE = MH - Costos\ operacionales\ [US\$/A] = 0$

Comportamiento del modelo con DMO desde el aspecto económico: Para poder determinar si los ensayos de evaluación realizados en las simulaciones con DMO son, así mismo, viables desde el aspecto económico, se plantearon los siguientes pasos: se inició con el ajuste del rendimiento de la unidad, a máxima carga de alimentación (3,3 KB/D), hasta lograr encontrar el punto de equilibrio (utilidad bruto igual a cero). Luego, este valor se comparó con los resultados de los rendimientos obtenidos en las simulaciones de cada ensayo de evaluación. Por último, se determinó que ensayo presentó el mejor desempeño, también, desde el aspecto económico.

Cálculo del balance económico: Con el ensayo de evaluación ya definido, desde los aspectos operativos y económicos, se recalcula el balance llevando la unidad al máximo rendimiento que la simulación arroja para dicho ensayo. Al final se examinó el valor del margen de utilidad bruta y se determinó si cargar DMO en la unidad de desasfaltado con propano U1000 es económicamente viable.

5. Análisis de Resultados

5.1 Desarrollo del modelo en Aspen HYSYS®.

5.1.1 Análisis De Los Paquetes Termodinámicos.

Selección de los paquetes termodinámicos: Al examinar el **árbol de decisiones** (figura 6), para simulaciones con compuestos no polares, las ecuaciones de estado PR, SRK, SRK-Twu, y LKP son las de aplicar. Ahora, al revisar la **tabla auxiliar para modelos termodinámicos** (Tabla 4), los procesos que impliquen destilación atmosférica, al vacío y separación de hidrocarburos, las ecuaciones de estado PR, PRSV, SRK, y SRK-Twu parecen las más apropiadas. Si el proceso incluye hidrocarburos aromáticos (como el Slurry) estipulan el uso de los modelos de actividad NRTL y UNIQUAC. Por último, al estudiar la **tabla para coeficientes de actividad** (tabla 5), convienen que para el equilibrio líquido-líquido aplican los modelos de actividad NRTL y UNIQUAC. Ahora bien, tomando toda la información anterior y, soportada en simulaciones realizadas a procesos de desasfaltado con solventes (heurística), se determinó para las cargas y productos la ecuación de estado PR. Para las corrientes del proceso de desasfaltado se consideraron los modelos de actividad UNIQUAC y NRTL (Steltenphol & Chlebovec, 2002) y las ecuaciones de estado PRSV, PR (Aparicio, Jeronimo, & Martins, 2002), y SRK-Twu (Cao, Jiang, & Li, 2009) que serán probadas en el modelo.

En general, la principal ventaja de los modelos de actividad estriba en la buena determinación del equilibrio líquido-líquido para mezclas binarias. Sus cálculos están basados en ecuaciones empíricas y semi-teóricas para la estimación de los coeficientes de actividad, sin embargo sus estimaciones de la interacción molecular dependen de la composición de las mezclas, y se obtienen únicamente a partir de parámetros estructurales de componentes puros. Para el caso de las ecuaciones de estado, estas se pueden aplicar a mezclas utilizando reglas de mezclado para combinar constantes de las especies puras o, en el caso de las ecuaciones PR y PRSV, se pueden aplicar en composiciones inferidas o pseudocomponentes (Luque Rodriguez, 2005).

Comportamiento de los paquetes termodinámicos en el modelo: Los resultados de la simulación de la extracción líquido-líquido con fondos de vacío, cuando se aplicaron los modelos de actividad **UNIQUAC** y **NRTL** fueron semejantes. En la figura 21 se puede observar la convergencia arrojada en la simulación y es debido a la concordancia de los cálculos del modelo en el balance molar. Sin embargo, la dificultad que tienen estos modelos de actividad está en la capacidad de inferir parámetros de entalpía molecular para componentes hipotéticos o pseudocomponentes, como el caso de las corrientes de carga fondos de vacío y Slurry, que se ve reflejada en los datos atípicos de temperaturas, por esta razón dichos modelos fueron excluidos del estudio.

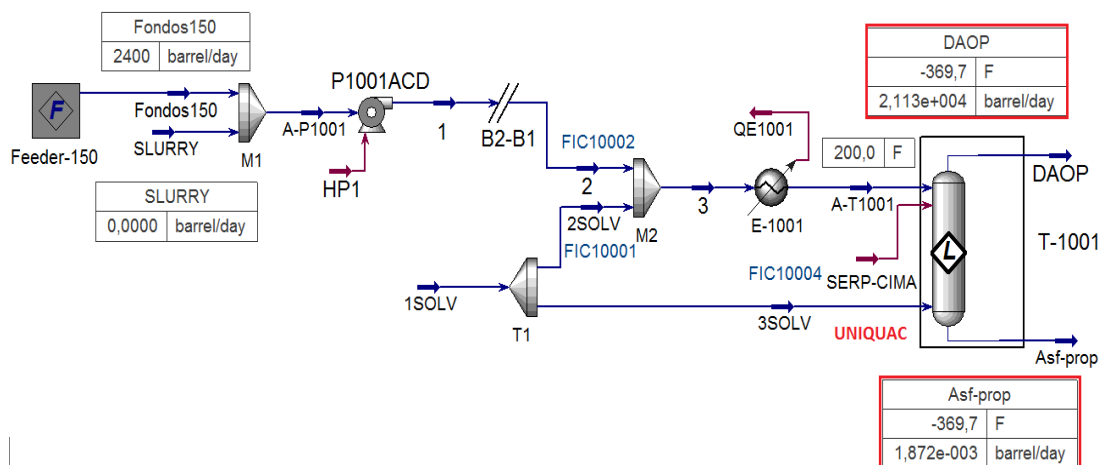


Figura 21. Simulación aplicando el modelo de actividad UNIQUAC.

Para el caso de la simulación aplicando las ecuaciones de estado **PR**, **PRSV** y **SRK-Twu**, bajo las mismas condiciones de operación, los cálculos también dieron concordancia en los balances molares (convergencia), además, se encontraron valores de temperatura asociados a un proceso de extracción líquido-líquido. En la Tabla 14 se registra el resumen de los datos comparativos de estos paquetes termodinámicos.

Tabla 14.

Datos comparativos paquetes termodinámicos

ECUACIONES DE ESTADO	CARGA B/D	SOLVENTE EXTRACCIÓN		CONDICIONES T1001					EXTRACTO PRODUCTO B/D	RENDIMIENTO %
		TEMP.	FLUJO	T° ENTRADA	T° CIMA	T° FONDO	FLUJO CIMA	FLUJO FONDO		
		°F	B/D	°F	°F	°F	B/D	B/D		
SRK-Twu	2.400	150,0	17.500,0	200,0	162,5	150,7	17.680,0	2.480,0	693,9	29,0
PR	2.400	150,0	17.500,0	200,0	161,3	150,5	17.810,0	2.318,0	793,5	33,0
PRSV	2.400	150,0	17.500,0	200,0	161,1	150,6	18.110,0	2.020,0	1.065,0	44,0

En continuación, tomando como referencia el comportamiento de los valores del rendimiento en los históricos del proceso real de la unidad U1000, las ecuaciones de estado PRSV, PR, y SRK-Twu presentaron un comportamiento asociado al desasfaltado con propano cargando fondos de vacío en la simulación. Esto se puede observar en la figura 22 en donde los datos del rendimiento

de DAO que arrojaron los modelos con las ecuaciones de estado seleccionadas, fueron graficados y comparados con los datos históricos de la misma variable de la unidad U1000 con cambios en la relación solvente/carga.

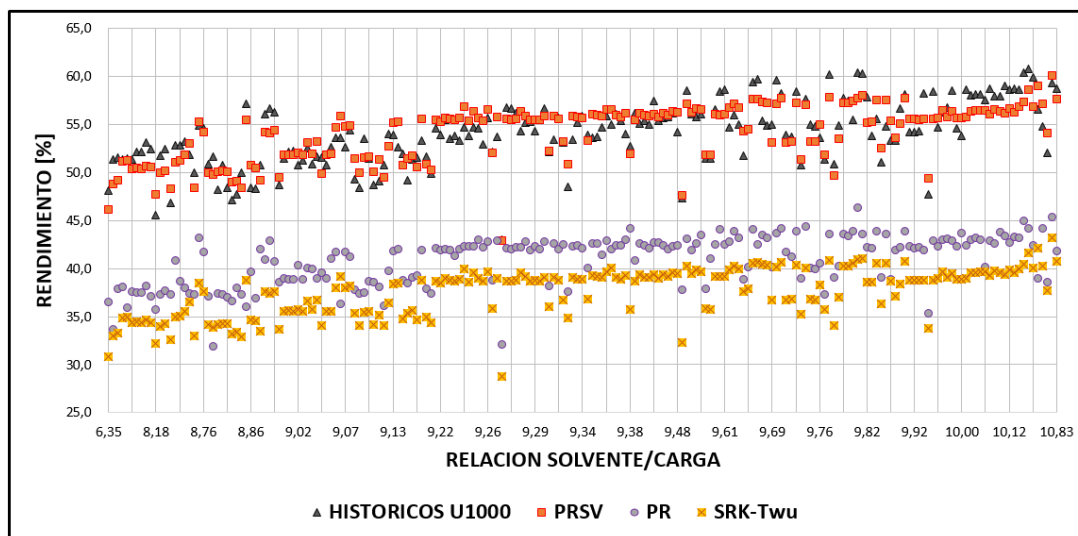


Figura 22. Comportamiento rendimiento vs relación S/C.

Así mismo se graficaron los datos del rendimiento de DAO pero ahora con modificaciones en la temperatura de cima de la T-1001. En la figura 23 se puede notar las tendencias de estos datos.

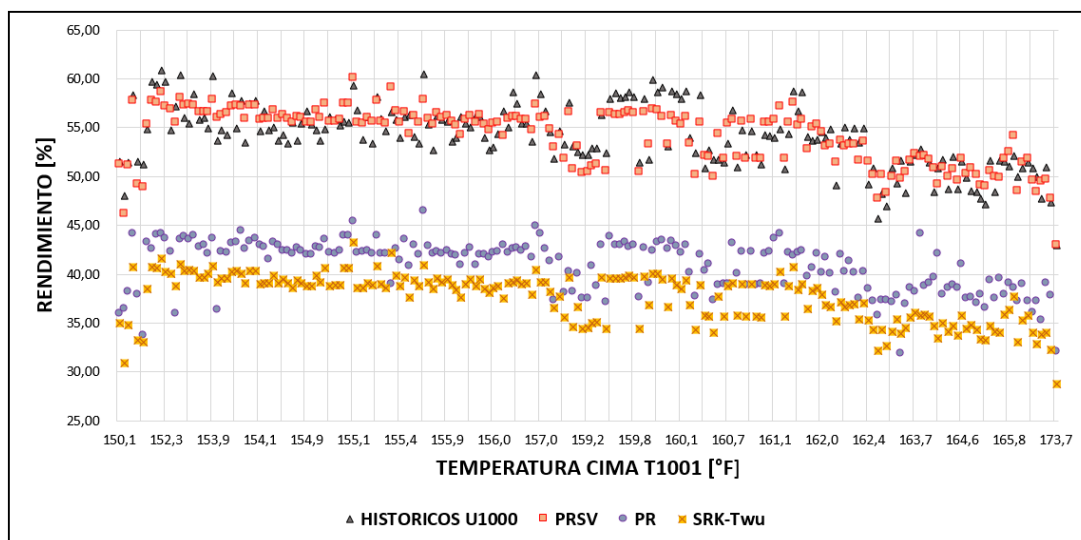


Figura 23. Comportamiento rendimiento vs Temperatura de cima T1001.

También se observa que los valores arrojados en las simulaciones con las ecuaciones de estado PR y SRK-Twu están cercanos entre ellos pero más alejados de los datos del proceso real. Esto se debe a las inferencias planteadas por estos modelos de la temperatura crítica de la mezcla (solvente-extracto). Este comportamiento se explica tomando como referencia las curvas de la figura 24.

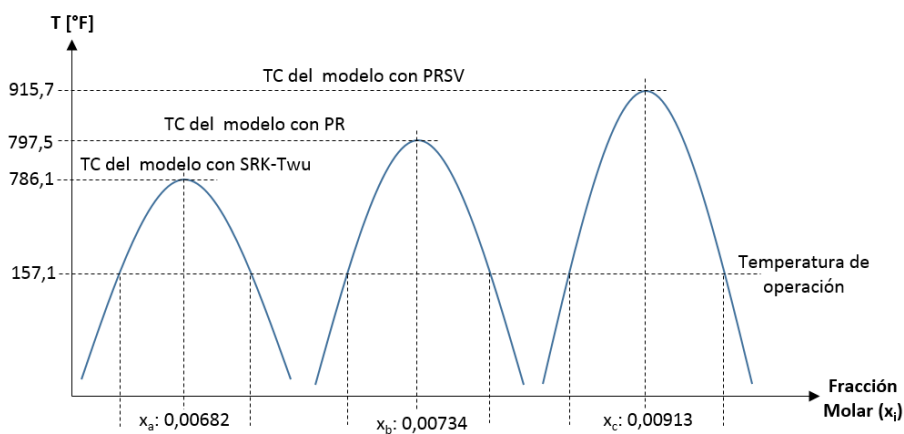


Figura 24. Curva Temperatura -Fracción molar de los modelos

Los valores de las temperaturas críticas de la mezcla y fracciones molares del producto de cima de la torre T1001 fueron extraídos del modelo para cada ecuación de estado con las mismas condiciones operacionales, y se extrapolaron en la envolvente de la figura 4b (página 26) la cual representa el comportamiento del equilibrio líquido-líquido. Para el caso del modelo planteado con la ecuación SRK-Twu, la temperatura crítica de la mezcla fue 786,1°F y la fracción molar (x_A) de 0,00682, en comparación con el modelo que aplico la ecuación PRSV, donde los valores de la temperatura crítica y fracción molar (x_C) fueron 915,7°F y 0,00913 respectivamente. Al analizar estos datos se evidencia que al aumentar la temperatura crítica de la mezcla, lo hace también, el área bajo la curva para una misma temperatura de operación (temperatura de cima T1001). Esto es, aumenta la fracción molar del soluto en el extracto que se obtiene en el proceso de desasfaltado, viéndose reflejado en el rendimiento. En consecuencia, para los modelos que infirieron las temperaturas críticas más bajas, como el caso PR y SRK-Twu, su rendimiento fue inferior al calculado por el modelo con la ecuación PRSV.

5.1.2 Validación Del Modelo con Fondos de vacío. El resumen del ANOVA realizado al modelo con cada paquete termodinámico se describe en la Tabla 15. Se observa que los valores de la media y desviación estándar de los datos de la variable **rendimiento** arrojados por las ecuaciones de estado PR y SRK-Twu no cumplieron con el intervalo de confianza del 95%, esto es, no reflejaron la realidad del proceso. Por el contrario, el modelo basado en la ecuación de estado PRSV satisfizo las condiciones del ANOVA realizado.

Tabla 15.

Resumen de comparación media y desviación estándar con fondos de Vacío

PAQUETES DE FLUIDOS	DESVIACIÓN ESTÁNDAR				PROMEDIO					APLICA
	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR	VALOR	VALOR-P	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR	VALOR	F-RATIO	VALOR-P	
DATOS U1000	2,962860	3,606180	3,25281	N.A.	53,6560	54,5608	54,1084	N.A.	N.A.	BASE
PRSV	2,657590	3,234630	2,91766	0,956773	53,7193	54,5309	54,1251	1,24293	0,12495	SI
PR	2,352890	2,863770	2,58315	0,0	40,5199	41,2384	40,8792	1,58569	0,00120	NO
SRW-Twu	2,264880	2,756650	2,48652	0,0	37,2605	37,9522	37,6063	1,71132	0,00020	NO

Se puede determinar que estos resultados son los esperados si se tiene en cuenta las desviaciones observadas para cada ecuación de estado al revisar los resultados obtenidos en el análisis inicial del modelo (figuras 22 y 23).

5.1.3 Validación del modelo con Slurry. Ahora, tomando el modelo planteado con la ecuación de estado PRSV, se simula como carga Slurry. En el ANOVA, también se compararon los valores de la media y desviación estándar de los datos de la variable dependiente **rendimiento** tanto de la simulación como los datos reales de planta. El modelo planteado con la ecuación de estado PRSV también refleja el proceso real de la unidad U1000 con carga de Slurry. En la Tabla 16 está el resumen de la validación del modelo.

Tabla 16.

Comparación de la media y desviación estándar con Slurry.

VALIDACION DEL MODELO CARGANDO SLURRY				
TABLA COMPARATIVA	RENDIMIENTO [%] DATOS REALES U1000	RENDIMIENTO [%] CON EoS PRSV	INTERVALO DE CONFIANZA DATOS PLANTA	
			LIMITE INF.	LIMITE SUP.
Promedio	76,7163	76,9903	76,1987	77,2339
Desviación Estándar	3,16449	3,21676	2,83839	3,57596

5.2 Análisis de las variables del proceso.

5.2.1 Comportamiento del rendimiento vs temperatura de cima T1001. En la figura 25 se puede observar que la tendencia de los datos de la unidad con fondos de vacío, arroja una pendiente negativa ($m = -0.0312$). Es decir, que al aumentar la temperatura de cima de la T1001, el rendimiento disminuye.

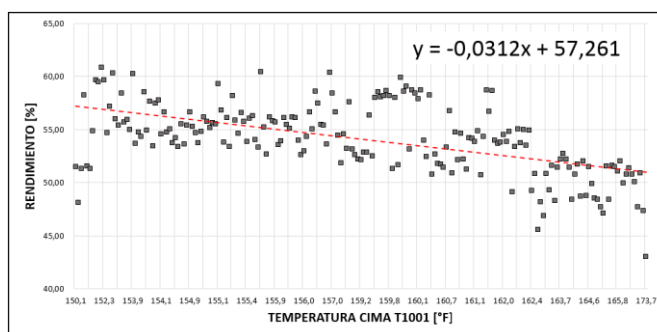


Figura 25. Rendimiento vs Temperatura de cima T1001 con Fondos de vacío

El análisis comienza retomando la curva de equilibrio líquido-líquido y que se plantea en la figura 26. Cada área bajo la curva representa el total de la mezcla soluto-solvente de extracción ($x_i = 1$) y el valor de la fracción molar representa el soluto en dicha mezcla. A medida que aumenta la temperatura el área disminuye y a su vez lo hace la fracción molar del soluto.

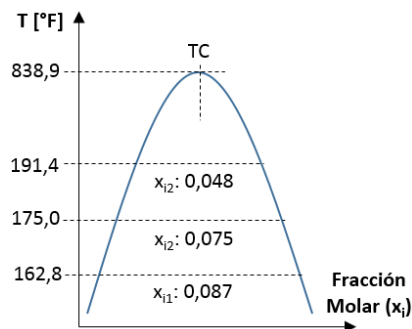


Figura 26. Curva de temperatura vs fracción molar.

Este comportamiento se da debido al cambio de la densidad de la mezcla soluto-solvente de extracción. Cabe recordar que la operación de extracción líquido-líquido está dada por el fenómeno de transferencia de masa del soluto al solvente, siendo la densidad uno de los parámetros más influyentes. En continuación, el flujo de masa por difusión de la especie A (j_A) está dado por la ley de Fick con la ecuación: $j_A = -\rho D_{AB}(dw_A/dx)$, donde D_{AB} es la difusividad, ρ es la densidad total de la mezcla, y w_A es la fracción de masa del componente A. En esta ecuación se puede observar que la densidad total de la mezcla es directamente proporcional al flujo de masa. Entonces, a medida que esta densidad es forzada a disminuir por el aumento en la temperatura, también lo hace el flujo. Para el proceso de la unidad de desasfaltado U1000 con carga de fondos de vacío, este comportamiento se ve reflejado en la disminución de la producción de DAO, impactando sobre la variable rendimiento.

Ahora, al revisar los datos reales de la unidad U1000 operando con Slurry, no presentó un comportamiento parecido al registrado con fondos de vacío. Esto se puede observar en la figura 27. Sin embargo al hacer un acercamiento al proceso real, en el cuarto de control de la unidad U1000, se pudo evidenciar que por condiciones operativas y de integridad de algunos equipos, los ajustes al rendimiento solo se estaban haciendo modificando la relación solvente/carga de la unidad.

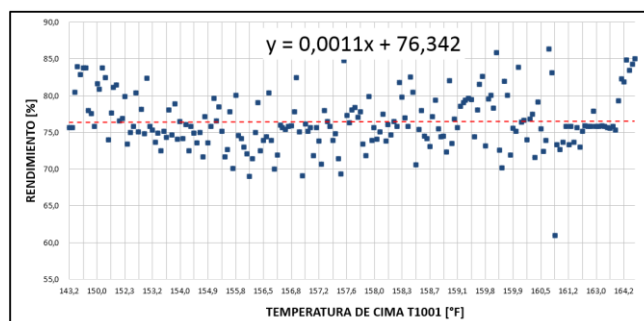


Figura 27. Rendimiento vs Temperatura de cima T1001 con Slurry.

5.2.2 Comportamiento del rendimiento vs relación solvente/carga. Al examinar la tendencia de los datos registrados en la figura 28 (a) y (b), se observa que las pendientes son positivas para ambos casos ($y_a = 0,0355$, $y_b = 0,0583$), es decir, que al aumentar la relación solvente/carga el rendimiento también lo hace.

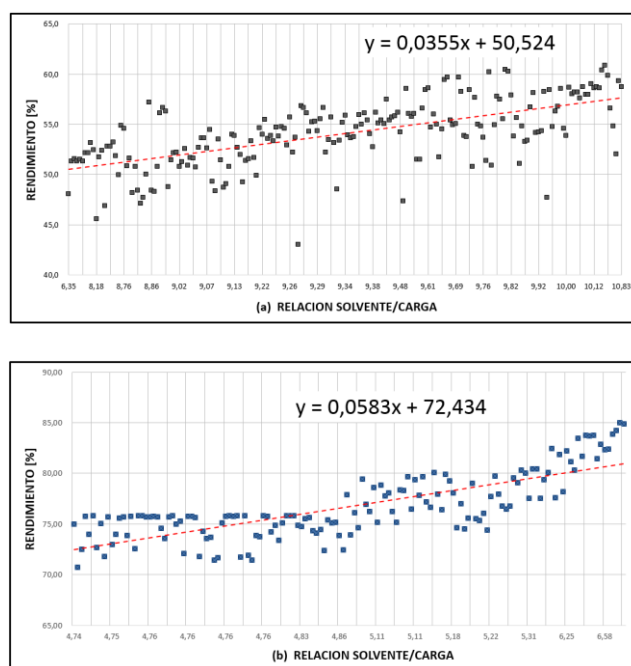


Figura 28. Rendimiento vs relación solvente/carga con fondos de vacío (a) y Slurry (b).

En la figura 28(a) están los datos reales de la unidad U1000 con carga de fondos de vacío y en la figura 28(b) con carga de Slurry, para ambos casos el comportamiento es muy similar. Para su análisis, en la figura 29 se plantea un balance de masa tomando como sistema la torre T1001 (contactor).

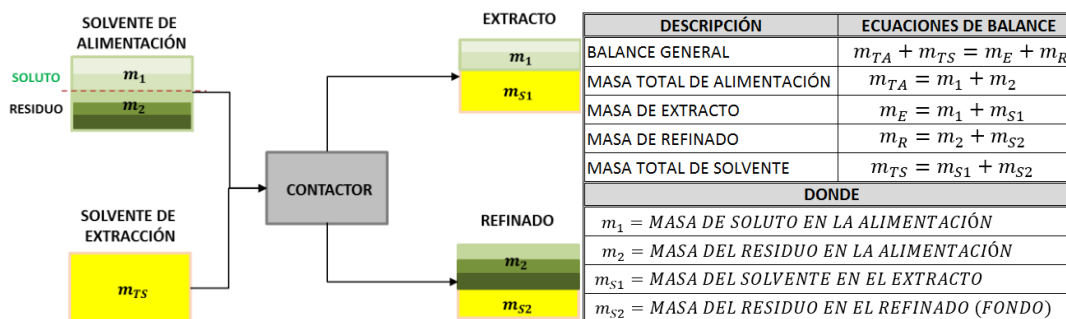


Figura 29. Balance de masa para la extracción líquido-líquido.

El balance general representa los flujos de masa que entran (alimentación y solvente de extracción) y salen (extracto y refinado) del contactor. La corriente del solvente de alimentación (m_{TA}) contiene la masa de soluto (m_1) a extraer. Ahora bien, si m_{TS} es el total de solvente de extracción usado en el proceso, a medida que este aumenta, también lo hace m_1 en el producto de cima o extracto. Se puede considerar que una cantidad x de solvente extrae una cantidad y de soluto, y bajo las mismas condiciones de presión, temperatura y composición, si se aumenta el valor de x igual lo hace el valor de y .

Como la relación solvente carga ($R_{S/C}$) está dada por la ecuación: $R_{S/C} = F_S/F_A$, donde F_S es el flujo de solvente de extracción y F_A el flujo de alimentación, y La transferencia del soluto al solvente de extracción se favorece cada vez que se aumenta el flujo másico de este último (F_S), entonces, en consecuencia, cada vez que se aumenta la relación solvente carga, lo hace también el rendimiento de DMO y DAO en el proceso de desasfaltado de la unidad U1000.

5.2.3 Comportamiento del contenido de CCR en el extracto. El análisis del contenido de carbón en las muestras de extracto (Carbón conradson), está directamente relacionada con los asfaltenos presentes en la alimentación. Si se pudiera representar la distribución del contenido de asfaltenos en la muestra de alimentación (fondos de vacío o Slurry), se vería como en la figura 30 (a), (b), y (c).

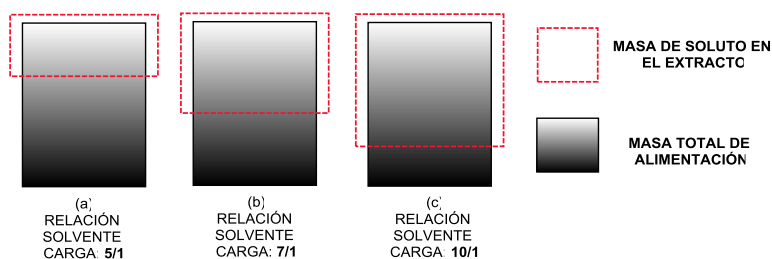


Figura 30. Distribución del asfalto en la alimentación

En la figura 30(a) el soluto presenta poco contenido de asfaltenos comparado con las figuras 30(b) y (c) que se incrementan a medida que lo hace la masa de soluto contenida en el extracto, por efecto del aumento en la relación solvente carga. Este comportamiento se puede observar en las figuras 31 (a) y (b) con los datos reales de CCR en el extracto del proceso.

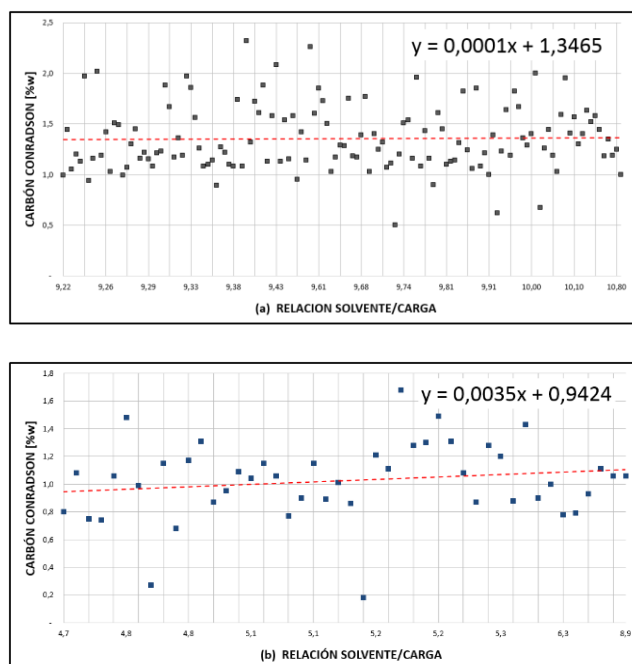


Figura 31. CCR vs Relación solvente/carga con fondos de vacío (a) y Slurry (b).

Aunque las pendientes de las rectas que arrojaron los datos del contenido de CCR en el extracto no son tan pronunciadas, sus tendencias son positivas. En la figura 31(a) con carga de fondos de vacío ($y_a = 0,0001$) y la figura 31(b) con carga de Slurry ($y_b = 0,0035$). Esto es, a medida que aumenta la relación solvente carga, también lo hace la producción de soluto (rendimiento), y a su vez el contenido de CCR en el extracto (DAO y SDA).

Volviendo a las figuras 30(a), (b), y (c) no existe una línea de separación que pueda determinar la cantidad exacta de soluto contenida en la alimentación, pues esto depende principalmente de la composición de la misma. Ahora bien, ¿cuánto soluto se desea extraer?, es ahí donde los datos de laboratorio y ajustes operacionales llevan a revisar la cantidad de extracto (rendimiento) que se requiere obtener, pero dentro de los parámetros de calidad, referida en el contenido CCR. Entonces, a medida que los ajustes en el proceso implican el aumento del rendimiento, el soluto obtenido (DAO o SDA) llevará más contenidos de asfaltenos que se verán reflejados en los datos del CCR.

5.3 Evaluación del modelo de la unidad U1000 con DMO

Ahora se analiza el comportamiento del modelo, implementando como nueva corriente de alimentación DMO, por medio de ensayos de evaluación.

5.3.1 Resultados de los Ensayos De Evaluación Para los ensayos de evaluación, los cinco tipos de solventes usados en las simulaciones son los descritos en la tabla 12, y las condiciones operacionales aplicadas a las mismas son las planteadas en la tabla 17.

Tabla 17.

Condiciones operacionales aplicados a los ensayos de evaluación.

CONDICIONES DE CARGA		
DESCRIPCIÓN DE LA VARIABLE	UND.	VALOR
TEMPERATURA DEL SOLVENTE DE EXTRACCIÓN	°F	170,0
TEMPERATURA DE ENTRADA DE CARGA A LA T1001	°F	150,0
CONTENIDO DE CCR EN EL DMO DE ALIMENTACIÓN	%w	5,02
FLUJO DE ALIMENTACIÓN	B/D	3.300,0
FUJO TOTAL DE SOLVENTE DE EXTRACCIÓN	B/D	22.000,0

Cabe recordar, que los ajustes para observar el comportamiento del rendimiento y el contenido de CCR en el DMO desasfaltado, se realizó en las variables relación solvente/carga y la temperatura de cima T1001.

Ensayo de evaluación N°1: La composición del solvente de extracción usado para este ensayo fue: 85% propano, 5% propileno y 10% isobutano y corresponde al que se empleó en la simulación de la unidad U1000 con fondos de vacío. En la tabla 22 del apéndice G están los datos obtenidos en el ensayo y en las figuras 32(a) y (b) está su representación gráfica.

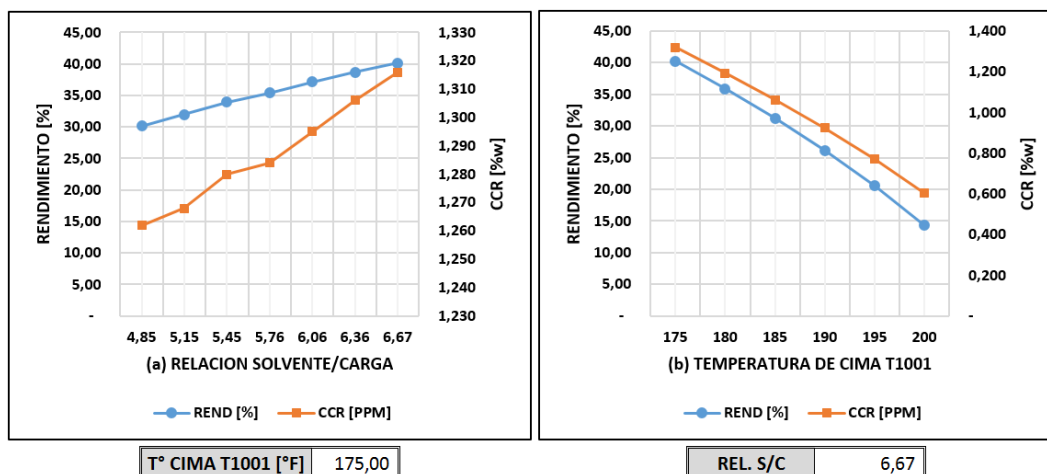


Figura 32. Comportamiento Rendimiento en el ensayo N°1

Resultados: Para la figura 32(a), el incremento del rendimiento estuvo en el intervalo del 30 al 40%. Para el CCR estuvo entre el 1,30 al 1,26%w. Ahora, para la figura 32(b) el comportamiento del rendimiento estuvo entre el 14 y 40% y el CCR entre 0,60 y 1,32 %w.

Ensayo de evaluación N°2: Para este ensayo, el solvente de extracción usado presentó una composición de: 70.5% propano, 28.5% propileno y 1% isobutano. Este tipo de solvente es el que se produce en la unidad de craqueo catalítico Orthoflow. Los datos obtenidos en la simulación se representan en la Tabla 23 del apéndice G y están graficados en las figuras 33 (a) y (b).

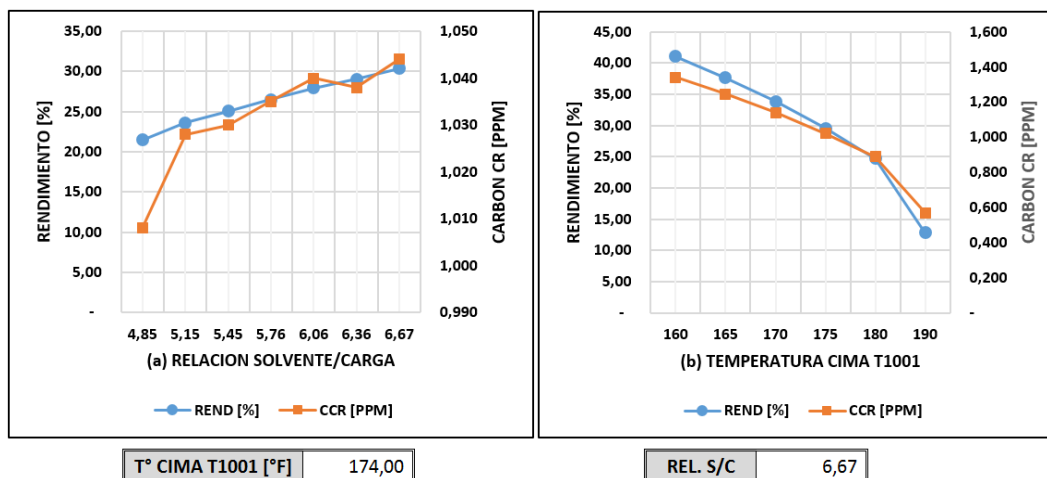


Figura 33. Comportamiento Rendimiento vs relación S/C con solvente-2.

Resultados: Para la figura 33(a), el rendimiento presentó un incremento desde 21 hasta 30%. Para el CCR fue del 1,00 al 1.04%w. Para la figura 33(b), el incremento del rendimiento estuvo en el intervalo del 12 al 41%. Para el CCR estuvo entre el 0,6 al 1,3%w.

Ensayo de evaluación N°3: El solvente de extracción usado para este ensayo es el que se produce en la unidad de craqueo catalítico UOP-I, y su composición es: 29% isobutano, 15% n-butano, 12% trans-2-buteno, 14% 1-buteno, 23% isobutileno y 7% cis-2-buteno. Al realizar la simulación, el modelo corrió solo con los ajustes reportados en la Tabla 18.

Tabla 18.

Resultado del ensayo de evaluación N°3

SOLV. EXT.	REL. S/C	T° ENT T1001	T° CIMA T1001	DMO-D	REND.	CCR
18.000,00	5,45	130,00	174,00	3.296,00	99,88	4,200

Ensayo de evaluación 4: Para esta simulación se usó un solvente de extracción con la siguiente composición: 3% propano, 4% propileno, 27% isobutano, 18% nbutano, 14% trans-2-buteno, 11% 1-buteno, 15% isobutileno, y 8% cis-2-buteno. Este tipo de solvente es el que se

produce en la unidad de craqueo catalítico Modelo-IV. El modelo corrió solo con los ajustes reportados en la Tabla 19.

Tabla 19.

Resultado del ensayo de evaluación N°4

SOLV. EXT.	REL. S/C	T° ENT T1001	T° CIMA T1001	DMO-D	REND.	CCR
18.000,00	5,45	130,00	174,00	3.291,00	99,73	4,172

Ensayo de evaluación N°5: Para este ensayo se usó el solvente de extracción usado en la simulación con Slurry, y su composición es: 24% propileno, 57% propano, 10% isobutano, 2% nbutano, 1.7% trans-2-buteno, 2% 1-buteno, y 3.3% iso-butileno. La tabla 24 del apéndice G muestra los datos obtenidos en la simulación, los cuales están graficados en las figuras 34(a) y (b).

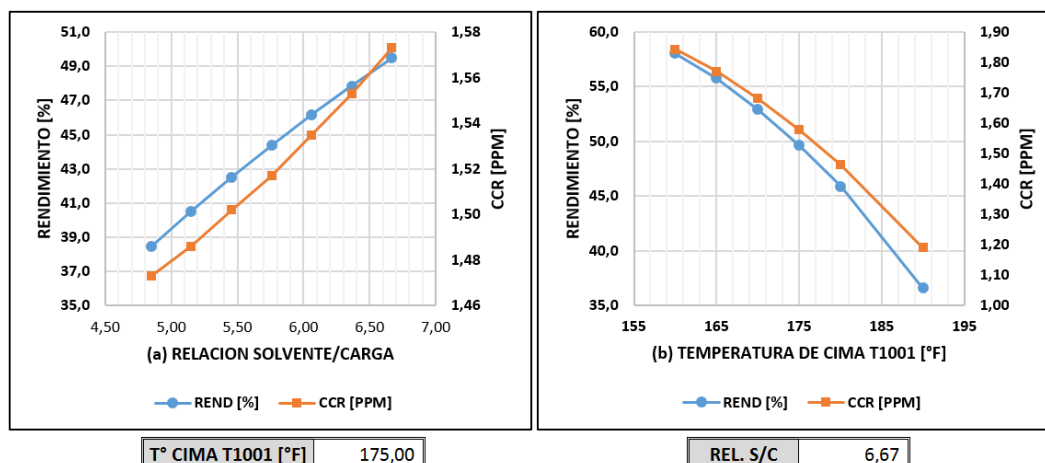


Figura 34. Comportamiento Rendimiento vs relación S/C con solvente-5.

Resultados: Para la figura 34 (a), el comportamiento del rendimiento estuvo entre el intervalo del 38 al 50%. Para el CCR estuvo entre el 1,5 al 1,6%w. Ahora, para la figura 34(b) el incremento del rendimiento estuvo entre el 36 al 58% y el CCR entre 1,1 al 1,8 %w.

5.3.2 Análisis De Resultados De Las Simulaciones Con Dmo.

Cambio en la composición del solvente: Los ensayos estuvieron caracterizados por el cambio en la composición del solvente de extracción usado en cada simulación. Contar con el solvente apropiado para los requerimientos del proceso es muy importante, pues no es un parámetro que se pueda modificar con rapidez, sumado al costo operacional que implicaría cambiar toda la composición del mismo en una unidad de proceso como la U1000. Por eso, seleccionar el solvente de extracción adecuado al proceso es parte de la meta de estos ensayos de evaluación. Más allá de la afinidad físico-química que puedan presentar los componentes del solvente de extracción con respecto al soluto, la variable que se pretende impactar al modificar su composición continúa siendo la *densidad* (ρ). Para su análisis, se tomaron los valores del rendimiento del DMO desasfaltado y su contenido de CCR obtenidos con cada ensayo, con las variables relación solvente/carga y temperatura cima T1001 más cercanas posible entre ellas. Los datos están tabulados en la Tabla 25 del anexo G y fueron graficados en la figura 35.

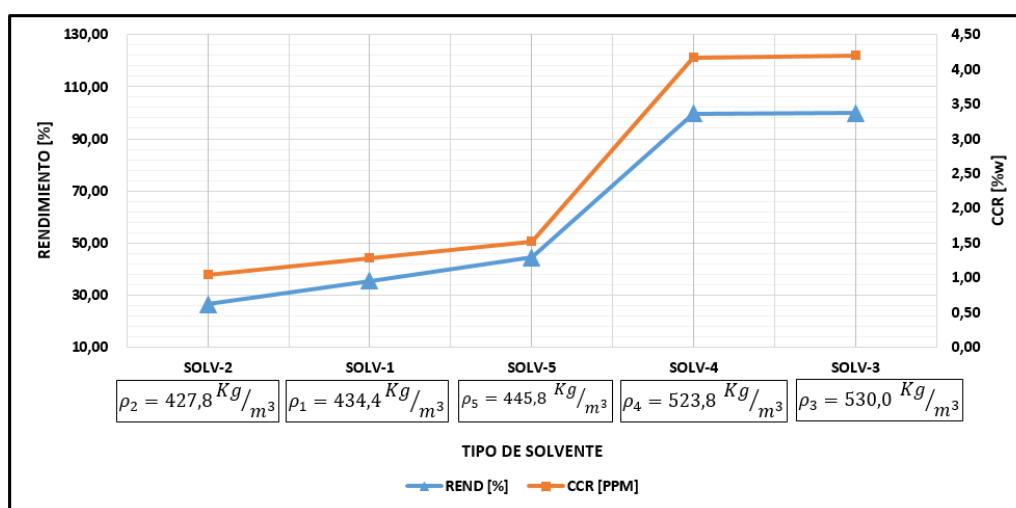


Figura 35. Resumen de resultados de los ensayos

En esta gráfica se puede observar que a medida que la densidad del solvente de extracción usado en la simulación aumenta, así mismo lo hacen el rendimiento y el CCR. Para explicar este comportamiento, se inicia teniendo presente que el aumento en el flujo másico del solvente de extracción, implica también, aumento de la masa de soluto en el extracto. En continuación, si el flujo másico (Q_m) está regido por la ecuación: $Q_m = Q_V * \rho$, donde Q_V es el flujo volumétrico y ρ la densidad, entonces, con un flujo volumétrico constante, a medida que la densidad del solvente de extracción aumenta, por cambio en su composición, también lo hace su flujo másico y así mismo el flujo de soluto en el extracto (rendimiento) y su contenido de CCR.

Resultados ensayos N°3 y 4: Ya se había planteado, que una cantidad x de solvente extrae una cantidad y de soluto. Pero esta condición está ligada a las características físico-químicas tanto del solvente como de las cargas usadas en el proceso de extracción (temperaturas, relación solvente carga, composición, densidad, entre otras). Ahora bien, es probable que si se usa el mismo tipo de solvente x , aplicado a otro proceso de extracción con una carga compuesta por el mismo soluto y , y bajo las mismas condiciones operacionales, el primero tienda a sacar todo el soluto de la carga, o sea, que el solvente “arrastre” la carga completa (o en su mayoría) como extracto o producto de cima. Esto fue lo que se observó en los ensayos N°3 y 4 en donde el solvente usado en estas simulaciones es muy similar al que se usa en el proceso de extracción líquido-líquido de la unidad U2500 (DEMEX) para obtener el DMO. Entonces, se puede decir, que el comportamiento del modelo en estas simulaciones estuvo acorde con el proceso de desasfaltado con propano como tal. Sin embargo, también muestran que los solventes de extracción usados no son los apropiados con carga de DMO. Estos modelos no fueron tenidos en cuenta para el estudio económico.

Resultados ensayos N°1 y 2: Los resultados reportados en estos ensayos arrojaron los rendimientos y contenidos de CCR más bajos. Esto podría ser positivo desde el punto de vista del

perfil de calidad (bajo contenido de CCR en el extracto), pero, posiblemente por el bajo rendimiento, estos escenarios no sean económicamente viable.

Resultados ensayo N°5: Los resultados arrojados en el ensayo 5 prometieron ser los más convenientes, con un rendimiento del 44.36% y con un dato de CCR en 1.52%w estarían dentro de los objetivos que se quieren alcanzar al desasfaltar DMO. Estas conjeturas se respaldaran con el balance económico de la unidad.

5.3.3 Comparación de los resultados desde el aspecto económico. Al realizar la proyección económica al proceso de desasfaltado con propano de la U1000 con carga de DMO, se observa que el rendimiento mínimo para que la unidad esté en el punto de equilibrio, es decir, para que los costos operacionales sean iguales al margen que dan los hidrocarburos, es de **43%**. Ahora bien, al realizar el balance de utilidades brutas, comparando los resultados del rendimiento obtenido en las simulaciones de todos los ensayos de evaluación y extrapolando el valor del rendimiento en el punto de equilibrio, se observó que el ensayo de evaluación N° 5 es el más conveniente también desde el aspecto financiero. Entonces, se establece que los parámetros operacionales planteados en la simulación para este ensayo son los ideales para el cargue de DMO en la unidad de desasfaltado U1000. El resumen de los datos se describe en la Tabla 20.

Tabla 20.

Parámetros operativos planteados para cargar DMO

COMPOSICIÓN DEL SOLVENTE		RANGOS OPERATIVOS	VARIABLES INDEPENDIENTES		OBJETIVO		
			REL. S/C	T° ENT T1001 °F	T° CIMA T1001 °F	REND. %	CCR %w
PROPANO	57,00						
PROPILENO	24,00						
ISO-BUTANO	10,00	VALOR MIN	4,85	130,00	160,00	36,58	1,19
N-BUTANO	2,00	VALOR MAX	6,70	150,00	190,00	58,03	1,84
TRANS-2-BUTENO	1,70						
1-BUTENO	2,00						
ISO-BUTILENO	3,30						
TEMPERATURA SOLVENTE EXTRACCIÓN [°F]				150,00	CCR CARGA	5,05	

5.3.4 Cálculo del balance económico. Teniendo en cuenta que el ensayo de evaluación N°5 presentó el mejor desempeño, sirvió como base para el análisis económico tomando el mayor valor del rendimiento obtenido en ésta simulación. En la Tabla 21 se describe el balance bruto de la unidad U1000.

Tabla 21.

Balance de utilidades Brutas U1000

AÑO (PROYECCIÓN)	DIAS	365,00	PRODUCTOS			BALANCE ECONÓMICO		
RENDIMIENTO	%	58,00	DMO DESASFALTADO	KB/D	1,91			
CARGAS			DMO FONDO (ASFALTO)	KB/D	1,39			
CARGA DMO	KB/D	3,30	VLR. DMO DESASFALTADO	US\$/B	59,80	MARGEN DE HIDROCARBUROS	MUS\$/A	3,95
VALOR DMO	US\$/B	54,80	VLR. DMO FONDO (ASFALTO)	US\$/B	55,70	COSTOS OPERACIONALES	MUS\$/A	3,20
COSTO MAT. PRIMA	MUS\$/A	66,01	INGRESOS POR PRODUCTOS	MUS\$/A	69,95	UTILIDAD BRUTA	MUS\$/A	0,75

En el balance económico no se observaron grandes márgenes brutos de utilidad dado que a los productos no se les valora como terminados y requieren un proceso más que disminuye su margen de ganancia. Sin embargo, existen otras utilidades que no han sido evaluadas pero que podrían verse reflejadas si se cargara la unidad U1000 con DMO, tales como:

- Un aumento en el consumo de DMO para las unidades FCC, lo que supone un impacto económico positivo al disminuir los inventarios de este producto.
- El extracto o DMO desasfaltado reemplazaría parte del gasóleo de carga a las unidades FCC. Ese gasóleo entraría como carga a la unidad de hidrocraqueo moderado convirtiendo el 35% en ACPM, impactando sobre los rendimientos de productos valiosos.

La información de los costos operacionales y los precios de carga y productos para el desarrollo del presente balance económico fueron suministrados por el departamento de economía de la GRB⁵ correspondientes al año 2018.

6. Conclusiones

A continuación se enuncian las conclusiones obtenidas después del análisis de resultados del presente trabajo de aplicación:

- Se constató que la metodología planteada basada en la identificación y recolección de las variables de proceso y datos de laboratorio, sumado a una selección e implementación de los equipos y corrientes, estableciendo parámetros operativos, fue la más apropiada al momento de desarrollar el modelo, en estado estacionario, con la herramienta Aspen HYSYS®.
- Se comprobó, mediante la validación realizada por medio de un ANOVA a los resultados arrojados por la simulación tanto con fondos de vacío como con Slurry, y con un intervalo de confianza del 95%, que el modelo planteado con el paquete termodinámico **PRSV** (Peng Robinson Stryjek Vera) es capaz de reproducir el comportamiento real de la unidad de desasfaltado con propano U1000. Dentro de la validación están incluidas las pruebas realizadas a los paquetes termodinámicos UNQUAC, NRTL, PR, y SRK-Twu demostrando que ninguno de éstos cumplía con los lineamientos requeridos.

⁵ Esta información es confidencial y solo se usará como referente para los análisis económicos del presente trabajo de aplicación.

- Se verificó que las variables rendimiento y contenido de CCR en el extracto son afectadas por los cambios en las variables temperatura de cima T1001 (ambas de forma inversa) y por la relación solvente carga (ambas de forma directa). Entonces, cada vez que un ajuste operacional en el proceso de desasfaltado con propano de la U1000 implique el aumento en el rendimiento, también se aumentara el contenido CCR en el extracto.
- Se determinó, al evaluar el modelo desarrollado en la herramienta Aspen HYSYS ® por medio de las simulaciones planteadas en los ensayos de evaluación, que la unidad de desasfaltado con propano U1000 puede cargar DMO, logrando producir un extracto (DMO desasfaltado) de alta calidad (bajo contenido de carbón conradson) y con un rendimiento dentro de un margen de utilidades brutas aceptables.

7. Recomendaciones

Al desarrollar el modelo de la unidad U1000 y validar su comportamiento con los datos reales de planta, con fondos de vacío y slurry, se observó la versatilidad que tiene esta unidad en procesar diferentes tipos de productos. Las recomendaciones que inducen a continuar trabajando sobre el modelo son las siguientes:

- Tener en cuenta los resultados obtenidos en la simulación desarrollada en esta propuesta de aplicación para tomar la decisión de implementar el cargue de DMO en la unidad de desasfaltado con propano U1000.

- Incorporar en el modelo otros tipos de solvente, siendo inclusivos con aquellos que no se produzcan en la refinería de Barrancabermeja, para evidenciar mejoras en las condiciones de calidad y rendimiento del DMO extracto, o en su defecto observar otras propiedades que se puedan obtener de la mezcla.
- Analizar la probabilidad de realizar mezclas de productos como: fondos de vacío con slurry, slurry con DMO, entre otros, e implementarlos como carga al modelo, observando el comportamiento del rendimiento, CCR u otros parámetros requeridos.
- Llevar el modelo de modo estacionario a modo dinámico, para que sirva como matriz de entrenamiento a los operadores o ingenieros de proceso.
- Replicar este modelo pero ahora con las torres de desasfaltado de la unidad U2500 las cuales, actualmente, también están fuera de servicio.

Referencias Bibliográficas

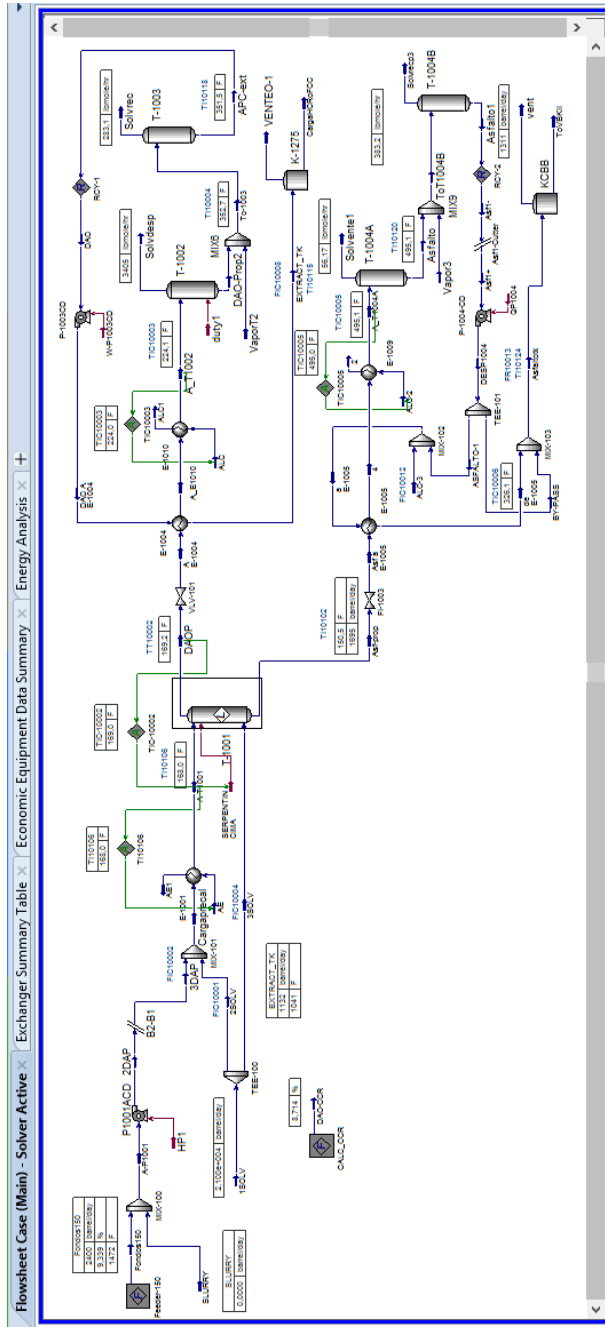
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (s.f.). *Información General cuencas sedimentarias de Colombia*. Obtenido de http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Cuencas-sedimentarias/_layouts/15/osssearchresults.aspx?u=http%3A%2F%2Fwww%2Eanh%2Egov%2Eco%2FInformacion-Geologica-y-Geofisica%2FCuencas-sedimentarias&k=cuencas%20hidrograficas#k=cuencas%20hidrograf
- Aguilar, J. L. (2006). *Curso Básico de simulación de procesos con Aspen Hysys*.
- Aparicio, J. J., Jeronimo, M. A., & Martins, F. G. (2002). *Two different approaches for RDC modelling when simulating a solvent deasphalting plant*. Porto, Portugal: Departamento de Engenharia Química, LEPÆ, Faculdade de Engenharia da Unversidade do Porto.
- Aspentech. (2004). *HYSYS 2004.2*. Aspentech.
- Atkins, P. W. (1999). *Química Física*. Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- Cao, F., Jiang, D., & Li, W. (2009). *Process analysis of the extract unit of vacuum residue through mixed C4 solvent for deasphalting*. Shanghai, China: School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology.
- Carrillo, J. A., & Cáceres, J. (1996). *Solventes de Desasfaltado*. Bucaramanga.
- Cralson, E. C. (1996). *Don't Gamble With Physical Properties For Simulations*. Aspen Technology.
- David R. Anderson, D. J. (2008). *Estadística para administración y economía*. Santa Fe (Mexico): CENGAGE Learning.

- Ecopetrol S.A. (2000). *Manual de Descripción del Proceso de la Unidad GRB – Unidad Tratamientos de UOP 2*. Barrancabermeja.
- Ecopetrol S.A. (2000). *Manual de Operaciones CDU U-150*. Barrancabermeja.
- Ecopetrol S.A. (2000). *Manual de operaciones DEMEX*. Barrancabermeja.
- Ecopetrol S.A. (2015). *Guías de control y ventanas operativas de integridad en las áreas operativas de Ecopetrol S.A.* Barrancabermeja: Ecopetrol.
- Ecopetrol S.A. (2000). *Manual de operaciones DAP*. Barrancabermeja.
- Ecopetrol S.A. (2000). *Manual de operaciones DAP*. Barrancabermeja.
- Gearhart, J. A. (23 de 7 de 1979). *United States Patente n° 4,239,616*.
- Kamaruddin, M. (s.f.). *HYSYS: An Introduction to Chemical Engineering Simulation*. Skudai, Malaysia: Universiti Teknologi Malaysia.
- Lee, J. M., Shin, S., & Ahn, S. (2013). *Separation of solvent and deasphalted oil for solvent deasphalting process*. Seoul, Republic of Korea: Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University.
- Levine, I. N. (2002). *Fisicoquímica*. Madrid-España: Mc Graw-Hill.
- Luque Rodriguez, S. (2005). *Simulación y optimización avanzada en la industria química: HYSYS*. Oviedo, España.
- McCabe, W. L. (1991). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Madrid: McGRAW-HILL.
- Moncada, L. (2011). *Aspen Introducción*. Obtenido de <http://simprocess.blogspot.com/2012/02/aspen-introduccion.html>

- Montgomery, D. C. (2005). *DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS*. Limusa Wiley.
- Normas ASTM. (s.f.). *Norma ASTM D4530*.
- Perry, R. H. (1999). *Manual del Ingeniero Químico*. Mc Graw-Hill.
- Rodriguez, S. L. (2005). *Simulación y optimización avanzada en la industria química: HYSYS*. Oviedo, España.
- Sámamo, V. (2009). *A batch reactor study of the effect of deasphalting on hydrotreating of heavy oil*. Mexico.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2005). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química*. México: Mc Graw-Hill.
- Steltenphol, P., & Chlebovec, M. (2002). *Simulation of toluene extractive distillation from a mixture heptane*.
- Tech, A. (2004). *Bases de la simulacion, Aspen HYSYS V3*. Aspen Tech.
- Tecnológico de Energía e Innovación. (s.f.). *¿Cómo escoger los modelos termodinámicos? ASPEN HYSYS®*. (E-LERNOVA) Recuperado el 01 de Octubre de 2018, de http://elernova.edu.co/E-books/hysys/modelos_termodinamicos/index.html
- Torres, D. V. (2015). *Estudio morfológico comparativo de asfaltenos en crudos cubanos al utilizar n-pentano y n-hexano como agente precipitante*. La Habana, Cuba: RCI.
- Universidad Nacional de Cuyo. (2010). *Curso electivo : "simulación de procesos en Aspen HYSYS"*.
- UOP Engineering Design Seminar. (1990). *Hydrocarbon Properties*.

Apéndices

Apéndice A. Modelo completo U1000 para las simulaciones.



Apéndice B. Interfase EDR para I.C. en Aspen HYSYS®.

Exchanger Details: E-1004

mode: Simulation

Recent Previous

Setting Plan Tube Layout

Configuration

TEMA Type: BEM

Tube layout option: New (optimum) layout

Location of hot fluid: Shell side

Tube OD / Pitch: 0.75 / 0.9375

Tube pattern: 30-Triangular

Tubes are in baffle window: Yes

Baffle type: Single segmental

Baffle cut orientation: Horizontal

Default exchanger material: Carbon Steel

Size

Specify some sizes for Design:

OD: 15.25 / 16

Tube length: 118.1102

Baffle spacing center-center: 4.5276

Number of baffles: 22

Number of tube / passes: 204 / 1

Shells in series: 1

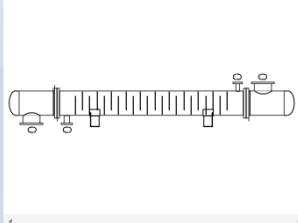
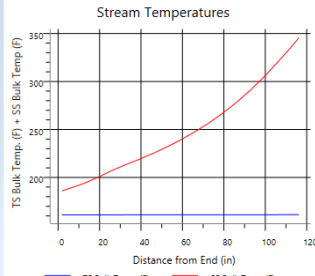
Shells in parallel: 1

Overall Results

Excess surface (%): 1

Dp-ratio Shellside / Tubeside: 0,7619 / 0,8571

Total cost (all shells): 23791

Exchanger Details: E-1005

Calculation mode: Simulation

Recent Previous

Setting Plan Tube Layout

Configuration

TEMA Type: BEM

Tube layout option: New (optimum) layout

Location of hot fluid: Shell side

Tube OD / Pitch: 0.75 / 0.9375

Tube pattern: 30-Triangular

Tubes are in baffle window: Yes

Baffle type: Single segmental

Baffle cut orientation: Horizontal

Default exchanger material: Carbon Steel

Size

Specify some sizes for Design:

Shell ID / OD: 30.5118 / 31.4567

Tube length: 100.3937

Baffle spacing center-center: 23.0315

Number of baffles: 2

Number of tube / passes: 783 / 2

Shells in series: 1

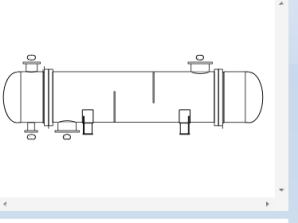
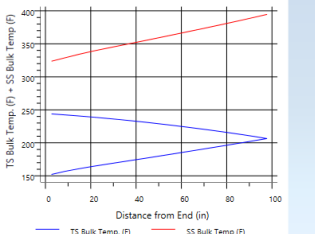
Shells in parallel: 1

Overall Results

Excess surface (%): 0

Dp-ratio Shellside / Tubeside: 0,9869 / 0,9628

Total cost (all shells): 50945

Exchanger Details: E-1009

Calculation mode: Simulation

Recent Previous

Setting Plan Tube Layout

Configuration

TEMA Type: B - E - M BEM

Tube layout option: New (optimum) layout

Location of hot fluid: Tube side

Tube OD / Pitch: in 0.75 / 0.9375 0.75 / 0.9375 /

Tube pattern: 30-Triangular 30

Tubes are in baffle window: Yes

Baffle type: Single segmental Single segmental

Baffle cut orientation: Vertical V

Default exchanger material: Carbon Steel Carbon Steel

Size

Specify some sizes for Design: Set default No

Shell ID / OD: in 10.136 / 10.75 10.136 / 10.75 /

Tube length: in 224.4095 224.4094 /

Baffle spacing center-center: in 3.3465 3.3465 /

Number of baffles: 63 63 /

Number of tube / passes: 79 / 1 79 / 1 /

Shells in series: 1 1 /

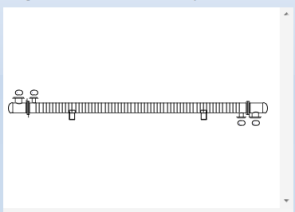
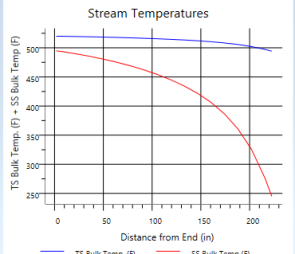
Shells in parallel: 1 1 /

Overall Results

Excess surface (%): 2

Dp-ratio Shellside / Tubeside: 0.8796 / 0.2869 /

Total cost (all shells): Dollar(US) 16909

Exchanger Details: E-1010

Calculation mode: Simulation

Recent Previous

Setting Plan Tube Layout

Configuration

TEMA Type: B - E - M BEM

Tube layout option: New (optimum) layout

Location of hot fluid: Tube side

Tube OD / Pitch: in 0.75 / 0.9375 0.75 / 0.9375 /

Tube pattern: 30-Triangular 30

Tubes are in baffle window: Yes

Baffle type: Single segmental Single segmental

Baffle cut orientation: Vertical V

Default exchanger material: Carbon Steel Carbon Steel

Size

Specify some sizes for Design: Set default No

Shell ID / OD: in 15.25 / 16 15.25 / 16 /

Tube length: in 94.4882 94.4882 /

Baffle spacing center-center: in 5.5118 5.5118 /

Number of baffles: 12 12 /

Number of tube / passes: 138 / 1 138 / 1 /

Shells in series: 1 1 /

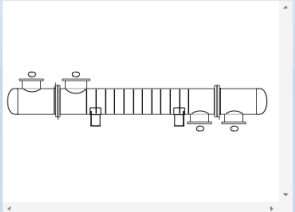
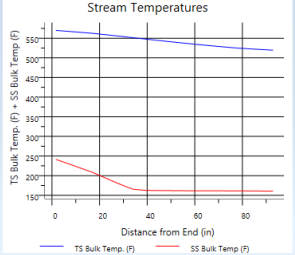
Shells in parallel: 1 1 /

Overall Results

Excess surface (%): 4

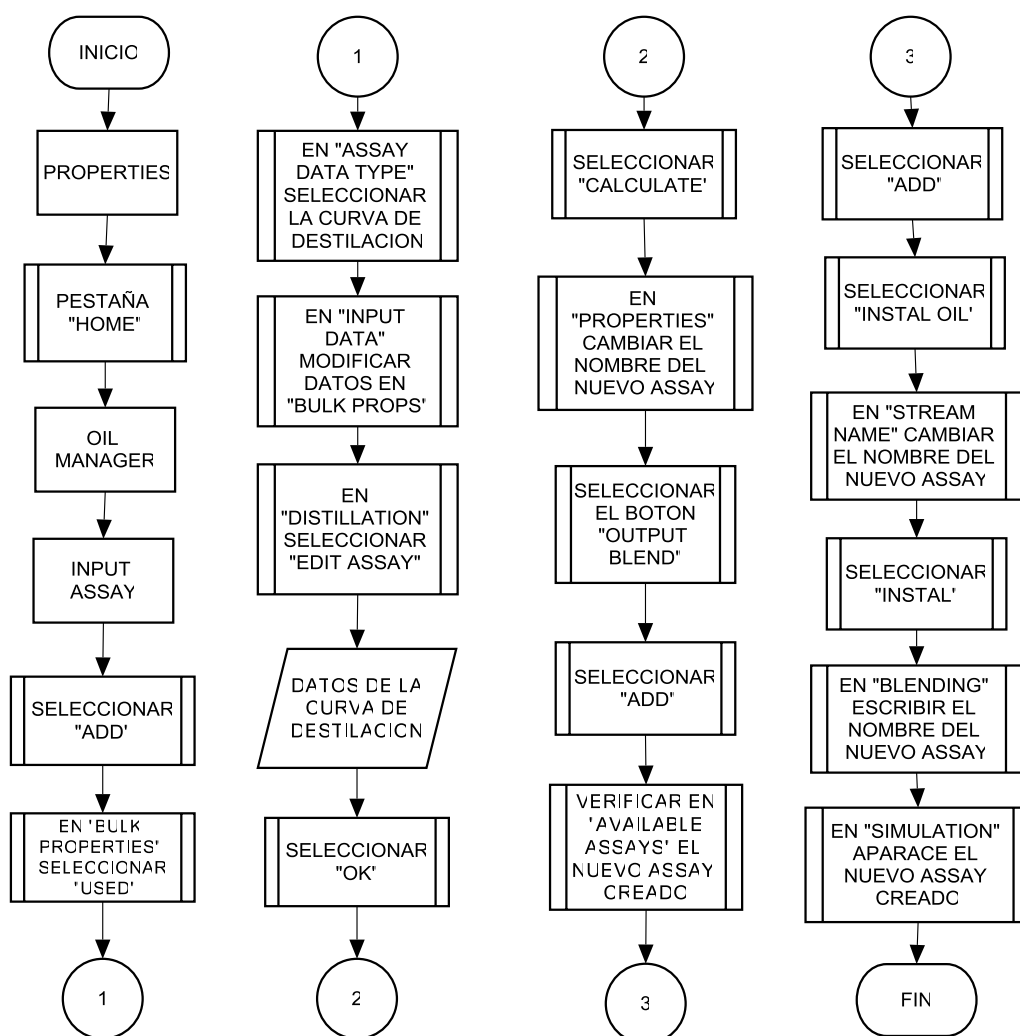
Dp-ratio Shellside / Tubeside: 0.1131 / 0.8447 /

Total cost (all shells): Dollar(US) 18927

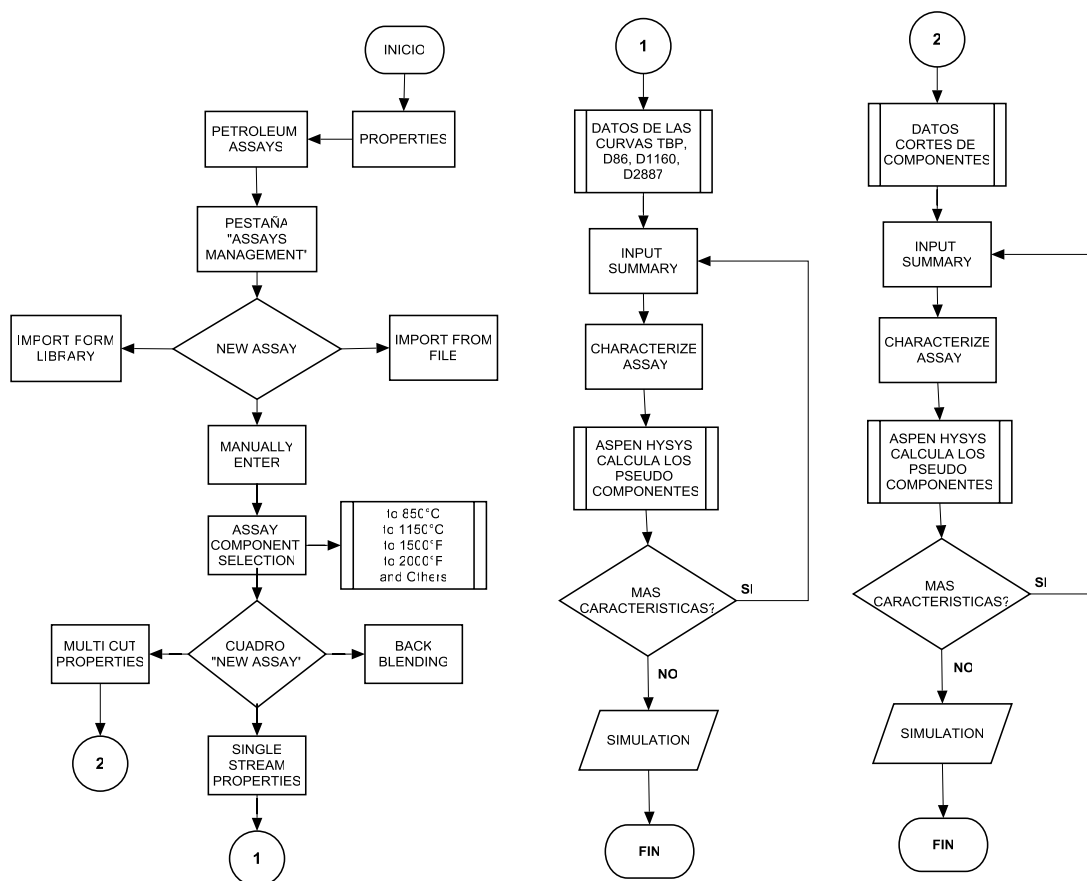
Apéndice C. Creando una corriente con "Oil Manager"

Al definir una corriente por assay, este será creado como una mezcla de pseudocomponentes según los datos de laboratorio obtenidos a ingresar en el simulador.



Apéndice D. Creando una corriente con “Assay Management”

Cuando se configura un ensayo en Aspen HYSYS® Petroleum Refining, primero hay que seleccionar y caracterizar los ensayos. Esto se hace desde el ambiente de Propiedades de HYSYS y se usa para poder evaluar las propiedades de los crudos antes de que sean usados en el ambiente de simulación. Si un usuario no ha definido el paquete de fluidos o la lista de componentes al momento de crear el ensayo, HYSYS va a crear de forma automática una lista de componentes hipotéticos con Peng-Robinson como paquete de fluidos para ser usados en la simulación.



Apéndice E. Tabla datos U1000 con fondos de vacío (sección)

DATOS UNIDAD U1000 CON FONDOS DE VACÍO								
CALCULO	CARGA [B/H]	CALCULO	T° ENT T1001	T° CIMA T1001	DAO PROD	REND. [%]	CCR [PPM]	
SOLV EXT.	U1000-FI_10002	REL SOLV/CARGA	U1000-TI_10106	U1000-TT_10002	U1000-FR_10008			
21.328,29	2.400,21	8,89	121,90	164,11	1.219,20	50,80	1,67	
21.488,31	2.179,63	9,86	122,64	160,68	1.161,84	53,30	1,06	
21.634,16	2.393,56	9,04	125,68	160,36	1.261,16	52,69	1,15	
21.623,39	2.244,80	9,63	127,76	160,45	1.161,85	51,76	1,29	
21.600,05	2.398,36	9,01	124,30	160,59	1.233,88	51,45	1,18	
21.577,82	2.394,45	9,01	124,39	160,95	1.248,47	52,14	1,31	
21.613,86	2.397,89	9,01	124,31	161,05	1.251,99	52,21	1,33	
21.647,26	2.400,86	9,02	124,81	161,05	1.230,25	51,24	1,42	
21.632,62	2.396,43	9,03	124,88	161,17	1.216,07	50,75	1,08	
21.644,24	2.399,37	9,02	122,88	160,81	1.221,88	50,93	1,62	
21.654,30	2.401,14	9,02	121,39	158,91	1.262,88	52,60	1,37	
21.646,56	2.398,70	9,02	122,70	159,91	1.239,77	51,69	1,39	
21.650,51	2.401,49	9,02	122,41	160,27	1.219,61	50,79	1,29	
21.230,28	2.169,86	9,78	123,31	162,25	1.192,09	54,94	1,43	
21.205,51	2.177,75	9,74	124,35	162,15	1.197,34	54,98	1,20	
21.194,33	2.186,99	9,69	125,00	162,09	1.203,72	55,04	1,77	
21.190,10	2.180,72	9,72	123,87	162,11	1.172,23	53,75	1,32	
21.245,92	2.198,20	9,67	124,87	161,97	1.198,17	54,51	1,28	
21.178,12	2.173,38	9,74	126,22	162,03	1.191,05	54,80	1,51	
21.179,94	2.180,09	9,72	125,34	162,02	1.174,73	53,88	1,25	
21.234,47	2.174,59	9,76	126,43	161,88	1.167,24	53,68	1,54	
21.258,86	2.153,62	9,87	125,12	162,07	1.149,66	53,38	1,85	
21.212,63	2.159,38	9,82	124,96	161,90	1.162,23	53,82	1,14	
21.256,70	2.143,03	9,92	125,96	161,25	1.165,11	54,37	0,62	
21.254,95	2.143,60	9,92	124,70	161,09	1.162,29	54,22	1,39	
21.283,18	2.147,52	9,91	125,06	161,09	1.163,62	54,18	1,00	
21.237,56	2.123,05	10,00	126,18	161,01	1.159,48	54,61	1,40	
21.195,44	2.125,71	9,97	125,15	160,89	1.163,78	54,75	1,82	
21.219,18	2.121,16	10,00	126,45	161,10	1.142,65	53,87	2,00	
21.252,06	2.009,83	10,57	128,19	161,14	1.102,35	54,85	1,35	
21.127,66	1.950,42	10,83	130,80	161,26	1.145,90	58,75	1,00	
21.135,63	2.139,27	9,88	129,72	161,29	1.213,41	56,72	1,08	
21.596,43	2.173,35	9,94	126,54	160,23	1.266,36	58,27	1,23	
21.343,13	2.174,03	9,82	125,59	160,10	1.258,70	57,90	1,13	
21.526,62	2.159,69	9,97	127,21	160,10	1.261,96	58,43	1,19	
21.520,23	2.152,25	10,00	127,27	159,81	1.259,86	58,54	1,29	
21.510,34	2.149,22	10,01	127,45	159,83	1.247,50	58,04	1,26	
21.500,23	2.143,69	10,03	125,44	159,85	1.247,69	58,20	1,19	
21.485,24	2.149,39	10,00	124,86	159,73	1.210,81	56,33	1,67	
21.485,23	2.145,10	10,02	125,93	159,83	1.248,19	58,19	1,44	
21.509,98	2.135,34	10,07	126,46	159,89	1.238,35	57,99	1,95	
21.525,35	2.137,94	10,07	124,44	160,11	1.255,88	58,74	1,59	
21.535,74	2.123,44	10,14	124,40	160,07	1.247,13	58,73	1,40	
21.439,84	2.112,16	10,15	125,82	159,99	1.237,70	58,60	1,63	
21.432,22	2.116,91	10,12	126,09	159,84	1.241,47	58,65	1,30	
21.429,40	2.121,39	10,10	123,70	160,02	1.252,73	59,05	1,57	
21.514,49	2.111,90	10,19	125,93	159,92	1.264,74	59,89	1,44	
21.326,92	2.131,59	10,01	126,21	161,31	1.250,85	58,68	0,67	
21.389,78	2.139,51	10,00	125,21	160,80	1.214,86	56,78	1,36	
21.398,81	2.125,88	10,07	126,64	158,85	1.224,36	57,59	1,03	
21.308,96	2.281,58	9,34	128,06	160,13	1.231,24	53,96	1,26	
21.247,35	2.280,06	9,32	128,40	160,05	1.212,21	53,17	1,36	
21.644,12	2.297,46	9,42	123,91	155,89	1.282,36	55,82	1,58	
21.496,92	2.291,11	9,38	125,79	156,00	1.287,01	56,17	1,08	
20.448,49	2.299,82	8,89	124,70	155,93	1.290,92	56,13	1,47	
20.424,29	2.284,90	8,94	125,57	155,69	1.286,09	56,29	1,35	
20.477,10	2.291,07	8,94	123,84	156,06	1.298,33	56,67	1,56	
21.011,48	2.083,31	10,09	128,47	159,77	1.208,11	57,99	1,41	
21.034,83	2.069,84	10,16	129,14	156,96	1.250,22	60,40	1,52	
21.075,04	2.072,56	10,17	127,94	152,20	1.261,04	60,84	1,58	
20.752,94	2.121,50	9,78	123,79	153,86	1.278,16	60,25	1,96	

20.717,01	2.117,25	9,78	124,69	154,05	1.223,10	57,77	1,16
20.695,32	2.112,77	9,80	124,68	154,01	1.214,35	57,48	0,90
20.696,19	2.125,99	9,73	124,89	154,00	1.226,10	57,67	0,50
20.795,65	2.119,35	9,81	120,11	152,94	1.278,02	60,30	1,10
21.032,67	2.168,50	9,70	127,67	152,32	1.293,81	59,66	1,03
21.023,72	2.162,31	9,72	127,59	153,07	1.263,98	58,46	1,07
20.940,73	2.166,51	9,67	127,59	151,88	1.288,36	59,47	1,75
20.997,49	2.164,03	9,70	126,89	150,28	1.260,42	58,24	1,40
20.854,60	2.157,46	9,67	126,20	151,76	1.287,82	59,69	1,18
20.772,10	2.160,83	9,61	124,32	156,15	1.266,40	58,61	1,73
20.770,66	2.161,46	9,61	124,09	157,05	1.224,04	56,63	1,60
20.757,58	2.159,50	9,61	125,07	157,00	1.261,88	58,43	1,85
20.845,66	2.108,99	9,88	119,98	155,19	1.226,83	58,17	1,21
21.180,22	2.162,25	9,80	120,99	155,03	1.200,24	55,51	1,61
21.231,95	2.160,98	9,83	121,53	155,02	1.202,19	55,63	1,31
21.268,17	2.162,77	9,83	122,44	154,92	1.186,02	54,84	1,24
21.250,20	2.209,01	9,62	122,07	152,94	1.237,60	56,03	1,03
21.265,57	2.196,70	9,68	122,28	152,96	1.217,12	55,41	1,17
21.425,62	2.212,79	9,68	124,10	153,97	1.215,41	54,93	1,39
21.195,29	2.201,70	9,63	120,13	154,66	1.211,64	55,03	1,17
21.163,05	2.200,42	9,62	120,52	154,91	1.203,42	54,69	1,50
21.136,96	2.228,65	9,48	121,48	154,74	1.208,65	54,23	1,13
21.177,32	2.270,00	9,33	120,87	154,84	1.212,24	53,40	1,97
21.213,10	2.278,58	9,31	119,92	154,29	1.290,74	56,65	1,23
21.171,53	2.281,13	9,28	118,85	153,89	1.239,10	54,32	1,16
21.156,93	2.284,49	9,26	119,63	154,14	1.247,27	54,60	1,19
21.107,93	2.255,38	9,36	119,36	153,85	1.261,55	55,93	0,89
20.956,10	2.237,13	9,37	120,56	153,86	1.230,10	54,99	1,27
21.233,64	2.289,28	9,28	124,58	154,88	1.297,00	56,66	1,30
21.260,01	2.292,74	9,27	124,38	155,06	1.302,60	56,81	1,07
21.269,36	2.282,92	9,32	125,03	154,98	1.272,38	55,73	1,17
21.256,62	2.284,78	9,30	126,94	154,84	1.268,87	55,54	1,21
21.243,63	2.286,30	9,29	126,14	154,90	1.263,79	55,28	1,15
21.215,26	2.292,34	9,25	125,52	155,08	1.233,82	53,82	1,16
21.220,66	2.272,99	9,34	125,19	155,21	1.270,02	55,87	1,56
21.189,47	2.283,09	9,28	124,04	154,97	1.282,10	56,16	1,45
21.290,10	2.280,87	9,33	124,06	154,99	1.258,78	55,19	1,86
21.491,01	2.297,31	9,35	121,14	154,91	1.234,42	53,73	1,10
21.437,99	2.287,76	9,37	122,35	155,12	1.283,60	56,11	1,22
21.475,54	2.286,03	9,39	123,73	154,88	1.266,48	55,40	1,32

21.474,71	2.295,22	9,36	123,00	154,63	1.256,61	54,75	1,14
20.562,02	2.260,42	9,10	120,11	157,06	1.230,68	54,44	1,37
20.560,95	2.273,06	9,05	120,62	156,83	1.219,08	53,63	1,24
20.997,39	2.277,86	9,22	120,76	156,00	1.229,36	53,97	1,44
21.122,36	2.292,09	9,22	122,26	155,26	1.252,76	54,66	0,99
21.120,14	2.284,79	9,24	120,47	155,13	1.219,48	53,37	1,97
21.099,54	2.283,27	9,24	122,73	155,39	1.229,86	53,86	1,13
20.760,44	2.287,81	9,07	121,48	156,03	1.204,38	52,64	1,95
20.751,12	2.273,12	9,13	121,45	155,93	1.225,15	53,90	1,46
20.745,34	2.268,53	9,14	121,01	155,84	1.195,48	52,70	1,33
20.948,07	2.280,21	9,19	118,78	155,73	1.216,23	53,34	2,00
21.086,93	2.282,47	9,24	120,74	155,91	1.222,58	53,56	1,20
21.065,99	2.274,46	9,26	120,27	156,04	1.204,54	52,96	1,42
21.089,19	2.283,05	9,24	118,52	155,93	1.266,13	55,46	1,05
21.083,25	2.268,89	9,29	119,67	156,05	1.233,02	54,34	1,08
21.115,17	2.277,77	9,27	118,57	154,70	1.223,74	53,73	1,49
21.127,21	2.280,39	9,26	114,24	153,72	1.270,60	55,72	1,03
21.118,66	2.281,54	9,26	117,37	153,88	1.249,14	54,75	2,02
21.095,36	2.264,48	9,32	120,29	154,00	1.210,57	53,46	1,67
21.053,69	2.253,98	9,34	116,44	154,85	1.209,06	53,64	1,08
21.119,32	2.252,51	9,38	118,32	155,70	1.217,69	54,06	1,08
21.111,19	2.214,01	9,54	119,09	155,39	1.241,53	56,08	1,42
21.059,62	2.215,45	9,51	116,14	153,94	1.297,03	58,54	1,15
21.072,68	2.210,75	9,53	116,25	155,34	1.233,16	55,78	0,95
21.399,41	2.277,20	9,40	115,71	156,28	1.309,61	57,51	1,61
21.376,23	2.275,54	9,39	117,92	155,96	1.253,96	55,11	2,32
21.331,80	2.265,43	9,42	119,54	155,91	1.261,71	55,69	1,13

Apéndice F. Tabla de datos U1000 con Slurry (sección)

DATOS U1000 CON SLURRY					
CALCULO	CARGA	CALCULO	T° ENTRADA T-1001	EXTRACTO PROD.	REND [%]
SOLV EXT.	U1000-FT_10002	REL Solv/carga	U1000-TI_10106	U1000-FR_10008	
16.554,14	2.401,15	6,894	131,03	2.040,99	85,00
16.572,97	2.401,04	6,902	132,97	2.037,52	84,86
16.552,95	2.428,45	6,816	133,83	2.044,92	84,21
16.546,18	2.521,16	6,563	133,73	2.104,68	83,48
16.559,93	2.649,14	6,251	133,98	2.177,87	82,21
16.574,43	2.914,60	5,687	134,29	2.385,61	81,85
16.563,10	3.223,32	5,139	134,08	2.554,67	79,26
16.567,39	3.479,99	4,761	134,26	2.637,88	75,80
16.546,79	3.479,66	4,755	135,48	2.633,72	75,69
16.560,37	3.481,68	4,756	138,21	2.636,29	75,72
16.556,50	3.478,71	4,759	142,26	2.613,82	75,14
16.551,04	3.480,98	4,755	145,03	2.576,15	74,01
16.575,37	3.480,49	4,762	147,25	2.567,44	73,77
16.573,77	3.479,51	4,763	145,54	2.553,87	73,40
16.543,12	3.479,86	4,754	133,09	2.612,45	75,07
16.566,29	3.481,07	4,759	131,72	2.566,13	73,72
16.550,78	3.481,56	4,754	136,71	2.530,15	72,67
16.567,34	3.479,81	4,761	137,58	2.496,62	71,75
16.568,75	3.485,09	4,754	135,85	2.544,03	73,00
16.542,50	3.479,66	4,754	137,25	2.497,10	71,76
16.572,34	3.479,96	4,762	138,76	2.485,42	71,42
16.544,09	3.482,50	4,751	130,73	2.576,62	73,99
16.566,01	3.481,26	4,759	134,12	2.585,51	74,27
16.556,81	3.480,34	4,757	137,38	2.560,13	73,56
16.564,05	3.480,42	4,759	140,67	2.495,10	71,69
16.572,72	3.480,28	4,762	142,85	2.502,93	71,92
16.550,36	3.485,79	4,748	136,26	2.526,81	72,49
16.568,39	3.484,02	4,756	138,51	2.527,46	72,54
16.553,79	3.479,33	4,758	138,51	2.509,12	72,11
16.558,16	3.479,19	4,759	141,31	2.484,61	71,41
16.514,62	3.479,23	4,747	144,91	2.461,40	70,75
16.569,42	3.478,90	4,763	144,24	2.581,77	74,21
16.569,28	3.479,27	4,762	145,46	2.569,49	73,85
16.567,62	3.481,82	4,758	146,01	2.500,49	71,82
16.564,12	3.480,70	4,759	142,76	2.560,24	73,56
16.568,77	3.339,46	4,962	142,56	2.541,35	76,10

16.573,30	2.593,03	6,391	134,21	2.104,25	81,15
16.551,97	2.521,57	6,564	135,52	2.059,48	81,67
16.525,92	2.509,27	6,586	135,56	2.067,82	82,41
16.569,13	2.519,74	6,576	132,29	2.110,37	83,75
16.551,84	2.520,24	6,568	132,45	2.111,58	83,78
16.561,18	2.520,54	6,570	134,88	2.109,99	83,71
16.602,22	2.519,00	6,591	135,52	2.113,58	83,91

16.569,60	2.518,61	6,579	135,18	2.086,67	82,85
16.567,94	2.519,47	6,576	137,18	2.051,42	81,42
16.583,60	2.519,93	6,581	136,70	2.074,60	82,33
16.569,75	2.581,26	6,419	136,91	2.074,12	80,35
16.552,43	3.468,73	4,772	139,08	2.596,54	74,86
16.580,68	3.497,92	4,740	138,34	2.622,82	74,98
16.574,29	3.479,63	4,763	137,40	2.605,70	74,88
16.571,21	3.429,71	4,832	137,46	2.542,42	74,13
16.576,52	3.013,62	5,501	137,85	2.337,76	77,57
16.571,20	3.121,29	5,309	136,72	2.510,78	80,44
16.533,27	3.118,99	5,301	138,69	2.506,20	80,35
16.565,67	3.119,71	5,310	139,64	2.418,36	77,52
16.567,82	3.120,65	5,309	138,76	2.419,09	77,52
16.561,82	3.241,46	5,109	138,59	2.471,96	76,26
16.563,89	3.240,03	5,112	138,11	2.572,04	79,38
16.563,72	3.240,40	5,112	137,29	2.582,23	79,69
16.562,74	3.125,93	5,298	136,99	2.485,96	79,53
16.554,35	3.197,28	5,178	136,93	2.497,14	78,10
16.552,40	3.471,38	4,768	133,45	2.632,46	75,83
16.559,24	3.478,53	4,760	135,42	2.634,66	75,74
16.562,29	3.480,85	4,758	136,51	2.633,85	75,67
16.552,22	3.480,06	4,756	136,12	2.637,88	75,80
16.556,21	3.480,76	4,756	139,00	2.636,10	75,73
16.550,71	3.479,71	4,756	139,82	2.634,20	75,70
16.574,23	3.480,20	4,762	136,27	2.637,88	75,80
16.562,04	3.479,35	4,760	137,89	2.637,88	75,82
16.566,62	3.482,23	4,757	138,74	2.635,85	75,69
16.530,47	3.480,55	4,749	138,22	2.637,72	75,78
16.561,15	3.480,91	4,758	139,89	2.621,12	75,30
16.587,89	3.478,04	4,769	142,85	2.637,71	75,84
16.553,02	3.480,88	4,755	143,38	2.637,88	75,78
16.546,36	3.479,25	4,756	144,37	2.637,88	75,82
16.540,98	3.479,29	4,754	143,35	2.634,66	75,72
16.571,25	3.480,16	4,762	142,23	2.637,88	75,80
16.548,73	3.478,31	4,758	142,78	2.637,88	75,84
16.565,50	3.478,17	4,763	141,83	2.635,16	75,76
16.559,05	3.480,36	4,758	139,33	2.636,65	75,76
16.561,44	3.480,68	4,758	143,86	2.636,43	75,74
16.553,24	3.481,31	4,755	148,37	2.631,67	75,59
16.559,60	3.376,72	4,904	147,57	2.630,79	77,91

16.563,36	3.117,99	5,312	147,59	2.497,09	80,09
16.563,16	3.118,68	5,311	150,28	2.475,16	79,37
16.541,88	3.116,33	5,308	150,30	2.493,62	80,02
16.526,90	3.221,00	5,131	147,70	2.573,24	79,89
16.571,83	3.242,01	5,112	149,29	2.537,93	78,28
16.565,54	3.238,53	5,115	151,38	2.482,62	76,66
16.579,10	3.239,92	5,117	150,96	2.475,15	76,40

Apéndice G. Ensayos de evaluación del modelo con DMO.**Tabla 22** Datos corrida de evaluación N°1

CAMBIO RELACION SOLV./CARGA				CAMBIO T° CIMA T1001			
RSC	TCT	REND.	CCR	RSC	TCT	REND.	CCR
4,85	175,0	30,16	1,262	6,67	175,0	40,24	1,320
5,15	175,0	32,00	1,268	6,67	180,0	35,85	1,193
5,76	175,0	35,42	1,284	6,67	185,0	31,24	1,063
6,06	175,0	37,12	1,295	6,67	190,0	26,16	0,924
6,36	175,0	38,67	1,306	6,67	195,0	20,53	0,771
6,67	175,0	40,12	1,316	6,67	200,0	14,28	0,604

Tabla 23 Datos corrida de evaluación N°2

CAMBIO RELACION SOLV./CARGA				CAMBIO T° CIMA T1001			
RSC	TCT	REND.	CCR	RSC	TCT	REND.	CCR
4,85	174,0	21,48	1,008	6,67	160,0	41,03	1,341
5,15	174,0	23,61	1,028	6,67	165,0	37,67	1,246
5,45	174,0	25,05	1,030	6,67	170,0	33,85	1,140
5,76	174,0	26,52	1,035	6,67	175,0	29,52	1,020
6,06	174,0	27,95	1,040	6,67	180,0	24,72	0,890
6,67	174,0	30,39	1,044	6,67	190,0	12,86	0,571

Tabla 24 Datos corrida de evaluación N°5

CAMBIO RELACION SOLV./CARGA				CAMBIO T° CIMA T1001			
RSC	TCT	REND.	CCR	RSC	TCT	REND.	CCR
4,85	175,0	38,45	1,473	6,67	160,0	58,03	1,842
5,15	175,0	40,52	1,486	6,67	165,0	55,76	1,770
5,45	175,0	42,52	1,502	6,67	170,0	52,91	1,680
5,76	175,0	44,36	1,517	6,67	175,0	49,64	1,578
6,06	175,0	46,18	1,535	6,67	180,0	45,88	1,463
6,67	175,0	49,48	1,573	6,67	190,0	36,58	1,190

Tabla 25 Comparación de los ensayos de evaluación.

ENSAYO	RELACIÓN S/C	T° CIMA T1001 [°F]	REND [%]	CCR [%w]	DENSIDAD SOLVENTE [Kg/m ³]
3	5,45	174,0	99,88	4,200	530,00
4	5,45	174,0	99,73	4,170	523,80
5	5,76	175,0	44,36	1,520	445,80
1	5,76	175,0	35,42	1,280	434,40
2	5,76	174,0	26,52	1,040	427,80