

**COMPARACIÓN ENTRE EL SOFTWARE COMERCIAL HYSYS Y LOS
SOFTWARE DE USO LIBRE COCO Y DWSIM: FUNCIONALIDAD Y
DESEMPEÑO PARA LA SIMULACIÓN DE UNA TORRE DE DESTILACIÓN DE
CRUDOS.**

MANUEL SERNA PEREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2018

**COMPARACIÓN ENTRE EL SOFTWARE COMERCIAL HYSYS Y LOS
SOFTWARE DE USO LIBRE COCO Y DWSIM: FUNCIONALIDAD Y
DESEMPEÑO PARA LA SIMULACIÓN DE UNA TORRE DE DESTILACIÓN DE
CRUDOS.**

MANUEL SERNA PEREZ

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero
Químico**

DIRECTOR

GIOVANNI MORALES MEDINA

PhD. en Ingeniería Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2018

AGRADECIMIENTOS

Las palabras sobran para expresar la felicidad que siento de poder culminar esta etapa en mi vida. Primero que nada, le agradezco a JEHOVA DIOS por darme la vida y la sabiduría para poder alcanzar los logros trazados hasta este momento, y por haberme dado una familia maravillosa.

A mis padres Manuel Serna Bedoya y Nicolaza Perez Agudelo por todo el amor que me han brindado, y por todo el sacrificio que han hecho para poder estar hoy donde estoy.

A mi hermano Cristian Serna Perez, que es una persona especial (autista) el me ha brindado su compañía y apoyo a pesar de su discapacidad, él ha sido una gran fuente de apoyo y fortaleza para afrontar todos los tropiezos de cada día.

A mis tíos y primos que entre todos hemos conformado una gran familia.

A todos mis amigos y compañeros de estudio, por compartir tantas experiencias y por pasar tantos momentos inolvidables.

Un agradecimiento especial a Roque Carreño, Aura C., Yair Camargo y Diana M. Sarmiento por su apoyo incondicional.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO TEÓRICO	15
1.1 ESTRUCTURA DE UN SOFTWARE DE SIMULACIÓN DE PROCESO	18
1.2 SOFTWARE DE USO LIBRE COCO	19
1.3 SOFTWARE DE USO LIBRE DWSIM	20
1.4 VALIDACIÓN DE DATOS TABLA ANOVA.	21
1.5 OBJETIVOS	22
1.5.1 Objetivo General	22
1.5.2 Objetivos específicos	22
2. METODOLOGIA	23
2.1 RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	23
2.2 CODIFICACIÓN DE LA TORRE DE DESTILACIÓN	23
2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA VALIDACIÓN DE LOS SIMULADORES	24
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	26
3.1 DATOS HISTÓRICOS DE PROCESO	26
3.2 CODIFICACIÓN DE LA TORRE DE DESTILACIÓN	27
3.2.1. Codificación en HYSYS	27
3.2.2. Codificación en COCO	28
3.2.3. Codificación en DWSIM	31
3.2.4. Comparación de requerimientos	33
3.3 COMPARACIÓN RESULTADOS DE SIMULACIONES	34
3.3.1. Perfil de temperatura	34
3.3.2. Requerimientos energéticos	35
3.3.3. Perfiles de flujo	36
3.3.3.1. Perfil de flujo de vapor	36

3.3.3.2. Perfil de flujo de liquido	37
3.3.4. Productos y propiedades	38
3.4. VALIDACIÓN DE SIMULACIONES	39
4. CONCLUSIONES	42
5. RECOMENDACIONES	44
BIBLIOGRAFÍA	45
ANEXOS	48

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama para diseño de procesos,	16
Figura 2. Datos históricos carga de crudo a la torre de destilación, año 2015. El eje X corresponde a los datos históricos tomados cada dos horas a partir del 1° de Enero de 2015.	27
Figura 3. Simulación HYSYS	28
Figura 4. Torres despojadoras y pumparound	28
Figura 5. Ecuaciones usadas para la aproximación de propiedades en el simulador COCO.....	29
Figura 6. Simulación en COCO.....	30
Figura 7. Pumparound CHEMSEP.....	31
Figura 8. Ecuaciones usadas para la aproximación de propiedades en el simulador DWSIM.	32
Figura 9. Simulación DWSIM.....	33
Figura 10. Etapas vs temperatura.....	34
Figura 11. Flujo de vapor en las diferentes etapas	37
Figura 12. Flujo de líquido en las diferentes etapas; se indica la entrada de crudo, salidas y entradas de los pumparound	38

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Requerimiento energético en los diferentes simuladores.....	35
Tabla 2. Peso molecular, densidad en los diferentes simuladores y porcentaje de error con respecto a HYSYS.....	38
Tabla 3. Análisis estadístico a los resultados de simulación.....	39

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Descripción del proceso	48
Anexo B. Tablas ANOVA	52
Anexo C. Tablas Pueba T	64

RESUMEN

Título: COMPARACIÓN ENTRE EL SOFTWARE COMERCIAL HYSYS Y LOS SOFTWARE DE USO LIBRE COCO Y DWSIM: FUNCIONALIDAD Y DESEMPEÑO PARA LA SIMULACIÓN DE UNA TORRE DE DESTILACIÓN DE CRUDOS*

Autores: MANUEL SERNA PEREZ**

Palabras Clave: Simulación, optimización, procesos, inteligencia artificial, software..

Descripción:

La necesidad de nuevos productos, un entorno amable con el medio ambiente, optimización de los procesos misionales, así como el buen manejo del talento humano. Hace necesario que la ingeniería química busque alternativas de bajo presupuesto, fácil manejo y factibilidad para dar solución a los nuevos retos.

Existen un conjunto de herramientas disponibles para el análisis, el diseño y la simulación de operaciones unitarias; algunas de estas operaciones son complejas y presentan dificultad para realizar el respectivo cálculo analíticamente, en ocasiones estos pueden llegar a ser inviables. Sin lugar a duda la tecnología y el uso de material informático es el auge para la simulación de procesos, los cuales permiten optimizar variables principales de los procesos, sin necesidad de modificar las variables en tiempo real lo que ocasiona desestabilización del sistema y pérdidas económicas, lo que generaría un producto con especificaciones diferentes a las óptimas. Se puede definir un simulador como un paquete informático que puede realizar cálculos de balances de masa y energía ya sea para un equipo específico o una planta de procesos, estos a su vez permiten desde diseñar un intercambiador, hasta realizar la optimización de un proceso, entre otras.

En esta investigación se realiza la comparación entre dos software de uso libre con uno de uso comercial; los simuladores emplean inteligencia artificial para desarrollo de ecuaciones, pero aun así se requiere un programador con altos conocimientos ingenieriles del tema, cabe recordar que el simulador es una “calculadora”, las suposiciones, datos y propiedades ingresadas dependen estrictamente del conocimiento del programador y sus fuentes.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímica Escuela de Ingeniería Química Director Giovanni Morales Medina PhD. en Ingeniería Química

ABSTRACT

Title: COMPARISON BETWEEN THE HYSYS COMMERCIAL SOFTWARE AND THE COCO AND DWSIM FREE USE SOFTWARE: FUNCTIONALITY AND PERFORMANCE FOR THE SIMULATION OF A CRUDE DISTILLATION TOWER *

Authors: MANUEL SERNA PEREZ **

Keywords: Simulation, optimization, processes, artificial intelligence, software

Description:

The need for new products, a friendly environment, optimization of mission processes, as well as the good management of human talent. It makes necessary that the chemical engineering look for alternatives of low budget, easy handling and feasibility to give solution to the new challenges.

There is a set of tools available for the analysis, design and simulation of unit operations; some of these operations are complex and have difficulty performing the respective calculation analytically, sometimes these can become unfeasible. Undoubtedly, the technology and the use of computer equipment is the boom for the simulation of processes, which allow to optimize the main variables of the processes, without the need to modify the variables in real time, which causes destabilization of the system and economic losses, which would generate a product with different specifications than the optimal ones.

A simulator can be defined as a computer package that can perform mass and energy balance calculations for either a specific equipment or a process plant, these in turn allow from designing an exchanger, to perform the optimization of a process, between others.

In this research, the comparison between two software of free use with one of commercial use is made; the simulators use artificial intelligence to develop equations, but even so a programmer with a high engineering knowledge of the subject is required, it should be remembered that the simulator is a "calculator", the assumptions, data and properties entered depend strictly on the knowledge of the programmer and his sources.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Engineering Physico-chemical School of Chemical Engineering Director Giovanni Morales Medina PhD. in Chemical Engineering

INTRODUCCIÓN

La simulación de procesos es definida como; una herramienta para toma de decisiones, ya que permite predecir el comportamiento de un sistema o proceso ante distintos escenarios; estos conjuntos de herramientas computacionales están disponibles para el análisis, el diseño y la simulación de operaciones unitarias; algunas de estas operaciones son complejas y presentan dificultad para realizar el respectivo cálculo manual. Entre los software comerciales disponibles para efectuar simulaciones de equipos y procesos se encuentran ASPEN PLUS, SPEEDUP, PRO II, HYSYS Y CHEMCAD. Los software comerciales más utilizados en la industria petroquímica son ASPEN PLUS Y HYSYS, los cuales pertenecen a la empresa *Aspen technology products* y tienen un alto costo económico en el mercado. Como alternativa a los paquetes comerciales se tienen los programas de uso libre COCO, DWSIM, CHEMSEP, AZPROCED Y IQUIMICAD, entre otros; en la actualidad se han realizado diferentes reportes y estudio para el uso de simuladores libre según lo dispuesto por leino¹ [15].

COCO es un simulador de uso libre que trabaja bajo la plataforma de CHEMSEP y dispone de diferentes opciones que lo hacen destacar entre los diferentes tipos de simuladores de uso libre; DWSIM es un simulador químico de uso libre que dispone de opciones avanzadas que solo se encuentran en plataformas comerciales, se encuentran dos problemas en este software las cuales son el gran consumo de recursos del sistema y lo complicado de su uso para personas ajenas a los procesos químicos. Estos simuladores de uso libre son los más usados debido a su

¹ LEINO, Marko: process simulation unit operation models – review of open and hsc chemistry i/o interfaces, Tampere, Finlandia. 2016, 105 h. Tesis (Master's Degree Programme in Information Technology). Tampere University of Technology. Faculty of Business and Built

arquitectura, diseño de la interface y múltiples funciones, parecidas a las de un simulador comercial.

A pesar de lo anterior, los reportes dirigidos a comparar los desempeños de los software de uso libre como COCO y DWSIM, con los paquetes comerciales como HYSYS son escasos. Los desempeños entre los simuladores pueden ser evaluados por medio del análisis de varianza respecto a datos de proceso de un equipo industrial. En el presente documento se describen los resultados más importantes de la comparación entre los software COCO y DWSIM con el software comercial HYSYS, en la simulación en estado estacionario de una torre de destilación industrial de crudos.

1. MARCO TEÓRICO

La simulación de procesos puede ser definida como una técnica para evaluar en forma rápida un proceso con base en una representación del mismo, mediante modelos matemáticos. La solución de estos se lleva a cabo por medio de programas de computadora y permite tener un mejor conocimiento del comportamiento de dicho proceso. El número de variables que aparecen en la descripción matemática de una planta de proceso química puede ser tan grande como cientos, y el número de ecuaciones no lineales que deben resolverse pueden ser del orden de miles; por lo tanto, una forma viable de resolver el problema corresponde al uso de una computadora².

Desde el siglo XX la simulación de los procesos químicos ha sido ampliamente aplicada para resolver los balances de masa y energía a nivel industrial. En la ingeniería química se hace referencia a la transformación de materias primas para satisfacer al cliente final, pero esto nos lleva a crear una estructura básica empleando la síntesis del proceso, en la cual podemos definir las operaciones con sus respectivas interconexiones, según la Figura 1.

² MARTÍNEZ SIFUENTES, Víctor Hugo. Simulación de Procesos en Ingeniería Química: Simulación de procesos. México: Plaza y Valdés Editores, 2000. 184 p

```
graph TD; Necesidad --> Sintesis; Sintesis --> Simulacion; Simulacion --> Optimizacion; Optimizacion --> Sintesis; Optimizacion --> Diagrama; Parametrica --> Optimizacion; Estructural --> Optimizacion; Inputs["Balanaces de materia y energía<br/>Dimensiones y costos<br/>Evaluación económica preliminar"] --> Simulacion
```

Diagrama de flujo del proceso de optimización de procesos:

- Necesidad** → **Síntesis de procesos**
- Síntesis de procesos** → **Simulación de procesos**
- Simulación de procesos** → **Optimización**
- Optimización** → **Síntesis de procesos** (retroalimentación)
- Optimización** → **Diagrama de flujo del proceso**
- Paramétrica** → **Optimización**
- Estructural** → **Optimización**
- Balanaces de materia y energía**, **Dimensiones y costos**, **Evaluación económica preliminar** → **Simulación de procesos**

En la etapa de Simulación de procesos se solucionan los balances de materia y energía para un proceso químico, cálculo de dimensiones y costos de los equipos y efectuar una evaluación económica preliminar del proceso, y la etapa de optimización, que puede ser paramétrica, modificando parámetros tales como presión o temperatura, o estructural cuando se hacen modificaciones al diagrama de flujo involucrando a los equipos y/o interconexiones^{3 4}.

- En la simulación de un problema (análisis), donde son especificadas las variables asociadas con las corrientes de alimentación y las variables de diseño de los módulos unitarios. Las incógnitas son las variables asociadas con todas las corrientes adicionales y con las corrientes de producto que salen del proceso.

5 Ibíd

Es decir, se conocen las alimentaciones y los parámetros de los equipos, y las incógnitas son las condiciones de las corrientes de salida.

- El problema de diseño es similar al problema de simulación, excepto que algunas de las variables de diseño no están especificadas y se imponen restricciones a algunas variables de las corrientes (regularmente sólo restricciones de igualdad). El número de restricciones es igual al número de variables de diseño sin especificar. En el diseño se conocen las alimentaciones y las condiciones principales de las corrientes de salida, y las incógnitas son las dimensiones y especificaciones de algunos parámetros de los equipos.
- En el problema de optimización, las variables asociadas con las corrientes de alimentación y las variables de diseño pueden no estar especificadas, entonces es necesario agregar una función de costo al modelo. Las variables sin especificar se determinan de modo que se minimiza la función objetivo. En este caso, se pueden especificar restricciones de igualdad y desigualdad⁶.

De otro lado, es posible mencionar las siguientes ventajas derivadas del uso de simuladores ^{7 8}:

- La simulación hace posible estudiar y experimentar con las interacciones complejas de un sistema dado (sin importar cuál), además promueve un aprendizaje por reforzamiento positivo con la interactividad que permite el programa.

⁶ MARTÍNEZ SIFUENTES, Víctor Hugo. Op. Cit.

⁷ COMPUTACIÓN APLICADA AL DESARROLLO S.A. DE C.V. Generación de computadoras [en línea]. <http://www.cad.com.mx/generaciones_de_las_computadoras.htm> [citado en 30 de septiembre 2017]

⁸ PAGINA PERSONALES PROFESORES UNAM. Ventajas y desventajas de los software [en línea]. <http://profesores.fi-b.unam.mx/maixx/Biblioteca/Librero_Telecom/Libro_SS CD/s006_Ventajas_Desventajas.html> [citado en 5 de octubre 2017]

- Por medio de sonidos, imágenes animadas y textos, el usuario descubre y desarrolla sus habilidades, aumentando su capacidad de respuesta, proporcionando explicación sobre los principios involucrados y cómo son afectadas las variables, cuando se manipula cada una de ellas
- Disminuye la brecha entre la teoría académica y la práctica laboral, acercando al usuario a su futura realidad como trabajador, mejorando sus competencias laborales.
- Son una solución económica ya que suplen a un sistema físico costoso.
- Proporciona una ilustración sobre los principios involucrados y cómo son afectadas las variables, cuando se manipula cada una de ellas.

Asimismo, es posible mencionar que diversos simuladores pueden estar basados en modelos de caja negra, en donde los modelos matemáticos son desconocidos pero funcionan para aplicaciones reales. También existen limitaciones asociadas a los costos de estos y a la falta de actualizaciones, sobre todo en aquellos paquetes comerciales.

1.1 ESTRUCTURA DE UN SOFTWARE DE SIMULACIÓN DE PROCESO

Los software para simulación de procesos fisicoquímicos industriales coinciden en una estructura dividida globalmente en tres secciones:

- Sección de selección de compuestos y propiedades termodinámicas.
- Sección de diseño del diagrama de flujo, en donde se seleccionan y conectan equipos con un modelo matemático internamente definido. Las conexiones representan flujos de materia, de energía o de información.

- Sección interna o de cálculos, la cual se encuentra oculta al usuario.

Según las especificaciones del usuario en las secciones de compuestos y en la sección del diagrama de flujo, el programa realiza los cálculos en la sección interna, aplicando diferentes esquemas de solución para las ecuaciones algebraicas o diferenciales según el caso –simulación en estado estacionario o en estado dinámico–. También, los simuladores presentan una guía de colores que indican al usuario el estado de grados de libertad de la simulación⁹

1.2 SOFTWARE DE USO LIBRE COCO

COCO o “COFE” como es comúnmente llamado gracias a su interfaz gráfica, es un simulador libre que cuenta con una gran variedad de procesos unitarios. Este software maneja su base de datos con CHEMSEP, el cual posee más de 400 compuestos integrados, así como hasta 40 pseudocomponentes disponibles en una simulación. COCO (CAPE-OPEN a CAPE-OPEN) es un entorno de simulación de estado estable en CAPE-OPEN, libre de carga, que consta de los siguientes componentes^{10 11}:

- COFE es el entorno CAPE-OPEN Flowsheet es una interfaz gráfica intuitiva para el flujo de productos químicos.
- TEA contiene los paquetes termodinámicos utilizados en COCO para aplicaciones de ingeniería, se basa en el código de la biblioteca termodinámica

⁹ GIL CHAVES, Iván D., GUEVARA LÓPEZ, Javier R., GARCIA ZAPATA, Jose L., LEGUIZAMON ROBAYO, Alexander y RODRIGUEZ NIÑO, Gerardo. Process analysis and simulation in chemical engineering: Process simulation in chemical engineering. Canada: Springer, 2016. 515 p.

¹⁰ LEINO, Marko Op. Cit.

¹¹ SANCHIS SEBASTIA, Miguel: Implementación de unidades de separación en el simulador de procesos coco. aplicación al diseño de un proceso de regeneración de aguas de lavado de recubrimientos metálicos, Valencia, España. 2014, 101 h. Tesis (Ingeniería química). Universidad politécnica de valencia. Ingeniería química

de ChemSep e incluye un banco de datos de más de 400 productos químicos de uso general.

- COUSCOUS es un paquete que incluyen un expansor, bomba, calentador, enfriador, divisor compuesto, reactor de flujo pistón (PFR), convertidor de corriente, mezclador, divisor, válvula, reactor Gibbs, intercambiador de calor, reactor de equilibrio, reactor de conversión fija, flash, reactor de tanque de agitación continua (CSTR), operación de vacío, flash trifásico, turbina, compresor, separador de sólidos, comprobador de propiedades, calculadora de información, unidad de medida, unidad de calor de combustión, mezclador de energía térmica, divisor de energía térmica, registrador COULIS, hoja de flujo integrada, modelo Excel, modelo MATLAB o Scilab, modelo de columna ChemSep, controlador y restricción de flujo.
- CORN es el paquete CAPE-OPEN “Reaction Numerics” que viene con COCO el cual facilita especificar cualquier tipo de reacción cinética o de equilibrio. Unidades de reactores simples, como reactores de conversión, CSTR y reactores de flujo que pueden utilizar el paquete CORN vienen con el paquete COUSCOUS.

1.3 SOFTWARE DE USO LIBRE DWSIM

DWSIM es un simulador de procesos químicos compatible con CAPE-OPEN para Windows, Linux, Android, macOS e iOS. Construido en la parte superior de las plataformas Microsoft .NET 4.5 y Mono, y con una interfaz gráfica de usuario (GUI), DWSIM permite analizar el comportamiento de sus sistemas químicos mediante modelos de termodinámica y operaciones unitarias sin costo alguno¹².

¹² CHEMSEP. [en línea]. <<http://www.chemsep.com/>> [citado en 20 de septiembre 2017]

- CAPE-OPEN es un entorno de simulación de estado estable, con paquete de propiedad Thermo 1.0 / 1.1, Servidor de paquete de propiedad Thermo 1.1, Socket de operación de unidad y Soporte de objeto de supervisión de hoja de flujo. DWSIM también expone una operación de la unidad de script IronPython / IronRuby (personalizada) para simuladores que cumplen con CAPE-OPEN.
- MODELOS TERMODINÁMICOS conta de los siguientes modelos PC-SAFT, FPROPS, CoolProp, Peng-Robinson, Soave-Redlich-Kwong, Lee-Kesler, Lee-Kesler-Plöcker, UNIFAC, UNIFAC modificado (Dortmund), UNIQUAC, NTRL, COSMO-SAC, LIQUAC, Extended UNIQUAC, Chao -Seader, Grayson-Streed, ley de Raoult, tablas de vapor IAPWS-IF97, IAPWS-80 Seawater, Black-Oil y Sour Water.
- Utilidades, aproximación de fase, cálculos de hidratación, propiedades de componente puro, punto crítico, tamaño de PSV, tamaño de recipiente, hoja de cálculo y propiedades de flujo de petróleo en frío.
- Herramientas, regresión de Datos Binarios, Creador de Compuestos, Granel C7 + y Curvas de Destilación. Gestor de Reacciones y Caracterización de Petróleo, análisis de proceso, utilidad de Análisis de Sensibilidad y Optimización Restringida Multivariante¹³.

1.4 VALIDACIÓN DE DATOS TABLA ANOVA.

El análisis de varianza (ANOVA) se basa no solo en la descomposición de la variación total, sino además en la comparación de la variación entre grupos y la variación interna de los grupos, teniendo en cuenta sus correspondientes grados de

¹³ LEINO, Marko Op. Cit.

libertad. Generalmente se toma un alfa de 0.05 (grado de significancia estadística) para aceptar o rechazar la hipótesis nula por el nivel de significancia. Si el nivel de significancia es mayor que 0.05, aceptamos la hipótesis nula de independencia entre las variables (no existen efectos diferenciales entre los tratamientos). Si el nivel de significancia es menor que 0.05 rechazaremos la hipótesis nula y aceptaremos la hipótesis alternativa, es decir concluiremos que existe una relación de dependencia entre las variables, y en este caso podremos decir que los distintos niveles del factor si influyen sobre los valores de variación cuantitativa¹⁴.

1.5OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General Evaluar la funcionalidad y los resultados generados por el software comercial HYSYS y los software de unos libre COCO y DWSIM en la simulación de una torre de destilación industrial de crudos.

1.5.2 Objetivos específicos

- Codificar y analizar una torre de destilación de crudos industrial en los simuladores HYSYS 8.4, COFE y DWSIM 5.0
- Comparar los datos históricos de proceso con los resultados obtenidos en cada ambiente de simulación
- Analizar los desempeños reportados por cada ambiente de simulación.

¹⁴ DEPARTAMENTOS Análisis de varianza anova. Departamento economía [en línea]. <www.uam.es/departamentos/economicas/econapli/anova.pdf> [citado en 5 de octubre 2017]

2. METODOLOGIA

2.1 RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Los datos históricos para una torre de destilación de crudos industrial fueron proporcionados por ECOPETROL-GRB. Los datos históricos fueron analizados para eliminar detectar las zonas de operación en estado pseudoestacionario de utilidad para las comparaciones con los resultados de las simulaciones.

2.2 CODIFICACIÓN DE LA TORRE DE DESTILACIÓN

La torre de destilación de crudos fue codificada en cada uno de los paquetes HYSYS, COCO y DWSIM. Los datos de entrada para la torre requeridos en los paquetes fueron tomados de las hojas de especificaciones suministradas por la GRB. Es importante mencionar que cada paquete presenta particularidades en los requerimientos de especificaciones del equipo y para la convergencia del mismo. También, una carga de crudo mezcla fue definida para la simulación de la torre, según lo dispuesto por Pabuena¹⁵. El paquete termodinámico en cada simulador fue definido según la disponibilidad en los mismos y las recomendaciones presentadas en la literatura; En HYSYS, COCO y DWSIM el modelo termodinámico seleccionado fue el EOS Peng-Robinson.

¹⁵ PABUENA TORRES, Oscar: Simulación de la torre de destilación atmosférica t-250 utilizando hysys, Bucaramanga, Colombia. 2015, 130 h. Tesis (Magister en ingeniería química). Universidad Industrial de Santander. Facultad físico químicas. Ingeniería química

Para la convergencia en cada simulador se utilizó una caída de presión constante en cada plato donde el plato numero 32 tiene una presión de 34.06 psi y en el plato numero 1 una presión de 32.4 psi, se ingresaron flujos de salida molares para Diesel, Goa y Kerojet, el flujo de carga de entrada con todas sus propiedades temperatura, presión, y las propiedades proporcionadas por los pseudocompuestos. Se uso un rango de convergencia de 1E-5 para los 3 simuladores; debido a que los simuladores cuentan con diferentes solvers en el simulador de uso libre DWSIM se usó el método numérico de RUSELL y para el simulador de uso libre COCO se utilizó el *2-pass constant H first*.

2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA VALIDACIÓN DE LOS SIMULADORES

Los simuladores de uso libre no contienen la función de ingresar datos desde Excel (solo exportan hacia este, propiedades de las corrientes). Con el fin de probar los simuladores se decidió utilizar una muestra significativa de los 4365 datos históricos disponibles por la planta atreves de la siguiente ecuación:

$$n = \frac{k^2 * p * q * N}{(e^2 * (N - 1)) + k^2 * p * q}$$

Ecuación 1: ecuación para calcular la muestra correcta¹⁶

Dónde:

- N: es el tamaño de población o universo total de posibles resultados.
- k: es la contante que depende del nivel de confianza que asignemos.
- e: es el error muestral deseado

¹⁶ .FEEDBACK Networks La información viva. [en línea]. <<https://www.feedbacknetworks.com/cas/experiencia/sol-preguntar-calcular.html>> [citado en 20 de septiembre 2017]

- p : es la proporción de individuos que poseen en la población la característica de estudio.
- q : es la proporción de individuos que no poseen esa característica,
- n : es el tamaño de la muestra¹⁷.

Tomando valores de $N= 4365$, $k=1,96$ (95% de confianza), $e=10\%$, $p=0.5$, $q=0.5$

Según la anterior fórmula para el tamaño de muestra estadísticamente hablando se obtienen una muestra (n) de 94 datos, los cuales son tomados aleatoriamente de nuestros registros históricos del año 2015. Estos 94 datos, seleccionados aleatoriamente, fueron utilizados para validar los resultados de los software libres en comparación con HYSYS y los datos históricos, por medio de la tabla de análisis de varianza (ANOVA), pruebas t de diferencia de medias. Las variables utilizadas para la validación fueron, flujos de producción de diesel, gasóleos (GOA), Nafta y kero-jet; estas variables fueron seleccionadas debido a que presentan en mayor impacto económico en el proceso y debido a las predicciones de los flujos.

¹⁷ Ibíd.

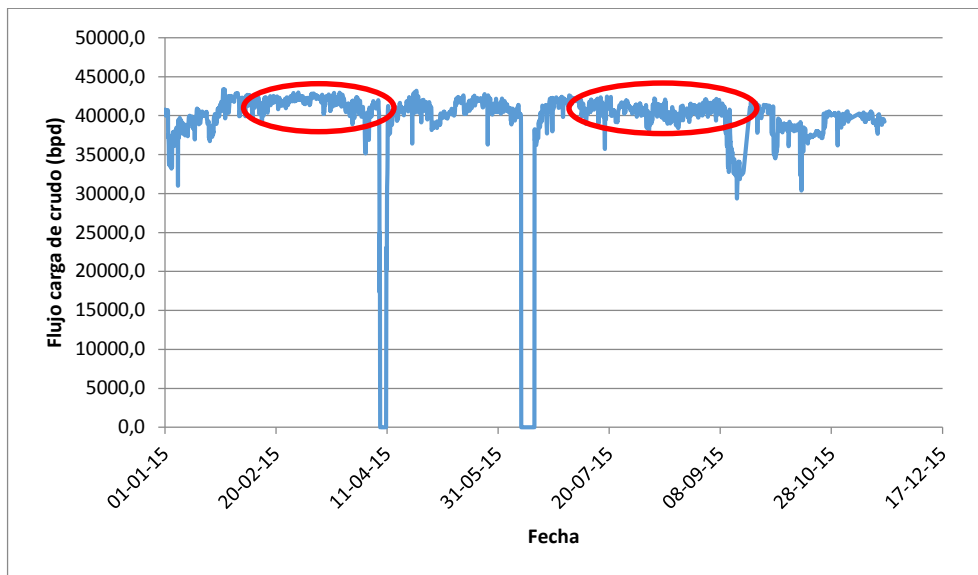
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 DATOS HISTÓRICOS DE PROCESO

Se tiene una gama de datos históricos (4365 muestras cada 2 horas) de una torre de crudos industriales para la comparación de los diferentes simuladores los cuales fueron proporcionados por ECOPETROL-GRB y tomados de la referencia¹⁸. La ventana de operación corresponde al año 2015, para el cual se detectaron dos estados estacionarios referentes a 1824 muestras; la primera fecha de estado estacionario corresponde del 25 de enero al 25 de marzo (escenario 1) y la segunda corresponde desde el 22 de junio al 08 de septiembre (escenario 2), según la Figura 2. En los escenarios, los promedios de alimentación de las cargas fueron de 41977 ± 250 bpd y 40903 ± 1800 bpd (95% de confianza), respectivamente, lo que representa una variación del 1% y 4% de la carga total, respectivamente, soportando el supuesto de estabilidad en la operación.

¹⁸LEINO, Marko Op. Cit.

Figura 2. Datos históricos carga de crudo a la torre de destilación, año 2015.
El eje X corresponde a los datos históricos tomados cada dos horas a partir del 1° de Enero de 2015.

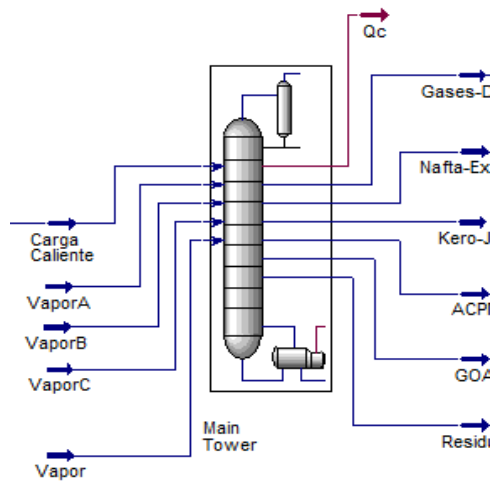


Fuente: LEINO, Marko: process simulation unit operation models – review of open and hsc chemistry i/o interfaces, Tampere, Finlandia. 2016, 105 h. Tesis (Master's Degree Programme in Information Technology). Tampere University of Technology. Faculty of Business and Built

3.2 CODIFICACIÓN DE LA TORRE DE DESTILACIÓN

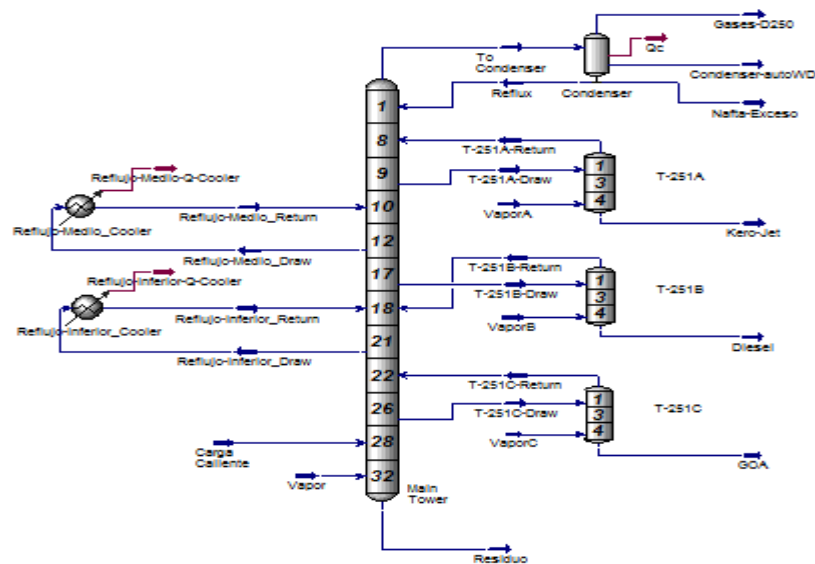
3.2.1. Codificación en HYSYS Para el ingreso de los assay se tomaron diversas las temperaturas y las gravedades específicas las cuales son requeridos por este simulador para la correcta aproximación de nuestra carga de entrada. En la Figura 3 se muestra la simulación de este proceso en HYSYS en el cual consta de diferentes líneas de entrada (correspondiente a cada campo), un mezclador un horno, torre principal con condensador y 3 torres despojadoras.

Figura 3. Simulación HYSYS



En la Figura 4 se puede apreciar los paltos en los cuales van las torres despojadora y pumparound.

Figura 4. Torres despojadoras y pumparound



3.2.2. Codificación en COCO Para el ingreso de los pseudocompuestos se requiere del complemento CHEMSEP en el cual se requiere de las temperaturas y

gravidades específicas y así podemos definir los assays, el simulador nos brinda una serie de opciones para calcular las propiedades; en la Figura 5 se observan los modelos utilizados para la correcta aproximación de resultados.

Figura 5. Ecuaciones usadas para la aproximación de propiedades en el simulador COCO.

Pseudo Component Generation

☒ Tb+SG ☐ Tb+API ☐ Reverse order

Tb (K)	SG

Tc: Kesler-Lee 1976

Pc: Kesler-Lee 1976

Vc: Riazi-Daubert 1987

w: Kesler-Lee 1976

Mw: Riazi-Daubert 1980

Name: T[Tb] [C]

[Tb][SG][Mw][API][K] [C][H][S][NN][AA]

CpIG: Lee-Kessler 1976

ViscL: API 6th 1997

kL: API 12A3.2

☒ CAS# 999TTT-NN-C

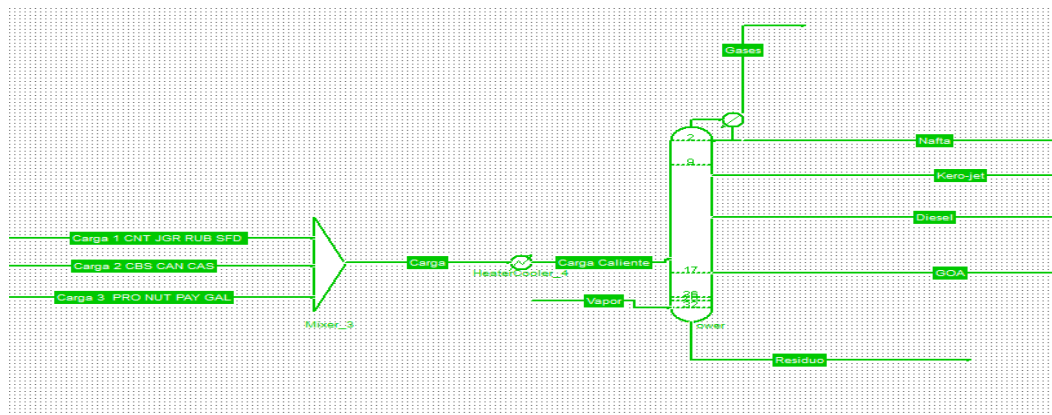
Methods selection: libre

Para la convergencia se utilizó una caída de presión constante en cada plato donde el plato numero 32 tiene una presión de 34.06 psi y en el plato numero 1 una presión de 32.4 psi, se ingresaron flujos de salida molares para Diesel, Goa y Kerojet, el flujo de carga de entrada con todas sus propiedades temperatura, presión, y las propiedades proporcionadas por los pseudocompuestos. Se uso un rango de

convergencia de $1E-5$; para este simulador de uso libre se utilizó el solver *2-pass constant H first*.

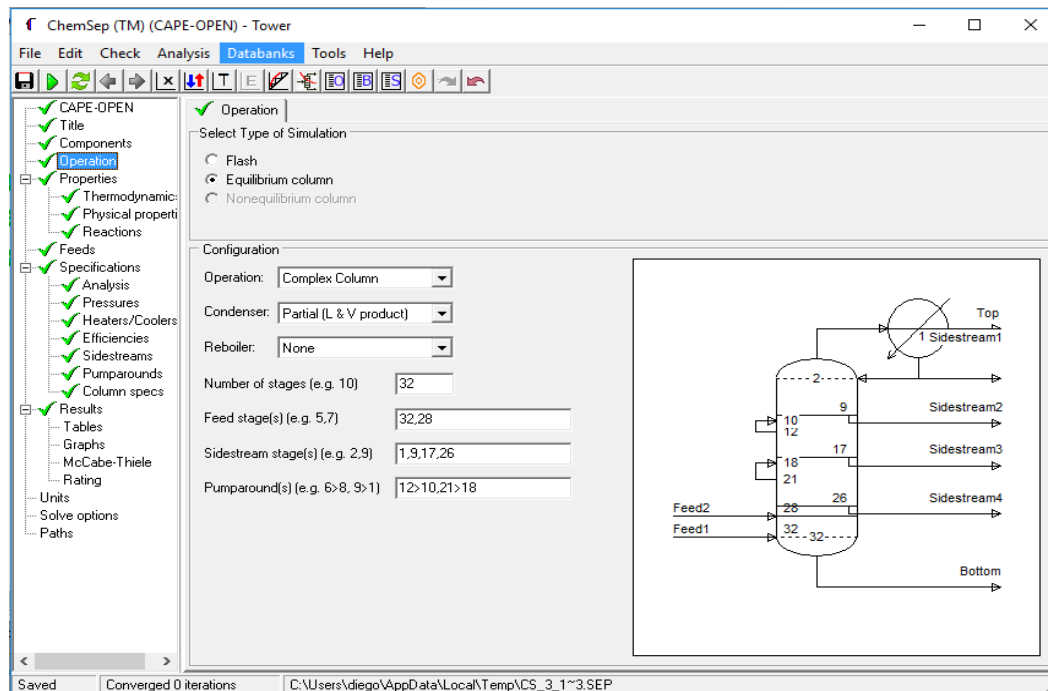
El simulador de uso libre COCO (Figura 6) se limita por los pseudocompuestos a usar, debido a que este simulador trabaja bajo CHEMSEP (Figura 7) el cual solo permite el ingreso de 40 compuestos, por lo tanto, se realizó la unión de algunos con propiedades idénticas (temperatura y gravedad específica); en este simulador es necesario el ingreso de la entropía y la entalpía de formación para la convergencia.

Figura 6. Simulación en COCO



En COCO se agregan los pumparound directamente en la plataforma CHEMSEP la cual cuenta con una opción para el ingreso de estos.

Figura 7. Pumparound CHEMSEP



3.2.3. Codificación en DWSIM Para el ingreso de los pseudocompuestos se requiere de las temperaturas y gravedades específicas y así podemos definir los assays, el simulador nos brinda una serie de opciones para calcular las propiedades; en la Figura 8 se observa los modelos que fueron seleccionados para la correcta aproximación de resultados.

Figura 8. Ecuaciones usadas para la aproximación de propiedades en el simulador DWSIM.

DWSIM - Caracterización de Petróleo crudo (Propiedades)

Principal Opciones

Valores iniciales

Masa Molar Densidad Absoluta Temp. de ebullición K

Estos valores se utilizarán para el pseudocomponente más ligero, si la caracterización se basa en estas propiedades-.

Métodos y correlaciones

Temperatura Crítica

Presión Crítica

Factor Acéntrico

Densidad

Masa Molar

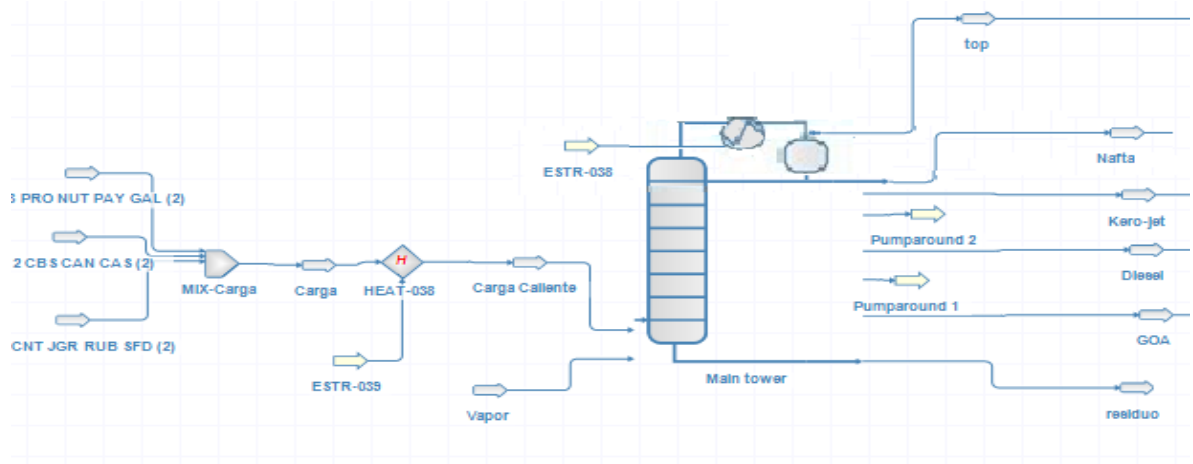
☐ Ajuste de los factores acéntricos para igualar PEVs (entre correlación y paquete del propiedades)

☒ Ajustar los parámetros de Rackett para igualar densidades (entre correlación y la ecuación Rackett)

Nombre de la corriente

Para la convergencia se utilizó una caída de presión constante en cada plato donde el plato numero 32 tiene una presión de 34.06 psi y en el plato numero 1 una presión de 32.4 psi, se ingresaron flujos de salida molares para Diesel, Goa y Kerojet, el flujo de carga de entrada con todas sus propiedades temperatura, presión, y las propiedades proporcionadas por los pseudocompuestos. Un rango de convergencia de 1E-5 fue establecido; en este simulador de uso libre (DWSIM) se usó el método numérico de RUSELL.

Figura 9. Simulación DWSIM



En la Figura 9 se puede apreciar el ambiente de simulación en DWSIM como cada uno de los equipos utilizados para la simulación, se puede apreciar los pumparound del sistema los cuales se agregan como retiros de energía y se debe asignar la cantidad de energía a retirar.

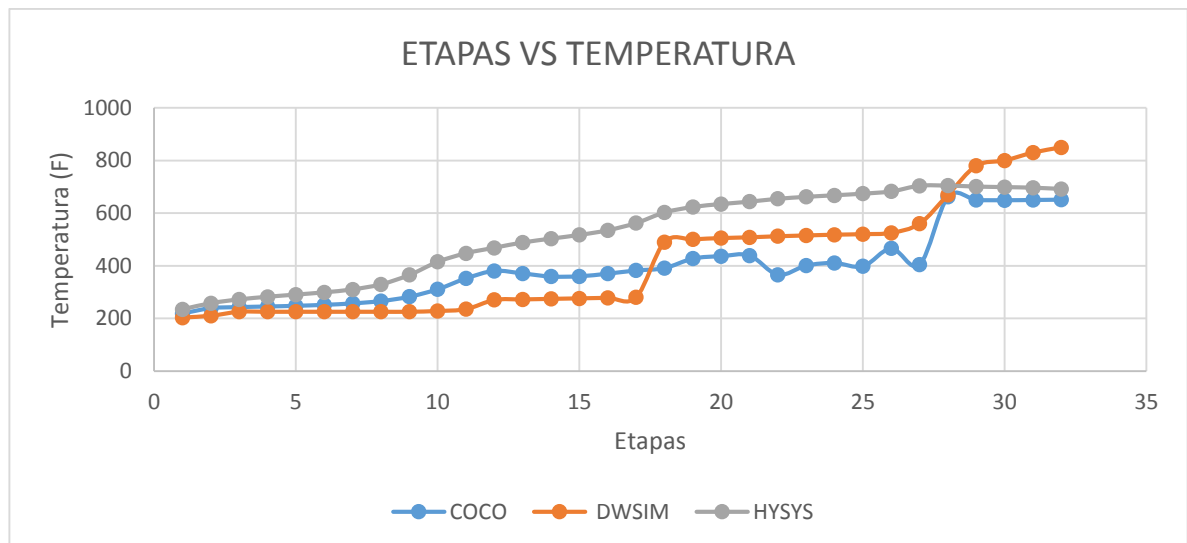
3.2.4. Comparación de requerimientos Según la codificación presentada en los numerales anteriores es posible mencionar que las facilidades que otorgan los simuladores HYSYS y DWSIM son superiores a las establecidas para la codificación en COCO. Los dos primeros no tienen tantas restricciones como lo tiene el simulador COCO el cual no permite ingresar más de 40 pseudocompuestos en la simulación. En el ámbito de exportación de datos a distintos programas como lo es EXCEL tienen mayor factibilidad los simuladores COCO y HYSYS los cuales tienen integrados esta opción para el correcto análisis de los resultados obtenidos.

3.3 COMPARACIÓN RESULTADOS DE SIMULACIONES

Los programas presentan diferentes resultados ante convergencia de la torre de destilación. Estos presentan algunas divergencias que pueden ser debidas a las diferentes restricciones propias del código de cada simulador.

3.3.1. Perfil de temperatura El perfil de temperatura de cada etapa de la torre principal es presentado en la Figura 9. Esta figura hace referencia al proceso térmico que se lleva acabo internamente en la torre de destilación.

Figura 10. Etapas vs temperatura.



Se puede observar que en todos los simuladores este perfil de temperatura va disminuyendo con respecto a los platos. Asimismo, es posible mencionar que en COCO y DWSIM, el efecto de los reflujos (*pumparounds*) se presenta con mayor influencia en el perfil de temperaturas, lo cual puede deberse a:

- El ingreso de la entalpia de formación y la entropía los cuales son requeridos por el simulador COCO (modelo termodinámico).

- Bajo caudal que circunda en ese plato en específico esto debido a que fueron retiradas las torres despojadoras en ambos simuladores.
- En el simulador DWSIM los *pumparounds* son representados tan solo con retiro de energía, en donde se debe de anexar el valor de la energía retirada.
- A diferencia de las anteriores simulaciones, en HYSYS se codificaron las 3 torres despojadoras y sus respectivos ciclos, lo cual influye en un decremento monótonico de la temperatura con el ascenso en la torre de destilación.

En general, los software COCO y DWSIM subestiman los valores de la temperatura de los platos, especialmente en los platos superiores. En DWSIM, en el fondo, se reporta una temperatura de entrada de 850 °F, pero al ascender al plato número 27, donde entra la carga fresca, se presenta una perturbación disminuyendo la temperatura a 410 °F; esta disminución drástica se puede apreciar también en el plato 17, debido a la cantidad de diésel extraído. De igual forma, en COCO también se presentan perturbaciones, pero la principal se observa en el plato de alimentación de crudo, plato 27.

3.3.2. Requerimientos energéticos Los requerimientos energéticos para el horno, los *pumparounds* y en el condensador fueron analizados en los diferentes simuladores utilizados en este trabajo. En la siguiente tabla se puede observar el requerimiento energético para cada proceso en los diferentes simuladores.

Tabla 1. Requerimiento energético en los diferentes simuladores

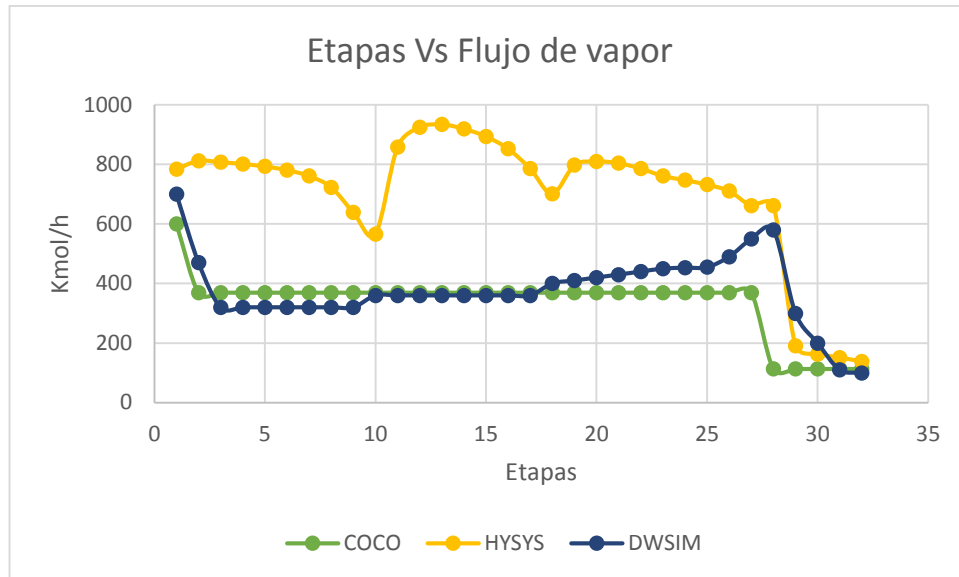
	HYSYS (kJ/h)	COCO (kJ/h)	DWSIM (kJ/h)
HORNO	106018699.9	64698271.2	88708053.6
PUMPAROUND PLATO 21-18	-11796623.2	-8493623.4	-11796623.2
PUMPAROUND PLATO 12-10	-20993753.7	-16874322.9	-20993753.7
CONDENSADOR	-26294368.1	-21908763.6	-23847209.1

De esta tabla es posible deducir que los requerimientos de calentamiento para el crudo y enfriamiento para los *pumparound* y la cima son subestimados por COCO y DWSIM, especialmente por COCO. Los porcentajes de error llegan a 39% para COCO y 16.3% para DWSIM en el calentamiento del crudo, mientras que para enfriamiento, COCO reporta en promedio 24% de error en los *pumparound* y 17% en la cima; es importante mencionar que COCO no presenta convergencia cuando se definen los valores de los flujos calóricos en los *pumparound*. Por su parte, DWSIM reporta valores coincidentes con HYSYS en los *pumparound* ya que en este paquete se definen estos valores para la convergencia, mientras que para el condensador se presenta un error de 9% respecto a HYSYS. La coincidencia del flujo calórico en los *pumparound* aproxima mejor el perfil de temperaturas reportado por DWSIM (Figura 9).

3.3.3. Perfiles de flujo

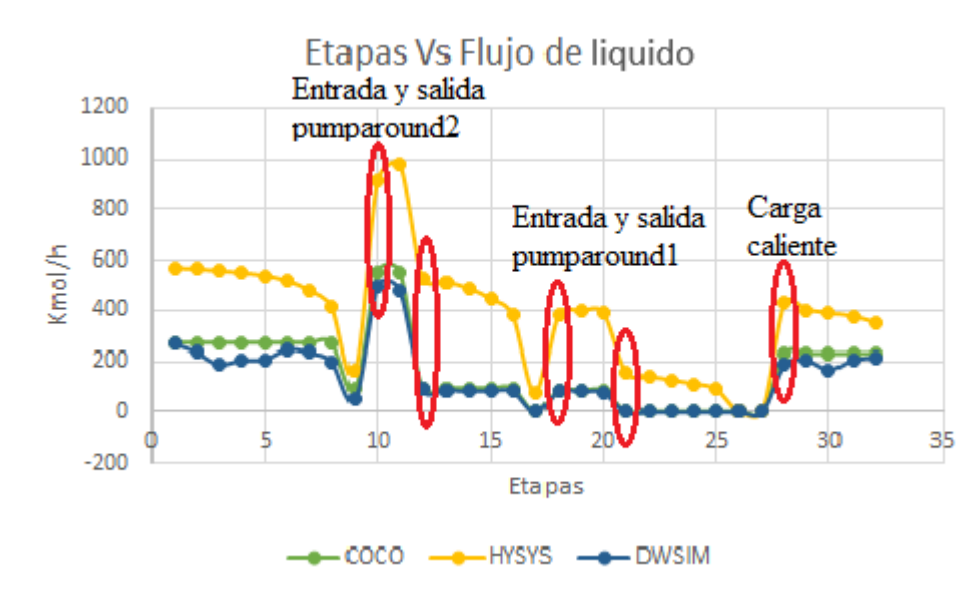
3.3.3.1. Perfil de flujo de vapor La Figura 11 presenta el perfil de flujo de vapor de la torre principal según cada simulador. Según esta figura, el perfil del flujo de vapor en cada simulador varia, esto puede ser por las aproximaciones tomadas en cada simulador y por los requerimientos energéticos los cuales varían en cada simulador por las propiedades de los mismos (sección anterior). Es importante destacar que a pesar de la coincidencia entre los flujos de calor de los *pumparound*, la simulación en DWSIM reporta menores valores de flujo de vapor que los predichos por HYSYS; DWSIM coincide más con lo reportado por COCO para este flujo. Los puntos mínimos mostrados por HYSYS coinciden con los flujos de vapor recirculados desde las torres despojadoras.

Figura 11. Flujo de vapor en las diferentes etapas



3.3.3.2. Perfil de flujo de líquido El perfil de flujo de líquido a lo largo de la torre puede ser analizado en la Figura 12. En esta figura se presentan los resultados para cada simulador, los cuales, a diferencia de lo referente al flujo de vapor, exhiben tendencias similares. En la Figura 12 se ilustran los flujos de *pumparound* responsables de los incrementos y decrementos para el flujo de líquido, así como la entrada de crudo de alimentación.

Figura 12. Flujo de líquido en las diferentes etapas; se indica la entrada de crudo, salidas y entradas de los pumparound



3.3.4. Productos y propiedades Los productos que son retirados de nuestra torre principal son GOA, DIESEL, KERO-JET Y NAFTA; estos son relacionados por su densidad y peso molecular en cada uno de los simuladores los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Peso molecular, densidad en los diferentes simuladores y porcentaje de error con respecto a HYSYS

	Peso molecular (w)	Densidad (Kg/m ³)
HYSYS (GOA)	348.6	676.4
COCO (GOA)	397.7 (14.08%)	699.1 (3.36%)
DWSIM (GOA)	401.3 (15.12%)	755.4 (11.68%)
HYSYS (Diesel)	232.3	664.3
COCO (Diesel)	250.8 (7.96%)	704.1 (5.99%)
DWSIM (Diesel)	255.5 (9.99%)	723.4 (8.90%)
HYSYS (Kero-jet)	147.5	676.7
COCO (Kero-jet)	160.3 (8.68%)	759.5 (12.24%)
DWSIM (Kero-jet)	150.2 (1.83%)	720.6 (6.49%)
HYSYS (Nafta)	91.4	649.5

	Peso molecular (w)	Densidad (Kg/m³)
COCO (Nafta)	100.9 (10.39%)	778.5 (19.86%)
DWSIM (Nafta)	96.1 (5.14)	750.4 (15.54%)

Según los datos de la Tabla 2, HYSYS reporta flujos más livianos en propiedades que los correspondientes a los estimado por COCO y DWSIM. La razón principal de sebe a la cantidad de componentes livianos en cada corriente producto líquido debido al perfil de temperatura (Figura 10).

3.4. VALIDACIÓN DE SIMULACIONES

El análisis estadístico nos lleva a una prueba de hipótesis alternativa o nula dependiendo para validar los resultados de los simuladores respecto a los datos históricos de proceso; en la tabla 3 se puede observar el *p-value*, una prueba t para dos colas, el error promedio y el error de la mediana para la comparación referente a los productos obtenidos en la torre durante la ventana de operación; las 94 muestras de los estados estacionarios en los datos históricos fueron seleccionadas al azar y evaluadas en cada uno de los simuladores (ver metodología). Asimismo, en los anexos se pueden analizar individualmente cada uno de los análisis estadísticos realizados.

Tabla 3. Análisis estadístico a los resultados de simulación.

	<i>p-value</i>	P(T<=t) dos colas	Error promedio	Error mediana
HYSYS vs COCO (GOA)	7.73E-17	5.28E-16	70.7%	83.0%
HYSYS vs COCO (Diesel)	1.26E-33	1.15E-28	34.8%	29.4%
HYSYS vs COCO (Kero-jet)	0.48	0.48	4.2%	16.3%
HYSYS vs COCO (Nafta)	0.09	0.09	3.4%	28.3%
HYSYS vs DWSIM (GOA)	1.16E-42	4.28E-32	44.0%	46.9%

	<i>p-value</i>	P(T<=t) dos colas	Error promedio	Error mediana
HYSYS vs DWSIM (Diesel)	1.34E-133	3.09E-81	53.0%	53.7%
HYSYS vs DWSIM (Kero- jet)	7.67E-06	1.13E-05	4.5%	3.9%
HYSYS vs DWSIM (Nafta)	0.14	0.14	2.5%	33.6%
COCO vs DWSIM (GOA)	1.14E-46	1.61E-34	60.0%	71.0%
COCO vs DWSIM (Diesel)	1.29E-13	3.39E-12	17.9%	34.4%
COCO vs DWSIM (Kero- jet)	0.04	0.05	8.6%	17.4%
COCO vs DWSIM (Nafta)	0.95	0.95	0.6%	7.4%
HISTÓRICOS vs HYSYS (GOA)	0.75	0.76	2.7%	1.9%
HISTÓRICOS vs HYSYS (Diesel)	0.50	0.51	1.6%	0.2%
HISTÓRICOS vs HYSYS (Kero-jet)	2.28E-06	2.35E-06	7.21%	8.3%
HISTÓRICOS vs HYSYS (Nafta)	2.01E-08	2.95E-08	17.5%	23.1%
HISTÓRICOS vs COCO (GOA)	1.80E-16	1.32E-15	65.8%	79.5%
HISTÓRICOS vs COCO (Diesel)	9.60E-31	9.47E-28	33.1%	29.6%
HISTÓRICOS vs COCO (Kero-jet)	0.19	0.19	3.8%	6.7%
HISTÓRICOS vs COCO (Nafta)	2.81E-09	2.83E-09	29.7%	44.8%
HISTÓRICOS vs DWSIM (GOA)	1.29E-45	6.92E-34	44.8%	48.0%
HISTÓRICOS vs DWSIM (Diesel)	1.25E-109	6.29E-69	52.3%	53.8%
HISTÓRICOS vs DWSIM (Kero-jet)	6.87E-19	1.00E-16	11.8%	11.9%
HISTÓRICOS vs DWSIM (Nafta)	3.15E-08	3.17E-08	15.58%	48.9%

Según los valores de *p-value* de la Tabla 3 basados en 94 muestras, los resultados de HYSYS para los productos diésel y gasóleo (GOA) representan los datos históricos de proceso recolectados para la torre de destilación de crudos (*p-value*>0.05); sin embargo, las diferencias entre HYSYS y los datos históricos para gasolina (nafta) y kero-jet se encuentran según el margen reportado en la literatura (errores promedio entre 3% y el 21% en los flujos de salida de productos livianos¹⁹). Asimismo, el simulador COCO reproduce los valores de gasolina para las 94 muestras en los datos históricos. De otro lado, DWSIM no presenta concordancia con los datos históricos según las 94 muestras. Tomando el patrón de comparación los resultados de HYSYS, tanto COCO como DWSIM representan los valores para el producto gasolina (Nafta) reportado por HYSYS. COCO supera a DWSIM al reproducir también los valores de HYSYS para el flujo kero-jet. Las diferencias en resultados fueron discutidas en las secciones anteriores, con lo cual este análisis de varianza confirma las limitaciones en cada software libre.

¹⁹ MESA GÓMEZ, Adriana; VALERO VALDIVIESO, Manuel; FIGUEREDO MEDINA, Manuel. Process simulation-based improvements to maximize naphtha production in an existing gas processing plant,” Ing. Univ., vol. 20, no. 2, pp. 355-371, 2016. Disponible en <<http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.iyu20-2.psim>>

4. CONCLUSIONES

En relación al objetivo general de este trabajo de investigación se concluye, la funcionalidad de cada simulador discierne un poco entre ellos desde su interfaz, cantidad de datos ingresados y resultados, por ende, se debe tener en cuenta esas propiedades para utilizar el simulador apropiado.

Los resultados son el factor crucial estos dependen de la nuestra prueba de significancia, este es el concepto que tenemos, pero tiene una dependencia ya sea para escala industrial o académica, en este caso los simuladores son aptos para este proceso, pero tienen sus limitaciones como lo hemos visto a lo largo de todo este estudio.

Se concluye que los software libres tienen una hipótesis alternativa en los productos livianos (Nafta y Kero-jet), en cambio en los productos pesados nuestra hipótesis es nula.

Teniendo en cuenta las ventajas, uso y versatilidad de los simuladores libres, estos no presentan todas las capacidades de la interfaz de un simulador comercial. Por ejemplo, el simulador COCO depende de varias sub-rutinas que se encuentran por fuera del ambiente principal.

Se realizó satisfactoriamente la codificación y el análisis de la torre de destilación en los simuladores de uso libre, en esta podemos observar la relación que tienen entre sí, no obstante, esta codificación se realizó con unas condiciones idénticas en todos los simuladores libres.

Se compararon los datos históricos y se le hicieron sus respectivas pruebas estadísticas para el simulador libre COCO, DWSIM y el comercial HYSYS, se tiene total confianza en la relación entre simuladores dado que según los análisis estadísticos realizados se llega a la conclusión de que sus resultados no tienen una gran margen de error en relación a los productos livianos, comparando con los datos históricos se tienen mayor margen de error pero en nuestro producto principal es aceptable el cual tiene como máximo un 30%.

Se puede apreciar buen desempeño en cada ambiente de simulación, pero se debe tener en cuenta el tiempo en que estos resuelven este circuito para llegar a una aproximación adecuada en este proceso.

Los simuladores de uso libre a pesar de tener algunas restricciones como el tiempo de solución, la cantidad de datos ingresados, y en algunos casos la ayuda de otros paquetes libres para su correcta función, se tienen resultados aceptables, se recalca en la habilidad que tenga el programador en cada simulador como también el conocimiento del tema para la solución de posibles problemas en el entorno de la simulación.

Para el uso académico los simuladores libres ofrecen una mejor opción para el estudiantado, no obstante, se tiene en cuenta que los ejercicios académicos tienen restricciones y son menos rigurosos comparados con los de una planta industrial, otra ventaja es el factor económico, asequible para los estudiantes y tienen actualizaciones constantes los cuales ayudan a disminuir los errores de cálculos en los procesos.

5. RECOMENDACIONES

- Tomando en cuenta todas las experiencias, se recomienda desarrollar un manual que permita a los estudiantes de Ingeniería Química una aproximación simple y efectiva a la simulación de procesos industriales en software de uso libre.
- Iniciar un estudio más detallado de los productos y subproductos arrojados por los software libres, los cuales contemplen todas las propiedades físico-químicas las cuales permitan realizar discusiones sobre la aplicabilidad de este tipo de software en la industria y academia.
- Integrar diferentes software de uso libre para la comparación de procesos en operaciones unitarias, con diferentes software de uso comercial.
- Incentivar a la creación de software de uso libre básicos para solución de problemas a nivel académico.

BIBLIOGRAFÍA

ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA. Departamento economía [en línea]. [citado en 5 de octubre 2017] www.uam.es/departamentos/economicas/econapli/anova.pdf

CAPE OPEN TO CAPE OPEN. Simulation environment [en línea]. [citado en 20 de septiembre 2017] Disponible en: <http://www.cocosimulator.org>

CHEMSEP. [en línea]. [citado en 20 de septiembre 2017] disponible en: <http://www.chemsep.com/>

COMPUTACIÓN APLICADA AL DESARROLLO S.A. DE C.V. Generación de computadoras [en línea]. [citado en 30 de septiembre 2017] Disponible en: http://www.cad.com.mx/generaciones_de_las_computadoras.htm

DWSIM. Main page [en línea]. [citado en 20 de septiembre 2017] disponible en: <http://dwsim.inforside.com.br>

FEEDBACK NETWORKS La información viva. [en línea] [citado en 20 de septiembre 2017] disponible en: <https://www.feedbacknetworks.com/cas/experiencia/sol-preguntar-calcular.html>

GAVILANES CARRASCO. Fernando: optimización del proceso criogénico de planta de gas mediante simulación para incrementar la producción de gas licuado de petróleo (G.L.P). San Andrés Cholula, Puebla, México, 2012, 84 h. Trabajo de grado (Magister in chemical engineering). Universidad de las Américas Puebla. Escuela de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental. Disponible en Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación: [en línea]

disponible en:
<http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1181/1/T-SENESCYT-000311.pdf>

GIL CHAVES, Iván D., GUEVARA LÓPEZ, Javier R., GARCIA ZAPATA, Jose L., LEGUIZAMON ROBAYO, Alexander y RODRIGUEZ NIÑO, Gerardo. Process analysis and simulation in chemical engineering: Process simulation in chemical engineering. Canada: Springer, 2016. 515 p.

LEINO, Marko: process simulation unit operation models – review of open and hsc chemistry i/o interfaces, Tampere, Finlandia. 2016, 105 h. Tesis (Master's Degree Programme in Information Technology). Tampere University of Technology. Faculty of Business and Built.

MARTÍNEZ SIFUENTES, Víctor Hugo. Simulación de Procesos en Ingeniería Química: Simulación de procesos. México: Plaza y Valdés Editores, 2000. 184 p

MARTÍNEZ TRILLOS, Omar: Simulación de sistemas de control en procesos del sector oil & gas a través del software aspen hysys y conexión a rockwell automation con el estándar de comunicación opc. Bogotá, Colombia. 2015, 149 h. Trabajo de grado (Ingeniero en control). Universidad distrital francisco José de caldas. Facultad tecnológica. Ingeniería en control. Disponible en sistema de bibliotecas Universidad distrital francisco José de caldas: [en línea] disponible en: repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4248/1/MartinezTrillosOmar2015.pdf/

MESA GÓMEZ, Adriana; VALERO VALDIVIESO, Manuel; FIGUEREDO MEDINA, Manuel. Process simulation-based improvements to maximize naphtha production in an existing gas processing plant,” Ing. Univ., vol. 20, no. 2, pp. 355-371, 2016. [en línea] Disponible en <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.iyu20-2.psim>

PABUENA TORRES, Oscar: Simulación de la torre de destilación atmosférica t-250 utilizando hysys, Bucaramanga, Colombia. 2015, 130 h. Tesis (Magister en ingeniería química). Universidad Industrial de Santander. Facultad físico químicas. Ingeniería química.

PAGINA PERSONALES PROFESORES UNAM. Ventajas y desventajas de los software [en línea]. [citado en 5 de octubre 2017] http://profesores.fi-b.unam.mx/maixx/Biblioteca/Librero_Telecom/Libro_SS CD/s006_Ventajas_Desventajas.htm

SANCHIS SEBASTIA, Miguel: Implementación de unidades de separación en el simulador de procesos coco. aplicación al diseño de un proceso de regeneración de aguas de lavado de recubrimientos metálicos, Valencia, España. 2014, 101 h. Tesis (Ingeniería química). Universidad politécnica de valencia. Ingeniería química.

SIMULACIÓN DE PROCESOS. Introducción Hysys [en línea]. [citado en 20 de septiembre 2017] Disponible en: <https://simulacionprocesos.wikispaces.com/introducci%C3%B3n+Hysys>

SOLE, Antonio Creus. Simulación de procesos con PC: Breve nota histórica. Barcelona: Editorial Marcombo S.A., 1989. 160 p

ANEXOS

Anexo A. Descripción del proceso

En este proceso deseamos tener una recuperación de Gasóleo (GOA), DIESEL, KEROJET, y NAFTA, para esto se recibió dietas de crudos y hojas de especificación para una torre de destilación, así como datos históricos para la misma

Se proporcionan el fluido inicial proveniente de diferentes campos, el cual lo llamamos “carga”; esta tiene diferentes propiedades las cuales debemos recrearlas en cada simulador a usar. Se tiene información de densidades, flujo másico y volumétrico en diferentes rangos de temperatura para cada campo que conforman el flujo de entrada.

Este proceso se va a recrear en cada simulador bajo el estado termodinámico de peng-robinson

Pseudocompuestos en HYSYS

En el simulador comercial HYSYS entramos a una sección que se llama input assain; el cual nos permite crear una relación de flujo con cada intervalo de temperatura y respectivas propiedades, esto lo llamamos “pseudocomponentes”.

Pseudocompuestos en COCO

Para crear pseudocompuestos en el simulador libre COCO debemos ingresar a CHEMSEP el cual nos permite recrear cada intervalo de temperatura ingresando gravedad específica, una temperatura y seleccionando una serie de ecuaciones

dadas por el simulador para así llegar a una buena aproximación de este modelado; para este caso se usa un promedio de cada rango de temperatura creando así entre 3 y 12 pseudocompuestos de cada campo; se debe tener precaución al recrear todos los compuestos dado que nos limita a usar solo 40 en cada proceso.

Otro aspecto que debemos tener en cuenta es el número CAS (Chemical Abstracts Service), el cual nos lo proporciona automáticamente para cada pseudocomponente creado, algunos tienen números iguales en relación a sus propiedades idénticas, por lo tanto, en el momento de ingresar estos compuestos con igual número CAS se eliminarán. En este simulador debemos ingresar otros datos para tener uso de esos compuestos creados los cuales son gráfica de densidades, entalpías de formación y entropía.

Pseudo Component Generation

☒ Tb+SG ☐ Tb+API ☐ Reverse order

Tc

Pc

Vc

w

Mw

Name

CpIG

ViscL

kL

☒ CAS#

Methods selection

Figura 8: Pseudocompuestos chemsep

Pseudocompuestos en DWSIM

El simulador libre DWSIM nos permite ingresar gravedad específica y una temperatura para hallar sus propiedades, se pueden ingresar datos de entrada de masa molar y temperatura de ebullición promedio. En este simulador el proceso de recrear los pseudocompuestos es más fácil relacionado con los anteriores.

DWSIM - Caracterización de Petróleo crudo (Propiedades)

Principal Opciones

Datos de entrada

Masa Molar (MM)

Densidad absoluta (d60/60) [adimensional]

Temp. de ebullición promedio. K

Datos de viscosidad (deje en blanco para calcular)

T1 310.92 K Visc 1 m2/s

T2 372.04 K 2 Visc m2/s

Número de Pseudocomponentes 10

Caracterizar crudo

Propiedades de pseudo-componentes

Nombre	Fracción Molar	Teb (K) (K)	Dens. 20/4	MM (kg/kmol) (kg/kmol)	TC (K) (K)	PC (Pa) (Pa)	F Ac.	Visc 1 (m2/s) (m2/s)	Visc 2 (m2/s) (m2/s)

Nombre de la corriente: OIL_5557

Crear y añadir corriente de crudo Guardar Assay Cargar Assay

Figura 9: Pseucomponentes DWSIM

Torre de destilación

El proceso principal se realiza en una torre de destilación fraccionada; esta consta de 32 etapas, con 2 pumparound, 3 torres despojadoras y un condensador parcial con reflujo. Por comodidad enumeramos los platos de manera descendente.

La corriente de “carga caliente” ingresa a esta torre en el plato 28 con una temperatura y presión de 705 F y 33.85 psia respectivamente. Para realizar la separación de los productos principales se tiene agua como vapor la cual ingresa por el plato 32 con una temperatura y presión de 717 F y 64.70 psia. Esto se puede observar en la figura 3.

Pumparound

El primer enfriamiento (pumparound 1) se localiza del plato 12 al plato 10.

El segundo enfriamiento (pumparound 2) se localiza en el plato 21 al plato 18.

Estos se encargan de bajar la temperatura para una mejor separación de los compuestos deseados.

Torres despojadoras

En los simuladores libres se encontraron problemas de convergencia por las limitaciones de estos al utilizar los despojadores laterales de productos, por lo cual estas fueron omitidas y los flujos laterales fueron directamente comparados con los datos históricos y con las salidas de las despojadoras según los resultados de HYSYS. Se puede apreciar que los flujos laterales son comparables, se recomienda para la comparación de estos flujos se codifiquen las despojadoras en los software COCO y DWSIM para el análisis de sus propiedades.

Anexo B. Tablas ANOVA

TABLAS ANOVA HYSYS VS COCO

HYSYS vs COCO (GOA)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HYSYS (GOA)	94	161320.468	1716.17519	198323.811		
COCO (GOA)	94	249129.244	2650.31111	772439.793		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	41012665.8	1	41012665.8	84.4956808	7.7288E-17	3.89194029
Dentro de los grupos	90281015.1	186	485381.802			
Total	131293681	187				

HYSYS vs COCO (Diesel)				
RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
HYSYS (Diesel)	94	772733.081	8220.56469	387248.21
COCO (Diesel)	94	499234.51	5311.00543	3186208.95
ANÁLISIS DE VARIANZA				
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Valor crítico para F
Entre grupos	397880152	1	397880152	222.686398
Dentro de los grupos	332331516	186	1786728.58	1.2646E-33
Total	730211667	187		3.89194029

HYSYS vs COCO (Kero-jet)					
RESUMEN					
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	
HYSYS (Kero-jet)	94	383572.392	4080.55736	206095.087	
COCO (Kero-jet)	94	395411.16	4206.5017	2792319.23	
ANÁLISIS DE VARIANZA					
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Entre grupos	745512.934	1	745512.934	0.49727146	0.48158362
Dentro de los grupos	278852531	186	1499207.16		3.89194029
Total	279598044	187			

HYSYS vs COCO (Nafta)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HYSYS (Nafta)	94	117626.067	1251.34113	156473.59		
COCO (Nafta)	94	104566.173	1112.4061	456812.515		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	907238.365	1	907238.365	2.95861379	0.0870844	3.89194029
Dentro de los grupos	57035607.8	186	306643.052			
Total	57942846.1	187				

TABLAS ANOVA HYSYS VS DWSIM

HYSYS vs DWSIM (GOA)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HYSYS (GOA)	94	161320.468	1716.17519	198323.811		
DWSIM (GOA)	94	83457	887.840426	284.501144		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	32248508.6	1	32248508.6	324.744804	1.1624E-42	3.89194029
Dentro de los grupos	18470573	186	99304.1559			
Total	50719081.6	187				

HYSYS vs DWSIM (Diesel)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HYSYS (Diesel)	94	772733.081	8220.56469	387248.21		
DWSIM (Diesel)	94	360775	3838.03191	461.945207		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	902709898	1	902709898	4656.62241	1.34E-133	3.89194029
Dentro de los grupos	36057044.4	186	193855.077			
Total	938766942	187				

HYSYS vs DWSIM (Kero-jet)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HYSYS (Kero-jet)	94	383572.392	4080.55736	206095.087		
DWSIM (Kero-jet)	94	362457	3855.92553	17709.5965		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2371594.53	1	2371594.53	21.1934307	7.6751E-06	3.89194029
Dentro de los grupos	20813835.6	186	111902.342			
Total	23185430.1	187				

HYSYS vs DWSIM (Nafta)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HYSYS (Nafta)	94	117626.067	1251.34113	156473.59		
DWSIM (Nafta)	94	105173	1118.8617	598942.658		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	824887.592	1	824887.592	2.18392865	0.14114938	3.89194029
Dentro de los grupos	70253711	186	377708.124			
Total	71078598.6	187				

TABLAS ANOVA COCO VS DWSIM

COCO vs DWSIM (GOA)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
COCO (GOA)	94	249129.244	2650.31111	772439.793		
DWSIM (GOA)	94	83457	887.840426	284.501144		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	145996236	1	145996236	377.874068	1.1407E-46	3.89194029
Dentro de los grupos	71863359.4	186	386362.147			
Total	217859596	187				

COCO vs DWSIM (Diesel)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
COCO (Diesel)	94	499234.51	5311.00543	3186208.95		
DWSIM (Diesel)	94	360775	3838.03191	461.945207		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	101973595	1	101973595	64.0000795	1.295E-13	3.89194029
Dentro de los grupos	296360393	186	1593335.45			
Total	398333989	187				

COCO vs DWSIM (Kero-jet)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
COCO (Kero-jet)	94	395411.16	4206.5017	2792319.23		
DWSIM (Kero-jet)	94	362457	3855.92553	17709.5965		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	5776471.6	1	5776471.6	4.11132552	0.04402379	3.89194029
Dentro de los grupos	261332681	186	1405014.41			
Total	267109152	187				

COCO vs DWSIM (Nafta)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
COCO (Nafta)	94	104566.173	1112.4061	456812.515		
DWSIM (Nafta)	94	105173	1118.8617	598942.658		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1958.71619	1	1958.71619	0.00371055	0.95149288	3.89194029
Dentro de los grupos	98185231.1	186	527877.587			
Total	98187189.8	187				

TABLA ANOVA HISTÓRICOS VS HYSYS

HISTÓRICOS vs HYSYS (GOA)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HISTÓRICOS (GOA)	94	163158.605	1735.72984	185681.3		
HYSYS (GOA)	94	161320.468	1716.17519	198323.811		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	17972.0652	1	17972.0652	0.09360326	0.75998754	3.89194029
Dentro de los grupos	35712475.3	186	192002.555			
Total	35730447.4	187				

HISTÓRICOS vs HYSYS (Diesel)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HISTÓRICOS (Diesel)	94	765951.174	8148.41675	701074.143		
HYSYS (Diesel)	94	772733.081	8220.56469	387248.21		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	244650.325	1	244650.325	0.44959166	0.50336063	3.89194029
Dentro de los grupos	101213979	186	544161.176			
Total	101458629	187				

HISTÓRICOS vs HYSYS (Kero-jet)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HISTÓRICOS (Kero-jet)	94	417572.203	4442.25748	310586.295		
HYSYS (Kero-jet)	94	383572.392	4080.55736	206095.087		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6148867.79	1	6148867.79	23.8013909	2.2868E-06	3.89194029
Dentro de los grupos	48051368.6	186	258340.691			
Total	54200236.3	187				

HISTÓRICOS vs HYSYS (Nafta)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HISTÓRICOS (Nafta)	94	164494.309	1749.93945	522905.484		
HYSYS (Nafta)	94	117626.067	1251.34113	156473.59		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	11684213.4	1	11684213.4	34.3967422	2.0177E-08	3.89194029
Dentro de los grupos	63182253.9	186	339689.537			
Total	74866467.3	187				

TABLAS ANOVA HISTÓRICOS VS COCO

HISTÓRICOS vs COCO (GOA)							
RESUMEN							
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza			
HISTÓRICOS (GOA)	94	163158.605	1735.72984	185681.3			
COCO (GOA)	94	249129.244	2650.31111	772439.793			
ANÁLISIS DE VARIANZA							
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F	
Entre grupos	39313567.9	1	39313567.9	82.0638815	1.8076E-16	3.89194029	
Dentro de los grupos	89105261.7	186	479060.547				
Total	128418830	187					

HISTÓRICOS vs COCO (Diesel)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HISTÓRICOS (Diesel)	94	765951.174	8148.41675	701074.143		
COCO (Diesel)	94	499234.51	5311.00543	3186208.95		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	378392442	1	378392442	194.682215	9.6033E-31	3.89194029
Dentro de los grupos	361517328	186	1943641.55			
Total	739909770	187				

HISTÓRICOS vs COCO (Kero-jet)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HISTÓRICOS (Kero-jet)	94	417572.203	4442.25748	310586.295		
COCO (Kero-jet)	94	395411.16	4206.5017	2792319.23		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2612296.9	1	2612296.9	1.68377469	0.19603063	3.89194029
Dentro de los grupos	288570214	186	1551452.76			
Total	291182510	187				

HISTÓRICOS vs COCO (Nafta)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HISTÓRICO						
(Nafta)	94	164494.309	1749.93945	522905.484		
COCO (Nafta)	94	104566.173	1112.4061	456812.515		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	19103092.7	1	19103092.7	38.997125	2.812E-09	3.89194029
Dentro de los grupos	91113773.9	186	489859			
Total	110216867	187				

TABLAS ANOVA HISTÓRICOS VS DWSIM

HISTÓRICOS vs DWSIM (GOA)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HISTÓRICOS (GOA)	94	163158.605	1735.72984	185681.3		
DWSIM (GOA)	94	83457	887.840426	284.501144		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	33789073.6	1	33789073.6	363.390186	1.2911E-45	3.89194029
Dentro de los grupos	17294819.5	186	92982.9007			
Total	51083893.1	187				

HISTORICOS vs COCO (Diesel)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HISTÓRICOS (Diesel)	94	765951.174	8148.41675	701074.143		
DWSIM (Diesel)	94	360775	3838.03191	461.945207		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	873232619	1	873232619	2489.48738	1.254E-109	3.89194029
Dentro de los grupos	65242856.2	186	350768.044			
Total	938475475	187				

HISTÓRICOS vs DWSIM (Kero-jet)						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
HISTÓRICOS (Kero-jet)	94	417572.203	4442.25748	310586.295		
DWSIM (Kero-jet)	94	362457	3855.92553	17709.5965		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	16157902	1	16157902	98.4349937	6.8713E-19	3.89194029
Dentro de los grupos	30531517.9	186	164147.946			
Total	46689419.9	187				

HISTÓRICOS vs DWSIM (Nafta)						
RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
HISTÓRICOS (Nafta)	94	164494.309	1749.93945	522905.484		
DWSIM (Nafta)	94	105173	1118.8617	598942.658		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	18718179.1	1	18718179.1	33.3702547	3.1524E-08	3.89194029
Dentro de los grupos	104331877	186	560924.071			
Total	123050056	187				

Anexo C. Tablas Pueba T

TABLA DE PRUEBA T HYSYS VS COCO

HYSYS vs COCO (GOA)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HYSYS(GOA)</i>	<i>COCO (GOA)</i>
Media	1716.17519	2650.31111
Varianza	198323.811	772439.793
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	138	
Estadístico t	-9.19215322	
P(T<=t) una cola	2.6422E-16	
Valor crítico de t (una cola)	1.65597038	
P(T<=t) dos colas	5.2844E-16	
Valor crítico de t (dos colas)	1.97730354	

HYSYS vs COCO (Diesel)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HYSYS (Diesel)</i>	<i>COCO (Diesel)</i>
Media	8220.56469	5311.00543
Varianza	387248.21	3186208.95
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	115	
Estadístico t	14.9226807	
P(T<=t) una cola	5.7375E-29	
Valor crítico de t (una cola)	1.65821183	
P(T<=t) dos colas	1.1475E-28	
Valor crítico de t (dos colas)	1.98080754	

HYSYS vs COCO (Kero-jet)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HYSYS (Kero-jet)</i>	<i>COCO (Kero-jet)</i>
Media	4080.55736	4206.5017
Varianza	206095.087	2792319.23
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	107	
Estadístico t	-0.70517477	
P(T<=t) una cola	0.24111687	
Valor crítico de t (una cola)	1.65921931	
P(T<=t) dos colas	0.48223375	
Valor crítico de t (dos colas)	1.98238337	

HYSYS vs COCO (Nafta)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HYSYS (Nafta)</i>	<i>COCO (Nafta)</i>
Media	1251.34113	1112.4061
Varianza	156473.59	456812.515
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	150	
Estadístico t	1.72006215	
P(T<=t) una cola	0.04374176	
Valor crítico de t (una cola)	1.6550755	
P(T<=t) dos colas	0.08748352	
Valor crítico de t (dos colas)	1.97590533	

TABLA DE PRUEBA T HYSYS VS DWSIM

HYSYS vs DWSIM (GOA)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HYSYS</i> (GOA)	<i>DWSIM</i> (GOA)
Media	1716.17519	887.840426
Varianza	198323.811	284.501144
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	93	
Estadístico t	18.0206771	
P(T<=t) una cola	2.1428E-32	
Valor crítico de t (una cola)	1.66140367	
P(T<=t) dos colas	4.2856E-32	
Valor crítico de t (dos colas)	1.98580181	

HYSYS vs DWSIM (Diesel)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HYSYS</i> (Diesel)	<i>DWSIM</i> (Diesel)
Media	8220.56469	3838.03191
Varianza	387248.21	461.945207
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	93	
Estadístico t	68.2394491	
P(T<=t) una cola	1.5471E-81	
Valor crítico de t (una cola)	1.66140367	
P(T<=t) dos colas	3.0942E-81	
Valor crítico de t (dos colas)	1.98580181	

HYSYS vs DWSIM (Kero-jet)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HYSYS (Kero-jet)</i>	<i>DWSIM (Kero-jet)</i>
Media	4080.55736	3855.92553
Varianza	206095.087	17709.5965
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	109	
Estadístico t	4.60363234	
P(T<=t) una cola	5.6468E-06	
Valor crítico de t (una cola)	1.65895346	
P(T<=t) dos colas	1.1294E-05	
Valor crítico de t (dos colas)	1.98196749	

HYSYS vs DWSIM (Nafta)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HYSYS (Nafta)</i>	<i>DWSIM (Nafta)</i>
Media	1251.34113	1118.8617
Varianza	156473.59	598942.658
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	138	
Estadístico t	1.47781212	
P(T<=t) una cola	0.07086838	
Valor crítico de t (una cola)	1.65597038	
P(T<=t) dos colas	0.14173676	
Valor crítico de t (dos colas)	1.97730354	

TABLA DE PRUEBA T COCO VS DWSIM

COCO vs DWSIM (GOA)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>COCO</i> (GOA)	<i>DWSIM</i> (GOA)
Media	2650.31111	887.840426
Varianza	772439.793	284.501144
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	93	
Estadístico t	19.4389832	
P(T<=t) una cola	8.0639E-35	
Valor crítico de t (una cola)	1.66140367	
P(T<=t) dos colas	1.6128E-34	
Valor crítico de t (dos colas)	1.98580181	

COCO vs DWSIM (Diesel)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>COCO</i> (Diesel)	<i>DWSIM</i> (Diesel)
Media	5311.00543	3838.03191
Varianza	3186208.95	461.945207
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	93	
Estadístico t	8.00000497	
P(T<=t) una cola	1.6946E-12	
Valor crítico de t (una cola)	1.66140367	
P(T<=t) dos colas	3.3892E-12	
Valor crítico de t (dos colas)	1.98580181	

COCO vs DWSIM (Kero-jet)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>COCO</i> (Kero-jet)	<i>DWSIM</i> (Kero-jet)
Media	4206.5017	3855.92553
Varianza	2792319.23	17709.5965
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	94	
Estadístico t	2.02764038	
P(T<=t) una cola	0.02271393	
Valor crítico de t (una cola)	1.66122586	
P(T<=t) dos colas	0.04542787	
Valor crítico de t (dos colas)	1.98552344	

COCO vs DWSIM (Nafta)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>COCO</i> (Nafta)	<i>DWSIM</i> (Nafta)
Media	1112.4061	1118.8617
Varianza	456812.515	598942.658
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	183	
	-	
Estadístico t	0.06091428	
P(T<=t) una cola	0.47574697	
Valor crítico de t (una cola)	1.6532228	
P(T<=t) dos colas	0.95149395	
Valor crítico de t (dos colas)	1.97301192	

TABLA DE PRUEBA T HISTÓRICOS VS HYSYS

HISTÓRICOS vs HYSYS (GOA)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HISTÓRICOS</i> (GOA)	<i>HYSYS</i> (GOA)
Media	1735.72984	1716.17519
Varianza	185681.3	198323.811
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	186	
Estadístico t	0.3059465	
P(T<=t) una cola	0.37999377	
Valor crítico de t (una cola)	1.65308714	
P(T<=t) dos colas	0.75998754	
Valor crítico de t (dos colas)	1.97280011	

HISTÓRICOS vs HYSYS (Diesel)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HISTÓRICOS</i> (Diesel)	<i>HYSYS</i> (Diesel)
Media	8148.41675	8220.56469
Varianza	701074.143	387248.21
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	172	
Estadístico t	-0.67051596	
P(T<=t) una cola	0.25171413	
Valor crítico de t (una cola)	1.65376095	
P(T<=t) dos colas	0.50342825	
Valor crítico de t (dos colas)	1.97385217	

HISTÓRICOS vs HYSYS (Kero-jet)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HYSTÓRICOS</i> (Kero-jet)	<i>HYSYS</i> (Kero-jet)
Media	4442.25748	4080.55736
Varianza	310586.295	206095.087
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	179	
Estadístico t	4.87866692	
P(T<=t) una cola	1.1752E-06	
Valor crítico de t (una cola)	1.6534108	
P(T<=t) dos colas	2.3505E-06	
Valor crítico de t (dos colas)	1.97330543	

HISTÓRICOS vs HYSYS (Nafta)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HISTÓRICOS</i> (Nafta)	<i>HYSYS</i> (Nafta)
Media	1749.93945	1251.34113
Varianza	522905.484	156473.59
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	144	
Estadístico t	5.86487359	
P(T<=t) una cola	1.4756E-08	
Valor crítico de t (una cola)	1.65550418	
P(T<=t) dos colas	2.9512E-08	
Valor crítico de t (dos colas)	1.97657507	

TABLA DE PRUEBA T HISTÓRICOS VS DWSIM

HISTÓRICOS vs COCO (GOA)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HISTÓRICOS</i> (GOA)	<i>COCO</i> (GOA)
Media	1735.72984	2650.31111
Varianza	185681.3	772439.793
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	135	
Estadístico t	-9.05891172	
P(T<=t) una cola	6.5911E-16	
Valor crítico de t (una cola)	1.65621913	
P(T<=t) dos colas	1.3182E-15	
Valor crítico de t (dos colas)	1.97769228	

HISTÓRICOS vs COCO (Diesel)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HISTÓRICOS</i> (Diesel)	<i>COCO</i> (Diesel)
Media	8148.41675	5311.00543
Varianza	701074.143	3186208.95
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	132	
Estadístico t	13.9528569	
P(T<=t) una cola	4.7383E-28	
Valor crítico de t (una cola)	1.65647927	
P(T<=t) dos colas	9.4767E-28	
Valor crítico de t (dos colas)	1.97809884	

HISTÓRICOS vs COCO (Kero-jet)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HISTÓRICOS</i> (Kero-jet)	<i>COCO</i> (Kero-jet)
Media	4442.25748	4206.5017
Varianza	310586.295	2792319.23
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	113	
Estadístico t	1.29760344	
P(T<=t) una cola	0.09853317	
Valor crítico de t (una cola)	1.65845022	
P(T<=t) dos colas	0.19706635	
Valor crítico de t (dos colas)	1.98118036	

HISTÓRICOS vs COCO (Nafta)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HISTÓRICO</i> (Nafta)	<i>COCO</i> (Nafta)
Media	1749.93945	1112.4061
Varianza	522905.484	456812.515
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	185	
Estadístico t	6.24476781	
P(T<=t) una cola	1.4187E-09	
Valor crítico de t (una cola)	1.65313187	
P(T<=t) dos colas	2.8375E-09	
Valor crítico de t (dos colas)	1.97286995	

TABLA DE PRUEBA T HISTÓRICOS VS DWSIM

HISTÓRICOS vs DWSIM (GOA)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HISTÓRICOS</i> (GOA)	<i>DWSIM</i> (GOA)
Media	1735.72984	887.840426
Varianza	185681.3	284.501144
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	93	
Estadístico t	19.0627959	
P(T<=t) una cola	3.4605E-34	
Valor crítico de t (una cola)	1.66140367	
P(T<=t) dos colas	6.921E-34	
Valor crítico de t (dos colas)	1.98580181	

HISTÓRICOS vs DWSIM (Diesel)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HISTÓRICOS</i> (Diesel)	<i>DWSIM</i> (Diesel)
Media	8148.41675	3838.03191
Varianza	701074.143	461.945207
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	93	
Estadístico t	49.8947631	
P(T<=t) una cola	3.1476E-69	
Valor crítico de t (una cola)	1.66140367	
P(T<=t) dos colas	6.2951E-69	
Valor crítico de t (dos colas)	1.98580181	

HISTÓRICOS vs DWSIM (Kero-jet)

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HISTÓRICOS</i> (Kero-jet)	<i>DWSIM</i> (Kero-jet)
Media	4442.25748	3855.92553
Varianza	310586.295	17709.5965
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	104	
Estadístico t	9.92144111	
P(T<=t) una cola	5.0416E-17	
Valor crítico de t (una cola)	1.65963744	
P(T<=t) dos colas	1.0083E-16	
Valor crítico de t (dos colas)	1.98303753	

HISTÓRICOS vs DWSIM (Nafta)		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	<i>HISTÓRICOS</i> (Nafta)	<i>DWSIM</i> (Nafta)
Media	1749.93945	1118.8617
Varianza	522905.484	598942.658
Observaciones	94	94
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	185	
Estadístico t	5.77669929	
P(T<=t) una cola	1.5871E-08	
Valor crítico de t (una cola)	1.65313187	
P(T<=t) dos colas	3.1741E-08	
Valor crítico de t (dos colas)	1.97286995	