

Formulación de un modelo de predicción de ensuciamiento de los intercambiadores de calor del tren de precalentamiento de la unidad de destilación de crudo U-2000 de la refinería de Barrancabermeja.

Carlos Alberto Vera Gelvez

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

Director:

Gustavo Emilio Ramírez Caballero

Ph.D. en Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Maestría en Ingeniería Química

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

A **Dios**, porque Él es bueno y para siempre es su misericordia.

A **Sandra**, mi esposa, mi compañera, mi ayuda idónea, por su apoyo incondicional.

A **Carlos Junior** y **Sury**, mis hijos, mi herencia, mis motivadores.

A mi **madre**, por sus oraciones.

Agradecimientos

A **Ecopetrol**, la organización en donde el talento humano es valorado.

A la **UIS**, la institución líder en la formación de profesionales en Santander y Colombia.

A los **profesores** de la UIS, por sus esfuerzos y entrega diaria en la educación y formación de personas.

Al profesor **Gustavo Ramírez**, por sus valiosas orientaciones.

A **German, Rosario, Bayron y Juliana**, por su colaboración y hospitalidad.

A mis **compañeros** de estudio de maestría, por su apoyo y por su amistad.

CONTENIDO

	Pág.
Introducción	17
1. Planteamiento del problema.....	20
2. Objetivos.....	24
2.1 Objetivo General.....	24
2.2 Objetivos Específicos.....	24
3. Antecedentes	25
4. Marco Teórico.....	36
4.1 Descripción del proceso.....	36
4.2 Intercambiadores de calor.....	38
4.3 Transferencia de calor en un intercambiador de calor.....	39
4.4 Coeficiente global de transferencia de calor (u).....	44
4.5 Diferencia de temperatura media logarítmica (lmtd).....	45
4.6 Factor de ensuciamiento.....	46
4.7 Teoría sobre el ensuciamiento.....	48
4.7.1 Definición	48
4.7.2 Efectos.....	48
4.7.2 Tipos de Ensuciamiento.....	49
4.7.3 Etapas del Ensuciamiento	49

4.7.4 Curvas de Ensuciamiento.....	50
4.7.5 Modelos de Predicción del Ensuciamiento	52
4.7.6 Modelos de Umbral de Ensuciamiento	55
4.7.7 Parámetros que Influencian el Ensuciamiento.....	57
4.8 Simulación de procesos en Aspen Plus.....	58
4.9 Simulación en Aspen Exchanger Design & Rating	62
4.10 Análisis de regresión.....	62
4.10.1 Análisis de regresión lineal simple	64
4.10.2 Análisis de regresión lineal múltiple.....	65
4.11 Prueba de hipótesis en la regresión lineal múltiple.....	67
4.11.1 Análisis de varianza de la regresión lineal múltiple	67
4.11.2 Estadístico F0 de la regresión lineal múltiple	68
4.11.3 Valor P de la regresión lineal múltiple	69
4.11.4 R^2 y R^2 ajustado de la regresión lineal múltiple.	70
4.11.5 Prueba sobre un coeficiente individual de la regresión lineal múltiple	71
4.11.6 Presentación de los resultados del análisis de la regresión lineal múltiple.....	71
5. Metodología	73
5.1 Revisión bibliográfica y recopilación de datos.....	74
5.2 Definición del método de medición del ensuciamiento.....	76
5.3 Simulación en estado estacionario del proceso de destilación de la U-2000.....	78
5.4 Simulación rigurosa de los intercambiadores de calor del tren de precalentamiento de la U-2000.	79
5.5 Variables de estudio y determinación de los modelos.	82

5.5.1 Desarrollo de la regresión lineal múltiple	83
5.5.2 Análisis de varianza de los modelos ajustados	85
5.5.3 Validación de la simulación.....	85
5.6 Determinación de los costos del ensuciamiento.	85
5.7 Determinación del tiempo óptimo para limpieza de los intercambiadores.....	86
6. Análisis de resultados	87
6.1 Cálculo del ensuciamiento de los intercambiadores de calor y obtención de tendencias.	87
6.2 Modelos de regresión y análisis de varianza con los datos históricos.	94
6.2.1 Modelo de ensuciamiento y variabilidad del E-2005A.....	95
6.2.2 Modelo de ensuciamiento y variabilidad de los E-2010BD	97
6.2.3 Modelo de ensuciamiento y variabilidad de los E-2010AC	99
6.2.4 Modelo de ensuciamiento y variabilidad de los E-2005 y E-2007	102
6.2.5 Modelo de ensuciamiento y variabilidad de los E-2009BC y E-2009AD.....	104
6.3 Modelos de regresion y análisis de varianza con los datos de la simulación rigurosa.	106
6.3.1 Análisis de sensibilidad y validación de la simulación.....	107
6.3.2 Modelos de ensuciamiento de los intercambiadores simulados	108
6.4 Estimación de los costos del ensuciamiento.	114
6.5. Optimización del tiempo de corrida del segundo tren de precalentamiento en condicion de ensuciamiento.....	119
7. Conclusiones	122
8. Recomendaciones	123
Referencias Bibliográficas	125
Apéndices.....	129

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Diagrama esquemático de un tren de precalentamiento de una unidad de destilación de crudo.	18
<i>Figura 2.</i> Tendencias de temperatura de precalentamiento y carga de crudo de U-2000.	22
<i>Figura 3.</i> Tendencias de temperatura de precalentamiento y consumo de gas de U-2000.	23
<i>Figura 4.</i> Tendencias de temperatura de precalentamiento y consumo de gas de U-2000.	23
<i>Figura 5.</i> Esquema de carga de crudo de la Refinería de Barrancabermeja.	26
<i>Figura 6.</i> Diagrama de flujo de proceso de la unidad de destilación de crudos U-2000.	27
<i>Figura 7.</i> Diagrama de flujo del primer tren de precalentamiento de la U-2000.	28
<i>Figura 8.</i> Diagrama de flujo del segundo tren de precalentamiento de la U-2000.	29
<i>Figura 9.</i> Esquema de calor a transferir al crudo según el diseño por la unidad U-2000.	32
<i>Figura 10.</i> Diagrama simplificado de la U-2000.	37
<i>Figura 11.</i> Esquema de un intercambiador de calor de tubos y coraza.	39
<i>Figura 12.</i> Mecanismos de transferencia de calor en un intercambiador.	40
<i>Figura 13.</i> Balance de energía según modelo termodinámico.	41
<i>Figura 14.</i> Modelo de balance en la transferencia de calor en un intercambiador.	42
<i>Figura 15.</i> Red de resistencias térmicas asociadas con la transferencia de calor en un intercambiador de calor con coordenadas cilíndricas.	43
<i>Figura 16.</i> Resistencia adicional causada por el ensuciamiento.	47

<i>Figura 17.</i> Representación esquemática del fenómeno de ensuciamiento.	50
<i>Figura 18.</i> Curvas de Modo de Ensuciamiento.	51
<i>Figura 19.</i> Diagrama de flujo para la selección del paquete termodinámico.	59
<i>Figura 20.</i> Metodología desarrollada.	73
<i>Figura 21.</i> Simulación Rigurosa de Intercambiador de calor en Aspen EDR.....	80
<i>Figura 22.</i> Diagrama de simulación en Aspen Plus del primer tren de precalentamiento con Intercambiadores rigurosos incorporados.	81
<i>Figura 23.</i> Diagrama de simulación en Aspen Plus del segundo tren de precalentamiento con Intercambiadores rigurosos incorporados.	81
<i>Figura 24.</i> Tendencia de ensuciamiento con datos históricos de E-2005A.....	91
<i>Figura 25.</i> Tendencia de ensuciamiento con datos históricos de E-2010BD.	92
<i>Figura 26.</i> Tendencias de calor transferido y ensuciamiento de E-2005.	120

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Distribución de corrientes del primer tren de precalentamiento.....	28
Tabla 2. Distribución del corrientes del segundo tren de precalentamiento.....	30
Tabla 3. Calor a transferir al crudo según el diseño para cada intercambiador del tren de precalentamiento de la U-2000.....	31
Tabla 4. Paquetes Termodinámicos en función del tipo de proceso.....	60
Tabla 5. Análisis de varianza del modelo de regresión lineal múltiple.....	72
Tabla 6. Análisis de significación de los parámetros del modelo de regresión lineal múltiple...	72
Tabla 7. Instrumentación del segundo tren de precalentamiento la U-2000.....	75
Tabla 8. Plantilla utilizada para la captura de datos históricos de proceso.....	76
Tabla 9. Orden aleatorio de la toma de datos del proceso simulado para el intercambiador E2005A.....	84
Tabla 10. Variables para evaluación de los costos de energía.....	86
Tabla 11. Datos capturados de los registros históricos de la planta.....	88
Tabla 12. Comparación de factor de ensuciamiento y calor transferido.....	93
Tabla 13. Análisis de varianza modelo de regresión ajustado de E-2005A.....	96
Tabla 14. Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión ajustado de E-2005A.....	96
Tabla 15. Análisis de varianza modelo de regresión ajustado de E-2010BD.....	98

Tabla 16. Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión ajustado de E-2010BD.	98
Tabla 17. Análisis de varianza modelo de regresión ajustado de E-2010AC.	100
Tabla 18. Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión ajustado de E-2010AC.	100
Tabla 19. Análisis de varianza modelo de regresión ajustado de E-2005.	102
Tabla 20. Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión ajustado de E-2005.	102
Tabla 21. Análisis de varianza modelo de regresión ajustado de E-2007.	103
Tabla 22. Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión ajustado de E-2007.	103
Tabla 23. Análisis de varianza modelo de regresión ajustado de E-2009BC.	105
Tabla 24. Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión ajustado de E-2009BC.	105
Tabla 25. Análisis de varianza modelo de regresión ajustado de E-2009AD.	106
Tabla 26. Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión ajustado de E-2009AD.	106
Tabla 27. Comparación de coeficientes globales de transferencia de calor.	107
Tabla 28. Comparación de las temperaturas de entradas y salidas.	108
Tabla 29. Análisis de varianza modelo de regresión de E-2005A simulado.	109
Tabla 30. Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión de E-2005A simulado.	109
Tabla 31. Análisis de varianza modelo de regresión de E-2010AC simulado.	110

Tabla 32. Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión de E-2010AC simulado. 110

Tabla 33. Análisis de varianza modelo de regresión de E-2005 simulado. 111

Tabla 34. Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión de E-2005 simulado. 111

Tabla 35. Análisis de varianza modelo de regresión de E-2007 simulado. 112

Tabla 36. Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión de E-2007 simulado. 112

Tabla 37. Análisis de varianza modelo de regresión de E-2009AD simulado. 113

Tabla 38. Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión de E-2009AD simulado. 113

Tabla 39. Condiciones óptimas de operación para estimación de costos. 115

Tabla 40. Costo asociado por mayor consumo de gas combustible. 116

Tabla 41. Costo asociado por menor producción de Jet y Acpm..... 117

Tabla 42. Costo asociado por disminución de carga de crudo..... 118

Tabla 43. Evaluación del tiempo y máxima entrega de calor después de lograr el ensuciamiento límite. 120

Tabla 44. Ensuciamiento alcanzado por los intercambiadores en el tiempo de corrida optimizado. 122

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Tendencia del Factor de Ensuciamiento de los Intercambiadores de Calor del Segundo Tren de Pre calentamiento de la U-2000 con Datos Históricos.	129
Apéndice B. Tendencias de Calor Transferido y Ensuciamiento en Función del Tiempo del Segundo Tren de Pre calentamiento de la U-2000.....	132
Apéndice C. Hojas de especificaciones de diseño de los intercambiadores de calor del segundo tren de pre calentamiento de la U-2000.	136
Apéndice D. Datos Históricos de proceso del segundo tren de pre calentamiento de la U-2000.	143

Resumen

TÍTULO: FORMULACIÓN DE UN MODELO DE PREDICCIÓN DE ENSUCIAMIENTO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DEL TREN DE PRECALENTAMIENTO DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN DE CRUDO U-2000 DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA*

AUTOR: Carlos Alberto Vera Gelvez**.

PALABRAS CLAVE: Intercambiador de calor, tren de precalentamiento, transferencia de calor, ensuciamiento, análisis de regresión lineal múltiple, modelos empíricos.

DESCRIPCIÓN:

Los intercambiadores de calor son equipos diseñados para la transferencia de calor, y su mayor problema es la pérdida de eficiencia debido a la acumulación de depósitos indeseados sobre su superficie de transferencia, fenómeno llamado ensuciamiento.

La unidad de destilación de crudos U-2000 tiene un tren de precalentamiento diseñado para aportar el 60% de la energía necesaria para su operación, y la pérdida de transferencia de calor por ensuciamiento causa un mayor costo energético y restricciones en su capacidad de carga y producción.

En este trabajo de aplicación se desarrollaron para cada intercambiador del segundo tren de precalentamiento de la U-2000 unos modelos empíricos para la predicción del ensuciamiento. Partiendo de cinco años de datos históricos de la unidad, se calculó el factor ensuciamiento de los intercambiadores (R_f) a partir del coeficiente global de transferencia (U) y la diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD), obteniéndose así una tendencia del ensuciamiento durante su tiempo de operación.

Posteriormente mediante un análisis de regresión lineal múltiple se obtuvo un modelo del factor de ensuciamiento en función del tiempo, del flujo de las corrientes fría y caliente, y la diferencia de temperatura media logarítmica, los cuales tuvieron significancia estadística con un intervalo de confianza del 95%.

También se simularon de manera rigurosa los intercambiadores de calor, obteniéndose datos de su comportamiento mediante un análisis de sensibilidad, con los que se desarrollaron modelos similares a los estimados con los datos históricos. Igualmente se obtuvieron datos para estimar los costos causados por operar los intercambiadores evaluados con un alto grado de ensuciamiento.

Por último con los modelos empíricos de predicción de ensuciamiento obtenidos con los datos históricos, se estimó mediante una función objetivo, el tiempo en que los intercambiadores alcanzan un nivel de ensuciamiento que afecta la operación y deben iniciar su programa de limpieza.

* Tesis de Maestría.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Química. Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero, Ingeniero Químico. Ph.D.

Abstract

TITLE: FORMULATION OF A MODEL OF PREDICTION OF FOULING OF THE HEAT EXCHANGERS OF THE PRE-HEATING TRAIN OF THE CRUDE OIL DISTILLATION UNIT U-2000 OF THE BARRANCABERMEJA REFINERY*

AUTHOR: Carlos Alberto Vera Gelvez**.

KEYWORDS: Heat exchanger, pre-heating train, heat transfer, fouling, multiple linear regression analysis, empirical models.

DESCRIPTION:

Heat exchangers are equipment designed for heat transfer, and its biggest problem is the loss of efficiency due to the accumulation of unwanted deposits on its transfer surface, a phenomenon called fouling.

The U-2000 crude distillation unit has a preheating train designed to provide 60% of the energy needed for its operation, and the loss of heat transfer due to fouling causes a higher energy cost and restrictions on its feed capacity and production.

In this application study, empirical models for the prediction of fouling were developed for each exchanger of the second preheating train of the U-2000. Based on five years of historical data of the unit, the fouling factor of the exchangers (R_f) was calculated from the global transfer coefficient (U) and the logarithmic mean temperature difference (LMTD), thus obtaining a tendency of fouling during its operating time.

Subsequently, by means of a multiple linear regression analysis, a model of the fouling factor as a function of time, the flow of cold and hot currents, and the logarithmic mean temperature difference were obtained, which had statistical significance with a confidence interval of 95%.

The heat exchangers were also rigorously simulated, obtaining data on their behavior through a sensitivity analysis, with which models similar to those estimated with historical data were developed. Likewise, data were obtained to estimate the costs caused by operating the exchangers evaluated with a high level of fouling.

Finally with the empirical models of prediction of soiling obtained with the historical data, and by means of an objective function, the time in which the exchangers reach a level of contamination that affects the operation and should start its cleaning program was estimated.

* Master's Thesis.

** Faculty of Physico-Chemical Engineering, School of Chemical Engineering. Master's Degree in Chemical Engineering. Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero, Chemical Engineer. PhD.

Introducción

La refinación es un proceso fundamental en la cadena de la industria del petróleo que tiene como función agregar valor mediante la conversión del petróleo crudo en una gran variedad de productos refinados, como son los combustibles utilizados en los principales medios de transporte. Para ello las refinerías cuentan con una gran variedad de unidades de procesos entre las cuales están las unidades de destilación primaria y de vacío, que son el punto de partida de la conversión del petróleo crudo en productos valiosos.

Algunos estudios indican que la destilación de crudo es el mayor consumidor de energía térmica entre todos los procesos de destilación de la industria de refinación y petroquímica (ESDU, 2000), debido a que requieren aproximadamente una cantidad de energía equivalente al 4 % de la energía total del petróleo crudo que está siendo procesado.

Esto debido a que el proceso de destilación requiere que el petróleo crudo sea vaporizado para luego condensar los diferentes hidrocarburos que lo componen en cortes definidos, modificando la temperatura a lo largo de la columna fraccionadora y separándolos en función de su punto de ebullición.

Para garantizar la adecuada vaporización del petróleo crudo antes de ingresar a la columna de destilación este debe calentarse en un rango de temperatura entre 700°F y 720°F, y de igual manera los productos obtenidos en los cortes laterales y los reflujos deben ser enfriados para ser almacenados o retornados a la columna, demandando todo este proceso un alto consumo de energía.

Por lo cual para que el proceso de destilación de crudo sea térmicamente eficiente se realiza una integración térmica en donde los productos calientes que salen de la columna de destilación ceden calor al petróleo crudo frío que es cargado a la unidad por medio de una red de intercambiadores llamado tren de precalentamiento, como se muestra en la figura 1.

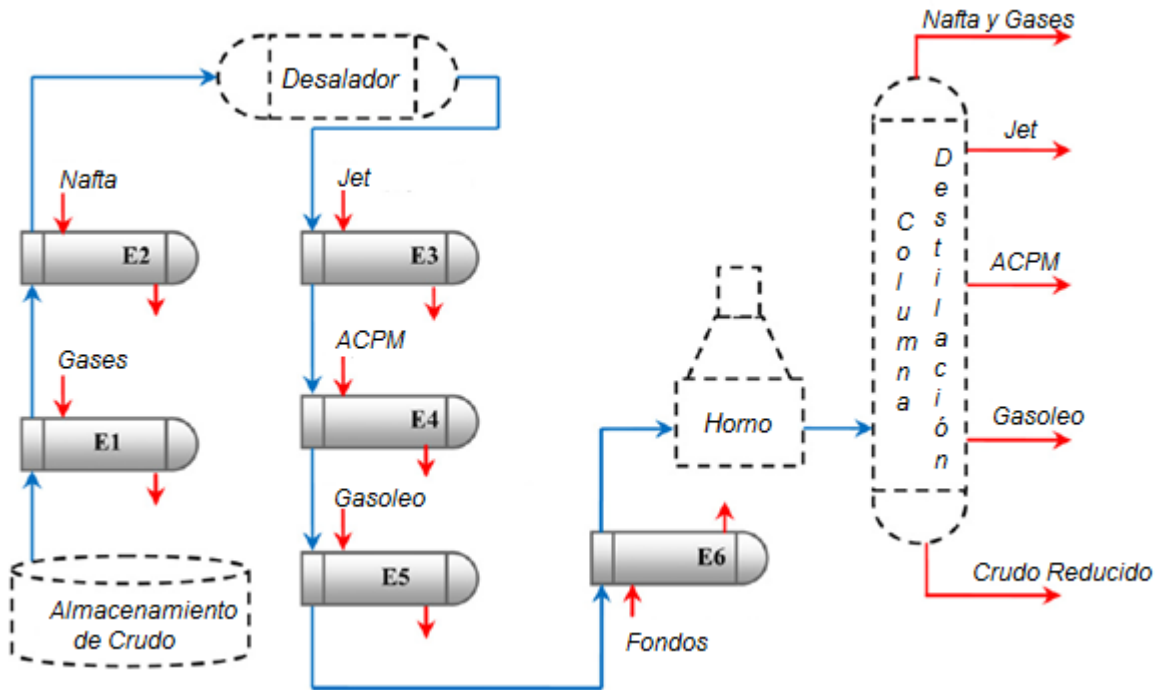


Figura 1. Diagrama esquemático de un tren de precalentamiento de una unidad de destilación de crudo.

Entre el 60% y 70% del calor requerido por la carga de crudo en el proceso de destilación atmosférica es proveído por el tren de precalentamiento y el restante por el horno (Planchal, et al., 2000). Es así como este tren de precalentamiento se puede considerar como la mejor demostración de la importancia de los intercambiadores de calor en una industria altamente competitiva y de ganancias marginales, ya que ellos abarcan en sí mismos dos conceptos fundamentales como son la energía y la economía.

Pero debido a la naturaleza del crudo y a las características del proceso de intercambio de calor, el rendimiento térmico e hidráulico de cada intercambiador de la red utilizada para precalentar el crudo se va reduciendo a lo largo del tiempo por causa de la deposición progresiva de material no deseado en las superficies de intercambiador de calor, fenómeno el cual es llamado ensuciamiento.

Este ensuciamiento, es decir, la formación de depósitos sobre las superficies de transferencia de calor, impacta negativamente en el proceso debido a que disminuye la eficiencia del intercambio térmico incrementando el consumo de energía en los hornos, y a que aumenta la caída de presión a través de los equipos, generando un mayor requerimiento de energía de bombeo, sin contar los problemas de corrosión.

Lo anterior lleva a la operación al límite de la capacidad de diseño a otros equipos involucrados como son los hornos de calentamiento ó las bombas de carga, haciendo necesario disminuir la capacidad de procesamiento de la unidad para compensar las pérdidas energéticas, las restricciones hidráulicas y las pérdidas de producción afectando al final la rentabilidad de la operación.

Por lo cual es importante que el grado de ensuciamiento de los intercambiadores sea evaluado durante su operación y así obtener información valiosa tanto para el análisis de las causas del ensuciamiento como para determinar el momento adecuado para el mantenimiento.

1. Planteamiento del problema

La refinería de Barrancabermeja cuenta con cinco unidades de destilación de crudo que en conjunto dan una capacidad de procesamiento de 250.000 BPD¹.

Estas cinco unidades de destilación de crudos tienen en total 101 intercambiadores de calor de tubo y coraza en sus trenes de precalentamiento, cuya función es incrementar la temperatura del crudo de 90°F hasta 500°F aproximadamente, antes de ingresar a los hornos en donde finalmente se eleva su temperatura hasta los 700°F para finalmente pasar a las columnas de destilación.

El equilibrio térmico alcanzado en este sistema es tan sensible a los disturbios que si por alguna causa el crudo ingresa al horno con una temperatura de precalentamiento menor, la temperatura del crudo a la salida de este disminuirá de una manera proporcional afectando la recuperación de productos valiosos en la columna de destilación, a menos que la energía necesaria para llegar al valor de temperatura de salida esperado de los 700°F sea compensado con una mayor quema de gas en el horno o una disminución de la carga a la unidad.

Una de las causas por las cuales la temperatura de precalentamiento del crudo disminuye antes de ingresar al horno es el ensuciamiento de los intercambiadores de calor del tren de precalentamiento. Este ensuciamiento ocasiona disminución en la eficiencia energética de las unidades, generando un aumento de los costos de consumo de energía, afectando negativamente la capacidad de procesamiento y la recuperación de los productos valiosos.

¹ Flujo volumétrico en barriles por día (BPD).

Los trenes de precalentamiento de carga de crudo de las unidades de destilación cuentan con elementos de medición de variables como flujo, presión y temperatura en los intercambiadores de calor, pero estos datos obtenidos tienen muy poca utilidad para la evaluación de desempeño de estos trenes de precalentamiento.

Es importante que los datos generados por los sistemas de medición sean tratados y utilizados en la medición de la rata de ensuciamiento de los intercambiadores de calor de los trenes de precalentamiento de las unidades de destilación, y de esta manera obtener información confiable, precisa y oportuna acerca de la tendencia del ensuciamiento, analizar qué variables de proceso insidien sobre este fenómeno y evaluar el impacto causado sobre la eficiencia de la transferencia de calor y los costos energéticos asociados.

Se evidencia que en la Refinería de Barrancabermeja se debe diseñar e implementar una metodología simple y fiable para medir la tendencia de ensuciamiento de los intercambiadores de calor del tren de precalentamiento de las unidades de destilación de crudo y responder a preguntas prácticas como:

¿Cuán eficiente es la transferencia de calor a través del tiempo?, ¿Cuál es el real rendimiento de un intercambiador en un momento dado de la operación? , ¿Qué tan sucio esta un intercambiador? ¿Cuál es el impacto en los costos energéticos de la unidad, al operar un intercambiador sucio? ¿Cuál es el momento adecuado para limpiar un intercambiador de calor?

Para desarrollar este trabajo de aplicación se tomará como caso de estudio el tren de precalentamiento de la unidad de destilación U-2000 de la refinería de Barrancabermeja, que tiene una capacidad de carga de 60.000 BPD de crudo liviano y 55.000 BPD de crudo mezclado o intermedio, pero que su capacidad actual de carga de crudo ha estado limitada a un valor aproximado de 50.000 BPD.

Esta disminución en su capacidad de carga, se debe principalmente a la disminución de la temperatura de precalentamiento del crudo que entrada al horno de destilación atmosférica, que a su vez es causada por la pérdida de eficiencia en la transferencia de calor de sus intercambiadores. Problemática que está asociada al fenómeno de ensuciamiento de los intercambiadores.

En la figura 2 se puede observar como la carga de crudo de la U-2000 esta correlacionada con la temperatura de precalentamiento, teniendo una misma tendencia decreciente, es decir que a lo largo del periodo de corrida la carga de crudo y la temperatura de precalentamiento han disminuido.

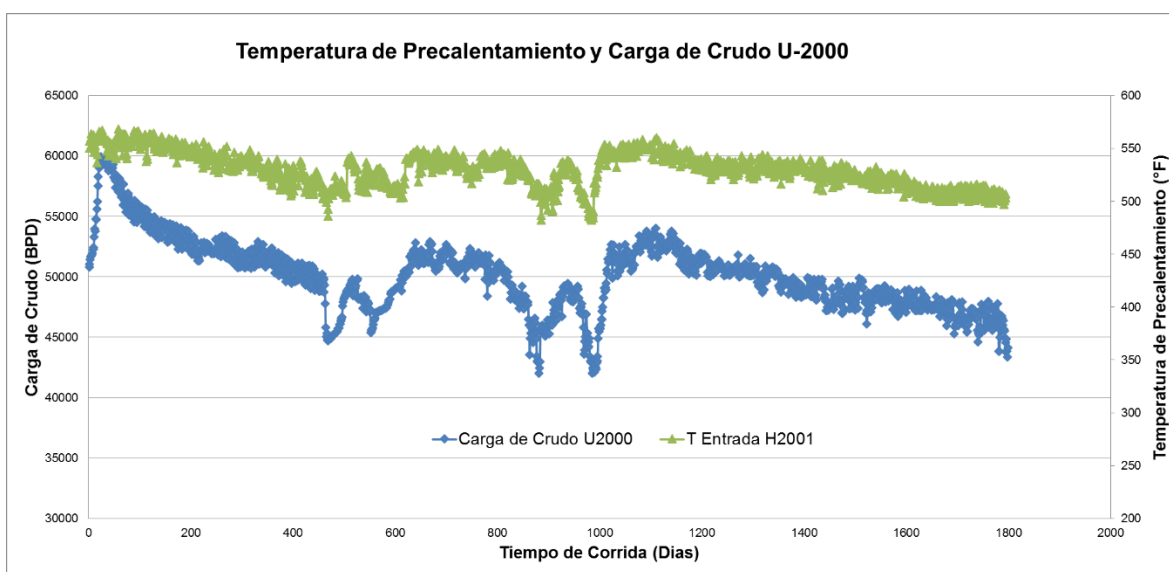


Figura 2. Tendencias de temperatura de precalentamiento y carga de crudo de U-2000.

En la figura 3, es notable como a medida que la temperatura de precalentamiento del crudo ha disminuido, el consumo de gas combustible en el horno ha aumentado; teniendo efectos en la operación e integridad mecánica del horno, que se refleja en un aumento de la temperatura de piel de tubo de sus serpentines, la cual tiene un valor límite que no se puede sobrepasar (Ver figura 4).

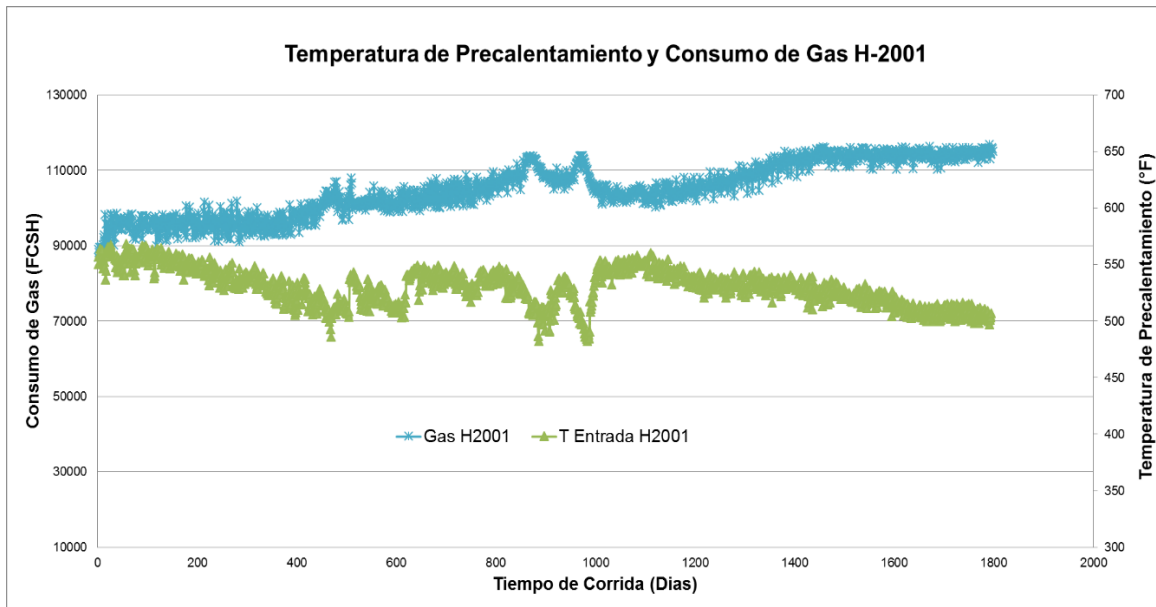


Figura 3. Tendencias de temperatura de pre calentamiento y consumo de gas de U-2000.

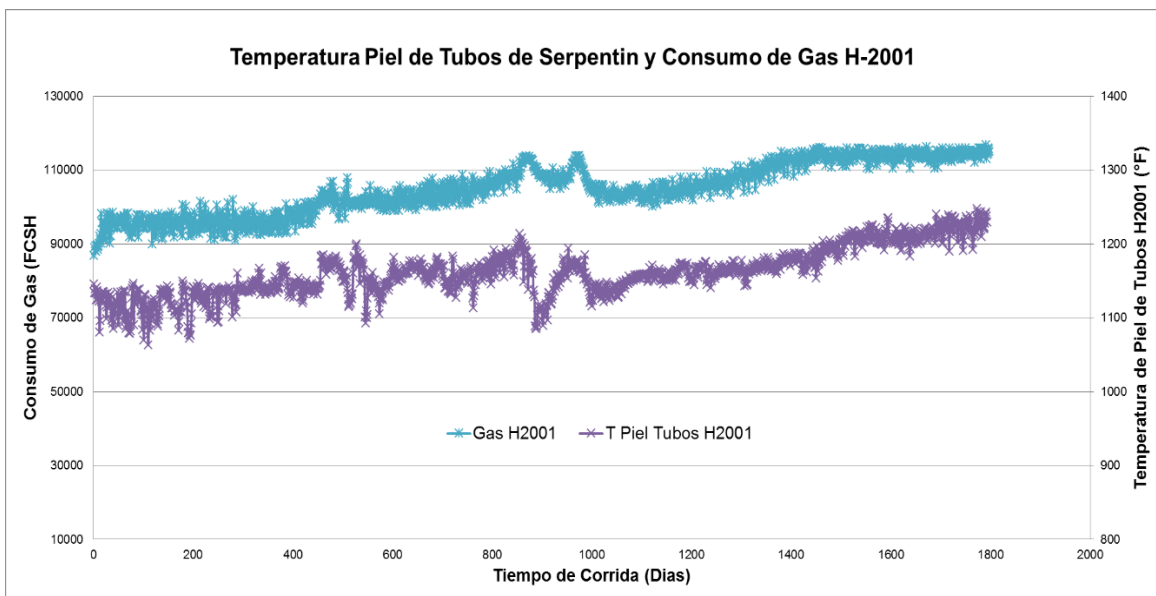


Figura 4. Tendencias de temperatura de pre calentamiento y consumo de gas de U-2000.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Formular un modelo de predicción de ensuciamiento de los intercambiadores de calor del tren de precalentamiento de la unidad de destilación de crudo U-2000 de la Refinería de Barrancabermeja.

2.2 Objetivos Específicos

- Definir el método de medición del ensuciamiento de los intercambiadores de calor del tren de precalentamiento.
- Evaluar mediante el método de medición definido el ensuciamiento de los intercambiadores de calor del tren de precalentamiento usando los datos históricos.
- Realizar una simulación rigurosa del segundo tren de precalentamiento de la unidad.
- Realizar un diseño de experimento en la simulación que permita identificar el comportamiento del tren de precalentamiento frente a factores operaciones de mayor influencia.
- Evaluar los costos causados por el ensuciamiento de los intercambiadores de calor según escenarios operacionales posibles, validados en la simulación.

3. Antecedentes

El 18 de Febrero de 1922 se inicia la historia de la refinería de Barrancabermeja con la llegada de los primeros equipos procedentes Talara, Perú. El alambique diseñado para destilar crudo, fue instalado en donde hoy se encuentran las oficinas de la Gerencia General. Los primeros procesos se realizaron con leña y su capacidad máxima alcanzaba una destilación sólo de 1.500 BPD.

Con el paso de los años y el avance de la tecnología, la Refinería de Barrancabermeja fue creciendo, aumentando los rendimientos, calidad y rentabilidad, hasta llegar actualmente a una capacidad instalada de procesamiento de petróleo crudo de 250.000 BPD y la producción del 80 por ciento del mercado interno de combustibles y derivados del país. Dentro de sus principales productos están: la Gasolina Motor (extra y corriente), el Jet-A1, el Diesel, el Avigas, el GLP, el Azufre, las Ceras, las Bases Lubricantes, el Polietileno de baja densidad, los Aromáticos, los Asfaltos, y los Disolventes Alifáticos, entre otros. La capacidad de carga de la refinería está distribuida en cinco unidades de destilación de crudos de las cuales la Unidad U-2000 es una de ellas (Ver figura 5).

La unidad de destilación de crudo U-2000 fue construida en 1979 con una capacidad de carga de 30.000 BPD de crudo en la sección de destilación atmosférica y de 25.000 BPD de crudo reducido como carga a la sección de destilación al vacío. En 1989 se le realiza una ampliación que aumentó su capacidad de carga de crudo a 48.000 BPD, y para el lado vacío a 34.000 BPD. En 1998 la unidad es sometida a una renovación para aumentar la capacidad a 60.000 BPD de crudo liviano Cusiana y a 55.000 BPD de crudo mezclado, capacidad con la que se cuenta hoy día.

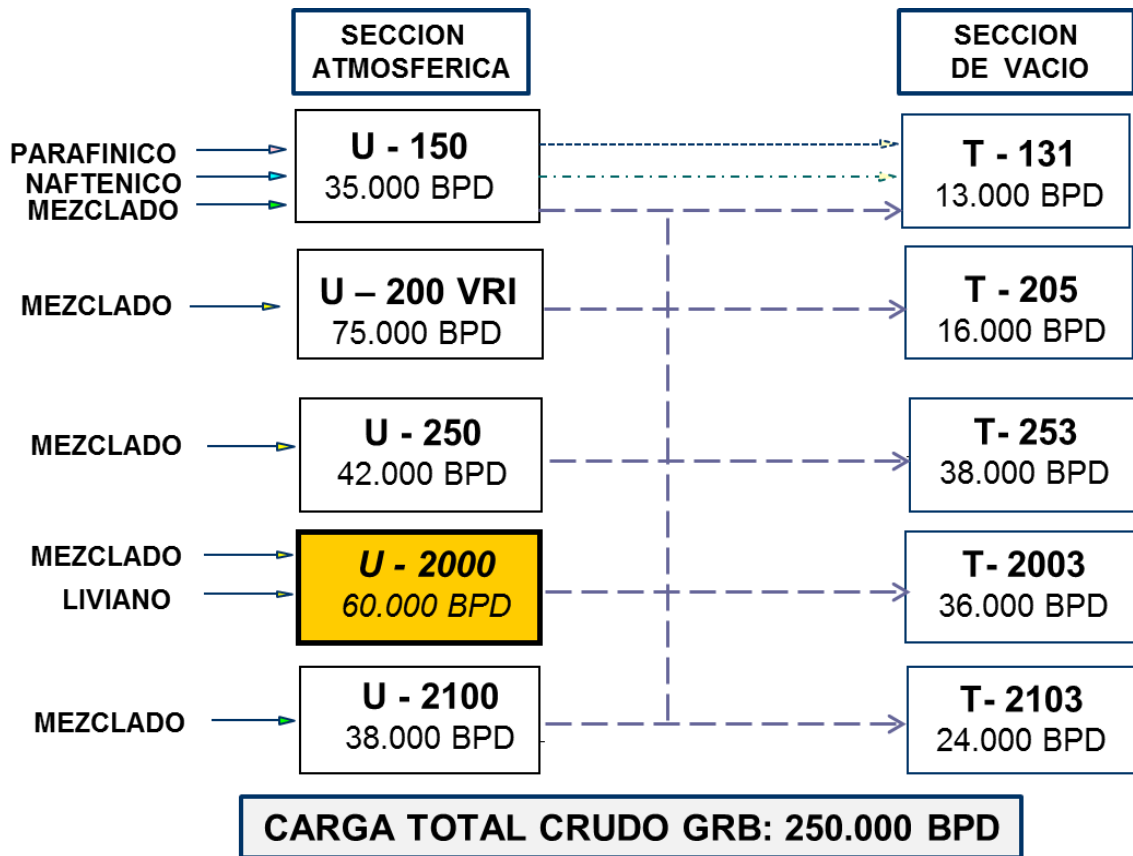


Figura 5. Esquema de carga de crudo de la Refinería de Barrancabermeja.

La unidad de destilación U-2000 actualmente procesa una mezcla de petróleo crudo proveniente de diferentes campos de producción de Ecopetrol S.A, con un promedio de 24 grados API.

Este petróleo crudo es una mezcla homogénea de diferentes hidrocarburos y el proceso de destilación del crudo consiste fundamentalmente en separar los productos valiosos contenidos en él, sin modificar la estructura molecular de estos, valiéndose de la diferencia existente en los puntos de ebullición de los productos; aplicando los principios de transferencia de calor y masa que se da entre las fases liquido-vapor dentro de la columna de destilación.

Para que el proceso de destilación del crudo sea eficiente, este debe ingresar a la columna de destilación parcialmente vaporizado en un rango de temperatura que oscilan entre los 700°F y 720°F. Y esto se logra mediante una alta integración térmica de la unidad.

Típicamente una unidad de destilación de crudo la integración térmica comprende una serie de intercambiadores de calor arreglados de manera estratégica llamado tren de precalentamiento, en donde se eleva la temperatura del crudo gradualmente, y un horno en donde se le da el calentamiento final.

En la figura 6 se puede observar un diagrama que muestra la configuración de la unidad U-2000 con sus principales equipos de proceso.

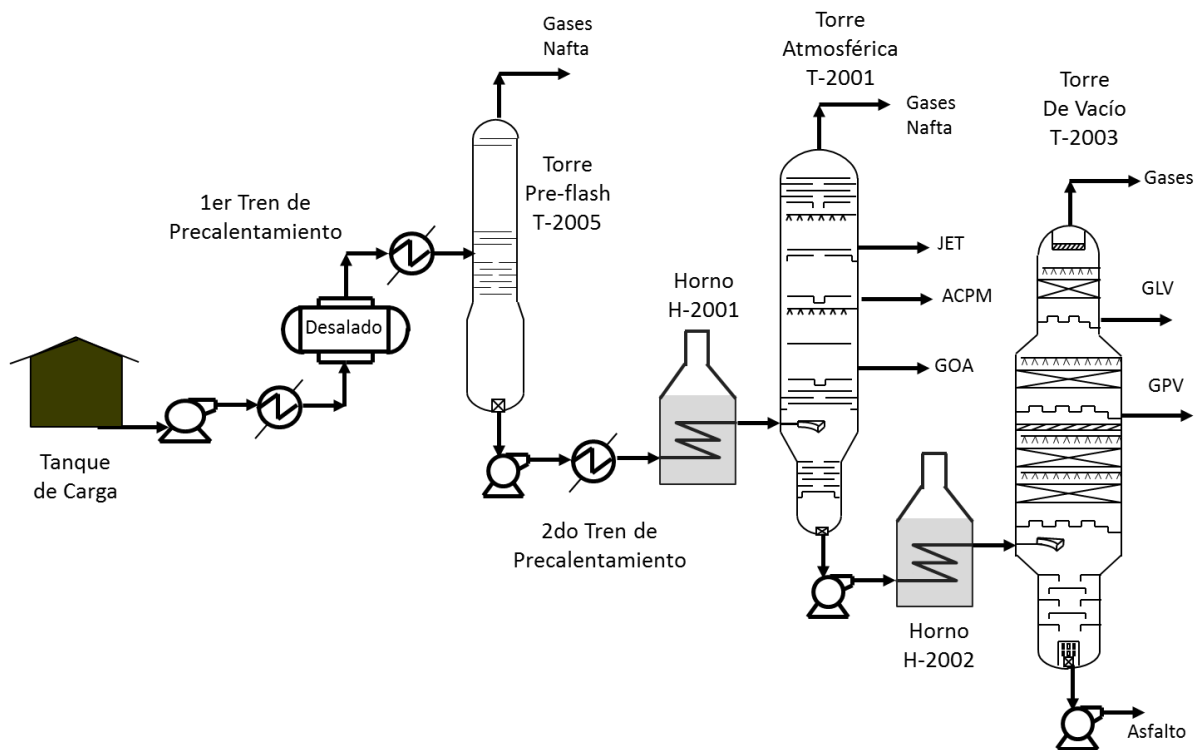


Figura 6. Diagrama de flujo de proceso de la unidad de destilación de crudos U-2000.

La unidad de destilación de crudos U-2000 tiene en su tren de precalentamiento 20 intercambiadores de calor. En el primer tren de precalentamiento que consta de 9 intercambiadores (ver figura 7), en donde el crudo frío incrementa gradualmente su temperatura de 90°F hasta aproximadamente 350°F, y a esta temperatura llega a la torre de pre-fraccionamiento T-2005, aquí la carga de crudo es rectificada mediante el retiro de una fracción liviana por la cima de la torre y pierde 10°F de temperatura de precalentamiento aproximadamente.

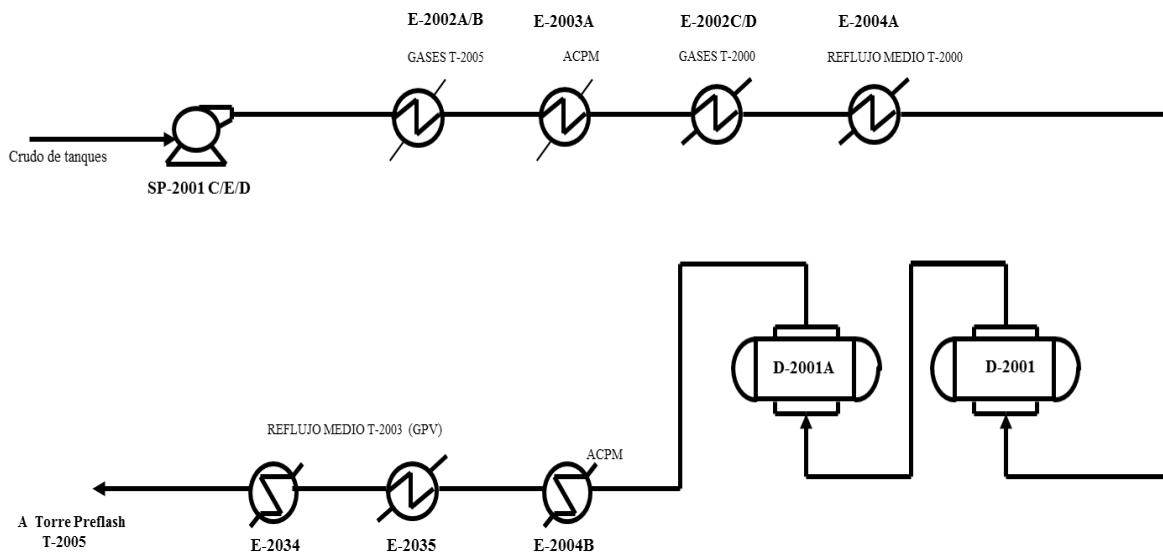


Figura 7. Diagrama de flujo del primer tren de precalentamiento de la U-2000.

Tabla 1

Distribución de corrientes del primer tren de precalentamiento.

Intercambiador	Corriente Lado Tubos	Corriente Lado Casco
E- 2002AB	Crudo (Frio)	Gases Cima T-2005 (Caliente)
E-2003A	Crudo (Frio)	ACPM (Caliente)
E-2002CD	Crudo (Frio)	Gases Cima T-2000 (Caliente)
E-2004A	Crudo (Frio)	Reflujo Medio T-2000 (Caliente)
E-2004B	ACPM (Caliente)	Crudo (Frio)

Intercambiador	Corriente Lado Tubos	Corriente Lado Casco
E-2035	GPV (Caliente)	Crudo (Frio)
E-2034	GPV (Caliente)	Crudo (Frio)

Posteriormente el crudo sale por el fondo de la torre de pre-fraccionamiento T-2005 y es enviado a través del segundo tren de intercambiadores de calor hasta llegar al H-2001 en donde se le da el calentamiento final para alcanzar la temperatura de destilación. En este segundo tren de precalentamiento el crudo incrementa su temperatura de 340°F hasta aproximadamente 520°F (ver Figura 8)

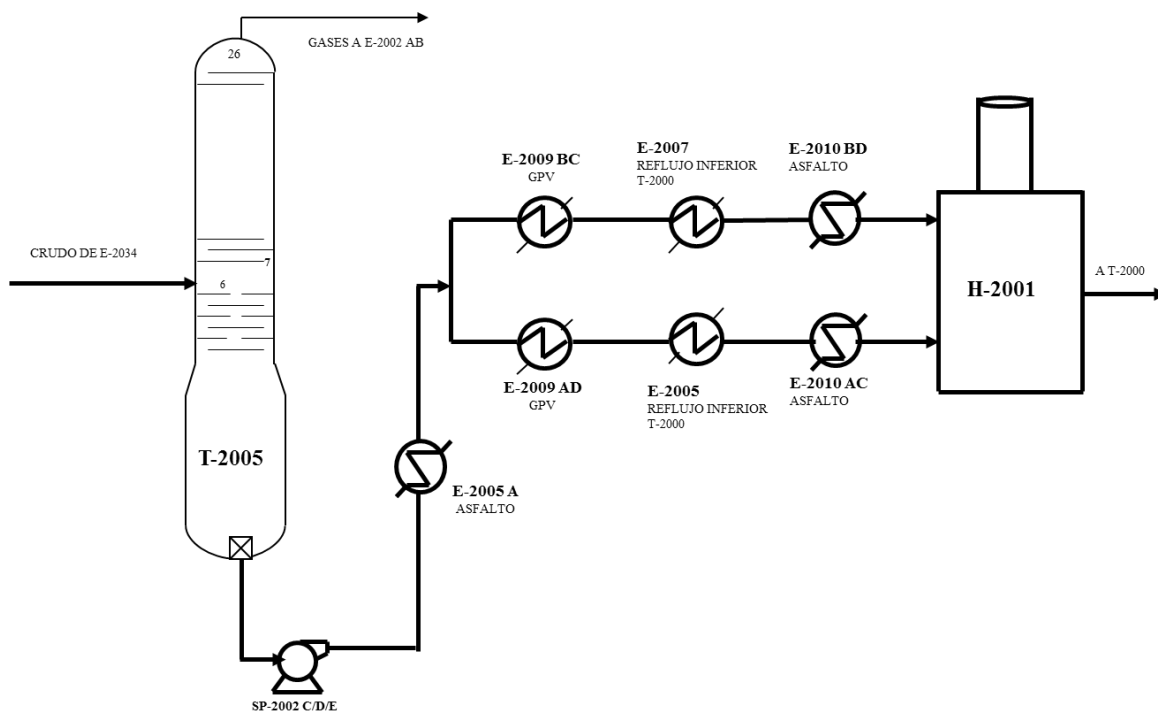


Figura 8. Diagrama de flujo del segundo tren de precalentamiento de la U-2000.

Tabla 2.

Distribución del corrientes del segundo tren de precalentamiento.

Intercambiador	Corriente Lado Tubos	Corriente Lado Casco
E- 2005A	Fondos de Vacío (Caliente)	Crudo (Frio)
E-2009 ABCD	Crudo (Frio)	GPV (Caliente)
E-2007	Crudo (Frio)	Reflujo Inferior T-2000 (Caliente)
E-2005	Crudo (Frio)	Reflujo Inferior T-2000 (Caliente)
E-2010 ABCD	Fondos de Vacío (Caliente)	Crudo (Frio)

De esta manera el crudo llega con la mayor temperatura posible al horno H-2001, el cual se encarga de dar el calentamiento final para que este alcance una temperatura de aproximadamente 700° que garantice una vaporización adecuada, para así pasar a la torre de destilación atmosférica T-2001, en donde se da la separación y obtención de los productos valiosos como son nafta virgen, Jet, Acpm y Gasóleo.

Entre el 60% y 70% del calor requerido por el petróleo crudo en el proceso de destilación atmosférica es proveído por el tren de precalentamiento y el restante por el horno (Planchal, et al., 2000). Para el caso de la U-2000, la unidad esta diseñada para suministrar al crudo 293.686.000 BTU/h, en donde el tren de precalentamiento debe aportar 193.686.000 BTU/h, que equivalen al 66% del calor total y el horno atmosférico debe aportar 100.000.000 BTU/h equivalentes al 34%. A continuación en la tabla 3 y la figura 9 se relaciona el calor que por diseño debe suministrar al crudo cada intercambiador de calor del tren de precaliente.

Tabla 3.

Calor a transferir al crudo según el diseño para cada intercambiador del tren de precalentamiento de la U-2000.

Intercambiador	Calor Transferido	Unidad
E- 2002AB	17.553.000	BTU/h
E-2003A	14.903.000	BTU/h
E-2002CD	31.000.000	BTU/h
E-2004A	17.540.000	BTU/h
E-2004B	15.119.000	BTU/h
E-2035	7.361.000	BTU/h
E-2034	10.687.000	BTU/h
E- 2005A	16.173.000	BTU/h
E-2009 AD	7.316.000	BTU/h
E-2009 BC	7.469.000	BTU/h
E-2007	15.800.000	BTU/h
E-2005	15.480.000	BTU/h
E-2010 AC	8.675.000	BTU/h
E-2010 BD	8.610.000	BTU/h
Calor Total a Transferir	193.686.000	BTU/h

Fuente: Hoja de datos de equipos de U-2000.

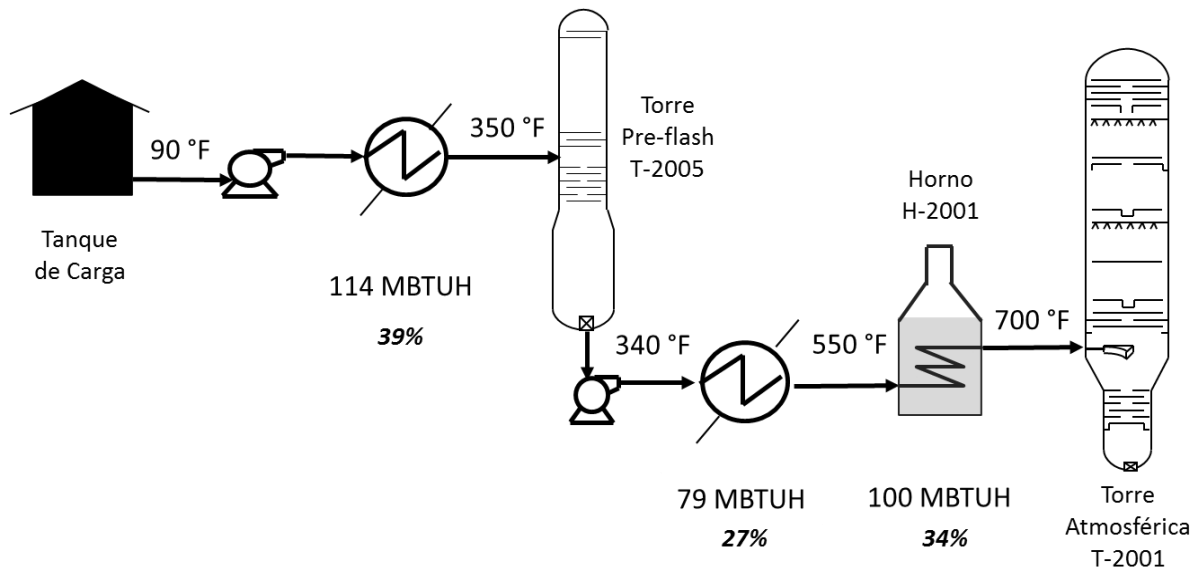


Figura 9. Esquema de calor a transferir al crudo según el diseño por la unidad U-2000.

La anterior información, suministrada por el tren de precalentamiento de la unidad U-2000, evidencia la importancia de los intercambiadores de calor en la industria de refinación del petróleo que es altamente competitiva y de ganancias marginales, ya que estos equipos de proceso abarcan en sí mismos dos conceptos fundamentales como son la energía y la economía.

Pero los intercambiadores de calor a lo largo del tiempo de operación van reduciendo su rendimiento térmico e hidráulico debido a la deposición progresiva de material no deseado en la superficie de intercambio, fenómeno característico de estos equipos que es conocido como ensuciamiento.

Este ensuciamiento es reconocido como un problema grave en los intercambiadores de calor debido a los dos efectos negativos que este genera como son la disminución de la tasa de transferencia de calor y el aumento de la resistencia al flujo en los equipos (Y.C.Chen, et al, 2007).

Se estima que los costos totales del ensuciamiento relacionados con intercambiadores en los principales países industrializados están alrededor del 0,25 % a 0,3 % de su PIB (ESDU Item

00016, 2000).y pueden superar los \$ 45 mil millones de dólares al año (Müller- Steinhagen, et al, 2005).

Las investigaciones sobre el fenómeno de ensuciamiento en los intercambiadores de calor datan desde 1910 y la primera aplicación práctica fue implementada en el 1920, y desde ese entonces el conocimiento de los mecanismos de ensuciamiento así como las técnicas de prevención, mitigación y eliminación de este han evolucionado notablemente.

Pero a pesar de los esfuerzos que ingenieros y científicos han dedicado al estudio del fenómeno de ensuciamiento de los equipos de transferencia de calor, este sigue siendo hoy en día uno de los principales problemas no resueltos de la Ciencia Térmica (Taborek, 1972; Hassan Al-Haj Ibrahim, 2012).

Generalmente los estudios relacionados con el fenómeno de ensuciamiento en intercambiadores de calor de crudo se realizan por medio de experimentos en laboratorio que son diseñados y operados bajo condiciones controladas, utilizando una gran variedad de dispositivos como: Stirred Cell System (Young et al, 2011), Recycle Flow Loop With Tubular Cross Section (Crittendent et al, 2009), y Recycle Flow Loop With Annular Cross Section (Wilson and Watkinson, 1995).

Y aunque estos estudios acerca del ensuciamiento en laboratorio eliminan las principales barreras que conlleva el realizarlo directamente en los intercambiadores de calor de la refinería, tienen como principal desventaja que el crudo no es expuesto al tiempo, a la temperatura, al flujo y a las condiciones reales de operación que tendría en los intercambiadores de calor en las unidades de proceso (Young et al, 2009).

Es así como algunos investigadores han realizado trabajos para la medición del ensuciamiento en intercambiadores de calor en tiempo real. Por ejemplo, Jerónimo, et al., (1997), desarrollaron un método simplificado para el seguimiento del ensuciamiento de una red de intercambiadores de

calor de una refinería basado en el cálculo de la eficiencia térmica usando las temperaturas de entrada y salida de los fluidos en el intercambiador de calor, y calculando una eficiencia estimada para el intercambio, obteniendo de esta manera buenos resultados en el monitoreo de los intercambiadores de calor y en la evaluación del ensuciamiento.

Heins, et al., (2007), realizaron una simulación rigurosa del tren de precaliente de la unidad de destilación Topping IV de la Refinería Luján de Cuyo en Argentina utilizando Aspen-Hysys® con el objetivo de monitorear el comportamiento de la red de intercambiadores y evaluar el impacto económico debido a las estrategias de limpieza. Con los datos históricos almacenados en los sistemas de información de la planta obtuvieron una buena representación del comportamiento del ensuciamiento durante el periodo evaluado observando claramente los efectos de los procedimientos de limpieza, considerando esta una buena herramienta para evaluar económicamente los diferentes escenarios de limpieza de la red de intercambio.

Sahin, et al., (2011), presentaron una metodología para monitorear la tasa de ensuciamiento de los intercambiadores del tren de precalentamiento de la unidad de hidrotratamiento de Diesel de la Refinería Tupras Izmir en Turquía, para con esta herramienta obtener tendencias de ensuciamiento que permitan realizar análisis de las principales causas de este, y también poder establecer un programa de mantenimiento para limpieza. La metodología desarrollada corrió satisfactoriamente con los datos históricos y en tiempo real, de los intercambiadores de calor de la planta de Diesel, y los resultados obtenidos fueron consistentes y describieron de manera confiable el comportamiento del ensuciamiento en los mismos.

Kashani, et al., (2011), desarrollaron una red neuronal artificial para el monitoreo y predicción del ensuciamiento en una red de intercambiadores de tubo y carcasa del tren de precalentamiento de una unidad de crudo de la Refinería de Teheran en Iran. Los resultados mostrados indican que

el modelo es capaz de calcular el ensuciamiento usando solamente las variables de proceso medidas en línea y predecir hasta dos días con un error medio relativo de 8% y hasta 10 días con un error medio relativo de 10%, y se considera que este modelo puede ser confiablemente usado en la industria para el monitoreo y predicción del ensuciamiento de intercambiadores de calor.

Gudmundsson, et al., (2011), compararon dos diferentes métodos para medición del ensuciamiento en intercambiadores de calor de flujo cruzado en condiciones de normal operación. El primer método se basó en las NTU en donde el ensuciamiento se detecta mediante la monitorización del coeficiente global de transferencia de calor, y el segundo método se basó en un modelo de caja negra que detecta el ensuciamiento a través del cambio en los errores de predicción. Los resultados encontrados indican que el método propuesto basado en las NTU puede ser utilizado para la medición del ensuciamiento en intercambiadores de calor flujo cruzado, usando las mediciones de las variables en operación normal.

Akınç, et al., (2011), elaboraron una metodología en la cual por medio de la simulación de los intercambiadores de calor se monitorea en tiempo real el factor de resistencia global de ensuciamiento de un tren de precalentamiento de una unidad de destilación de crudo, tomando los datos suministrados por la unidad como temperatura, presión y flujos principalmente. Al compararse los resultados de las simulaciones realizadas con la metodología propuesta y los resultados de las simulaciones realizados con software comercial se concluyó que la metodología es confiable y consistente.

Becerra, et al., (2014), diseñaron una metodología de control multivariable para diagnosticar, controlar y optimizar la red de intercambio de calor del circuito de fondos de la sección de fraccionamiento de la unidad de cracking catalítico fluidizado (fcc) de la refinería de Cartagena. Los resultados de las simulaciones permitieron confirmar que sí es posible la construcción de un

modelo que permita diagnosticar la tasa de ensuciamiento de una red de intercambio de calor a partir de monitoreo de las variables principales de proceso como son la temperatura, el flujo y la presión; y a su vez se puede emplear el Sistema de Control Multivariable para diagnosticar, controlar y optimizar la red de intercambio de calor.

Gadalla, et al., (2014), desarrollaron su trabajo para proponer una modernización de una unidad de destilación de crudo en una refinería en Egipto, mediante la evaluación de la columna de destilación junto con la red de intercambio de calor utilizando una herramienta de simulación como Aspen-Hysys®; demostrando que era necesario considerar algunos cambios en el proceso, junto con mejoras en las interacciones entre el proceso de destilación existente y el sistema de recuperación de calor.

4. Marco Teórico

4.1 Descripción del proceso.

La U-2000 de la refinería de Barrancabermeja, es una unidad destilación de crudo que cuenta con una sección de destilación atmosférica y una sección de destilación al vacío, en las cuales hay 3 torres de destilación: una torre de pre-fraccionamiento, una torre de destilación atmosférica y una torre de destilación al vacío (Ver figura 10).

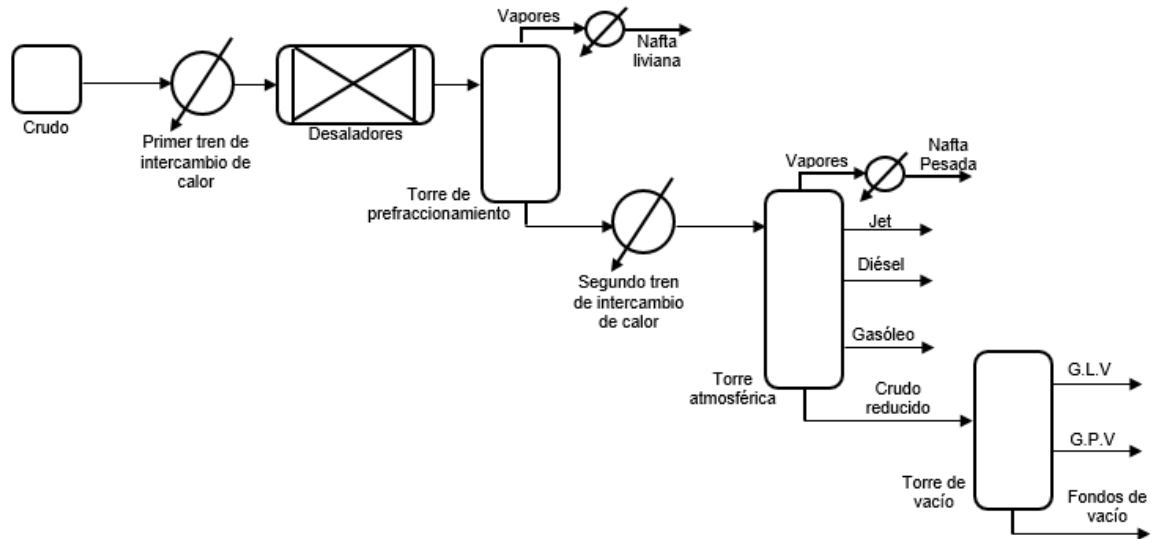


Figura 10. Diagrama simplificado de la U-2000.

La sección atmosférica comprende desde la bomba de carga, pasando por el primer tren de intercambio de calor cuyo objetivo es subir la temperatura del crudo para garantizar una correcta operación en los desaladores y en la torre de pre-fraccionamiento, donde se despoja parte de los componentes livianos del crudo como son los gases y nafta virgen de bajo punto inicial de ebullición.

El crudo despojado en la torre de prefraccionamiento sale por el fondo de esta para pasar por el segundo tren de intercambio de calor, el cual lleva al crudo a una temperatura de aproximadamente 520°F antes de entrar al horno atmosférico de donde sale parcialmente vaporizado a unos 700°F.

Posteriormente el crudo ingresa a la torre de destilación atmosférica ascendiendo la parte vaporizada hacia la cima y cayendo la parte líquida al fondo. La condensación de los vapores de hidrocarburo ocurre a medida que la temperatura en la torre va descendiendo, produciéndose corrientes laterales líquidas que se recuperan en los colectores de salida de la torre, obteniéndose productos como son la Nafta Virgen, Jet, Diésel y Gasóleo.

La fracción líquida que sale del fondo de la torre atmosférica, llamada crudo reducido, es cargada a la sección de vacío que opera a una presión por debajo de la presión atmosférica, y tiene como equipos principales el horno y la torre de destilación al vacío.

El horno incrementa la temperatura del crudo reducido hasta unos 710°F aproximadamente y este parcialmente vaporizado entra a la torre al vacío, en donde a medida que se va enfriando se obtiene principalmente dos corrientes laterales líquidas como son el gasóleo liviano de vacío y el gasóleo pesado de vacío (GLV, GPV), los cuales se recuperan en los colectores internos de la torre, para luego ser enviados como carga a otras unidades de proceso de la refinería.

En la parte inferior de la torre de vacío queda la fracción más pesada del barril de crudo que se denominan fondos de vacío, del cual no es posible obtener más productos valiosos por medio del proceso de destilación. Este fondo de vacío que comúnmente es llamado asfalto, es enviado hacia otros procesos especializados, en donde es convertido en productos de mayor utilidad y valor.

4.2 Intercambiadores de calor.

Los intercambiadores de calor son generalmente dispositivos o equipos diseñados para facilitar la transferencia de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evitar al mismo tiempo que estos se mezclen entre sí.

Los intercambiadores de calor se fabrican de diversos tipos dependiendo y tienen variada clasificación. Por ejemplo, de acuerdo al tipo de proceso de intercambio de calor pueden ser de contacto indirecto o de contacto directo; de acuerdo al patrón de flujo se tienen los de flujo paralelo, contraflujo o flujo cruzado; de acuerdo a su función están los regeneradores y recuperadores; o de acuerdo a su construcción están los de placa y los de tubo y coraza.

Estos últimos intercambiadores de calor son los más comúnmente usados en las aplicaciones industriales, y se caracterizan por tener un gran número de tubos empacados en un casco con sus ejes paralelos al de éste. La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por dentro de los tubos, en tanto que el otro se mueve por fuera de éstos, pasando por la coraza.

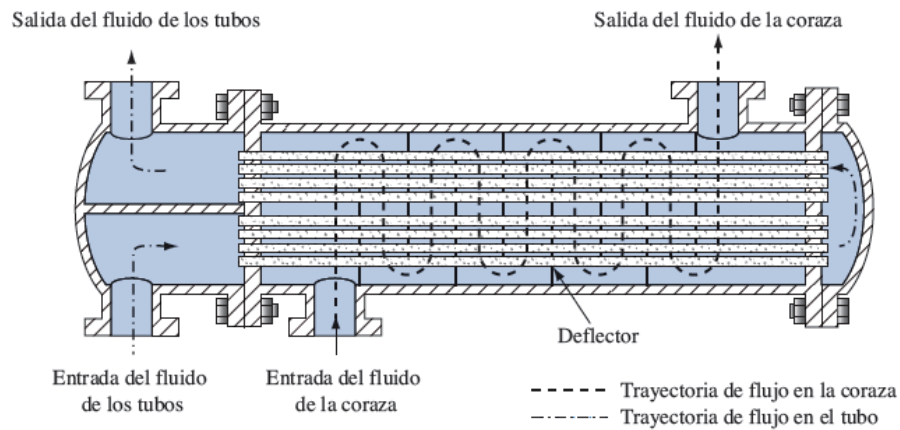


Figura 11. Esquema de un intercambiador de calor de tubos y coraza.

Fuente: Transferencia de Calor y Masa (Cengel).

4.3 Transferencia de calor en un intercambiador de calor.

Comúnmente en un intercambiador de calor los dos fluidos están separados por una pared sólida, y el mecanismo de transferencia de calor se da en primer lugar por convección del fluido caliente hacia la pared, después por conducción a través de la pared y, por último, de la pared hacia el fluido frío de nuevo por convección.

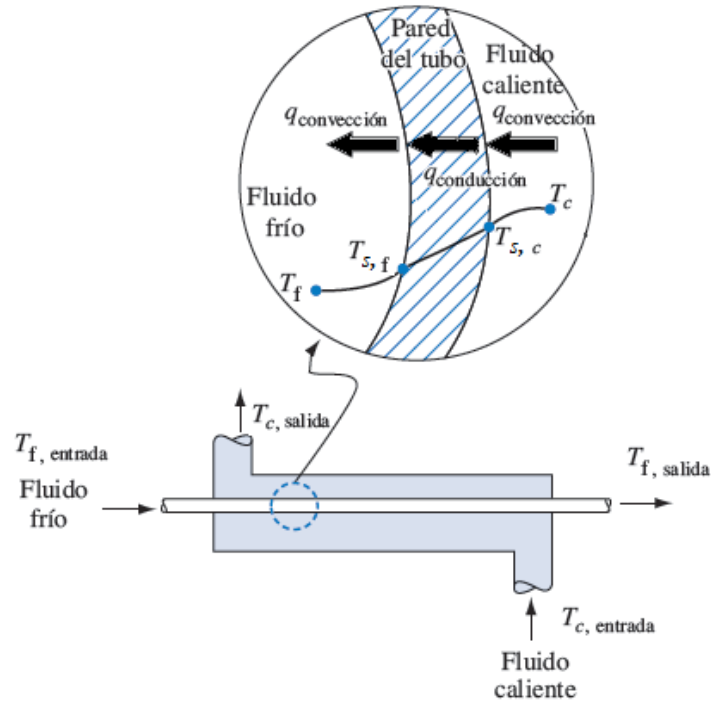


Figura 12. Mecanismos de transferencia de calor en un intercambiador.

Fuente: Transferencia de Calor y Masa (Cengel).

El análisis térmico de un intercambiador de calor fundamentalmente requiere la aplicación de la primera ley de la termodinámica en conjunto con los principios de la transferencia de calor. La transferencia global de energía en un intercambiador de calor de acuerdo al modelo termodinámico se puede expresar de la siguiente manera:

$$-q_{p\acute{e}rdido} + \sum \dot{E}_{entrada} + + \sum \dot{E}_{salida} = 0 \quad (1)$$

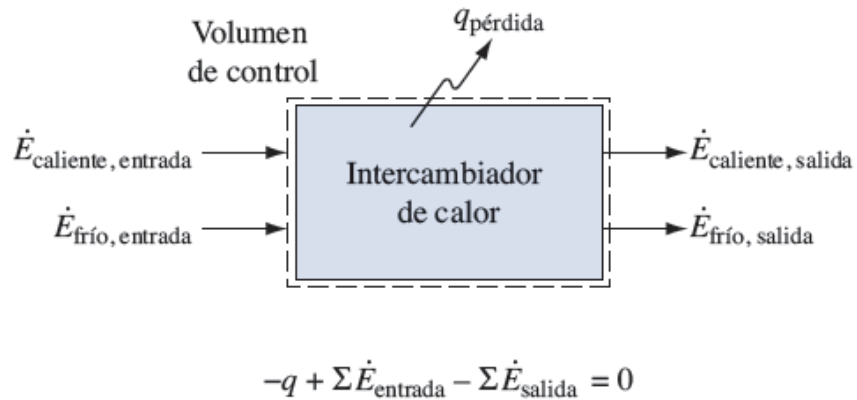


Figura 13. Balance de energía según modelo termodinámico.

Fuente: Transferencia de Calor y Masa (Cengel).

Considerando que el calor cedido por el fluido caliente es totalmente absorbido por el fluido frío, y que el calor perdido por el sistema es cero ($q_{p\acute{e}rdido} = 0$), el balance de energía se puede expresar como:

$$q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

$$q_{transferido} = q_{cedido \text{ por el fluido caliente}} = q_{absorbido \text{ por el fluido frio}}$$

$$q = (\dot{m}c_p)_{caliente} (T_{c,entrada} - T_{c,salida}) = (\dot{m}c_p)_{fr\acute{o}} (T_{f,salida} - T_{f,entrada})$$

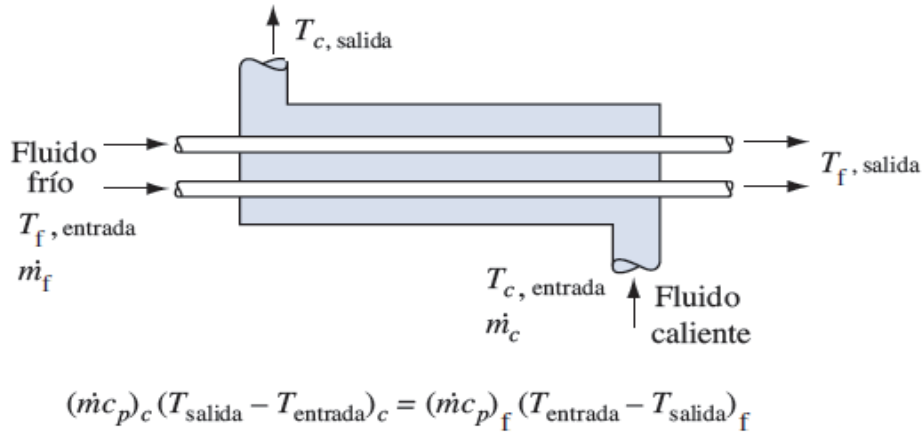


Figura 14. Modelo de balance en la transferencia de calor en un intercambiador.

Fuente: Transferencia de Calor y Masa (Cengel).

De acuerdo al mecanismo de transferencia de calor que se da en un intercambiador en donde dos fluidos están separados por una pared, en condiciones estacionarias la transferencia de calor se puede expresar como:

$$q_{\text{convección hacia la pared}} = q_{\text{conducción a través de la pared}} = q_{\text{convección desde la pared}}$$

$$q = h_c A (T_c - T_{s,c}) = kA \frac{(T_{s,c} - T_{s,f})}{L} = h_f A (T_{s,f} - T_f)$$

$$q = \frac{(T_c - T_{s,c})}{1/h_c A} = \frac{(T_{s,c} - T_{s,f})}{L/kA} = \frac{(T_{s,f} - T_f)}{1/h_f A}$$

$$q = \frac{(T_c - T_f)}{1/h_c A + L/kA + 1/h_f A} \quad (3)$$

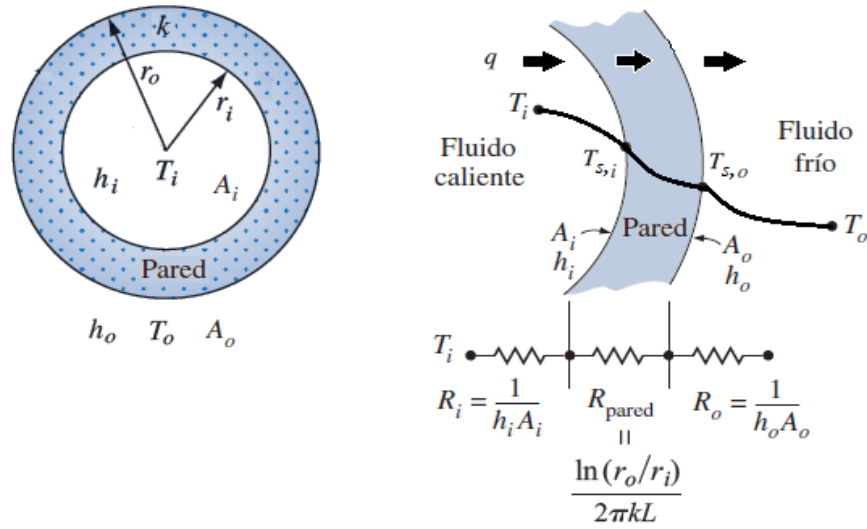


Figura 15. Red de resistencias térmicas asociadas con la transferencia de calor en un intercambiador de calor con coordenadas cilíndricas.

Fuente: Transferencia de Calor y Masa (Cengel).

Para el caso de los intercambiadores de tubos y coraza se manejan las coordenadas cilíndricas, y expresando las conductancias térmicas como resistencias tenemos que:

$$R_i = 1/h_i A_i \quad ; \quad R_k = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} \quad ; \quad R_o = 1/h_o A_o$$

$$q = \frac{(T_c - T_f)}{R_i + R_k + R_o}$$

$$R_{Total} = R_i + R_k + R_o$$

$$q = \frac{\Delta T}{R_{Total}} \quad (4)$$

Expresando la transferencia de calor de manera análoga a la ley de enfriamiento de Newton obtenemos la ecuación básica de diseño de un intercambiador:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (5)$$

4.4 Coeficiente global de transferencia de calor (u).

El coeficiente global de transferencia de calor U es también denominado conductancia unitaria global o transmitancia térmica global, especifica la tasa total promedio de flujo de calor entre una superficie, un fluido adyacente y los alrededores por área superficial unitaria y la diferencia de temperatura unitaria entre la superficie y el fluido.

En el coeficiente es muy útil para el análisis de la transferencia de calor en sistemas compuestos como los intercambiadores de calor, ya que este agrupa todas las resistencias o conductancias individuales del sistema térmico en una sola cantidad global.

$$U = \frac{1}{1/h_i + L/k + 1/h_o} \quad (6)$$

El coeficiente global de transferencia de calor U está relacionado con el valor de la Resistencia Total por medio de la siguiente expresión:

$$U \cdot A = \frac{1}{R_{Total}} \quad (7)$$

Los intercambiadores de calor tienen dos áreas superficiales para la transferencia de calor, una es el área de la superficie interior (A_i) y la otra es el área de la superficie exterior (A_o), que son las áreas superficiales de la pared de la tubería que separa los fluidos. Por tanto, si el coeficiente de transferencia de calor se basa en el área exterior A_o ; este es definido por,

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o}} \quad (8)$$

En tanto que, con base en el área interior, A_i , se obtiene que,

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \frac{A_i}{A_o h_o}} \quad (9)$$

4.5 Diferencia de temperatura media logarítmica (lmtd).

Las temperaturas de los fluidos a lo largo de un intercambiador de calor en general no son constantes, sino que varían de un punto a otro conforme el calor circula del fluido más caliente al más frío. Por tanto, incluso para una resistencia térmica constante la tasa de flujo de calor variará a lo largo de la trayectoria de los intercambiadores debido a que su valor depende de la diferencia de temperatura entre el fluido caliente y el frío en esa sección. Por lo cual resulta conveniente tener una diferencia de temperatura media ΔT_m para usarse en la relación:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (10)$$

Esta diferencia de temperatura media logarítmica LMTD se obtiene siguiendo el perfil real de temperaturas de los fluidos a lo largo del intercambiador y es una representación exacta de la diferencia de temperatura promedio entre los fluidos caliente y frío; y su expresión es la siguiente:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)} \quad (11)$$

Para intercambiadores de calor de Tubo y Coraza,

$$\Delta T_1 = T_{caliente, entrada} - T_{frío, salida} \quad \text{y} \quad \Delta T_2 = T_{caliente, salida} - T_{frío, entrada}$$

Adicionalmente para estos intercambiadores el procedimiento usual es modificar la LMTD simple mediante factores de corrección (F) el cual depende de la configuración geométrica del intercambiador y de las temperaturas de entrada y de salida de las corrientes de fluido caliente y frío. De manera que el cálculo del calor transferido en un intercambiador de tubo y coraza queda definido por la expresión:

$$q = U \cdot A \cdot LMTD \cdot F \quad (12)$$

Este factor de corrección se encuentra publicado en las gráficas de Bowman y de la TEMA, en donde los valores de la abscisa son para la relación adimensional de la diferencia de temperatura,

$$P = \frac{T_{tubos, salida} - T_{coraza, entrada}}{T_{coraza, entrada} - T_{tubos, entrada}}$$

Y el parámetro para cada una de las curvas, R, es igual a la relación de los productos del gasto másico por la capacidad térmica de los dos fluidos,

$$R = \frac{(\dot{m} \cdot c_p)_{tubos}}{(\dot{m} \cdot c_p)_{coraza}} = \frac{T_{coraza, entrada} - T_{coraza, salida}}{T_{tubos, salida} - T_{tubos, entrada}}$$

4.6 Factor de ensuciamiento.

Durante su operación normal un intercambiador de calor se va ensuciando debido a la deposición de materiales sobre la superficie de transferencia de calor. Esta capa de depósitos representa una resistencia adicional que afecta negativamente la transferencia de calor y disminuye la eficiencia del intercambiador.

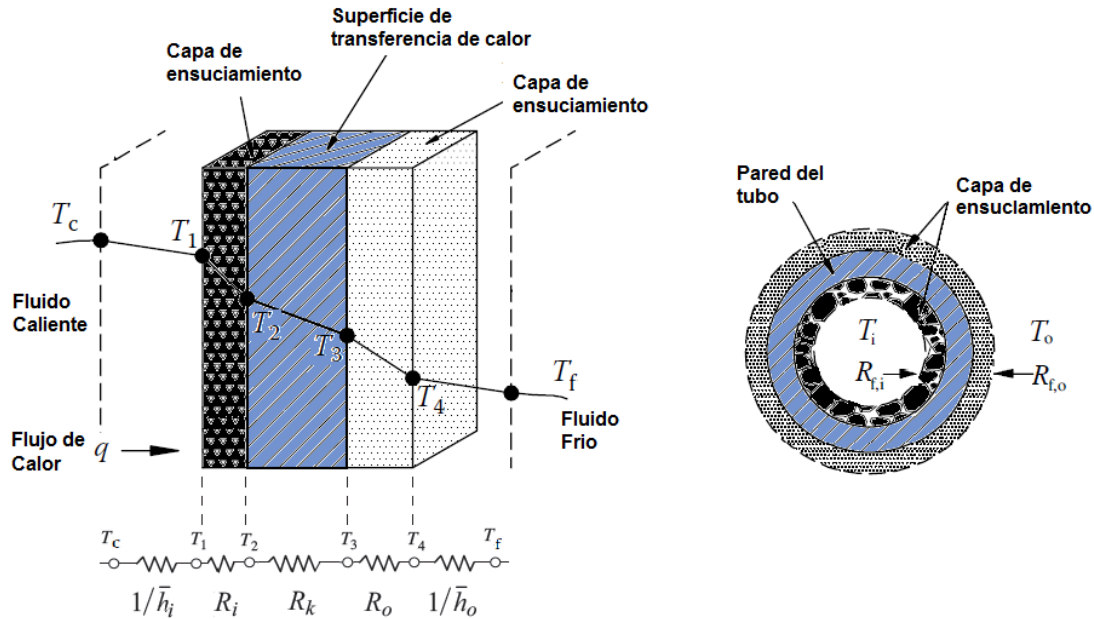


Figura 16. Resistencia adicional causada por el ensuciamiento.

Fuente: Heat Exchanger Design Handbook (Kuppan).

El efecto global de estas acumulaciones sobre la transferencia de calor se representa mediante un factor de ensuciamiento R_f , el cual es una medida de la resistencia térmica introducida por la incrustación y que debe incluirse junto con las otras resistencias térmicas para obtener un coeficiente global de transferencia de calor corregido.

Los factores de ensuciamiento se tienen que obtener experimentalmente, mediante pruebas de desempeño del intercambiador de calor y la determinación de los valores de U , tanto en condiciones de limpieza como de suciedad. El factor de ensuciamiento R_f se puede determinar con la siguiente relación (Epstein, 1983):

$$R_f = \frac{1}{U_{sucio}} - \frac{1}{U_{limpio}} \quad (13)$$

En donde el U_{sucio} (basado en el área exterior, A_o) incorpora las resistencias debido al ensuciamiento:

$$U_{sucio} = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{A_o}{A_i} R_{fi} + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + R_{fo} + \frac{1}{h_o}}$$

El factor de ensuciamiento se puede considerar como una variable durante la operación del intercambiador de calor, que arranca de cero en una superficie limpia, y que aumenta gradualmente conforme se acumulan depósitos sobre dicha superficie.

4.7 Teoría sobre el ensuciamiento.

4.7.1 Definición. El ensuciamiento, es un término originalmente usado en la industria del petróleo, y que se define como la acumulación de depósitos no deseados en las superficies de transferencia de calor que impiden la transferencia de calor y aumenta la resistencia al flujo del fluido (Epstein, 1983; Taborek et al., 1972).

4.7.2 Efectos. El crecimiento de estos depósitos indeseables sobre la superficie de transferencia de calor se va incrementando gradualmente con el tiempo de operación causando una disminución en el comportamiento térmico e hidráulico de los equipos de transferencia de calor, lo cual se ve reflejado en el aumento de los costos de la operación de las unidades de proceso (Bohnet, 1987; Bott, 1995; Muller-Steinhagen, 1999):

- Aumento en el capital de inversión por el sobre-diseño de los equipos de transferencia de calor.
- Aumento en el consumo de energía debido a la pérdida de eficiencia térmica y aumento en la caída de presión.

- Altos costos de mantenimiento por la limpieza de los equipos sucios y corrección de daños adicionales por corrosión debido al ensuciamiento.
- Disminución de la producción por las restricciones causadas o por la salida de los equipos para limpieza.
- Aumento en los costos por la implementación de acciones de mitigación como la utilización de aditivos anti-ensuciamiento.

4.7.2 Tipos de Ensuciamiento. El ensuciamiento es generalmente clasificado en cinco categorías de acuerdo al proceso que gobierna el fenómeno (Taborek et al., 1972; Epstein, 1981):

- Ensuciamiento Particulado.
- Ensuciamiento por Reacción Química.
- Ensuciamiento por Corrosión.
- Ensuciamiento por Precipitación-Cristalización.
- Ensuciamiento Biológico.

En el caso de la industria del petróleo predomina el ensuciamiento por reacción química de compuestos orgánicos, precipitación-cristalización de compuestos inorgánicos, deposición de partículas y corrosión, y estos se pueden dar de manera independiente o en combinación de dos o más mecanismos (Bott, 1995).

4.7.3 Etapas del Ensuciamiento. El fenómeno del ensuciamiento ha sido descrito en cinco subprocesos secuenciales (Epstein, 1981):

- **Iniciación:** las condiciones que promueven el ensuciamiento son establecidas durante este periodo.

- Transporte de masa: los precursores del ensuciamiento son llevados por difusión desde el fluido hasta la superficie de transferencia de calor.
- Deposición: cuando los precursores del ensuciamiento alcanzan la superficie de transferencia de calor se adhieren a esta.
- Remoción: a medida que se forma la capa de ensuciamiento sobre la superficie de transferencia es posible que una parte de ella sea removida por la acción de la erosión y/o transferencia de masa.
- Envejecimiento: las capas de ensuciamiento sobre la superficie de transferencia está sujeta a envejecimiento con el tiempo, que por efectos de polimerización y/o re-cristalización fortalecen su adherencia.

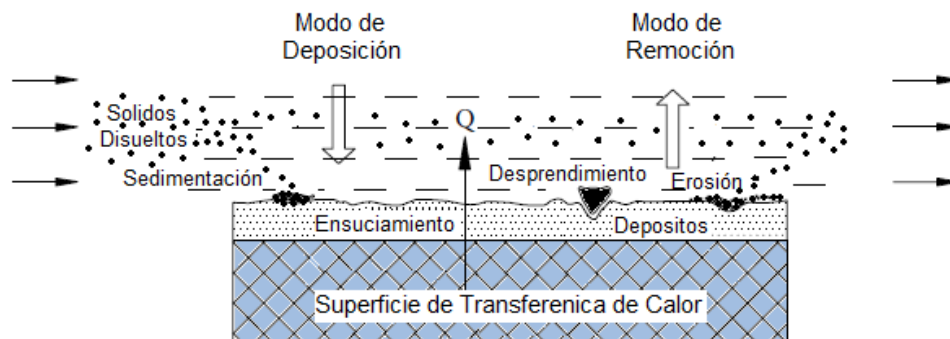


Figura 17. Representación esquemática del fenómeno de ensuciamiento.

Fuente: Heat Exchanger Design Handbook (Kuppan).

4.7.4 Curvas de Ensuciamiento. La formación del ensuciamiento a través del tiempo puede ser considerada como el resultado del proceso de deposición y remoción combinadas, el cual puede estar definido por uno de los siguientes cuatro modos: modo lineal, modo velocidad decreciente,

modo asintótico o modo diente de sierra (Bohnet, 1987; Epstein, 1988; Knudsen and Roy, 1989; Muller-Steinhagen, 1999).

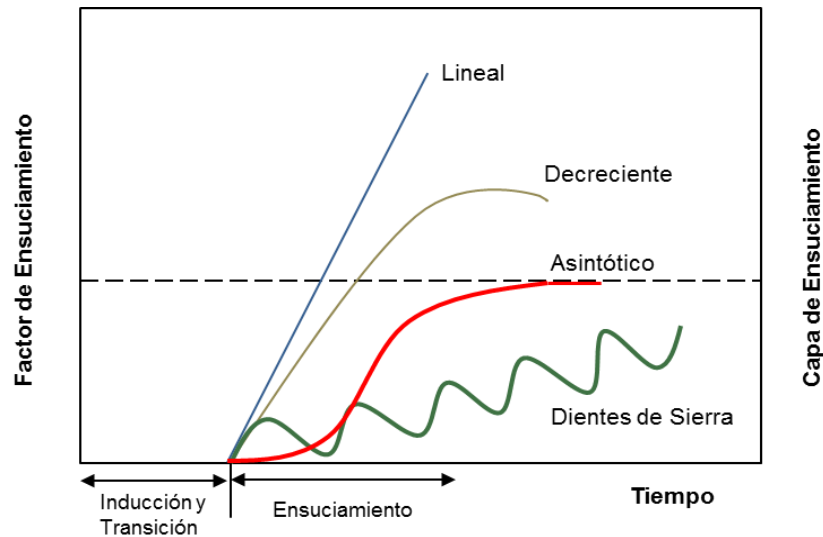


Figura 18. Curvas de Modo de Ensuciamiento.

Fuente: Epstein N. (1988) General Thermal Fouling Models. In: Melo L.F., Bott T.R., Bernardo C.A. (eds) Fouling Science and Technology.

- Modo Lineal: la resistencia por ensuciamiento tiene un comportamiento lineal, se caracteriza por depósitos duros con alta adhesión e indica una mayor velocidad del proceso de deposición.
- Modo Velocidad Decreciente: la resistencia por ensuciamiento inicialmente aumenta, pero después de un corto tiempo empieza a decrecer, este comportamiento es característico de depósitos de baja resistencia mecánica que favorecen la velocidad de remoción.
- Modo Asintótico: la resistencia por ensuciamiento presenta una curva con un comportamiento combinado, en donde al inicio del proceso la velocidad de deposición es mayor que la de remoción (Lineal), posteriormente la de remoción es mayor que la de

remoción (Decreciente) y eventualmente alcanza un valor constante en donde la velocidad de deposición y remoción son iguales. Este modo es el más característico en los intercambiadores de calor.

- Modo Diente de Sierra: este comportamiento es observado cuando el material de depósito es rápidamente removido en cortos intervalos de tiempo y posteriormente cambia la condición incrementándose la velocidad de deposición, proceso que se repite cíclicamente.

4.7.5 Modelos de Predicción del Ensuciamiento. Una gran variedad de modelos han sido propuestos para la predicción de la velocidad de ensuciamiento en los intercambiadores de calor, algunos de los más estudiados son:

Modelo Kern-Seaton: En 1958 presentaron el concepto que el ensuciamiento era el resultado neto de dos procesos que ocurren en simultaneo: deposición y remoción; por lo cual la masa neta de ensuciamiento depositado (M_f) puede ser expresada como la diferencia entre la velocidad de deposición (\dot{M}_d) y velocidad de remoción (\dot{M}_r), obteniendo la velocidad de ensuciamiento neto:

$$\frac{dM_f}{dt} = \dot{M}_d - \dot{M}_r \quad (14)$$

Que en términos de resistencia de ensuciamiento se puede expresar como:

$$\frac{dR_f}{dt} = \phi_d - \phi_r \quad (15)$$

En este modelo la velocidad de deposición (ϕ_d) permanece constante en el tiempo, pero que la velocidad de remoción (ϕ_r) es proporcional a la velocidad de ensuciamiento (M_f) y por lo tanto se incrementa con el tiempo para acercarse la velocidad de deposición (ϕ_d) de manera asintótica. El modelo expresado en términos de resistencia de ensuciamiento en el tiempo t queda:

$$R_f = R_f^* (1 - e^{-Bt}) \quad (16)$$

R_f^* ($= \phi_d/B$) es la resistencia de ensuciamiento asintótico y B es una constante relacionada a la resistencia del depósito. En 1959 Kern y Seaton propusieron que el espesor de la capa ensuciamiento (δ) puede ser calculada así:

$$\frac{d\delta}{dt} = K_1 C_b u - K_2 \tau \delta \quad (17)$$

En donde el primer término se refiere a la velocidad de deposición (ϕ_d), que es propuesta como una función de la concentración másica de las especies del ensuciamiento en el fluido (C_b), y la velocidad del fluido (u):

$$\phi_d = K_1 C_b u$$

Mientras que el segundo término se refiere a la velocidad de remoción, que es propuesta como una función dependiente del esfuerzo cortante (τ) y del el espesor de la capa ensuciamiento (δ):

$$\phi_r = K_2 \tau \delta$$

La desventaja del modelo es que la velocidad de remoción (ϕ_r) depende del espesor de la capa de ensuciamiento (δ), por lo que solamente después de que una notable capa de ensuciamiento haya sido acumulada el proceso de remoción empieza a ser significativo. Además, en condiciones de alta velocidad de flujo del fluido el proceso de deposición sería suprimido (Watkinson, 1968).

A pesar de que su modelo era muy generalizado, al no especificar ni tener en cuenta algún mecanismo particular del ensuciamiento, Kern and Seaton introdujeron la idea básica de abordar el ensuciamiento como función de las condiciones de proceso y el tiempo.

Este modelo ha sido revidado por posteriores investigadores, quienes con base en resultados obtenidos mediante experimentación, han planteado un gran número de diferentes modelos que describen los procesos de deposición y remoción, además de tener en cuenta uno o varios mecanismos de ensuciamiento.

Modelo Watkinson: En 1968 este investigador revisó el modelo Kern-Seaton empleando un factor llamado probabilidad de adherencia (S), el cual representa la fracción de partículas que son transportadas a la superficie de transferencia de calor y se adhieren a ella, y que tiene en cuenta los efectos de la temperatura de la superficie de transferencia de calor mediante una correlación tipo Arrhenius.

$$\phi_d = K_3 K_m (C_b - C_s) S \quad (18)$$

(C_s) representa la concentración másica de las especies del ensuciamiento en la superficie de transferencia, (K_m) es un coeficiente de transferencia de masa, y el factor llamado probabilidad de adherencia (S) está definido por:

$$S = \frac{K_4 \exp\left(\frac{-E_f}{R_g T_s}\right)}{f u^2}$$

En donde (E) es la energía de activación de la reacción de ensuciamiento, (R_g) es la constante universal de los gases, (T_s) es la temperatura de la superficie de transferencia, (f) es el factor de fricción y (u) es la velocidad del fluido.

Modelo Taborek: En 1972 Taborek y colaboradores plantearon que la velocidad de deposición está gobernada por la reacción química del ensuciamiento, dada por la forma simple de la ecuación de Arrhenius, y que además se encuentra afectada por el orden de dicha reacción:

$$\phi_d = K_5 A \exp\left(\frac{-E_f}{R_g T_s}\right) (C_r)^n \quad (19)$$

Aquí (A) denota el término pre-exponencial de Arrhenius, (C_r) es la concentración másica de las especies reactantes y (n) es el número de orden de la reacción. Taborek y colaboradores asumieron que la velocidad de remoción era el resultado de un balance de fuerzas entre los esfuerzos cortantes y resistencia de los depósitos adheridos.

$$\phi_r = K_6 \frac{\tau}{R_b} \quad (20)$$

En donde (R_b) es como la resistencia del depósito adherido, el cual es un parámetro difícil de estimar.

Modelo Epstein: En 1994 Epstein observó que en el tiempo cero del proceso de ensuciamiento era difícil determinar la concentración de especies de ensuciamiento en la superficie de transferencia y se requería que un proceso de difusión ocurriera con anterioridad. Epstein desarrolló un modelo para la velocidad de ensuciamiento inicial en la superficie de transferencia por reacción química, la cual es proporcional al tiempo de residencia del fluido sobre la superficie:

$$\left(\frac{dR_f}{dt}\right)_{t=0} = \frac{m\phi_d}{k_f\rho_f} \quad (21)$$

Donde, (m) es el factor estequiométrico, (k_f) es la conductividad térmica del ensuciamiento, (ρ_f) es la densidad del ensuciamiento y la velocidad de deposición (ϕ_d) está dada por:

$$\phi_d = \frac{C_b}{\left(\frac{K_7 S_c^{2/3}}{u\sqrt{f}}\right) + \left(\frac{K_8 \rho f u^2}{\mu \exp(-E_f/R_g T_{so} C_s^{n-1})}\right)} \quad (22)$$

En donde, (S_c) es el número de Schmidt, (ρ) es la densidad del fluido, (μ) es la viscosidad del fluido, (n) es el número de orden de la reacción y (T_{so}) es la temperatura de la superficie de transferencia en el tiempo cero. El primer término del denominador representa la transferencia de masa del sedimento o precursor del ensuciamiento a la superficie de transferencia y el segundo término representa los mecanismos de reacción y de adherencia.

4.7.6 Modelos de Umbral de Ensuciamiento. En 1978 Exxon y el Departamento de Energía de Estados Unidos realizaron un programa conjunto para el desarrollo de combustión en lecho fluidizado. Uno de los experimentos consistía en desviar una corriente de crudo, de un tren de

precaliente de una refinería de Exxon, y hacerla pasar por a través de cuatro secciones de calentamiento eléctrico en paralelo, para luego retornarlo a la planta.

Los detalles de la discusión de las tendencias de ensuciamiento observadas fueron reportados por Exxon y posteriormente un resumen fue presentado por Scarborough y colaboradores en 1979. En ese reporte se observa que, a una misma temperatura, pero a diferentes condiciones de velocidad el ensuciamiento pasa de ser significativo a indetectable.

Modelo Ebert-Panchal: Con base en el análisis de los datos reportados por Exxon y Scarborough y colaboradores, estos autores plantearon en 1995 que la reducción significativa del fenómeno del ensuciamiento podría ser explicada por la combinación de efectos que reducían el espesor de la capa límite e incrementaban la remoción de los depósitos de ensuciamiento.

Las teorías anteriores se basaban en la predicción de la remoción de los depósitos de ensuciamiento desde la superficie de transferencia, pero Ebert y Panchal enfocaron su estudio en la remoción de los depósitos de ensuciamiento desde la capa límite.

Para desarrollar su modelo asumieron que las reacciones formadoras de ensuciamiento ocurren en la capa límite térmica, a una temperatura media de película (T_f), y que subsecuentemente las partículas de ensuciamiento son removidas de la capa límite térmica por los mecanismos de transporte.

La correlación propuesta para la predicción lineal de la velocidad de ensuciamiento, temperatura media de película y velocidad del fluido es:

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta \exp\left(-E/R_g T_f\right) - \gamma \tau \quad (23)$$

En donde, el primer término describe la velocidad de deposición y relaciona la reacción química y la temperatura de película, mientras el segundo término describe la velocidad de remoción que depende de la velocidad del fluido y los esfuerzos cortantes en la superficie de transferencia,

(α, β, γ) son constantes del modelo, (Re) es el número de Reynolds, y temperatura media de película (T_f) está definida por:

$$T_f = T_b + 0,55(T_s - T_b) \quad (24)$$

Avances del Modelo de Umbral de Ensuciamiento: Después de que Ebert y Panchal publicaron su modelo, un gran número de investigadores han realizado variaciones a este.

El mismo Panchal en 1997 modificó el modelo, con el fin de incluir el calor específico y la conductividad térmica del fluido, adicionando el número de Prandtl (Pr), y la nueva expresión del modelo quedaría como:

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta Pr^{-0,33} \exp\left(-E/R_g T_f\right) - \gamma \tau \quad (25)$$

Otros modelos muy referenciados en la literatura son los desarrollados por: Polley (2002), Saleh (2003), Srinivasan-Watkinson (2005), Nasr-Givi (2006), Ma-Wang (2009); Yang (2013); Fuentes (2014).

4.7.7 Parámetros que Influencian el Ensuciamiento. Las condiciones que pueden influenciar en el ensuciamiento o que afectan el impacto del ensuciamiento sobre el intercambio de calor pueden ser divididos como: propiedades del fluido, parámetros operacionales y parámetros de diseño del intercambiador de calor (Garrett-Price et al, 1985; Gudmundsson, 2005;).

Propiedades del Fluido: La propensión de un fluido al ensuciamiento depende de sus propiedades como viscosidad y densidad, si tienen impurezas o sólidos suspendidos, la naturaleza de las sustancias disueltas, al igual que de su composición molecular.

Parámetros Operacionales: Temperatura del fluido, temperatura de la superficie de transferencia, y velocidad del fluido son las condiciones operacionales que más afectan el comportamiento del ensuciamiento.

Parámetros del Intercambiador de Calor: Parámetros como tipo de material y rugosidad de la tubería, orientación, tipo y geometría del intercambiador, influyen en el incremento o disminución del fenómeno de ensuciamiento.

4.8 Simulación de procesos en Aspen Plus

La simulación de procesos es el estudio de un sistema mediante la manipulación computacional de la representación matemática del fenómeno físico; de esta manera, se busca establecer el comportamiento de una operación de estructura conocida (I. D. Gil C , et al).

Así que se podría definir un simulador de procesos como un paquete informático que puede realizar cálculos de balances de materia y energía de un equipo u operación básica aislada, una unidad de planta o la planta completa. Así mismo, las técnicas de simulación de procesos se fundamentan en el desarrollo y obtención de uno o varios modelos matemáticos del sistema, que reproduce su comportamiento en condiciones estacionarias o en estado no estacionario (simulación dinámica).

La simulación es una herramienta informática importante, ya que puede permitir, por ejemplo, desde el diseño de un intercambiador de calor hasta el desarrollo y optimización de una compleja unidad de proceso (F. Gavilanes Carrasco). Los simuladores de procesos comerciales y académicos más divulgados en la actualidad son, entre *otros*: *Speed Up*, *Aspen Plus*, *Design II*, *Hysym*, *Aspen Hysys*, *Chemcad* y *Pro II*.

Aspen Plus es un software comercial de simulación de procesos, desarrollado por la empresa norteamericana Aspen Technology (Aspen Tech), para el diseño y optimización de procesos químicos y petroquímicos en estado estacionario y dinámico. Dicho Software es constantemente

utilizado en la industria de petróleo y gas, pues permite modelar más de 50 operaciones unitarias, usando una base de datos de más de 2000 compuestos y sus propiedades, como sustancias puras, electrólitos, crudos, correlaciones específicas para fracciones de petróleo, procesos de reciclaje, entre otros (V. M. Jennifer Dymont).

Por otra parte, uno de los principales requisitos para la simulación en *Aspen plus* es la elección de uno o varios paquetes termodinámicos, con el fin de calcular correctamente las propiedades físicas y los coeficientes de interacción de todas las corrientes (R. A. Fernández Rocha).

Por lo cual se debe elegir bien el modelo termodinámico a utilizar, ya que en muchas ocasiones el programa converge con la información suministrada, pero, si no es empleado el modelo adecuado, las especificaciones de salida no se ajustan a la realidad física del proceso.

Para escoger un paquete termodinámico se deben tener en cuenta criterios como: el tipo de sustancia, la operación unitaria, composición, fases involucradas, presión, temperatura, entre otros (Aspen Tech).

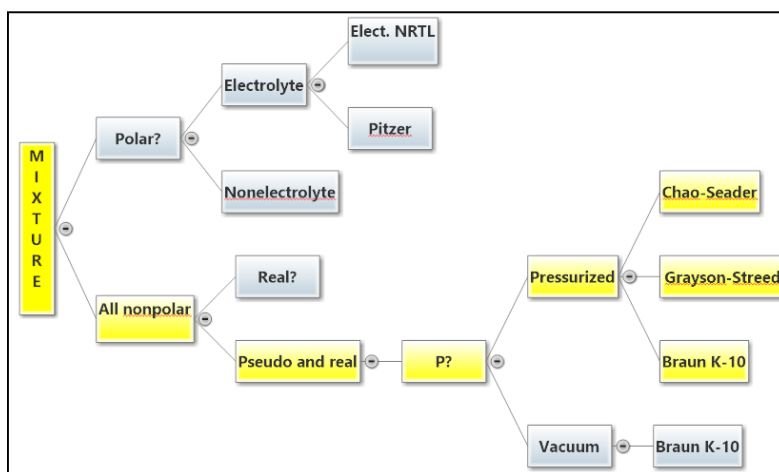


Figura 19. Diagrama de flujo para la selección del paquete termodinámico.

Fuente: CHE (s.f.) Property Selection Recuperado de:

<http://www.che.utah.edu/~sutherland/PropertySelection.pdf>

La Figura 19 muestra el diagrama propuesto por Carlson para la elección del paquete termodinámico (T. A. Ring). Teniendo en cuenta el tipo de sustancia, el camino resaltado de color amarillo presentado en el esquema es apropiado para el presente trabajo, arrojando, como posibles alternativas, los modelos de Chao-Seader (CS), Grayson-Streed (GS) y Braun K-10. De igual manera, la Tabla 4 muestra los paquetes propuesto por Aspen Tech según la operación a modelar.

Tabla 4.

Paquetes Termodinámicos en función del 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-Jofee (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
Separación de hidrocarburos	PR, SRK
Aromáticos	Wilson, NRTL, UNIQUAC
Hidrocarburos sustituidos (cloruro de vinilo, acrilonitrilo)	PR, SRK

Tipo de proceso	Paquete Termodinámico recomendado
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

Fuente: CHE (s.f.) Property Selection Recuperado de:

<http://www.che.utah.edu/~sutherland/PropertySelection.pdf>

De acuerdo a dicha información, el modelo de GS se recomienda para torres atmosféricas y de vacío, que son el tipo de unidades a simular; contrario a esto, el modelo de Braun k-10 se plantea sólo para torres de vacío, mientras que el modelo de CS no es propuesto para ninguno de los dos tipos de destilaciones.

Así mismo, la ecuación de estado de Peng Robinson también es acorde a la operación; sin embargo, Peng Robinson presenta buenos resultados para componente reales, temperatura reducida mayor a 0,7 y sin fases líquidas inmiscibles, por lo tanto, *Aspen* recomienda como elección, para la simulación de crudos por medio de pseudo-componentes, el modelo GS y sus variantes. Para la fase de agua libre usó STEAM-TA (modelo especializado para esta sustancia en fase libre).

La caracterización del crudo se realiza mediante *Assay/Blend*, ubicada en el entorno básico de la simulación en la interfaz *Properties*. Para la caracterización, *Aspen Plus* requiere ciertos paquetes de información, entre ellos las curvas de destilación, *light ends* (composición de livianos) y *bulk properties* (propiedades másicas), y aunque no es necesario ingresar todos los datos

mencionados al simulador, una cantidad mayor de información permite una caracterización más aproximada a la realidad.

4.9 Simulación en Aspen Exchanger Design & Rating

El *Aspen Exchanger Design and Rating* (EDR) es un programa especializado en la simulación de intercambiadores, que hace parte de la plataforma tecnológica ofrecida por Aspen Tech. Este permite a los usuarios que realizan simulaciones en *Aspen Plus* y *Aspen HYSYS* especificar el tamaño y la geometría de los intercambiadores de calor directamente al diagrama de flujo, proporcionando un modelado térmico e hidráulico riguroso que da mayor precisión a la simulación.

Aspen EDR es una muy buena herramienta para la simulación de intercambiadores de calor que ofrece una amplia gama de diseño de intercambiadores, evaluación de ensuciamiento, evaluación de coeficientes de transferencia de calor, restricciones por velocidad o debido a condiciones que violan los límites de diseño de acuerdo a los estándares de refinería con división II, tipo R y estampe ASME.

4.10 Análisis de regresión

El análisis de regresión es una técnica estadística que se utiliza para investigar y modelar la relación entre variables. La regresión es aplicada en variados campos como la ingeniería, física y química, ciencias biológicas y de la vida, economía, administración y ciencias sociales; y son

frecuentemente usados para analizar datos de experimentos no planeados, como serían el caso la observación de fenómenos no controlados o de registros históricos (Montgomery).

En la mayoría de las aplicaciones de regresión los modelos son una aproximación que representa de manera simplificada a la verdadera relación funcional entre las variables de interés. Esas relaciones funcionales frecuentemente están basadas en una teoría física, química, termodinámica o de otra disciplina científica o técnica, los cuales son considerados modelos mecánicos; mientras que los modelos de regresión se suponen son *modelos empíricos* (Montgomery).

El análisis de regresión se enfoca en encontrar la mejor relación entre una variable dependiente y y una o unas variables independientes x , cuantificando la fuerza de esa relación empleando métodos que permitan predecir de manera confiable los valores de respuesta de la variable y , dados los valores de la variable o las variables x , proceso llamado ajuste del modelo a los datos.

Si la relación encontrada entre la variable independiente x y la variable dependiente y es exacta y no contiene ningún componente aleatorio o probabilístico, se trata de una relación determinista entre dos variables científicas.

Pero en los fenómenos científicos, físico-químicos y de ingeniería, la relación no es determinista, es decir, un valor de x dada no siempre produce el mismo valor de y . Por lo cual, las relaciones son comunmente de naturaleza probabilística, toda vez que la relación no puede considerarse exacta, es decir existe un componente aleatorio en el modelo que relaciona las variables (Walpole).

El análisis de regresión comprende además la comprobación de la adecuación del modelo, en donde se estudia lo apropiado del modelo y la calidad del ajuste determinado. Mediante esos

análisis se puede determinar la utilidad del modelo de regresión. El resultado de la comprobación de adecuación puede indicar que el modelo es razonable, o que debe modificarse.

4.10.1 Análisis de regresión lineal simple. Un modelo donde una sola variable regresora o predictora x explica o tiene relación con una variable de respuesta y , y que además esta relación puede ser representada por una línea recta, se dice que este es un modelo de regresión simple:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (26)$$

A los parámetros β_0 (ordenada al origen) y β_1 (pendiente) se les llaman los coeficientes de regresión, que son desconocidos y que se tienen que estimar. ε es el error que se incurre en la predicción de los parámetros y normalmente recibe el nombre de error aleatorio o alteración aleatoria.

Se parte de la base que los errores tienen promedio cero y varianza desconocida, que los errores no están correlacionados, que la respuesta y es una variable aleatoria, por lo que hay una distribución de probabilidades de y para cada valor posible de x .

Generalmente para estimar β_0 y β_1 se utiliza el método de mínimos cuadrados. Esto es, se estima β_0 y β_1 tales que la suma de los cuadrados de las diferencias entre las observaciones y_i y la línea recta sea mínima, obteniéndose:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (\text{modelo muestral de regresión})$$

Una vez estimados los valores de los parámetros β_0 y β_1 , que se denominan b_0 y b_1 respectivamente, se llega al modelo ajustado de regresión lineal simple:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x \quad (27)$$

Estos estimadores b_0 y b_1 hallados por mínimos cuadrados tienen algunas características importantes como que son estimadores insesgados de los parámetros β_0 y β_1 del modelo, son

combinaciones lineales de las observaciones y_j , y tienen varianza mínima en comparación con todos los demás estimadores insesgados que sean combinaciones lineales de las y_j .

Una vez definido el modelo ajustado de regresión lineal simple, generalmente se procede a realizar prueba de hipótesis acerca de que los errores estén distribuidos en forma normal e independiente y establecer intervalos de confianza.

Dentro de las pruebas están la *prueba t* para probar la hipótesis que la pendiente es igual a una constante, y la prueba de significancia de la regresión con la hipótesis nula que no hay relación lineal entre y y x . Esta última se puede realizar mediante el uso del *estadístico t* o el uso del método de *análisis de varianza*.

4.10.2 Análisis de regresión lineal múltiple. En la mayoría de los problemas de investigación en los que se aplica el análisis de regresión se necesita más de una variable independiente para el modelo de regresión. La complejidad de la mayoría de mecanismos científicos es tal que, con el fin de predecir una respuesta importante, se requiere un modelo de regresión múltiple. Cuando este modelo es lineal en los coeficientes se denomina modelo de regresión lineal múltiple (Walpole).

Para el caso de k variables independientes, el modelo se describe como:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (28)$$

Y la respuesta estimada se obtiene a partir del modelo de regresión ajustado:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k \quad (29)$$

En donde cada coeficiente de regresión β_i se estima por medio de b_i , a partir de los datos muestrales, usando el método de los mínimos cuadrados. Como ocurre en el caso de una sola variable independiente (regresión lineal simple), a menudo el modelo de regresión lineal múltiple

es una representación adecuada de una estructura más complicada dentro de ciertos rangos de las variables independientes o regresoras (Walpole).

A fin de poder determinar las propiedades de los estimadores obtenidos al aplicar distintos métodos de estimación y realizar diferentes contrastes, se debe especificar un conjunto de hipótesis sobre el modelo de regresión lineal múltiple.

Existen tres grupos de hipótesis siguientes: las hipótesis sobre el error ϵ , las hipótesis sobre las variables regresoras x_i , y las hipótesis sobre los coeficientes de regresión del modelo β_i .

Hipótesis sobre el error ϵ :

- El valor esperado del error es cero (Linealidad):

$$E[\epsilon_i] = 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

- Todos los términos del error tienen la misma varianza (Homoscedasticidad): $\text{Var}[\epsilon_i] =$

$$\text{Var}[\epsilon_j] = \sigma^2 \quad \forall i \neq j$$

- Los errores no están autocorrelacionados unos con otros (Independencia).
- El error sigue una distribución normal (Normalidad):

$$\epsilon \sim (0_n, \sigma^2).$$

Hipótesis sobre las variables regresoras x_i :

- Las variables regresoras son fijas o deterministas.
- Las variables regresoras no están correlacionadas con el error aleatorio.
- Las variables regresoras no presentan relación lineal exacta entre sí.
- Las variables regresoras son medidas sin error.

Hipótesis sobre los coeficientes de regresión del modelo β_i :

- La única hipótesis es la de permanencia estructural, lo cual quiere decir que los parámetros poblacionales, β_i , se mantienen constantes a lo largo de toda la muestra:

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k .$$

Si los datos cumplen estas hipótesis entonces el teorema de Gauss-Markov establece que el método de estimación de mínimos cuadrados va a producir coeficientes de regresión óptimos, en el sentido que los parámetros estimados van a estar centrados y van a ser de mínima varianza (Montgomery).

4.11 Prueba de hipótesis en la regresión lineal múltiple

En el análisis de la regresión múltiple una vez estimados los parámetros del modelo, generalmente se procede a responder las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es la adecuación general del modelo?
- ¿Cuáles variables regresoras específicas parecen importante?

Existen varios procedimientos de prueba de hipótesis que son de gran utilidad para contestar estas preguntas como son el análisis de varianza, el *estadístico de prueba F*, el *valor P* y el *estadístico de prueba t* (Montgomery).

4.11.1 Análisis de varianza de la regresión lineal múltiple. El análisis de varianza es una técnica estadística que prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. En el caso de la regresión lineal múltiple, el análisis de varianza es muy útil para probar la significancia del modelo de regresión lineal múltiple estimado y determinar si existe una relación lineal entre la variable de respuesta y un subconjunto de los regresores x_1, x_2, \dots, x_k .

Las hipótesis apropiadas que sirven para determinar si el modelo explica una cantidad significativa de variación son:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ para al menos una } j$$

El rechazo de la hipótesis nula implica que al menos uno de los regresores x_1, x_2, \dots, x_k contribuye al modelo significativamente (Montgomery).

En el análisis de varianza se fundamenta en una partición de la variabilidad total de la variable de respuesta y , que inicia con la identidad:

$$y_i - \bar{y} = (\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i)$$

La cual, después de un tratamiento matemático concluye en la identidad fundamental del análisis de varianza para un modelo de regresión:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (30)$$

Que en forma simbólica se escribe:

$$SS_T = SS_R + SS_E$$

En donde:

SS_T (suma de cuadrados total) es la suma corregida de cuadrados de las observaciones que mide la variabilidad total de las observaciones.

SS_R (suma de cuadrados de regresión) es la suma de cuadrados que mide la cantidad de variabilidad en las observaciones y_i explicada por la línea de regresión.

SS_E (suma de cuadrados de los residuales o el error) es la suma de cuadrados que mide la cantidad de variación residual que queda sin explicar por la línea de regresión.

4.11.2 Estadístico F0 de la regresión lineal múltiple. La distribución F, también llamada distribución de razón de varianzas, es ampliamente usada en la comparación de varianzas muestrales y en análisis que implican dos o más muestras.

Para contrastar la hipótesis nula planteada en el análisis de varianza se debe utilizar un estadístico de prueba que compare la igualdad de las varianzas de la población, este es el estadístico F_0 , o estadístico de razón de varianzas o cociente corregido de varianzas muestrales, el cual está definido por:

$$F_0 = MS_R / MS_E \quad (31)$$

MS_R es el cuadrado medio de la regresión definido por $MS_R = SS_R / k$

MS_E es el cuadrado medio de residuales definido por $MS_E = SS_E / (n - k - 1)$

El criterio de decisión para rechazar la H_0 , está definido por:

$$F_0 > F_{\alpha, k, n-k-1}$$

Si el valor observado de F_0 es grande, es muy probable que al menos un $\beta_j \neq 0$, entonces el estadístico F_0 tiene una *distribución F* no central, con k y $n-k-1$ grados de libertad.

4.11.3 Valor P de la regresión lineal múltiple. De manera alternativa, puede utilizarse el enfoque del Valor P como auxiliar en la toma de decisiones acerca del modelo de regresión múltiple. El **Valor P** es el nivel (de significancia) más bajo en el que el valor observado del estadístico de prueba es significativo (Walpole).

El valor P se puede considerar simplemente como la probabilidad de obtener un conjunto de datos dado que las muestras provienen de la misma distribución. Una probabilidad muy pequeña o un valor pequeño de valor P evidentemente refuta la H_0 , y la conclusión es que las medias de la población son significativamente diferentes.

El criterio de decisión para rechazar la H_0 , es que el **Valor P** del estadístico F_0 es menor que el nivel de significancia α .

4.11.4 R^2 y R^2 ajustado de la regresión lineal múltiple. El coeficiente de determinación múltiple R^2 y R^2 *ajustado* son otras dos formas complementarias de evaluar la adecuación general del modelo ajustado de regresión múltiple (Montgomery).

El R^2 se define como la proporción de la varianza total de la variable explicada por el modelo ajustado, y refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar. El R^2 se calcula así:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (32)$$

El resultado del R^2 oscila entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que está intentando explicar. De forma inversa, cuanto más cerca de cero, menos ajustado estará el modelo y, por tanto, menos fiable será.

La cantidad R^2 tan sólo indica qué proporción de la variación total de la respuesta y es explicada por el modelo ajustado. Con frecuencia se reporta $R^2 \times 100\%$ que se interpretan como el porcentaje de variación explicado con el modelo propuesto.

Un alto valor de R^2 no implica necesariamente que el modelo de regresión sea el adecuado, debido a que R^2 aumenta siempre, cuando se agrega un regresor al modelo, independiente de que esta sea estadísticamente significativa o no.

Como corrección a esta debilidad se utiliza el R^2 ajustado, que proporciona un ajuste para los grados de libertad, y está definido como:

$$R^2_{ajustado} = 1 - \frac{SS_E/(n - k - 1)}{SS_T/(n - 1)}$$

$$R^2_{ajustado} = 1 - \left(\frac{n - 1}{n - k} \right) (1 - R^2) \quad (33)$$

Por lo que el agregar variables regresoras innecesarias al modelo, el valor de R^2 ajustado disminuirá con frecuencia (Montgomery).

4.11.5 Prueba sobre un coeficiente individual de la regresión lineal múltiple. Otra prueba de gran utilidad en un modelo de regresión lineal múltiple es la de determinar la significancia de cualquier coeficiente de regresión individual. La hipótesis a probar es:

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

El *estadístico t* es el utilizado para comprobar la hipótesis, y está definido por:

$$t = \frac{b_j}{se(b_j)} \quad (34)$$

En donde, $se(b_j)$ es conocido como el error estándar (*se*) del coeficiente de regresión b_j . El criterio de decisión para rechazar la H_0 , está definido por:

$$|t_0| > t_{\alpha/2, n-k-1}$$

Si no se rechaza la hipótesis $H_0: \beta_j = 0$, la conclusión que se obtiene es que la variable regresora x_j es insignificante (explica una cantidad insignificante de la variación de y) en la presencia de los demás regresores y se puede eliminar del modelo (Walpole).

4.11.6 Presentación de los resultados del análisis de la regresión lineal múltiple. Los métodos estadísticos deben usarse para el análisis de datos con el fin de que los resultados y las conclusiones sean objetivos y no de carácter apreciativo (Montgomery).

Para el manejo de una gran cantidad de datos y de un buen número de cálculos, actualmente existen varias aplicaciones informáticas diseñadas para auxiliar el análisis de los datos.

La metodología que conlleva el análisis de regresión lineal múltiple tanto en la estimación de los parámetros o coeficientes del modelo ajustado, como en la comprobación de la adecuación del ajuste del modelo por medio de la prueba de hipótesis es dispendiosa, por lo tanto el uso de software estadístico es de gran utilidad en los cálculos, presentación y análisis de los resultados.

A continuación en las tablas 5 y 6 se presenta una típica estructura para la presentación de los resultados del análisis de regresión lineal múltiple.

Tabla 5.

Análisis de varianza del modelo de regresión lineal múltiple.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	F ₀	Valor P
Regresión	SS_R	k	MS_R	MS_R/MS_E	--
Residual o Error	SS_E	$n - k - 1$	MS_E		
Total	SS_T	$n - 1$			

Fuente: Douglas C. Montgomery “Diseño y Análisis de Experimentos”

Tabla 6.

Análisis de significación de los parámetros del modelo de regresión lineal múltiple.

Variable	Coefficiente Estimado	Error Estándar	Prueba t para H ₀ : Coeficiente = 0	Valor P
x_1	--	--	--	--
x_2	--	--	--	--
x_3	--	--	--	--
x_j	--	--	--	--

Fuente: Douglas C. Montgomery “Introducción al Análisis de Regresión Lineal”

5. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo y el cumplimiento de los objetivos se empleó un plan metodológico, resumido en la siguiente figura:

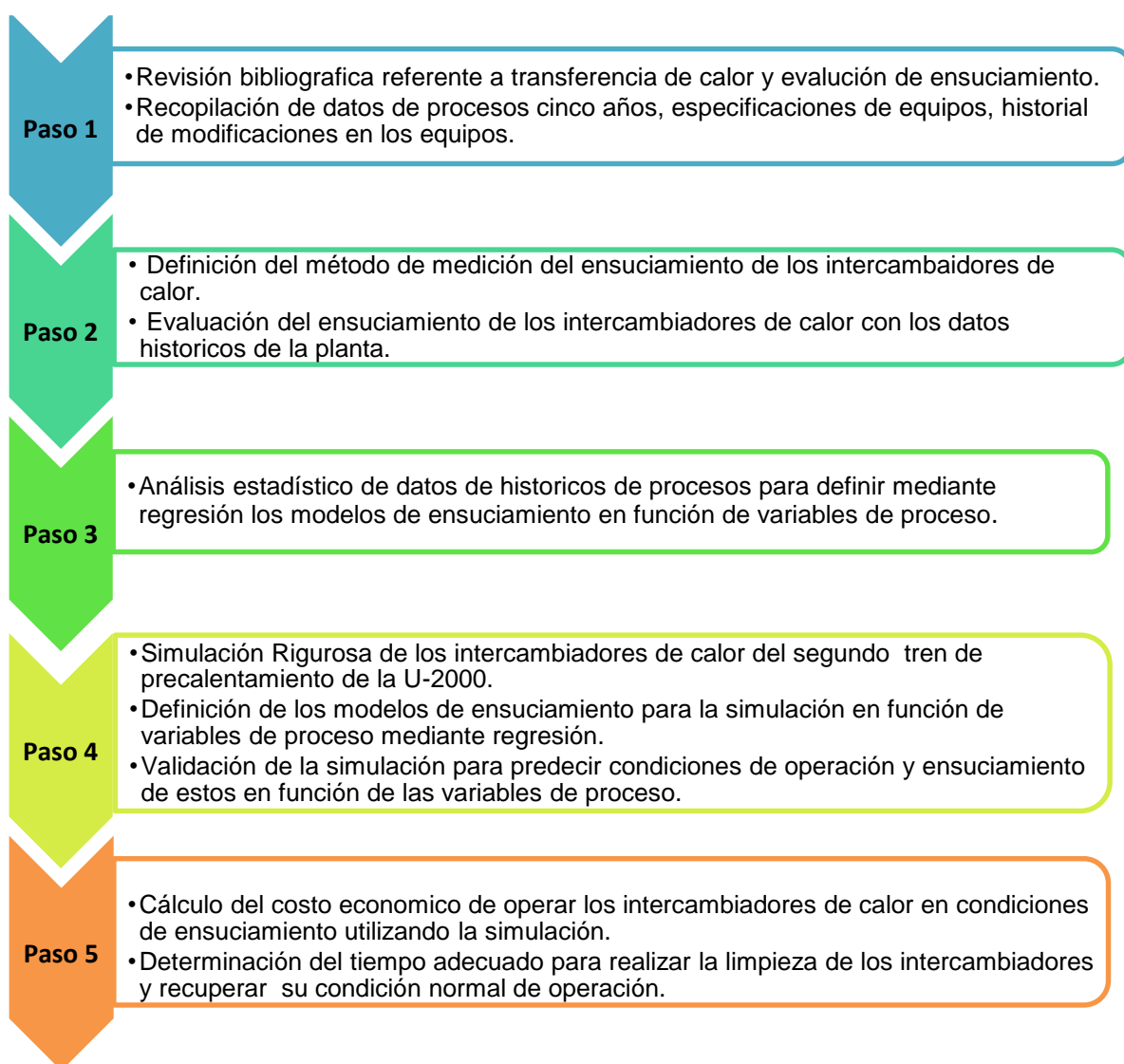


Figura 20. Metodología desarrollada.

5.1 Revisión bibliográfica y recopilación de datos

Se recopiló las hojas de datos de especificaciones de diseño de cada uno de los intercambiadores de calor de la unidad de destilación de crudos U-2000, de donde se obtuvieron los principales datos de diseño necesarios para la evaluación del comportamiento térmico de los intercambiadores de calor, el cálculo el ensuciamiento de los mismos, y el modelamiento riguroso de cada uno de ellos en el software comercial de simulación Aspen EDR.

En tablas de Excel se capturaron datos históricos, de aproximadamente 5 años, de las variables de proceso del tren de precalentamiento, como flujos y temperaturas de entrada y salida de la corriente fría y caliente; utilizando el software PI System.

Desarrollado por la empresa Norte Americana OSIsoft, *PI System* es un software especializado en la captura, almacenamiento y gestión de datos de las unidades de proceso en tiempo real. Este cuenta con un componente llamado PI Office que permite una integración con las aplicaciones de Office.

También se recolectó información de referencia sobre el balance térmico de los intercambiadores de calor, modelación y evaluación del ensuciamiento, evaluación de ensuciamiento realizado en otras refinerías, aplicación de software comerciales para la simulación de procesos e intercambiadores de calor, tratamiento estadístico de datos, análisis de experimentos, regresión múltiple y análisis de varianza, entre otros.

La información recopilada del proceso fue utilizada para definir la metodología para evaluar el ensuciamiento de intercambiadores en función del tiempo, para el desarrollo de la simulación y para validación de la misma, y para la generación de un modelo empírico que pronostique una manera aproximada el ensuciamiento de los intercambiadores de calor.

A continuación en la tabla 7 se relaciona los instrumentos instalados para la medición de las variables de flujo y temperatura en el segundo tren de precalentamiento de la unidad U-2000

Tabla 7.

Instrumentación del segundo tren de precalentamiento la U-2000.

Intercambiador	Lado	Producto	Indicador de Flujo	Indicador de Temperatura Entrada	Indicador de Temperatura Salida
E-2005A	Tubos	Fondos de Vacío	FIT-20032	TIT-20168	TIT-20169
	Coraza	Crudo	FIT-20077	TIT-20057	TIT-20058
	Tubos	Crudo	FIT-20004	TIT-20058	TIT-20060
E-2009AD	Coraza	GPV	FIT-20026 FIT-20118	TIT-20159	TIT-20160
	Tubos	Crudo	FIT-20005	TIT-20058	TIT-20059
	Coraza	GPV	FIT-20026 FIT-20118	TIT-20059	TIT-20161
E-2009BC	Tubos	Crudo	FIT-20005	TIT-20060	TIT-20062
	Coraza	Reflujo Inferior	FIT-20008	TIT-20091	TIT-20092
	Tubos	Crudo	FIT-20004	TIT-20059	TIT-20061
E-2005	Coraza	Reflujo Inferior	FIT-20008	TIT-20091	TIT-20093
E-2007	Coraza	Reflujo Inferior	FIT-20008	TIT-20091	TIT-20093
	Tubos	Fondos de Vacío	FIT-20032	TIT-20165	TIT-20166
	Coraza	Crudo	FIT-20005	TIT-20062	TIT-20064
E-2010AC	Tubos	Fondos de Vacío	FIT-20032	TIT-20165	TIT-20167
	Coraza	Crudo	FIT-20004	TIT-20061	TIT-20063
	Tubos	Fondos de Vacío	FIT-20032	TIT-20165	TIT-20167
E-2010BD	Coraza	Crudo	FIT-20004	TIT-20061	TIT-20063

Y en la tabla 8 se muestra el esquema de la plantilla de Excel utilizada para capturar los datos de las variables de proceso de la planta con la ayuda de la aplicación PI system.

Tabla 8.

Plantilla utilizada para la captura de datos históricos de proceso.

E2005						
Fecha Inicio	01/01/2012 00:00					
Fecha Final	01/06/2017 00:00					
Lapso de Tiempo	24h					
Corriente	Lado Frio (Crudo)			Lado Caliente (Reflujo Inferior)		
Variable	Flujo Crudo	T° Entrada	T° Salida	Flujo Ref. Int.	T° Entrada	T° Salida
TAG PI Sysytem	U2000-FIT20005	U2000-TIT20060	U2000-TIT20062	U2000-FIT20008	U2000-TIT20091	U2000-TIT20092

5.2 Definición del método de medición del ensuciamiento

El análisis térmico de un intercambiador de calor es gobernado por la primera ley de la termodinámica (principio de la conservación de la energía), en donde el calor liberado por la corriente caliente es totalmente ganado por la corriente fría (Sadik Kakac).

Este básico balance de energía es calculado mediante la ecuación 2:

$$q_{transferido} = q_{cedido\ por\ el\ fluido\ caliente} = q_{absorbido\ por\ el\ fluido\ frio}$$

$$q = (\dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T)_{caliente} = (\dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T)_{fria}$$

$$q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

Hay 4 métodos para calcular la efectividad térmica de un intercambiador de calor (Kuppan):

- Método $\epsilon - NTU$
- Método $P - NTU_c$
- Método LMTD

- Método $\psi - P$

Que para los intercambiadores de calor de tubo y coraza, en donde se cuente con la medición de las temperaturas de entrada y salida de las corrientes frías y calientes, se recomienda el método de la diferencia de temperatura media logarítmica **LMTD** (Kuppan).

Aquí la velocidad de transferencia de calor es relacionado con la geometría del intercambiador, los parámetros de flujo y temperaturas de operación por la ecuación 12:

$$q = U.A.LMTD.F \quad (12)$$

Despejando U de la ecuación 12, se calcula el coeficiente global de transferencia:

$$U = \frac{q}{A.LMTD.F}$$

Luego el factor de ensuciamiento R_f es determinado con la siguiente relación (Epstein, 1983):

$$R_f = \frac{1}{U_{sucio}} - \frac{1}{U_{limpio}} \quad (13)$$

Para el caso del cálculo del ensuciamiento de los intercambiadores de calor con los datos históricos de planta se tomó como Coeficiente Global de Transferencia Limpio U_{limpio} el calculado al inicio de la corrida, cuando el equipo se encontraba limpio, y a partir de este momento se considera que el Coeficiente Global de Transferencia calculado es el Coeficiente Global de Transferencia Sucio U_{sucio} .

Se establecieron las siguientes condiciones o suposiciones básicas en la realización de los cálculos (Cengel):

- El intercambiador opera en estado estacionario.
- El intercambiador está perfectamente aislado, y la transferencia de calor solo ocurre entre la corriente caliente y fría.
- No hay fuentes de calor dentro del equipo.

- El calor específico (C_p), de cada fluido es constante.
- La velocidad y la temperatura de los fluidos a la entrada son uniformes.
- El coeficiente global de transferencia U es constante a través del equipo.
- El área de transferencia de calor está distribuida uniformemente sobre cada fluido.
- En intercambiadores de pasos múltiples, el área de transferencia de calor se considera igualmente repartida en cada paso.
- Se supone que no ocurre cambio de fase en los fluidos involucrados.
- En flujo contracorriente: La temperatura es uniforme en una sección transversal (dA) del equipo.
- El flujo másico de cada fluido es uniforme a través del equipo dentro de cada paso. No hay estratificación, bypass, ni derrames de fluido.
- El flujo siempre está caracterizado por una velocidad promedio en cualquier sección transversal del equipo.
- La conducción axial en el fluido y en las paredes del equipo son despreciables.
- Los cambios de energía cinética y potencial son despreciables.

5.3 Simulación en estado estacionario del proceso de destilación de la U-2000.

Se tomó como base la simulación realizada en el año 2016 en su trabajo de grado de maestría por el Ingeniero Wilson Alcaraz, Magister en Ingeniería Química de la UIS. *Simulación y Análisis de Sensibilidad del Sistema de Destilación de Crudos de la U-2000 de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja*. La cual se corrió y se comprobó su correcta convergencia en el software Aspen Plus.

Con base en este modelo de la U-2000, se procedió a simular de manera rigurosa los intercambiadores, actualizar el modelo reemplazando los intercambiadores genéricos por los intercambiadores rigurosos y a evaluar el comportamiento del tren de precalentamiento bajo condiciones de ensuciamiento.

5.4 Simulación rigurosa de los intercambiadores de calor del tren de precalentamiento de la U-2000.

Después de verificar la validez a la simulación base de la U-2000 se procedió a realizar la simulación rigurosa de los intercambiadores de calor del tren de precalentamiento utilizando la integración de Aspen Plus con Aspen EDR.

Para la simulación rigurosa de cada intercambiador de calor en Aspen EDR, en el ambiente de trabajo, que se muestra en la figura 21, se alimenta al simulador con datos de diseño como es el tipo de intermediador según la norma TEMA, orientación, diámetro interior y exterior de la coraza, diámetro interior y exterior de los tubos, largo de los tubos, material de fabricación, geometría de distribución de los tubos, número de tubos, número y tipo de baffles, separación entre baffles, presión y temperatura de diseño, localización de los fluidos, entre otras.

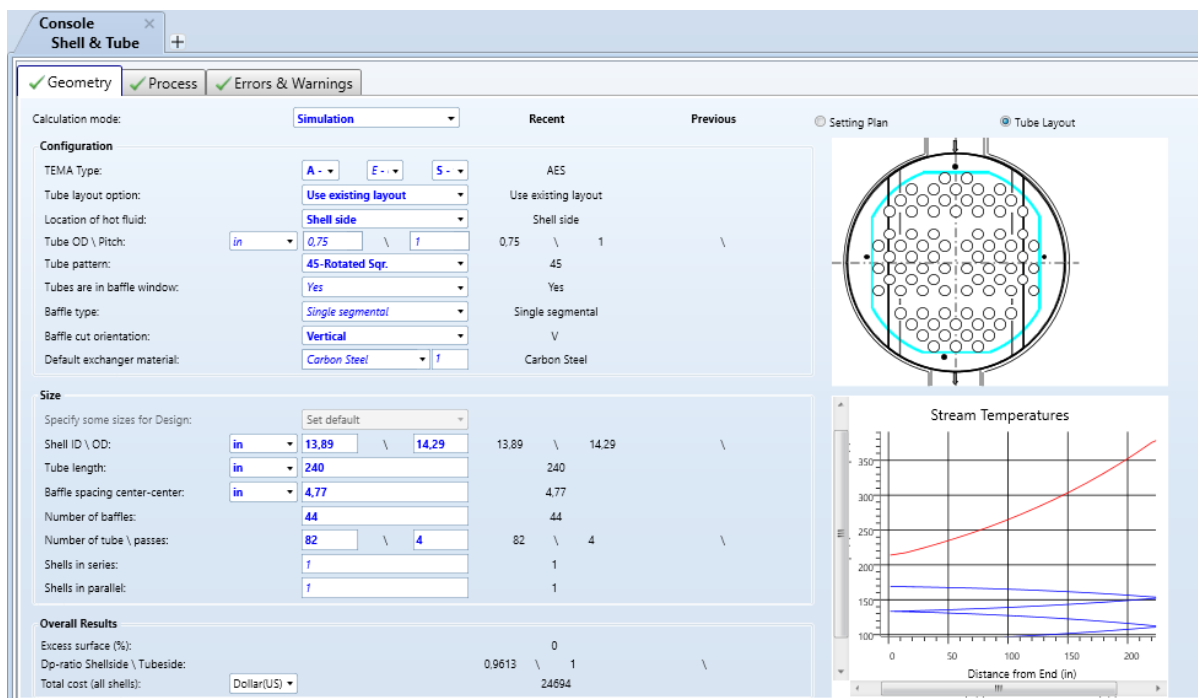
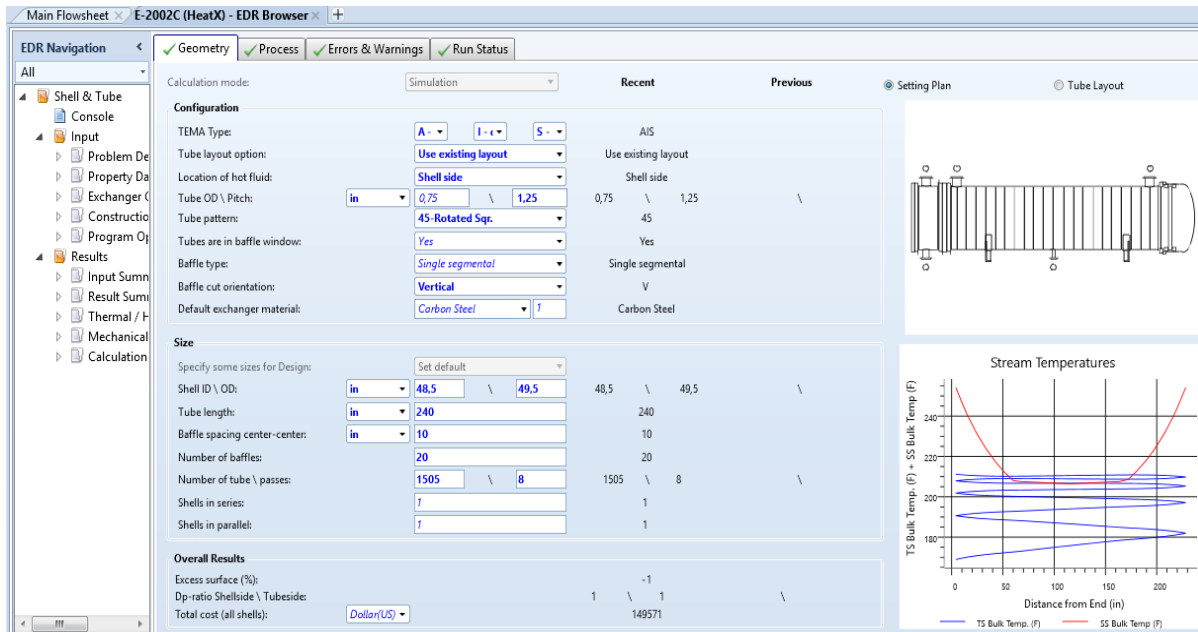


Figura 21. Simulación Rigurosa de Intercambiador de calor en Aspen EDR.

Una vez simulados de manera rigurosa los intercambiadores estos son integrados a la simulación de la U-2000 en Aspen Plus usando una herramienta que permite importar los equipos desde Aspen EDR, como se observa en las figuras 22 y 23.

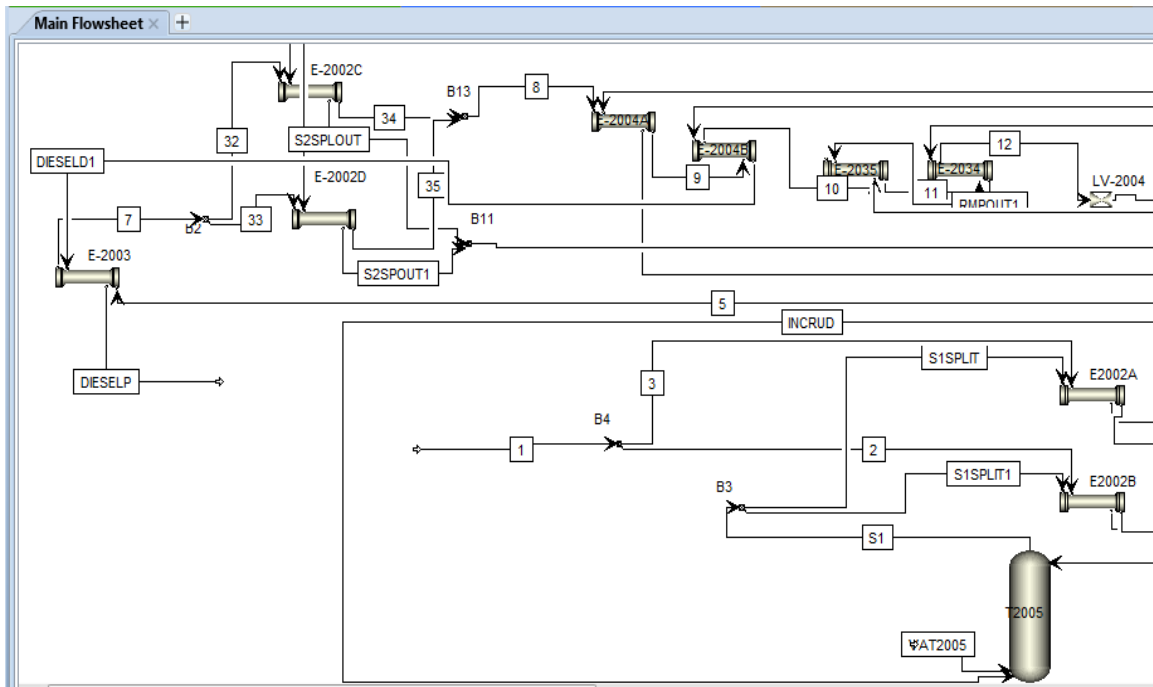


Figura 22. Diagrama de simulación en Aspen Plus del primer tren de precalentamiento con Intercambiadores rigurosos incorporados.

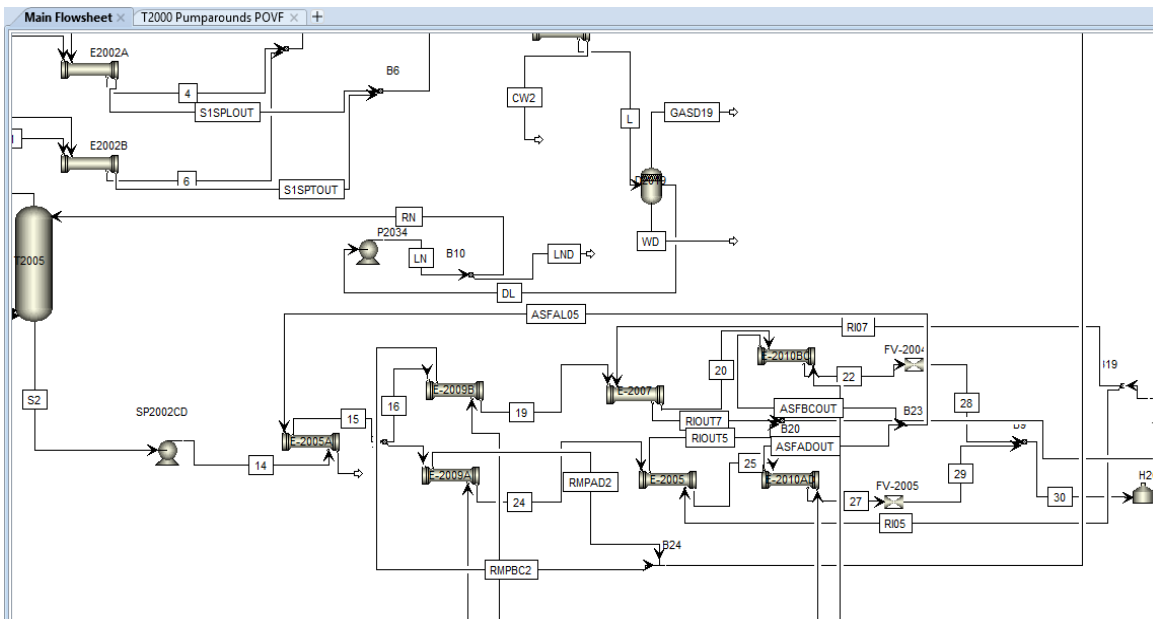


Figura 23. Diagrama de simulación en Aspen Plus del segundo tren de precalentamiento con Intercambiadores rigurosos incorporados.

5.5 Variables de estudio y determinación de los modelos.

Como punto de partida, para definir las variables de proceso con las cuales se desarrolló el modelo empírico de predicción de ensuciamiento para cada intercambiador de calor, se tomaron los datos históricos de proceso suministrados por los instrumentos de medición instalados en el segundo tren de precalentamiento como son los flujos volumétricos de la corriente fría y de la corriente caliente a cada intercambiador, y sus respectivas temperaturas de entrada y salida, los cuales fueron depurados para eliminar los datos atípicos.

Con base en la experiencia en la operación de la unidad, y después de haber realizado los cálculos del ensuciamiento con los datos históricos, se tomó la decisión de seleccionar la diferencia de temperatura media logarítmica corregida (LMTDc) como una de las variables del modelo propuesto. Un criterio fue la dependencia del ensuciamiento R_f del coeficiente global de transferencia U :

$$R_f = \frac{1}{U_{sucio}} - \frac{1}{U_{limpio}} \quad (13)$$

Y a su vez la dependencia de este coeficiente U con la temperatura media logarítmica corregida (LMTDc).

$$U = \frac{q}{A \cdot LMTDc}$$

Se realiza la aclaración que la diferencia de temperatura media logarítmica corregida (LMTD.F) se identificó con la abreviación $LMTDc$.

Otro criterio, también con base en la experiencia, fue que en el cálculo de la LMTDc intervienen las temperaturas de entrada y salida de la corriente caliente, y de la corriente fría respectivamente.

$$\Delta T_1 = T_{caliente, entrada} - T_{frío, salida} \quad \text{y} \quad \Delta T_2 = T_{caliente, salida} - T_{frío, entrada}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (11)$$

También se definieron como variables para el modelo de predicción del ensuciamiento de cada intercambiador el flujo de la carga de crudo que se denominó Flujo de Lado Frío (FLF), los flujos de las corrientes calientes que se denominaron Flujo de Lado Caliente (FLC). Y por último, la variable tiempo (t) fue seleccionada, tal vez como el principal predictor del ensuciamiento en los intercambiadores de calor.

5.5.1 Desarrollo de la regresión lineal múltiple. Definida las variables se planteó un modelo de regresión lineal múltiple en donde el ensuciamiento es determinado por las variables seleccionadas, $R_f(t, LMTDc, FLC, FLF)$:

$$R_f = \beta_1 t + \beta_2 LMTDc + \beta_3 FLC + \beta_4 FLF$$

Inicialmente en la regresión se procesaron los datos históricos del segundo tren de precalentamiento de la unidad y se hallaron los valores de los coeficientes para cada una de las variables obteniéndose un modelo ajustado del proceso “real”.

Posteriormente, se realizaron diferentes corridas en la unidad simulada, en donde se sometió a variación la carga de crudo o flujo lado frío (FLF), al flujo del lado caliente (FLC), el ensuciamiento de los intercambiadores (R_f) y se obtuvieron como respuesta variaciones en los valores del calor transferido (q), del coeficiente global de transferencia y de la diferencia de temperatura media logarítmica corregida (LMTDc).

En la tabla 9 se muestra la selección de variables y orden aleatorio establecido para obtener la relación de variables de cada intercambiador, de acuerdo a las interacciones presentadas de las mismas en el proceso simulado.

Tabla 9.

Orden aleatorio de la toma de datos del proceso simulado para el intercambiador E2005A.

FLF (BPD)	FLC BPD	Rf (ft²-h- °F/BTU)	U (BTU/ft²-h- °F)	LMTDc (°F)	Q (BTU/h)
49.000	15.544	0,000100			
49.000	15.544	0,000833			
49.000	15.544	0,001667			
49.000	15.544	0,002500			
49.000	15.544	0,003333			
49.000	15.544	0,004167			
49.000	15.544	0,005000			
47.000	14.772	0,001000			
47.000	14.772	0,001333			
47.000	14.772	0,002667			
47.000	14.772	0,004000			
47.000	14.772	0,005333			
47.000	14.772	0,006667			
47.000	14.772	0,008000			
52.000	19.406	0,001000			
52.000	19.406	0,001367			
52.000	19.406	0,002733			
52.000	19.406	0,004100			
52.000	19.406	0,005467			
52.000	19.406	0,006833			
52.000	19.406	0,008200			

Los datos arrojados por la simulación se tabularon y se sometieron igualmente al análisis de regresión, de tal forma que se obtuvieron los valores de los parámetros o coeficientes para cada una de las variables del modelo planteado pero esta vez en el proceso “simulado”.

5.5.2 Análisis de varianza de los modelos ajustados. Para determinar la validez de los modelos empíricos de predicción del ensuciamiento de cada intercambiador de calor, se realizó un análisis de varianza a cada uno de ellos.

En esta etapa se estableció un intervalo de confianza del 95%, y un coeficiente de determinación ajustado $R^2_{ajustado}$ mayor al 80%, es decir, que los modelos empíricos encontrados fueran capaces de predecir con una confiabilidad mayor del 80%, el comportamiento del ensuciamiento presentado por los intercambiadores en el tiempo de corrida evaluado.

El análisis de varianza se realizó a cada uno de los modelos de predicción obtenidos para cada intercambiador con los datos históricos reales, y de igual manera se realizó el análisis de varianza a los modelos obtenidos con los datos de la simulación.

5.5.3 Validación de la simulación. Se realizó una comparación de los modelos obtenidos con los datos históricos del proceso real con respecto a los modelos obtenidos con los datos proceso simulado. Haciendo énfasis en las diferencias encontradas entre los coeficientes establecidos para cada parámetro tanto del proceso real como del proceso simulado.

5.6 Determinación de los costos del ensuciamiento.

El ensuciamiento de los intercambiadores de calor del tren de precalentamiento tiene como consecuencia la disminución de la temperatura del crudo que ingresa al horno atmosférico, debiendo este asumir esa pérdida de calor con mayor quema de gas combustible con el fin de mantener la temperatura óptima de salida hacia la torre atmosférica.

Para poder evaluar los costos económicos provocados por la pérdida de temperatura de precalentamiento en la unidad, se manipulo en la simulación esta variable y se observaron los efectos que causó la disminución de esta temperatura sobre el consumo de gas en el horno y sobre la producción de las dos corrientes más valiosas de la torre atmosférica como son el Jet y el Acpm.

Se tuvo como principal restricción la máxima entrega de calor que el horno puede entregar al crudo, que por diseño según su hoja de especificaciones que es de 100.000.000 BTU/h más un 12% de sobredimensionamiento, para un total máximo de 112.000.000 BTU/h. Cabe anotar que cuando el horno trabaja bajo estas condiciones máximas de operación otra variable importante para su integridad mecánica, como es la temperatura de piel de tubo de los serpentines, no debe sobrepasar el valor de 1.200 °F.

La tabla 10 muestra las variables seleccionadas para evaluar en la simulación los efectos económicos de la disminución de la temperatura de precalentamiento.

Tabla 10.

Variables para evaluación de los costos de energía.

Carga (BPD)	Temperatura de Precalentamiento (°F)	Temperatura de Salida del Horno (°F)	Producción Jet+Acpm (BPD)	Calor Transferido por el Horno (BTU/h)
-------------	--------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------	--

5.7 Determinación del tiempo óptimo para limpieza de los intercambiadores.

Con los modelos empíricos encontrados para la predicción del ensuciamiento, se realizó una solución conjunta en una herramienta Solver para llevar a cabo una función objetivo y definir el tiempo óptimo para empezar con la limpieza de los intercambiadores de calor del segundo tren de

precalentamiento, y así recuperar la transferencia de calor de los mismos a las condiciones de diseño.

6. Análisis de resultados

Esta sección comprende el análisis de los resultados obtenidos en el cálculo del ensuciamiento de los intercambiadores de calor del segundo tren de precalentamiento de la unidad U-2000 con los datos históricos, así como en el desarrollo y análisis de los modelos empíricos para la predicción del ensuciamiento para cada uno de los intercambiadores evaluados. Estos modelos se definieron tanto para los datos históricos de la planta como para los datos suministrados por el proceso simulado.

También se presentan los resultados de los costos económicos causados por el ensuciamiento, además del tiempo óptimo estimado para la limpieza de los intercambiadores de calor del segundo tren de precalentamiento de la U-2000.

6.1 Cálculo del ensuciamiento de los intercambiadores de calor y obtención de tendencias.

Con los datos históricos del proceso y los datos de especificaciones de diseño de cada intercambiador de calor se realizó el cálculo del ensuciamiento. A continuación se describe un ejemplo del cálculo para el E-2005A.

Se toman los datos necesarios para los cálculos de la hoja de especificaciones del E-2005A son:

Área del Intercambiador: 3.788 ft².

Densidad promedio de la corriente caliente (Asfalto): 55,73 lb/ft³.

Densidad promedio de la corriente fría (Crudo): 46,43 lb/ft³.

Calor Específico promedio la corriente caliente (Asfalto): 0,631 BTU/lb °F.

Calor Específico promedio la corriente fría (Crudo): 0,631 BTU/lb °F.

Factor de Corrección de la LMTD: 0,9.

Los datos de las variables capturados de los registros históricos de la planta son:

Tabla 11.

Datos capturados de los registros históricos de la planta.

Fecha	Corriente Lado Frío (Crudo)			Corriente Lado Caliente (Asfalto)		
	Flujo	T°	T°	Flujo	T°	T°
	Crudo (BPD)	Entrada (°F)	Salida (°F)	Asfalto (BPD)	Entrada (°F)	Salida (°F)
	U2000- FIT20077	U2000- TIT20057	U2000- TIT20058	U2000- FIT20032	U2000- TIT20168	U2000- TIT20169
15-Dic-12	45065	349	403	19095	574	476

Inicialmente se halla el calor transferido en el intercambiador, partiendo de que:

$$q_{transferido} = q_{cedido\ por\ la\ corriente\ caliente} = q_{absorbido\ por\ la\ corriente\ fria}$$

$$q = (\dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T)_{caliente} = (\dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T)_{fria}$$

Se procede a calcular la transferencia de calor de la corriente caliente,

El flujo másico del lado caliente (**m**) es:

$$\dot{m} = \dot{V} / \rho = 19.095 \frac{B}{D} * \frac{5,61\ ft^3}{1\ Barril} * \frac{1\ Dia}{24\ h} * \frac{55,73\ lb}{ft^3}$$

$$\dot{m} = 248.750 \text{ lb/h}$$

La transferencia de calor del lado caliente (q_c) es:

$$q_c = 248.750 \frac{\text{lb}}{\text{h}} * 0,672 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ\text{F}} * (574^\circ\text{F} - 476^\circ\text{F})$$

$$q_c = 16.381.661 \text{ BTU/h}$$

Ahora se procede a calcular la transferencia de calor de la corriente fría,

El flujo másico del lado frío (\dot{m}) es:

$$\dot{m} = V/\rho = 45.065 \frac{\text{B}}{\text{D}} * \frac{5,61 \text{ ft}^3}{1 \text{ Barril}} * \frac{1 \text{ Dia}}{24 \text{ h}} * \frac{46,43 \text{ lb}}{\text{ft}^3}$$

$$\dot{m} = 487.724 \text{ lb/h}$$

Transferencia de calor del lado frío (q_f) es:

$$q_f = 487.724 \frac{\text{lb}}{\text{h}} * 0,631 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ\text{F}} * (403^\circ\text{F} - 349^\circ\text{F})$$

$$q_f = 16.665.374 \text{ BTU/h}$$

Calculada la transferencia de calor del lado caliente y el lado frío se procede a promediar estos valores:

$$q_{promedio} = \frac{16.739.857 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} + 16.366.712 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}}{2}$$

$$q_{promedio} = 16.523.518 \text{ BTU/h}$$

Ahora se procede a calcular el coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador por medio de:

$$U = \frac{q}{A \cdot LMTD_c}$$

Se halla el valor de la temperatura media logarítmica:

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)}$$

$$\Delta T_1 = T_{\text{entrada caliente}} - T_{\text{salida frio}} = 574^{\circ}\text{F} - 403^{\circ}\text{F} = 171^{\circ}\text{F}$$

$$\Delta T_2 = T_{\text{salida caliente}} - T_{\text{entrada frio}} = 476^{\circ}\text{F} - 349^{\circ}\text{F} = 127^{\circ}\text{F}$$

$$LMTD = \frac{171^{\circ}\text{F} - 127^{\circ}\text{F}}{\ln(171^{\circ}\text{F}/127^{\circ}\text{F})} = 147,91^{\circ}\text{F}$$

El valor del factor de corrección se definió como $F=0,9$. De esta manera el **LMTDc** es:

$$LMTDc = 147,91^{\circ}\text{F} * 0,9 = 133,12^{\circ}\text{F}$$

Por consiguiente se calcula el Coeficiente Global de Transferencia (**U**):

$$U = \frac{16.523.518 \text{ BTU/h}}{3.788 \text{ ft}^2 * 133,12^{\circ}\text{F}} = 32,77 \frac{\text{BTU}}{\text{h ft}^2\text{ }^{\circ}\text{F}}$$

Este coeficiente global de transferencia calculado se considera como un coeficiente global de transferencia sucio (U_{sucio}), debido a que fue calculado con unos datos históricos de 6 meses posteriores al inicio de la corrida de la unidad.

El cálculo del factor de ensuciamiento (**R_f**) comprende que:

$$R_f = \frac{1}{U_{\text{sucio}}} - \frac{1}{U_{\text{limpio}}}$$

Se toma como valor de coeficiente global de transferencia limpio el calculado al inicio de la corrida de la unidad.

$$\text{Coeficiente global de transferencia limpio } (U_{\text{limpio}}) = 41,72 \text{ BTU/h ft}^2 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$\text{Coeficiente global de transferencia sucio } (U_{\text{sucio}}) = 32,77 \text{ BTU/h ft}^2 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Factor de ensuciamiento (**R_f**) es:

$$R_f = \frac{1}{32,77 \frac{\text{BTU}}{\text{h ft}^2\text{ }^{\circ}\text{F}}} - \frac{1}{41,72 \frac{\text{BTU}}{\text{h ft}^2\text{ }^{\circ}\text{F}}} = 0,0065 \left(\frac{\text{h ft}^2 \text{ }^{\circ}\text{F}}{\text{BTU}} \right)$$

Esta metodología aplicada para el cálculo del ensuciamiento es repetida para los datos históricos de cada intercambiador y de esta manera obtener una tendencia del ensuciamiento en función del tiempo.

En la figura 24 se muestra la tendencia del factor de ensuciamiento para el intercambiador de calor E-2005A, en donde el Asfalto proveniente de los E-2010 ABCD cede calor al crudo proveniente de la torre de prefraccionamiento T-2005.

En esta tendencia se puede observar el comportamiento creciente del ensuciamiento del intercambiador de calor E-2005A, con la notoriedad que la pendiente de este ensuciamiento aumenta fuertemente en los últimos 100 días de corrida evaluados.

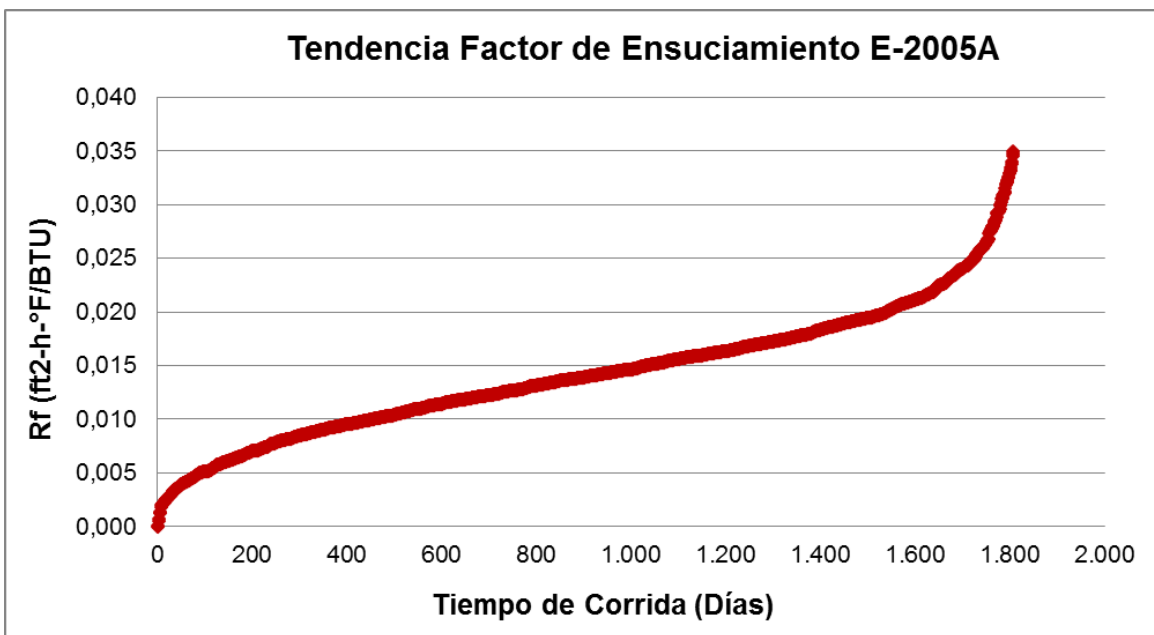


Figura 24. Tendencia de ensuciamiento con datos históricos de E-2005A.

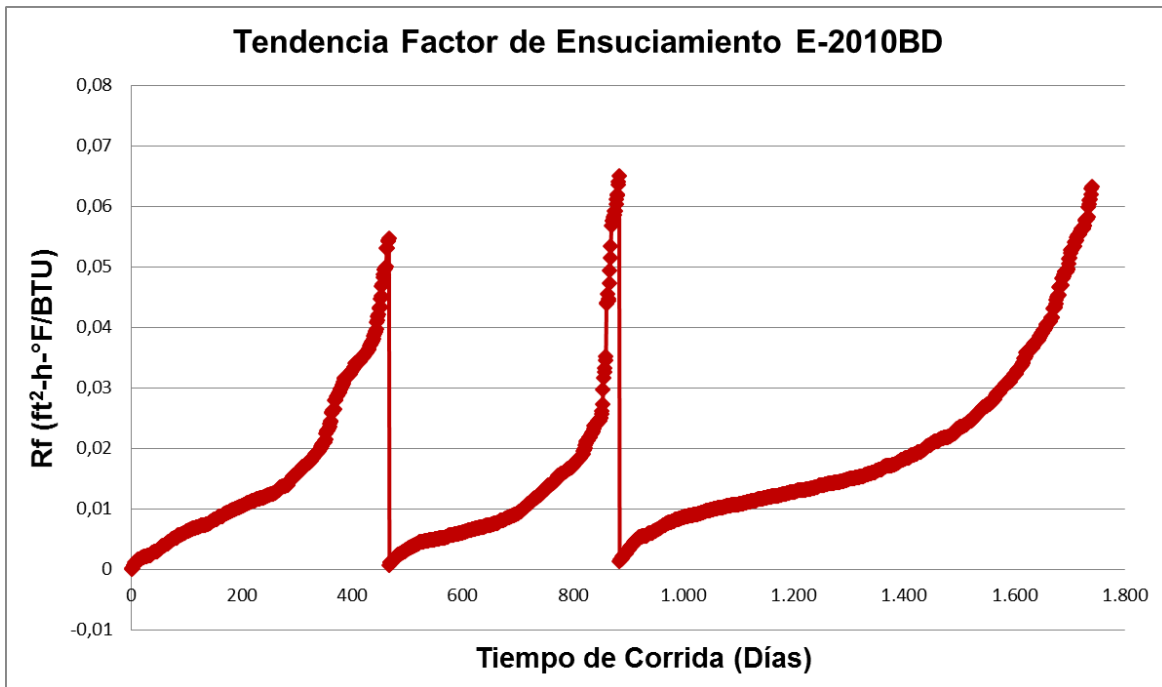


Figura 25. Tendencia de ensuciamiento con datos históricos de E-2010BD.

En la figura 25 se observa la tendencia de ensuciamiento para los intercambiadores E-2010BD, en donde el Asfalto proveniente del fondo de la torre de destilación al vacío T-2003 cede calor al crudo proveniente del intercambiador de calor E-2007. Estos dos intercambiadores se caracterizan por operar en serie y se evalúan como si fueran uno solo, y son los últimos intercambiadores del segundo tren de precalentamiento.

Las tendencias de ensuciamiento de los intercambiadores de calor E-2010BD, junto con la de los E-2010AC, que se muestra en el anexo A, son las que presenta la mayor pendiente de todos los intercambiadores evaluados. Esa mayor pendiente es probablemente debida a que estos equipos operan con el producto más caliente (670°F aproximadamente) y más sucio que se puede encontrar en una unidad de destilación de crudos como lo es el Asfalto.

También es probable que el arreglo de las corrientes en los intercambiadores no sea la adecuada, la corriente caliente de Asfalto por el lado tubos y la corriente fría de crudo por el lado coraza;

debido a que el régimen de flujo laminar que se puede presentar por el lado tubos favorece el mecanismo de depósito de suciedad y desfavorece el de desprendimiento del mismo, aumentando la velocidad del ensuciamiento.

Otra característica de la tendencia de ensuciamiento de los E-2010BD, al igual que la de los E-2010AC, es que se puede observar una recuperación de su condición de ensuciamiento, y esto es debido a que en ese momento los intercambiadores fueron sometidos a un proceso de limpieza mecánica.

Igualmente, se observa una disminución en la pendiente del ensuciamiento de los E-2010AC en comparación que los dos periodos de corrida anteriores, lo cual se puede deber a una mejora en la calidad del crudo cargado a la unidad (más limpio) y/o a la disminución de la temperatura de operación del lado caliente.

En la tabla 12 se muestran los valores del factor de ensuciamiento permitido por diseño y los valores del máximo calor que puede transferir cada intercambiador también por diseño, juntamente se presentan los valores registrados para estas variables al final de la corrida evaluada, que se llamó actual.

Tabla 12.

Comparación de factor de ensuciamiento y calor transferido.

Equipo	Rf Diseño	q Diseño	Rf Actual	q Actual
E-2005A	0,01	16.173.000	0,035	10.228.000
E-2005	0,03	7.316.000	0,024	4.432.000
E-2007	0,03	7.469.000	0,014	4.424.000
E-2009AD	0,01	15.800.000	0,01	12.115.000
E-2009BC	0,01	15.480.000	0,0097	12.403.000

Equipo	Rf	q	Rf	q
	Diseño	Diseño	Actual	Actual
E-2010AC	0,013	8.675.000	0,115	5.514.000
E-2010BD	0,013	8.610.000	0,063	6.324.000

Al comparar los valores de la tabla anterior, se observa que los intercambiadores E-2010ABCD y E-2005A son los que presentan mayor ensuciamiento, unas 5 y 3.5 veces por encima del valor de diseño. Condición que puede ser atribuida a que estos intercambiadores trabajan con la corriente de proceso más sucia de la unidad, como es el asfalto proveniente del fondo de la torre de destilación al vacío, el cual tiende a ser inestable para mantener una sola fase líquida favoreciendo la precipitación de su fracción pesada (asfáltenos).

Los intercambiadores E-2005 y E2009ABCD presentan valores de ensuciamiento sobre el valor de diseño, mientras que el E-2007 está por debajo de ese valor. En los valores presentados en la tabla 10, también se ve una menor transferencia de calor en los intercambiadores en comparación con el máximo posible por diseño, que puede ser atribuida en gran parte al ensuciamiento acumulado.

Las tendencias del ensuciamiento durante el tiempo de corrida de los demás intercambiadores evaluados son presentadas en el Anexo A.

6.2 Modelos de regresión y análisis de varianza con los datos históricos.

Para la predicción del ensuciamiento en los intercambiadores de calor del segundo tren de precalentamiento de la U-2000, se planteó el siguiente modelo empírico de regresión lineal múltiple:

$$R_f = \beta_1 t + \beta_2 LMTDc + \beta_3 FLC + \beta_4 FLF \quad (35)$$

En donde,

t = Tiempo de corrida

$LMTDc$ = Diferencia de temperatura media logarítmica corregida.

FLC = Flujo de la corriente del lado caliente.

FLF = Flujo de la corriente del frío.

Para probar el nivel de significancia del modelo se plantearon las siguientes hipótesis:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ para al menos una } j$$

Y para probar la significancia de cada coeficiente del modelo ajustado de la regresión, se plantearon las siguientes hipótesis:

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

6.2.1 Modelo de ensuciamiento y variabilidad del E-2005A. A continuación se presenta el modelo de regresión ajustado propuesto para el ensuciamiento del E-2005A, en la tabla 13 se presentan los resultados del análisis de varianza del modelo y en la tabla 14 se presentan los resultados de la prueba de significancia de cada coeficiente del modelo.

$$R_f(E-2005A) = 1,07E-5*t + 3,33E-5*LMTDc - 5,47E-6*FLF - 6,50E-6*FLC \quad (36)$$

$$R^2 = 99,03\% \quad R^2 \text{ (ajustado por G.L)} = 99,02\%$$

Tabla 13.

Análisis de varianza modelo de regresión ajustado de E-2005A.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medio	F₀	Valor-P
Modelo	0,344	4	0,0859318	45150,36	0,00001
Residual	0,0034	1776	0,0000019		
Total	0,347	1780			

Tabla 14.

Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión ajustado de E-2005A.

Variable	Coefficiente Estimado	Error Estándar	Prueba t para H₀: Coeficiente = 0	Valor-P
t	1,07E-5	7,215E-8	147,96	0,00001
LMTDc	3,33E-5	2,32E-6	14,35	0,00001
FLF	-5,46E-6	9,37E-9	-0,58	0,05600
FLC	-6,50E-6	1,59E-8	-4,11	0,00001

Al llevar a cabo la regresión y el análisis de varianza de la misma se encontró que las variables como la diferencia de temperatura media logarítmica, los flujos volumétricos de la corriente caliente y corriente fría, y el tiempo, explican el comportamiento del ensuciamiento, pues se observa que existe una dependencia estadísticamente significativa con respecto a dichas variables bajo un intervalo de confianza del 95%.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo de regresión ajustado explica en un 99,03% el comportamiento del ensuciamiento presentado en el intercambiador E-2005A.

El valor de probabilidad de la varianza de la regresión es inferior al nivel de significancia del 0,05; por lo cual la hipótesis nula de que el modelo no representa el comportamiento del ensuciamiento en el intercambiador se rechaza.

El valor de probabilidad de cada coeficiente en la prueba de significancia fue inferior a 0,05; de esta forma se rechaza la hipótesis nula, que los coeficientes no contribuyen de manera significativa al modelo.

Lo que indica que tanto el modelo de regresión empírico ajustado como los coeficientes estimados para el modelo son válidos estadísticamente para representar el comportamiento del ensuciamiento con un intervalo de confianza mayor al 95%.

De acuerdo con el modelo de regresión encontrado, se detalla que el ensuciamiento se incrementa al aumentar el tiempo de corrida. De igual manera, se evidencia que a medida que aumenta la diferencia de temperatura media logarítmica aumenta el ensuciamiento del intercambiador.

Con respecto a los flujos volumétricos de las corrientes, tanto del lado caliente (asfalto) como del lado frío (crudo), se observa que a medida que aumenta el caudal de estas corrientes se disminuye el ensuciamiento. Lo anterior probablemente se debe, que a medida que se incrementa el flujo aumenta la velocidad y la turbulencia se va favoreciendo el mecanismo de remoción del ensuciamiento depositado en las paredes de los tubos del intercambiador.

6.2.2 Modelo de ensuciamiento y variabilidad de los E-2010BD. Para el caso de esta pareja de intercambiadores arreglados en serie, se hace su evaluación como una unidad global. A continuación se presenta el modelo de regresión ajustado propuesto para el ensuciamiento del E-

2010BD, en la tabla 15 se presentan los resultados del análisis de varianza del modelo y en la tabla 16 se presentan los resultados de la prueba de significancia de cada coeficiente.

$$R_f(E-2010BD) = 3,29E-5 * t + 8,95E-6 * LMTDc - 5,34E-7 * FLF - 4,59E-7 * FLC \quad (37)$$

$$R^2 = 94,60\% \quad R^2 \text{ (ajustado por G.L.)} = 94,55\%$$

Tabla 15.

Análisis de varianza modelo de regresión ajustado de E-2010BD.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medio	F ₀	Valor-P
Modelo	0,0503302	4	0,0125826	1947,58	0,0000
Residual	0,0028750	445	6,46059E-7		
Total	0,0532052	449			

Tabla 16.

Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión ajustado de E-2010BD.

Variable	Coefficiente Estimado	Error Estándar	Prueba t para H ₀ : Coeficiente = 0	Valor-P
t	3,29E-5	2,390E-6	13,75	0,0000
LMTDc	8,95E-6	1,272E-7	7,04	0,0000
FLF	-5,34E-7	7,730E-8	6,90	0,0000
FLC	-4,59E-7	2,857E-8	16,07	0,0000

De forma similar al anterior intercambiador de calor analizado, se encontró que las variables como el tiempo, la diferencia de temperatura media logarítmica, los flujos volumétricos de la corriente caliente y fría, explican el comportamiento del ensuciamiento; se evidencia una

dependencia estadísticamente significativa con respecto a las variables predictoras bajo un intervalo de confianza del 95%.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo de regresión ajustado explica en un 94,55% el comportamiento del ensuciamiento presentado en los intercambiadores E-2010BD.

El valor de probabilidad de la varianza de la regresión está por debajo del nivel de significancia del 0,05; con lo que la hipótesis nula de que el modelo no representa el comportamiento del ensuciamiento en los intercambiadores se rechaza.

El valor de probabilidad de cada coeficiente en la prueba de significancia fue inferior a 0,05; de esta forma se rechaza la hipótesis nula, que los coeficientes no contribuyen de manera significativa al modelo.

Lo que indica que tanto el modelo de regresión empírico ajustado como los coeficientes estimados para el modelo son válidos estadísticamente para representar el comportamiento del ensuciamiento de los intercambiadores con un intervalo de confianza mayor al 95%.

De acuerdo con el modelo de regresión encontrado, se observa que el ensuciamiento se incrementa al aumentar el tiempo, que igualmente al aumentar los valores de la diferencia de temperatura logarítmica corregida se incrementa el ensuciamiento.

Y que al aumentar los flujos volumétricos de las corrientes, tanto del lado caliente (asfalto) como del lado frío (crudo), se disminuye el ensuciamiento; probablemente debido a que el aumento de la velocidad y la turbulencia dentro del intercambiador se favorece el mecanismo de remoción del ensuciamiento depositado en las paredes de los tubos.

6.2.3 Modelo de ensuciamiento y variabilidad de los E-2010AC. Esta pareja de intercambiadores arreglados en serie, se evalúan como una unidad global. A continuación se

presenta el modelo de regresión ajustado propuesto para el ensuciamiento del E-2010AC, en la tabla 17 se presentan los resultados del análisis de varianza del modelo y en la tabla 18 se presentan los resultados de la prueba de significancia de cada coeficiente del modelo.

$$Rf(E-2010AC) = 3,21E-5 * t + 1,60E-5 * LMTDc - 4,17E-8 * FLF - 3,64E-6 * FLC \quad (38)$$

$$R^2 = 99,36\% \quad R^2 \text{ (ajustado por G.L.)} = 99,35\%$$

Tabla 17.

Análisis de varianza modelo de regresión ajustado de E-2010AC.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medio	F ₀	Valor-P
Modelo	0,0639997	4	0,0159999	20752,42	0,0000
Residual	0,000415564	539	7,70991E-7		
Total	0,0644152	543			

Tabla 18.

Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión ajustado de E-2010AC.

Variable	Coefficiente Estimado	Error Estándar	Prueba t para H ₀ : Coeficiente = 0	Valor-P
t	3,21E-5	1,526E-6	21,02	0,0000
LMTDc	1,60E-5	2,364E-6	-1,82	0,0069
FLF	-4,17E-8	2,286E-8	-0,58	0,0000
FLC	-3,64E-6	1,387E-7	-26,26	0,0000

Al igual que los modelos de los intercambiadores analizados con anterioridad, este modelo propuesto ha sido validado estadísticamente, y de acuerdo al coeficiente de determinación R²

indica que el modelo de regresión ajustado explica en un 99,35% el comportamiento del ensuciamiento presentado en los intercambiadores E-2010AC.

En el modelo de regresión encontrado, se observa que el ensuciamiento se incrementa al aumentar el tiempo, que igualmente al aumentar los valores de la diferencia de temperatura logarítmica corregida se incrementa el ensuciamiento.

Y que al aumentar los flujos volumétricos de las corrientes, tanto del lado caliente (asfalto) como del lado frío (crudo), se disminuye el ensuciamiento; probablemente debido a que el aumento de la velocidad y la turbulencia dentro del intercambiador se favorece el mecanismo de remoción del ensuciamiento depositado en las paredes de los tubos.

Se debe resaltar que los intercambiadores que operan con asfalto, como son los E-2005A, E-2010BD y E-2010AC son los de mayor ensuciamiento en el segundo tren de precalentamiento de la U-2000, lo que es muy lógico por las características de esta corriente proveniente del fondo de la torre al vacío.

El asfalto o fondos de vacío, es la corriente más pesada y caliente en una unidad de destilación de crudo, es la más sucia por ser el fondo del barril de crudo, y su fase líquida inestable permite la precipitación de sus componentes más pesados, conocidos como asfáltenos.

Al comparar las pareja de intercambiadores E-2010BD y E-2010AC, con respecto al intercambiador E-2005A, se observa que estas parejas tienen una mayor velocidad de ensuciamiento, que el intercambiador inicialmente analizado; condición que se refleja en los modelos empíricos de ensuciamientos desarrollados.

En el modelo del E-2005A el valor del coeficiente de la variable tiempo es de $1,07E-5$, mientras que en los modelo de los E-2010BD y los E-2010AC, los valores son de $3,29E-5$ y $3,21E-5$ respectivamente, los cuales son valores 3 veces más altos.

6.2.4 Modelo de ensuciamiento y variabilidad de los E-2005 y E-2007. Este par de intercambiadores de calor operan en paralelo, y en ellos la corriente caliente de reflujo inferior proveniente de la torre de destilación atmosférica T-2001, cede calor al crudo cargado en la unidad.

El modelo de regresión ajustado para el ensuciamiento del E-2005 es:

$$Rf(E-2005) = 2,47E-6*t + 8,81E-7*LMTDc - 2,09E-6*FLF - 3,88E-6*FLC \quad (39)$$

$$R^2 = 94,48\% \quad R^2 \text{ (ajustado por G.L)} = 94,47\%$$

Los resultados del análisis de varianza del modelo y de la prueba de significancia de cada coeficiente, se presentan en las tablas 19 y 20.

Tabla 19.

Análisis de varianza modelo de regresión ajustado de E-2005.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medio	F₀	Valor-P
Modelo	0,13836	4	0,0345899	7363,99	0,00001
Residual	0,00806974	1666	0,00000469717		
Total	0,146429	1670			

Tabla 20.

Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión ajustado de E-2005.

Variable	Coefficiente Estimado	Error Estándar	Prueba t para H₀: Coeficiente = 0	Valor-P
t	2,47E-6	1,517E-7	16,28	0,00001
LMTDc	8,81E-7	1,470E-8	59,79	0,00001
FLF	-2,09 E-6	1,292 E-8	-16,14	0,00001
FLC	-3,88 E-6	8,815 E-8	-43,97	0,00001

Y el modelo de regresión ajustado para el ensuciamiento del E-2007 es:

$$Rf(E-2007) = 5,03E-6*t + 1,43E-7*LMTDc - 7,62E-8*FLF - 8,96E-8*FLC \quad (40)$$

$$R^2 = 98,68\% \quad R^2 \text{ (ajustado por G.L.)} = 98,68\%$$

Los resultados del análisis de varianza del modelo y de la prueba de significancia de cada coeficiente, se presentan en las tablas 21 y 22.

Tabla 21.

Análisis de varianza modelo de regresión ajustado de E-2007.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medio	F ₀	Valor-P
Modelo	0,0807307	4	0,0201827	32870,06	0,0000
Residual	0,00107698	1754	6,14014E-7		
Total	0,0818076	1758			

Tabla 22.

Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión ajustado de E-2007.

Variable	Coefficiente Estimado	Error Estándar	Prueba t para H ₀ : Coeficiente = 0	Valor-P
t	5,03E-6	4,839E-8	103,88	0,0000
LMTDc	1,43E-7	4,178E-8	3,42	0,0006
FLF	7,62E-8	4,648E-9	16,39	0,0000
FLC	-8,96E-8	3,966E-8	-2,26	0,0024

Los modelos propuestos para los E-2005 y E-2007 han sido validados estadísticamente, con unos valores de R² de 94,47% y 98,68% respectivamente, indicando que los modelos de regresión

ajustados podrían explicar el comportamiento del ensuciamiento presentando en los intercambiadores.

Al comparar los modelos de esta par de intercambiadores con los anteriormente analizados (E-2005A, E-2010BD, E-2010 AC), se observa que los coeficientes del parámetro tiempo ($2,47E-6$ y $5,03E-6$ respectivamente) en los E-2005 y el E-2007 son menores a los presentados en los antes mencionados ($1,07E-5$, $3,29E-5$ y $3,21E-5$ respectivamente). Esta menor velocidad de ensuciamiento puede deberse a que la corriente caliente es un producto más limpio que el Asfalto.

6.2.5 Modelo de ensuciamiento y variabilidad de los E-2009BC y E-2009AD. En estos intercambiadores se precalienta el crudo aprovechando el calor del reflujo medio de gasóleo de la torre de destilación al vacío. De acuerdo a su ubicación en el tren de precalentamiento se decide evaluarlos de la siguiente manera: los E2009BC que operan en serie se evalúan como una unidad global, e igualmente los E2009AD que operan en serie se evalúan como otra unidad global.

El modelo de regresión ajustado para el ensuciamiento de los E-2009BC es:

$$Rf(E-2009BC) = 4,57E-6 * t + 1,10E-6 * LMTDc - 4,52E-7 * FLF - 7,01E-7 * FLC \quad (41)$$

$$R^2 = 99,13\% \quad R^2 \text{ (ajustado por G.L)} = 99,12\%$$

Los resultados del análisis de varianza del modelo y de la prueba de significancia de cada coeficiente, se presentan en las tablas 23 y 24.

Tabla 23.

Análisis de varianza modelo de regresión ajustado de E-2009BC.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medio	F ₀	Valor-P
Modelo	0,0128	4	0,00319	30412,44	0,000001
Residual	0,00011	1062	1,049E-7		
Total	0,01287	1066			

Tabla 24.

Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión ajustado de E-2009BC.

Variable	Coefficiente Estimado	Error Estándar	Prueba t para H ₀ : Coeficiente = 0	Valor-P
t	4,57E-6	4,645E-8	98,31	0,00001
LMTDc	1,10E-6	3,76E-7	-2,94	0,0033
FLF	-4,52E-7	1,123E-8	4,02	0,0001
FLC	-7,01E-7	7,498E-9	1,93	0,0035

El modelo de regresión ajustado para el ensuciamiento de los E-2009AD es:

$$Rf(E-2009AD) = 4,35E-6 * t + 1,63E-6 * LMTDc - 3,34E-7 * FLF - 4,26E-7 * FLC \quad (42)$$

$$R^2 = 98,87\% \quad R^2 \text{ (ajustado por G.L)} = 98,86\%$$

Los resultados del análisis de varianza del modelo y de la prueba de significancia de cada coeficiente, se presentan en las tablas 25 y 26.

Tabla 25.

Análisis de varianza modelo de regresión ajustado de E-2009AD.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medio	F ₀	Valor-P
Modelo	0,0170129	4	0,00425322	22281,87	0,0000
Residual	0,0001947	1020	1,90883E-7		
Total	0,0172076	1024			

Tabla 26.

Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión ajustado de E-2009AD.

Variable	Coefficiente Estimado	Error Estándar	Prueba t para H ₀ : Coeficiente = 0	Valor-P
t	4,35E-6	6,738E-8	64,64	0,0000
LMTDc	1,63E-6	5,853E-7	6,21	0,0000
FLF	-3,34E-7	1,606E-8	-2,09	0,0037
FLC	-4,26E-7	1,088E-8	3,92	0,0001

Los modelos propuestos para los E2009BC y E-2009AD han sido validados estadísticamente, el coeficiente de determinación R² indica que los modelos de regresión ajustados explican en un 99,12% y 98,86% el comportamiento del ensuciamiento presentado en los intercambiadores E2009BC y E-2009AD.

6.3 Modelos de regresion y análisis de varianza con los datos de la simulación rigurosa.

En esta sección se describe los resultados obtenidos en la simulación rigurosa del tren de precalentamiento de la U-2000 al ser sometida a un análisis de sensibilidad, con el fin de obtener

unos datos de los parámetros seleccionados para el desarrollo de los modelos empíricos de ensuciamiento, que permitieran elaborar unos modelos de ensuciamiento con los datos simulados, para luego compararlos con los obtenidos con los datos históricos.

De igual manera, de los intercambiadores de calor del segundo tren de precalentamiento, se compararon algunos datos de diseño claves con los datos obtenidos de simulación y los datos históricos, para de una manera simplificada validar la simulación del tren de precalentamiento.

6.3.1 Análisis de sensibilidad y validación de la simulación. Después de correr la simulación bajo las condiciones de diseño de la planta, se compararon los valores de algunas variables importantes para los intercambiadores de calor como son el coeficiente global de transferencia U, y las temperaturas de entrada y salida de las corrientes, tanto del lado frío como el lado caliente. En las tablas 27 y 28 se muestran los valores hallados.

Tabla 27.

Comparación de coeficientes globales de transferencia de calor.

Equipo	U diseño	U simulado	U proceso real
E-2007	20,31	21,1	23,4
E-2005	20,56	22,1	22,7
E-2005A	44,47	44,9	41,7
E-2009AD	40,95	40,2	42,8
E-2009BC	40,95	40,2	39,2
E-2010AC	60,37	59,4	57,8
E-2010BD	60,37	59,4	58,6

Tabla 28.

Comparación de las temperaturas de entradas y salidas.

Valores de Diseño								
Lado	T	E2005A	E2009AD	E2009BC	E2005	E2007	E2010AC	E2010BD
Caliente	TE	544	540	540	624	624	665	665
	TS	418	454	449	562	561	540	548
Frío	TE	345	394	394	490	483	527	535
	TS	394	483	490	535	527	574	578
Valores de Simulación								
Caliente	TE	549	537	537	620	620	659	659
	TS	423	449	449	556	554	547	551
Frío	TE	347	390	390	475	476	522	527
	TS	390	476	475	527	522	569	570

Para el caso de las temperaturas de entrada (TE) y salida (TS) de la red de intercambiadores de precalentamiento, se encontró por comparación de medias de simulación y de diseño, que el valor de probabilidad dio mayor a 0,05; lo cual significa que se acepta la hipótesis nula identificando que las medias son iguales.

De la misma forma se realiza comparación de desviación estándar, encontrando que se acepta la hipótesis nula que la desviación estándar de las temperaturas de entrada y salida del proceso real son similares a la desviación estándar de las temperaturas de entrada y salida para la simulación.

6.3.2 Modelos de ensuciamiento de los intercambiadores simulados. Se determinaron modelos de ensuciamiento de igual manera como se hizo con los datos históricos de planta, encontrando modelos similares, en función del tiempo (t), la diferencia de temperatura logarítmica corregida (LMTDc), flujo de la corriente fría (FLF) y flujo de la corriente caliente (FLC), para luego conseguir respuestas de variabilidad de coeficientes de transferencia de calor, que al ser

comparados como muestras independientes, se encontró que las medias son iguales y que de forma similar la desviación estándar, además que los límites de confianza de la simulación comprenden los valores obtenidos por simulación.

A continuación se muestran los modelos de ensuciamiento encontrados para cada intercambiador del segundo tren de precalentamiento, con los datos simulados, con sus correspondientes tablas, en donde se presentan los resultados del análisis de varianza y de la prueba de significancia de cada coeficiente de cada modelo.

El modelo estimado para el E-2005A, con los datos simulados, es:

$$Rf(E-2005A_s) = 2,17E-5*t + 2,73E-6*LMTDc - 1,47E-6*FLF + 2,98E-6*FLC \quad (43)$$

$$R^2 = 96,88\% \quad R^2 \text{ (ajustado por G.L.)} = 96,41\%$$

Tabla 29.

Análisis de varianza modelo de regresión de E-2005A simulado.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medio	F ₀	Valor-P
Modelo	0,000384572	4	0,0000961429	155,34	0,0000
Residual	0,0000123782	20	6,18912E-7		
Total	0,00039695	24			

Tabla 30.

Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión de E-2005A simulado.

Variable	Coefficiente Estimado	Error Estándar	Prueba t para H ₀ : Coeficiente = 0	Valor-P
t	2,17E-5	5,751E-6	3,78	0,0012
LMTDc	2,73E-6	8,095E-7	3,38	0,0030
FLF	-1,47E-6	8,840E-7	3,37	0,0030

Variable	Coefficiente Estimado	Error Estándar	Prueba t para H ₀ : Coeficiente = 0	Valor-P
FLC	-2,98E-6	4,333E-7	-3,39	0,0029

El modelo estimado para el E-2010AC, con los datos simulados, es:

$$R_f(E-2010AC_s) = 4,80E-5*t + 7,27E-6*LMTDc - 6,74E-6*FLF + 1,57E-6*FLC \quad (44)$$

$$R^2 = 99,34\% \quad R^2 \text{ (ajustado por G.L.)} = 99,24\%$$

Tabla 31.

Análisis de varianza modelo de regresión de E-2010AC simulado.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medio	F ₀	Valor-P
Modelo	0,000518141	4	0,000129535	747,45	0,0000
Residual	0,000003466	20	1,73302E-7		
Total	0,000521607	24			

Tabla 32.

Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión de E-2010AC simulado.

Variable	Coefficiente Estimado	Error Estándar	Prueba t para H ₀ : Coeficiente = 0	Valor-P
t	4,80E-5	4,670E-6	10,27	0,0000
LMTDc	7,27E-6	8,254E-7	-0,88	0,0016
FLF	-6,74E-6	5,217E-7	1,29	0,0021
FLC	-1,57E-6	1,078E-7	-1,45	0,0039

Una particularidad presentada en el desarrollo de los modelos de ensuciamiento con los datos simulados, es que cuando los intercambiadores o la pareja de intercambiadores son mecánicamente

idénticos, es decir que todos sus datos de especificaciones de diseño son iguales; los modelos estimados también son iguales ($R_f(E-2010ACs) = R_f(E-2010BDs)$). Esto es debido a que teóricamente presentan el mismo comportamiento ante los cambios realizados en el análisis de sensibilidad de la simulación.

Por tanto, se hace énfasis que el modelo de ensuciamiento estimado con los datos simulados para el E-2010AC es el mismo para el E-2010BD.

Ahora se presenta el modelo estimado para el E-2005, con los datos simulados:

$$R_f(E-2005_s) = 2,82E-5*t + 1,68E-6*LMTDc - 4,33E-7*FLF + 1,53E-7*FLC \quad (45)$$

$$R^2 = 97,68\% \quad R^2 \text{ (ajustado por G.L.)} = 97,31\%$$

Tabla 33.

Análisis de varianza modelo de regresión de E-2005 simulado.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medio	F ₀	Valor-P
Modelo	0,000229999	4	0,0000574999	199,87	0,0000
Residual	0,0000054661	19	2,87689E-7		
Total	0,000235466	23			

Tabla 34.

Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión de E-2005 simulado.

Variable	Coficiente Estimado	Error Estándar	Prueba t para H ₀ : Coeficiente = 0	Valor-P
t	2,82E-5	2,317E-6	12,16	0,0000
LMTDc	1,68E-6	3,707E-7	0,45	0,0066
FLF	-4,33E-7	9,942E-8	-0,43	0,0067
FLC	1,53E-7	6,345E-8	0,24	0,0081

El modelo estimado para el E-2007, con los datos simulados es:

$$Rf(E-2007_s) = 2,36E-5*t + 1,03E-6*LMTDc - 5,18E-7*FLF - 1,95E-7*FLC \quad (46)$$

$$R^2 = 95,72\% \quad R^2 \text{ (ajustado por G.L.)} = 95,13\%$$

Tabla 35.

Análisis de varianza modelo de regresión de E-2007 simulado.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medio	F ₀	Valor-P
Modelo	0,000173548	4	0,0000612544	245,91	0,0000
Residual	0,0000049742	20	3,75345E-7		
Total	0,000178522	24			

Tabla 36.

Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión de E-2007 simulado.

Variable	Coefficiente Estimado	Error Estándar	Prueba t para H ₀ : Coeficiente = 0	Valor-P
t	2,36E-5	4,305E-6	9, 52	0,0000
LMTDc	1,03E-6	2,834E-7	0, 53	0,0046
FLF	-5,18E-7	3,419E-8	-0, 49	0,0072
FLC	-1,95E-7	9,467E-8	0,33	0,0064

El modelo estimado para el E-2009AD, con los datos simulados, es:

$$Rf(E-2009AD_s) = 2,79E-5*t + 8,12E-6*LMTDc - 1,26E-6*FLF - 1,55E-6*FLC \quad (47)$$

$$R^2 = 95,15\% \quad R^2 \text{ (ajustado por G.L.)} = 94,42\%$$

Tabla 37.

Análisis de varianza modelo de regresión de E-2009AD simulado.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medio	F₀	Valor-P
Modelo	0,000281946	4	0,0000704865	98,05	0,0000
Residual	0,0000143773	20	7,18864E-7		
Total	0,000296323	24			

Tabla 38.

Análisis de prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión de E-2009AD simulado.

Variable	Coefficiente Estimado	Error Estándar	Prueba t para H₀: Coeficiente = 0	Valor-P
t	2,79E-5	3,845E-6	7,25	0,0000
LMTDc	8,12E-6	7,19E-7	-1,13	0,0027
FLF	-1,26E-6	4,43E-7	2,85	0,0098
FLC	-1,55E-6	4,88529E-7	-3,16	0,0049

Para las parejas de intercambiadores E-2009AD y E-2009BC, el modelo de ensuciamiento estimado con los datos de la simulación es el mismo. Debido a que los intercambiadores o la pareja de intercambiadores son mecánicamente idénticos, es decir que todos sus datos de especificaciones de diseño son iguales; los modelos estimados también son iguales ($R_f(E-2009ADs) = R_f(E-2009BCs)$). Esto es debido a que teóricamente presentan el mismo comportamiento ante los cambios realizados en el análisis de sensibilidad de la simulación.

En términos generales se puede decir que los modelos de ensuciamiento estimados con los datos de la simulación del tren de precalentamiento, anteriormente presentados, son estadísticamente confiables.

Los coeficientes de determinación R^2 de los modelos tienen unos valores por encima del 90%, por lo que pueden explicar como mínimo el 90% del comportamiento del ensuciamiento presentado en los intercambiadores.

Que las variables seleccionadas como el tiempo (t), la diferencia de temperatura media logarítmica corregida (LMTDc), los flujos volumétricos de la corriente fría (FLF) y corriente caliente (FLC) pueden explicar el comportamiento del ensuciamiento bajo un intervalo de confianza del 95%.

En todos los modelos estimados con los datos de la simulación, se observa que el ensuciamiento se incrementa al aumentar el tiempo de corrida; de igual manera, que a medida que aumenta la diferencia de temperatura media logarítmica aumenta el ensuciamiento del intercambiador. Y a medida que aumenta el caudal de la corriente fría o de la corriente caliente disminuye el ensuciamiento. Lo anterior probablemente se debe, que a medida que se incrementa el flujo aumenta la velocidad y la turbulencia se va favoreciendo el mecanismo de remoción del ensuciamiento depositado en las paredes de los tubos del intercambiador.

6.4 Estimación de los costos del ensuciamiento.

El fenómeno de ensuciamiento en los intercambiadores de calor tiene como consecuencia una pérdida en la eficiencia de la transferencia de calor y un aumento en la caída de presión en el intercambiador.

Para una unidad de destilación de crudos como lo es la U-2000, el ensuciamiento de los intercambiadores de su tren de precalentamiento, tiene efectos negativos como son la reducción en la capacidad de carga de la unidad, la disminución en el rendimiento de productos valiosos y

un mayor consumo de gas combustible en el horno, que al final se traduce en un aumento de los costos de operación.

Con la simulación rigurosa del segundo tren de precalentamiento de la unidad, como herramienta de análisis, se realizaron unas pruebas de sensibilidad con el fin de poder estimar los principales costos asociados al ensuciamiento.

En las pruebas realizada se evaluaron los efectos causados por la disminución de la temperatura de precalentamiento de la carga de crudo, en tres variables sensibles como son el calor transferido (BTU/h) en el horno atmosférico H-2001, la producción (BPD) conjunta de Jet y Acpm de la torre atmosférica, y el flujo volumétrico (BPD) de carga de crudo a la unidad.

Se estableció una condición óptima de operación (Ver tabla 39) como punto de partida, y se midieron las desviaciones ocurridas en las variables sensibles ante la disminución de la temperatura de precalentamiento.

Tabla 39.

Condiciones óptimas de operación para estimación de costos.

Carga de Crudo (BPD)	Temperatura de Precalentamiento (°F)	Temperatura de Salida del Horno (°F)	Producción Jet+Acpm (BPD)	Calor Transferido por el Horno (BTU/h)	Costo (USD/h)
50.000	550	705	15.000	95.702.000	0

A las desviaciones presentadas se le dieron un valor económico en dólares (USD), con base a los precios de las materias primas y productos manejados por la coordinación de economía y gestión de la refinería de Barrancabermeja en el mes de noviembre de 2017, y de esta manera se calculó del costo ocasionado.

En la tabla 40, se presentan los resultados obtenidos para los costos asociados al mayor suministro de calor del horno a la carga de crudo, como efecto de la disminución en la temperatura

de precalentamiento; en esta prueba el objetivo es mantener constante la carga de crudo, la temperatura de salida del horno y la producción de Jet y Acpm, a costa de mayor suministro de calor en el horno.

Tabla 40.

Costo asociado por mayor consumo de gas combustible.

Temperatura de Precalentamiento vs Calor Suministrado por el Horno					
Carga de Crudo (BPD)	Temperatura de Precalentamiento (°F)	Temperatura de Salida del Horno (°F)	Producción Jet+Acpm (BPD)	Calor Transferido por el Horno (BTU/h)	Costo (USD/h)
50.000	550	705	15.000	95.702.000	0
50.000	540	705	15.000	100.869.259	18,09
50.000	530	705	15.000	106.006.557	36,07
50.000	520	705	15.000	111.113.766	53,94
50.000	510	705	15.000	116.190.636	71,71

Una vez medida el aumento en la demanda del calor suministrado (BTU/h) por el horno atmosférico a la carga de crudo, el incremento es multiplicado por el precio del gas combustible pagado por la refinería, establecido para este escenario en 3,5 USD por millón de BTU. Dando como resultado, que en el peor de los casos el horno debe suministrar un calor adicional de 20.488.000 BTU/h, con un costo de 71,71 USD/h, y que en un año este costo puede ascender a 620.000 USD.

El siguiente costo estimado, fue el relacionado con la disminución en el rendimiento de medios de la torre atmosférica, que se traduce en una disminución en la producción las fracciones más valiosas, como son el Jet y el Acpm.

Igualmente se parte de unas condiciones óptimas de operación de la unidad, el objetivo principal es mantener constantes el calor suministrado por el horno y la carga de crudo, y se miden los

efectos causados por la disminución de la temperatura de precalentamiento, en la temperatura de salida del horno y en la producción de medios.

Tabla 41.

Costo asociado por menor producción de Jet y Acpm.

Temperatura de Precalentamiento vs Rendimiento de Productos Medios					
Carga de Crudo (BPD)	Temperatura de Precalentamiento (°F)	Temperatura de Salida del Horno (°F)	Producción Jet+Acpm (BPD)	Calor Transferido por el Horno (BTU/h)	Costo (USD/día)
50.000	550	705	15.000	95.702.000	0
50.000	540	697	14.790	95.702.000	4.200
50.000	530	689	14.535	95.702.000	9.300
50.000	520	681	14.265	95.702.000	14.700
50.000	510	673	13.895	95.702.000	22.100

En la tabla 41, el análisis parte de una producción óptima de Jet y Acpm en la torre atmosférica de 15.000 BPD. A medida que la temperatura del precalentamiento disminuye y la carga de crudo se mantiene constante en 50.000 BPD, la temperatura de salida del horno también va decreciendo, debido a que se restringió el suministro de calor del horno al valor óptimo.

Esta condición trae como consecuencia una disminución en la producción de Jet y Acpm, ese delta de producción es multiplicado por la diferencia de precio existente entre los productos medios y un producto referente de menor valor, que para este caso es el gasóleo (producto intermedio de la torre atmosférica que es la materia prima de las unidades de craqueo catalítico).

Con un valor diferencial negativo de 20 USD por barril de producto medio dejado de producir, se estimó que en el peor de los casos se deja de producir 1.105 BPD, cuyo costo asociado es de 22.100 USD por día, cifra que podría ascender a 7.956.000 USD en un año.

Por último se estimó el costo relacionado con la disminución de carga a la unidad, cuyos resultados se presentan en la tabla 42. Para este ejercicio se mantuvieron constantes el calor

suministrado y la temperatura de salida del horno atmosférico, al igual que la producción de medios de la torre atmosférica.

Tabla 42.

Costo asociado por disminución de carga de crudo.

Temperatura de Pre calentamiento vs Carga de Crudo					
Carga de Crudo (BPD)	Temperatura de Pre calentamiento (°F)	Temperatura de Salida del Horno (°F)	Producción Jet+Acpm (BPD)	Calor Transferido por el Horno (BTU/h)	Costo (USD/día)
50.000	550	705	30,00	95.702.000	0
48.000	540	705	30,00	95.702.000	16.000
45.500	530	705	30,00	95.702.000	36.000
43.500	520	705	30,00	95.702.000	52.000
41.600	510	705	30,00	95.702.000	67.200

Para este caso, a medida que la temperatura de pre calentamiento decrecía, la carga de crudo disminuía proporcionalmente con el fin de mantener la temperatura de salida del horno en el valor óptimo, al igual que la producción de medios; sin incrementar el suministro de calor en el horno.

El diferencial de carga de crudo fue medido, y multiplicado por el valor del margen bruto de refinación, que para este escenario fue establecido en 8 USD por barril de carga de crudo. El costo estimado por la disminución de carga de crudo, en el peor de los casos es de 67.200 USD por día, que de mantenerse esta condición de operación en un año, los costos podrían llegar a ser de 24.192.000 USD.

El anterior ejercicio permite dimensionar que el costo, de operar el segundo tren de pre calentamiento de la unidad de destilación de crudo U-2000 con los intercambiadores sucios, puede ser bastante alto. Y normalmente en la U-2000 se da una combinación de estos escenarios con el fin de minimizar los costos, en donde el más utilizado es el de incrementar, en lo máximo

posible, el suministro de calor del horno a la carga, por medio de una mayor quema de gas combustible.

6.5. Optimización del tiempo de corrida del segundo tren de precalentamiento en condicion de ensuciamiento.

Con los modelos de regresión encontrados con los datos históricos para la predicción de ensuciamiento de los intercambiadores de calor del segundo tren de precalentamiento de la U-2000, se realizó una solución conjunta para llevar a cabo una función objetivo; que es minimizar el excesivo consumo de gas combustible en el horno atmosférico, que tiene lugar cuando los intercambiadores empiezan a trabajar bajo una condición de máximo ensuciamiento.

Para determinar las restricciones, se evaluaron modelos de transferencia de calor y ensuciamiento en función del tiempo, para cada uno de los intercambiadores. En la figura 26, se puede detallar una de las ecuaciones encontradas para la transferencia de calor, que fueron sometidas a solución junto con los modelos de regresión de ensuciamiento obtenidos con los datos históricos del proceso.

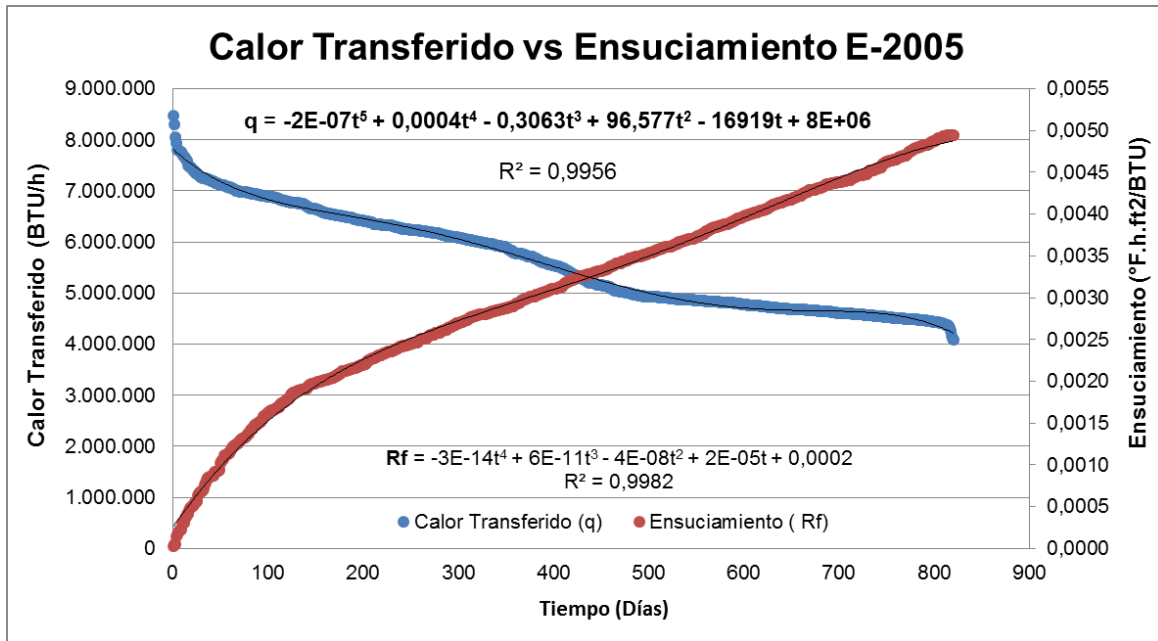


Figura 26. Tendencias de calor transferido y ensuciamiento de E-2005.

En el Anexo B se pueden consultar las gráficas de tendencias de calor transferido y ensuciamiento, para los intercambiadores analizados. A continuación, en la tabla 43 se resumen el ejercicio de optimización del tiempo de corrida realizado.

Tabla 43.

Evaluación del tiempo y máxima entrega de calor después de lograr el ensuciamiento límite.

Objetivo		
$q (2 \text{ Tren}) = -1,8E-06t^5 + 0,009t^4 - 5,53t^3 + 1588t^2 - 246780t + 95E6 + 79,5E6$		
Variable	Valor original	Valor final
	(BTU/h)	(BTU/h)
q Horno	95.000.000	111.999.985
Valor Óptimo		
Variable	Valor original	Valor final
Tiempo	510	631
Restricciones		

Variable	Valor	Fórmula	Estado	Demora
Carga	50.000	≤ 50.000	Vinculante	0
q Horno	112.000.000	$\leq 112.000.000$	Vinculante	0
Tiempo	631	≤ 800	No vinculante	118

La restricción más importante para la solución de la función objetivo, es la transferencia de calor máxima del horno H2101, escenario que se presenta cuando el horno llega a una transferencia del 112% de su capacidad nominal, la cual se definió en 112.000.000 BTU/h. Además se estableció que la carga es de 50.000 BPD, y la temperatura de salida del Horno es 705°F.

Al resolver la función objetivo, con ayuda de la herramienta Solver en Excel, teniendo en cuenta las restricciones de capacidad máxima del horno, se halló que a partir del día 631 el horno empieza a trabajar a su máxima transferencia de calor de 112.000.000 BTU/h, con el fin de mantener el nivel de carga establecido en 50.000 BPD y una temperatura de salida del horno de 705°F.

El ensuciamiento alcanzado, por los intercambiadores de calor del segundo tren de precalentamiento de la U-2000 a los 631 días de corrida, de acuerdo a los modelos empíricos de ensuciamiento encontrados con los datos históricos es presentado en la tabla 44; en donde se observa que los intercambiadores con un valor de factor de ensuciamiento por encima de su diseño, son los E-2010ABCD, los cuales deberían ser programados para someterse a un mantenimiento de limpieza y recuperar su condición óptima de operación.

Tabla 44.

Ensuciamiento alcanzado por los intercambiadores en el tiempo de corrida optimizado.

Equipo	Rf de Diseño	Rf Alcanzado en 631 días según modelo empírico	Prioridad de Mantenimiento
E-2005A	0,01	0,0068	Media
E-2005	0,03	0,0016	Baja
E-2007	0,03	0,0032	Baja
E-2009AD	0,01	0,0027	Baja
E-2009BC	0,01	0,0029	Baja
E-2010AC	0,013	0,0203	Alta
E-2010BD	0,013	0,0208	Alta

7. Conclusiones

- Con el método utilizado para el cálculo del ensuciamiento en los intercambiadores de calor del segundo tren de precalentamiento de la U-2000, el de la diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD), se logró obtener unas tendencias que reflejaron el comportamiento de este factor en el tiempo.
- Como un primer ejercicio de acercamiento al fenómeno de ensuciamiento que se presenta en los intercambiadores de calor del tren de precalentamiento de la unidad de destilación de crudos U-2000, en la refinería de Barrancabermeja, los modelos de regresión empíricos desarrollados con los datos históricos del proceso, pueden considerarse como una buena

aproximación para predecir el comportamiento del ensuciamiento de los intercambiadores de calor analizados.

- En los modelos empíricos estimados para la predicción del ensuciamiento, se observó que el parámetro tiempo de corrida es el que tiene mayor determinación en el fenómeno de ensuciamiento de los intercambiadores de calor evaluados, y que una alta velocidad de las corrientes frías y calientes en el intercambiador, moderan la tendencia del ensuciamiento.
- Los modelos de predicción del ensuciamiento hallados con los datos históricos de proceso y con los datos de simulación presentan una gran similitud, lo que indica que la simulación realizada es una buena representación del proceso real y que esta podría ser usada como una herramienta para análisis de sensibilidad del comportamiento de los intercambiadores del segundo tren de precalentamiento de la U-2000.

8. Recomendaciones

- Las unidades de proceso de la refinería de Barrancabermeja, como la U-2000, generan continuamente una buena cantidad de información, que es muy útil para el análisis del comportamiento de la operación y de los equipos, por lo cual se sugiere reforzar los planes de mantenimiento de la instrumentación de las plantas, para así garantizar que la información obtenida del proceso, para el análisis y evaluaciones del mismo, sea de buena calidad.

- Se recomienda que la Gerencia de la Refinería de Barrancabermeja hacer ajustes en los tiempos de corrida y en los planes de mantenimiento para la limpieza de los intercambiadores de calor de los trenes de precalentamiento de las unidades de destilación de crudos, específicamente del segundo tren de precalentamiento de la U-2000, con el fin de garantizar un buen desempeño energético de este sistema, generar ahorros en el consumo de gas combustible en los hornos de procesos y mejorar los márgenes de refinación, manteniendo un buen nivel de carga y un buen rendimiento de productos valiosos.
- Se debería continuar con el seguimiento, monitoreo y estudio del fenómeno de ensuciamiento de los intercambiadores de calor de los trenes de precalentamiento de las unidades de destilación de crudos, identificando nuevos parámetros que permitan mejorar los modelos propuestos en este trabajo de aplicación, y/o generar nuevos modelos. Con lo cual se contaría con herramientas de análisis, que serían de ayuda en la toma de decisiones en las problemáticas relacionadas con el ensuciamiento de intercambiadores de calor.

Referencias Bibliográficas

- Alcaraz, W. (2016) *Simulación y Análisis de Sensibilidad del Sistema de Destilación de Crudos de la U-2000 de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja*. Trabajo de Grado Magíster en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. 91 p.
- Aspen Tech, (2011) «*Aspen Physical Property System. "Physical Property Methods". Version Number: V7.3.*» Burlington
- Awad, M. (2011) *Fouling of Heat Transfer Surfaces*. In: Heat Transfer - Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems. Edited by Aziz Belmiloudi. Publisher: InTech. published January 28. 666 pg.
- Becerra Upegui B. C., Infante Rubio C. D. (2014) *Diseño de una metodología de control multivariable que permita diagnosticar, controlar y optimizar la red de intercambio de calor del circuito de fondos de la sección de fraccionamiento de la unidad de cracking catalítico fluidizado (FCC) de la refinería de Cartagena*. Universidad De San Buenaventura. Especialización En Ingeniería De Procesos De Petróleo. Cartagena.
- Bott T.R., (1995) *Fouling of Heat Exchangers*. Chemical Engineering Monographs. Elsevier Science Inc.
- Cengel, Y. (2007) *Transferencia de Calor y Masa: Un Enfoque Práctico*. Tercera Edición. Editorial: McGraw-Hill. México. 930 pág.
- Chen Y.C., Quan Z.H. & MA C.F. (2007) *Investigation Of Fouling Process For Convective Heat Transfer In An Annular Duct*. ECI Symposium Series, Volume RP5, Article 30, 2007. Portugal.
- Coletti F. y Macchietto S., (2009) *Refinery Pre-heat Train Network Simulation Undergoing Fouling: Assessment of the Energy Efficiency and Carbon Emissions*. En: International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning – VIII, July 14 - 19, Schladming, Austria.

Dyment V. M. J. (2015) «*Jump Start: Getting Started with Aspen Plus V8*,».

ECOPETROL (2015) *Historia de la Refinería de Barrancabermeja* Recuperado de: <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/Boletines%202015/Boletines%202015/refineria-de-barrancabermeja-celebra-/> Febrero 2015.

ECOPETROL S.A. (2009) *Manual de Procesos de la Unidad de Destilación de Crudos U2000*. Barrancabermeja. Colombia.

Erdener A.H., Becer M., Bakir M., Özçelik Y. and Balkan F. (2013) *Fouling Monitoring In Crude Oil Preheat Trains*. En: International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning, June. Budapest, Hungary.

ESDU (Engineering Sciences Data Unit), (2000) *Heat exchanger fouling in the preheat train of crude oil distillation levels*, Data Item 0016, ESDU Intl., London.

Fernández Rocha R.A. (2006), *Curso básico de simulación de procesos con Aspen Hysys*.

Gavilanes Carrasco F.(2012) *Optimización del proceso criogénico de planta de gas mediante simulación para incrementar la producción de gas licuado de petróleo (G.L.P.)*, Puebla Ecuador.

Gil C. I. D., Guevara L.J. R., J García Z. L. y Leguizamon R.A., (2011) *Análisis y simulación de procesos en Ingeniería Química*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Gudmundsson O., Palsson O.P., Palsson H. and Jonsson G.R., (2011) *Comparison Of Fouling Detection Between A Physical Method And A Black Box Model*. En: International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning - 2011, June 05 - 10, Crete Island, Greece.

Hassan Al-Haj Ibrahim. (2012) *MATLAB A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications*. Volume 3. Department of Chemical Engineering, Al-Baath University, Homs, Syria. En: InTech, September 26.

- Heins A., Veiga R., Ruiz C., Riera A. (2007) *Fouling Monitoring And Cleaning Optimization In A Heat Exchanger Network Of A Crude Distillation Unit*. En: International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning – VII, July 1 - 6, Tomar, Portugal.
- Hesselgreaves, J. (2001). *Compact Heat Exchangers: Selection, Design and Operation*. Department of Mechanical and Chemical Engineering, Heriot- Watt University, Edinburgh, UK. Printed by Pergamon. Elsevier Science Inc.
- Jerónimo M., Melo L., Sousa B., Ferreira, C. Martins P., (1997) Monitoring the Thermal Efficiency of Fouled Heat Exchangers: A Simplified Method. En: Experimental Thermal and Fluid Science; 14:455-463. Elsevier Science Inc.
- Kuppan, (2013) Thulukkanam. Heat Exchanger Design Handbook. Segunda Edición. Editorial: CRC Press. Estados Unidos. 1245 pág.
- López D. C., Mahecha C. A., Hoyos L. J., Acevedo L. y Villamizar J. F., (2009) «*Optimization model of a system of crude oil distillation units with heat integration and metal modeling*,» *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, vol. 3, nº 5, pp. 159-173, Diciembre.
- Moein N., Javad A., Shahrokh S., Mohammad F., (2012) *Dynamic crude oil fouling prediction in industrial preheater using optimized ANN based moving window technique*. En: Chemical Engineering Research and Design 90, 938–949. Published by Elsevier.
- Montgomery D. C, (2004) *Diseño y Análisis de Experimentos*, México: Editorial Limusa.
- Montgomery D. C, (1995) *Probabilidad y Estadística Aplicados a la Ingeniería*, Madrid: McGraw-Hill.
- Montgomery D., PECK Elizabeth, VINING Geoffrey, *Introducción al Análisis de Regresión Lineal*, México: Compañía Editorial Continental, 2006.
- Mueller-Steinhagen H, Malayeri Mr, Watkinson Ap. (2005) Fouling of heat exchanger-New approaches to solve old problem. En: Heat Transfer Engineering.
- Ring T. A., (S.F.) Property Selection Recuperado de:
<http://www.che.utah.edu/~sutherland/PropertySelection.pdf>.

Sadik Kakaç, Hongtan Liu, Anchasa Pramuanjaroenkij. (2002) Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design. Segunda Edición. Editorial: CRC Press. Estados Unidos. 522 pág.

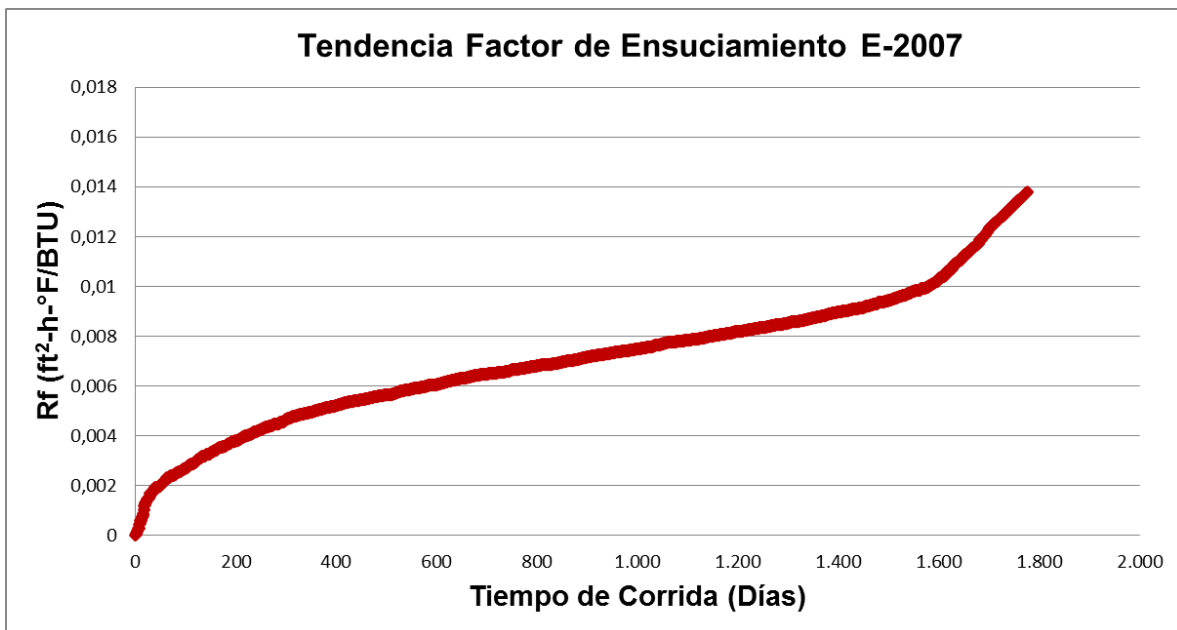
Şahin G., Orman S., Becer M., ayhan U.B., ÖZÇELİK Y., and Balkan F. (2011) Fouling Monitoring In Diesel Unit Preheat Exchangers. En: International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning, June. Crete Island, Greece.

Walpole R., Myers R., Myers S, Ye K. (2012) Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, México: Pearson Educación.

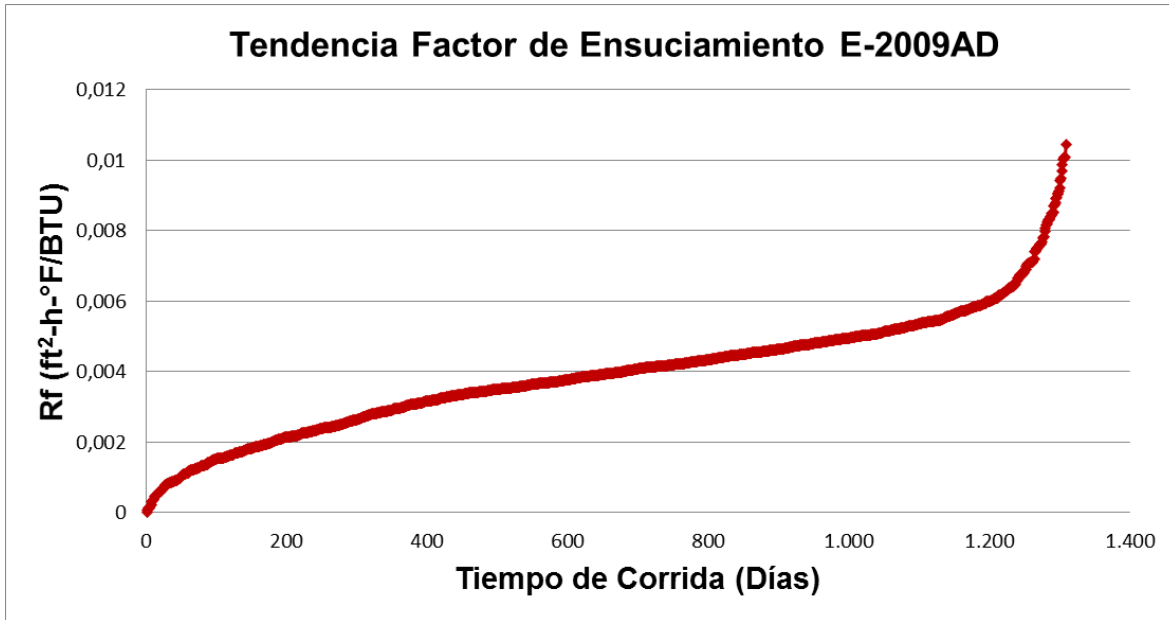
Apéndices

Apéndice A. Tendencia del Factor de Ensuciamiento de los Intercambiadores de Calor del Segundo Tren de Pre calentamiento de la U-2000 con Datos Históricos.

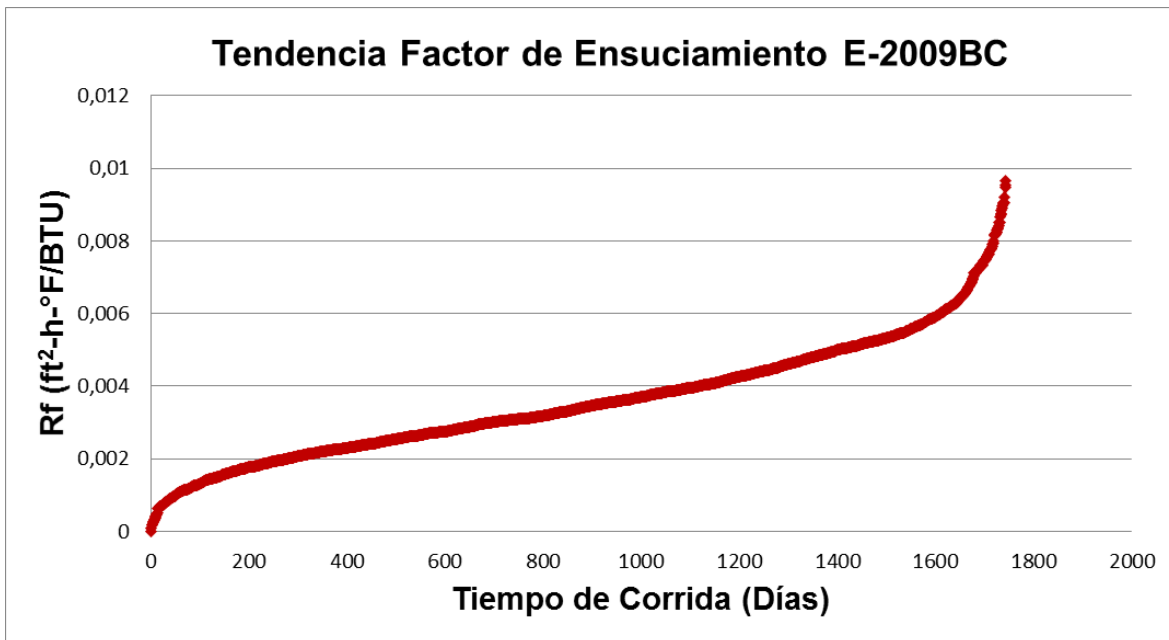
Apéndice A1. Tendencia del Ensuciamiento del E-2007.



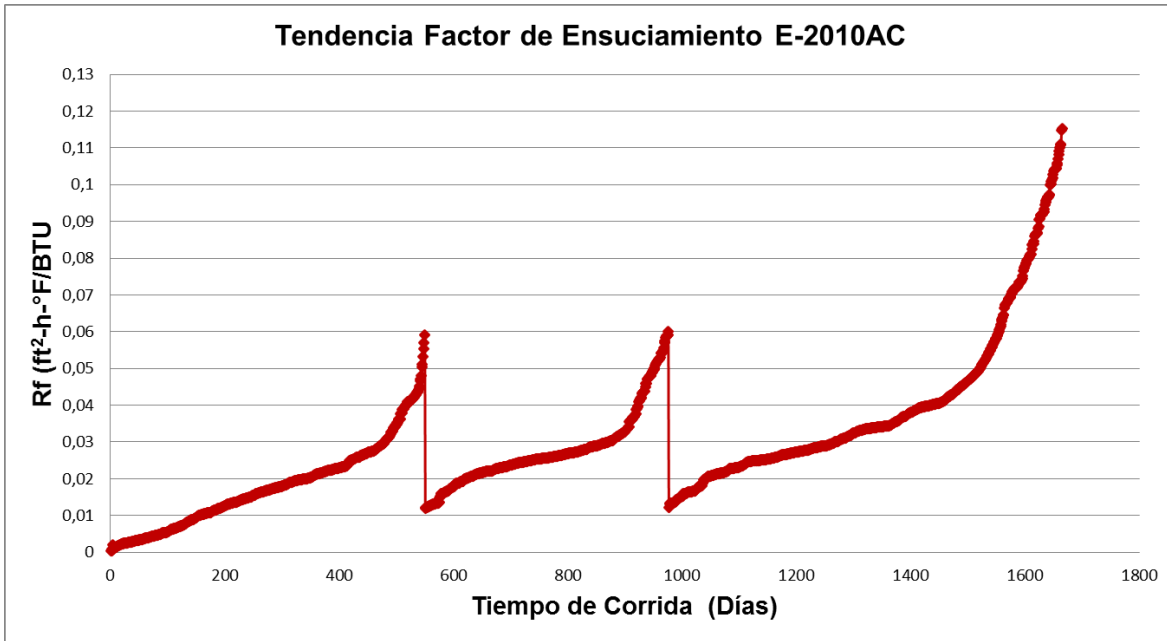
Apéndice A2. Tendencia del Ensuciamiento del E-2009AD.



Apéndice A3. Tendencia del Ensuciamiento del E-2009BC.

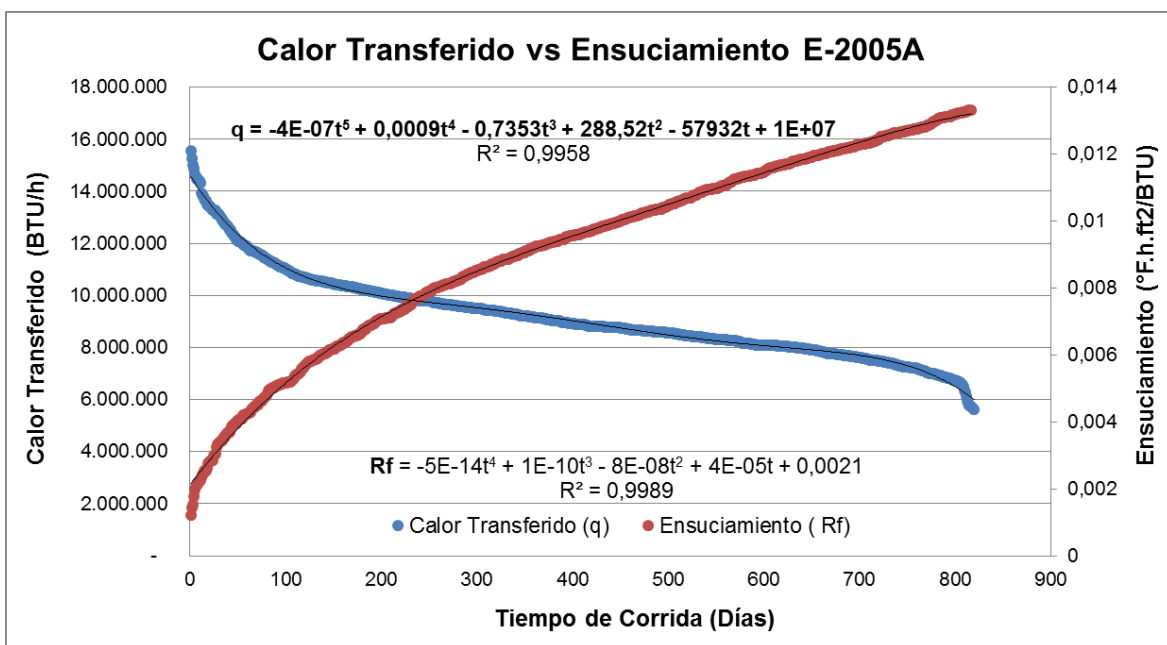


Apéndice A4. Tendencia del Ensuciamiento del E-2010AC.

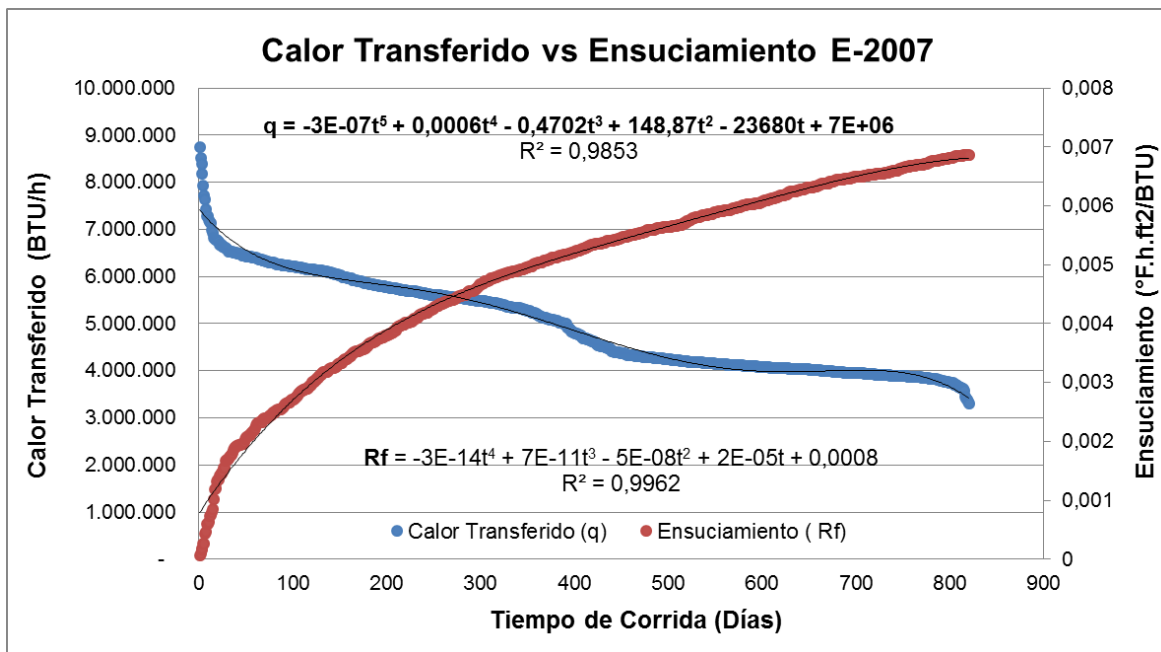


Apéndice B. Tendencias de Calor Transferido y Ensuciamiento en Función del Tiempo del Segundo Tren de Pre calentamiento de la U-2000.

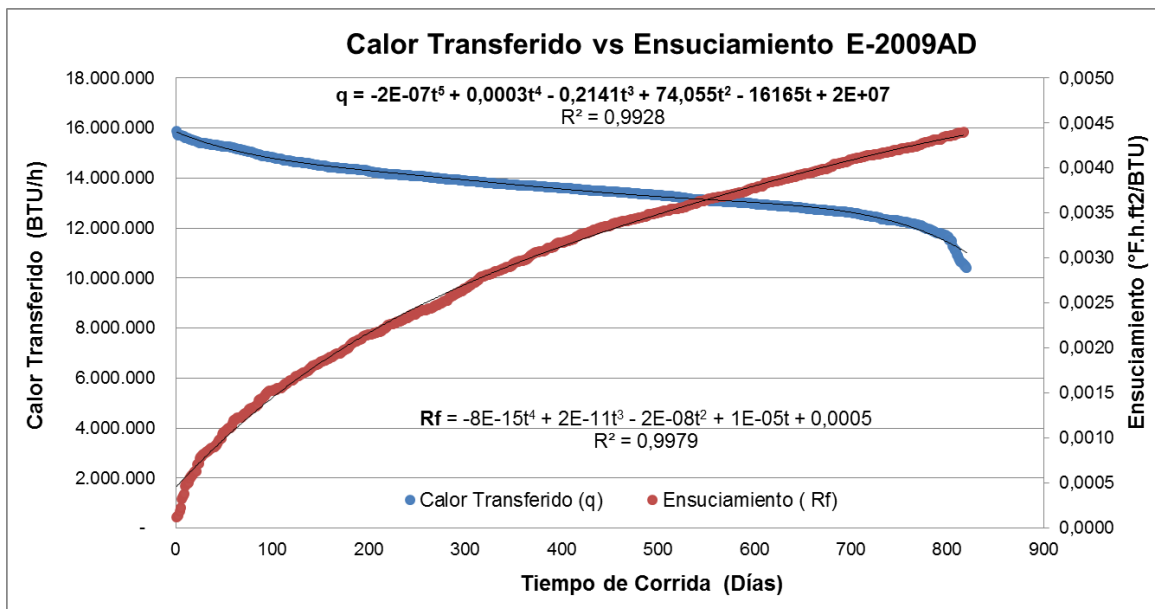
Apéndice B1. Tendencia de calor transferido y ensuciamiento de E-2005A.



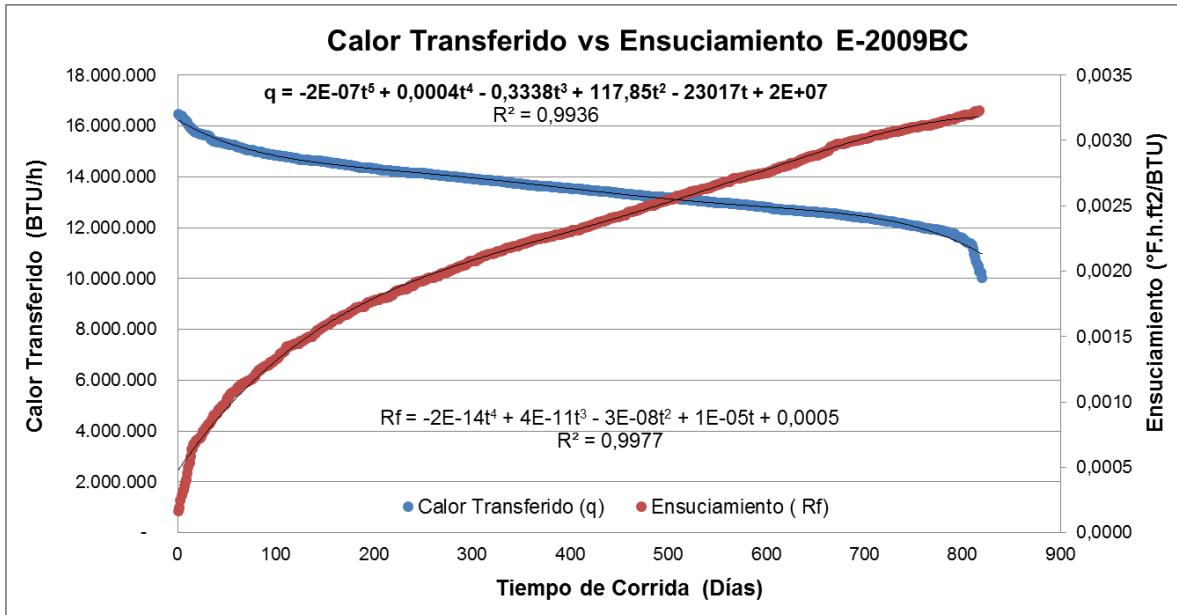
Apéndice B2. Tendencia de calor transferido y ensuciamiento de E-2007.



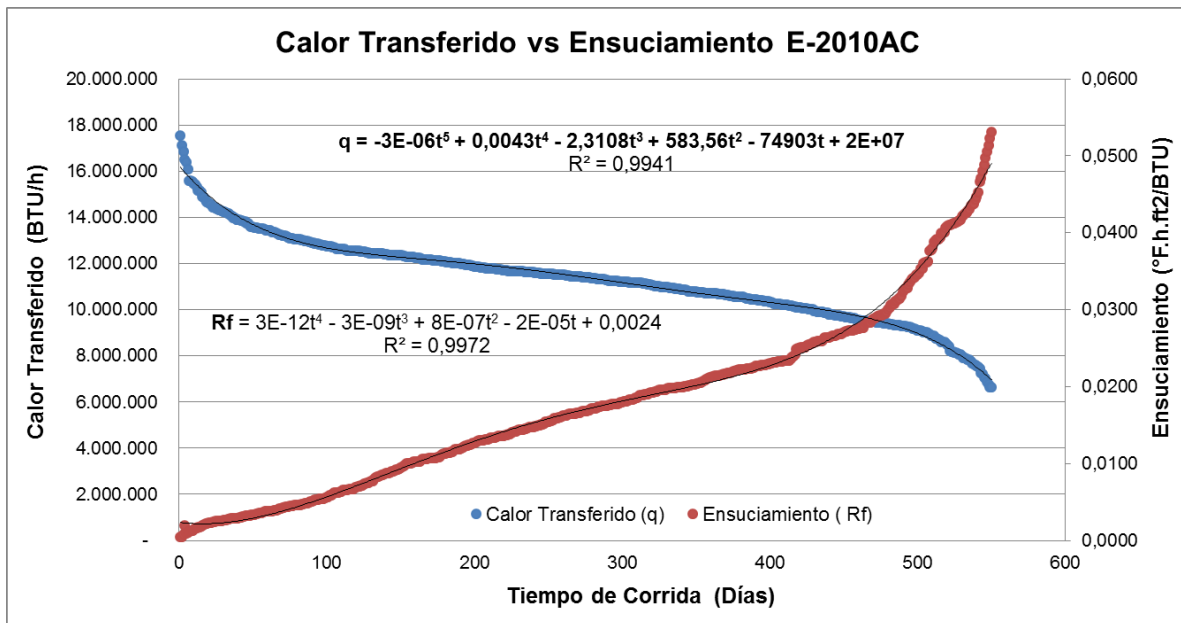
Apéndice B3. Tendencia de calor transferido y ensuciamiento de E-2009AD.



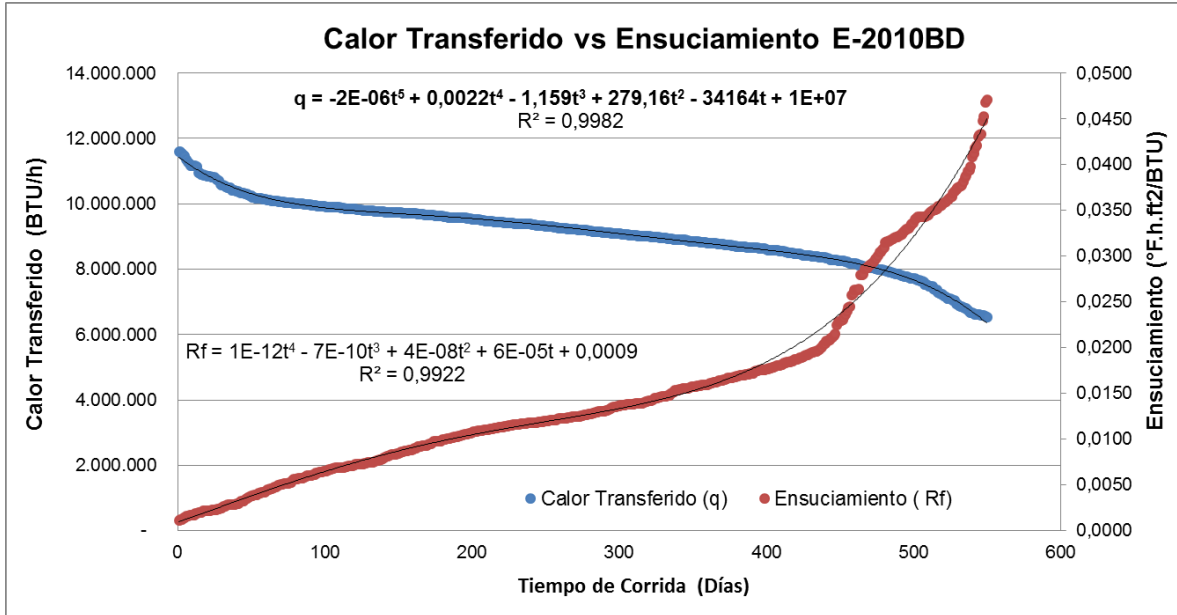
Apéndice B4. Tendencia de calor transferido y ensuciamiento de E-2009BC.



Apéndice B5. Tendencia de calor transferido y ensuciamiento de E-2010AC.




Apéndice B6. Tendencia de calor transferido y ensuciamiento de E-2010BD.




Apéndice C. Hojas de especificaciones de diseño de los intercambiadores de calor del segundo tren de precalentamiento de la U-2000.


Apéndice C1. Hoja de especificaciones de E-2005A.

		HEAT EXCHANGER SPECIFICATION SHEET				PIT-00-F-024	
COMPLEJO INDUSTRIAL DE BARRANCABERMEJA		PLANTA: U-2000		TAG			
PROJECT:	UNIT: 2000	DOC. TYPE:	PROGR:	REV.	SHEET OF	DATE: 20-10-00	
1	SERVICE OF UNIT CRUDO/FONDOS DE VACIO					Item E-2005 A	
2						MR	
3	Size 39 x 240	Type AES		Connected in: 1 Parallel 1 Series			
4	Surface Per Unit 3788 sq.ft	No. of Shells per Unit 1		Surface per Shell(eff.) 3788 sq.ft			
PERFORMANCE OF ONE UNIT (No. of Units Required:)							
6	Fluid allocation		Shell Side (in/out)		Tube Side(in/Out)		
7	Fluid Name		CRUDO		FONDOS DE VACIO		
8	Total Fluid	lb / h	536045		197868		
9	Vapor	lb / h					
10	Liquid	lb / h	535550	535550	197868	197868	
11	Steam	lb / h					
12	Water	lb / h	495	495			
13	Non Condensables	lb / h					
14	MW(Vapors/Non Condensables)						
15	Density(Liq/Vap)	lb / ft ³	48.512 /	47.303 /	52.242 /	54.376 /	
16	Viscosity (Liq/Vap)	cp	0.723 /	0.546 /	0.613 /	1.632 /	
17	Therm. Cond. (Liq./Vap)	Btu / h ft ² °F	0.0498 /	0.0475 /	0.0439 /	0.0473 /	
18	Specific Heat (Liq./Vap.)	Btu / lb°F	0.6012 /	0.6242 /	0.6756 /	0.6176 /	
19	Latent Heat	Btu / lb					
20	Operating Temperature	°F	345	394.3	544.2	417.9	
21	Velocity Average	ft / s	2.84		4.60		
22	Pressure Drop/Shell	PSI Allowed	Calc. 15.35		Allowed	Calc. 15.95	
23	Inlet Operating pressure	PSIG	394.40		274		
24	Fouling Factor	h ft ² °f / Btu	0.005		0.005		
25	Side Heat Transfer Coeff.	Btu / h ft ² °F	256.6		166.9		
26	Heat Duty	16.173 *10E6 Btu / h	MTD (corr.) °F: 96.0				
27	Transfer rate	Btu / h ft ² °F Service	44.47	Clean	90.35		
CONSTRUCCION OF ONE SHELL							
29			Shell Side		Tube Side		
30	Design/Test Press.	PSIG	460		335		
31	Design Temperature	°F	600		600		
32	No. of Passes Per Shell		1		8		
33	Corrosion Allowance		in.				
34	Connections	In	3				
35	Size in. & Rating	Out	4				
36		In	5				
37	Insulation					MATERIALS (Acording to ASTM())	
38	Tube No. 964	O.D. in. 0.75	Thk(BWG) 14		Tubes A-213 T5		
39	Lenght ft. 20	30	60	90	45	Shell A-515 GR 60	
40	Shell :I.D. 39	in. ;O.D.		in.		Tube Sheet A-182 F5	
41	Baffles :Type SEGMENTAL	;Cut 15		% Vert.		Shell Cover A-515 GR 60	
42	Spacing :Central 7.8	in. ;Inlet		in.		Channel A-387 5	
43	No. of baffles 28	;No. of pairs of Scaling Strips				Channel Cover A 182 F5	
44	Baffle Long:		GASKETS		Float. Head Cover A 182 F5		
45	Impingement Plate YES	Shell		Baffles A 285 C			
46	(FOR THERMOSIPHONS ONLY)		Chanel		Tube Supports A 285 C		
47	Liq. Static head Req.d		Floating Head		BOLTINGS		
48	dv2	lb / ft s ²	Shell Nozzle	Bundle	Shell/Channel	Shell Cover A193 B7/1942H	
49	In				Test Ring	Shell / Channel A193 B7/1942H	
50	Out				Test Flange	Floating Head A193 B7/1942H	
51	Intermediate				Expansion Joint	Channel Cover A193 B7/1942H	
52	T.E.M.A. Class Code Requirements						
53	Weight: Empty:	lb. Full of Water:		lb. Tube Bundle		lb.	
54	NOTES: 1- EQUIPO NUEVO REVAMPING 1998						
55	2 - CONDICIONES DE OPERACION CRUDO CUSIANA						


Apéndice C2. Hoja de especificaciones de E-2009AD.

		HEAT EXCHANGER SPECIFICATION SHEET				PIT-00-F-024	
COMPLEJO INDUSTRIAL DE BARRANCABERMEJA		PLANTA: U-2000		TAG			
PROJECT:	UNIT: 2000	DOC. TYPE:	PROGR:	REV.	SHEET OF	DATE: 20-10-00	
1	SERVICE OF UNIT	GASOLEO PESADO DE VACIO/CRUDO			Item	E-2009 AD	
2					MR		
3	Size	40 x 240	Type	AES		Connected in:	1 Parallel 2 Series
4	Surface Per Unit	7674 sq.ft	No. of Shells per Unit	2		Surface per Shell(ef.)	3837 sq.ft
5	PERFORMANCE OF ONE UNIT (No. of Units Required:)						
6	Fluid allocation	Shell Side (in/out)			Tube Side(in/Out)		
7	Fluid Name	GASOLEO PESADO DE VACIO			CRUDO		
8	Total Fluid	lb / h	279873		268022		
9	Vapor	lb / h					
10	Liquid	lb / h	279873	279873	267775	267775	
11	Steam	lb / h					
12	Water	lb / h			247	247	
13	Non Condensables	lb / h					
14	MW(Vapors/Non Condensables)						
15	Density(Liq/Vap)	lb / ft ³	48.066 /	49.806 /	47.301 /	44.884 /	
16	Viscosity (Liq/Vap)	cp	0.818 /	1.195 /	0.546 /	0.383 /	
17	Therm. Cond. (Liq./Vap)	Btu / h ft °F	0.0431 /	0.0461 /	0.0475 /	0.0430 /	
18	Specific Heat (Liq./Vap.)	Btu / lb°F	0.6778 /	0.6407 /	0.6243 /	0.6645 /	
19	Latent Heat	Btu / lb					
20	Operating Temperature	°F	540	454	394.3	483.0	
21	Velocity Average	ft / s	1.32		3.55		
22	Pressure Drop/Shell	PSI	Allowed 10.0	Calc. 3.44	Allowed 20.0	Calc. 3.59	
23	Inlet Operating pressure	PSIG	220		377.55		
24	Fouling Factor	h ft ² °f / Btu	0.005		0.005		
25	Side Heat Transfer Coeff.	Btu / h ft ² °F					
26	Heat Duty	15.8 *10E6 Btu / h	MTD (corr.) °F:	50.5			
27	Transfer rate	Btu / h ft ² °F	Service 40.95	Clean 76.92			
28	CONSTRUCCION OF ONE SHELL						
29		Shell Side			Tube Side		
30	Design/Test Press.	PSIG	270	530			
31	Design Temperature	°F	650	620			
32	No. of Passes Per Shell		1	4			
33	Corrosion Allowance	in.					
34	Connections	In 3					
35	Size in. &	Out4					
36	Rating	Inte5					
37	Insulation				MATERIALS (According to ASTM())		
38	Tube No.	978	O.D. in.	0.75	Thk(BWG)	14	Tubes A-179
39	Lenght ft.	20	30	60	90	45 X	Shell A-515 GR 60
40	Shell :I.D.	40.30	in.	O.D.	40.86	in.	Tube Sheet A-515 GR 60
41	Baffles :Type	SEGMENTAL	Cut	16	% Vert.		Shell Cover A-515 GR 60
42	Spacing :Central	8.27	in.	Inlet		in.	Channel A-515 GR 60
43	No. of baffles	31	No. of pairs of Scaling Strips				Channel Cover A105 GR 73
44	Baffle Long:		GASKETS			Float. Head Cover	A-515 GR 60
45	Impingement Plate		Shell				Baffles A 283 C
46	(FOR THERMOSIPHONS ONLY)		Chanel				Tube Supports A 283 C
47	Liq. Static head Req.d		Floating Head			BOLTINGS	
48	dv2	lb / ft s ²	Shell Nozzle	Bundle	Shell/Channel		Shell Cover A193 B7/1942H
49	In				Test Ring		Shell / Channel A193 B7/1942H
50	Out				Test Flange		Floating Head A193 B7/1942H
51	Intermediate				Expansion Joint		Channel Cover A193 B7/1942H
52	T.E.M.A. Class	R	Code Requirements				
53	Weight: Empty:		lb. Full of Water:		lb. Tube Bundle		lb.
54	NOTES: 1- EQUIPO RELOCALIZADO REVAMPING 1998						
55	2 - CONDICIONES DE OPERACIÓN CRUDO CUSIANA						


Apéndice C3. Hoja de especificaciones de E-2009BC.

		HEAT EXCHANGER SPECIFICATION SHEET				PIT-00-F-024		
COMPLEJO INDUSTRIAL DE BARRANCABERMEJA		PLANTA: U-2000		TAG				
PROJECT:	UNIT: 2000	DOC. TYPE:	PROGR:	REV.	SHEET OF	DATE: 20-10-00		
1	SERVICE OF UNIT	GASOLEO PESADO DE VACIO/CRUDO			Item	E-2009 BC		
2					MR			
3	Size	40 x 240	Type	AES	Connected in:	1 Parallel	2 Series	
4	Surface Per Unit	7674 sq.ft	No. of Shells per Unit	2	Surface per Shell(eff.)	3837 sq.ft		
5	PERFORMANCE OF ONE UNIT (No. of Units Required:)							
6	Fluid allocation	Shell Side (in/out)			Tube Side(in/Out)			
7	Fluid Name	GASOLEO PESADO DE VACIO			CRUDO			
8	Total Fluid	lb / h	279873		268022			
9	Vapor	lb / h						
10	Liquid	lb / h	279873	279873	267775	267775		
11	Steam	lb / h						
12	Water	lb / h			247	247		
13	Non Condensables	lb / h						
14	MW(Vapors/Non Condensables)							
15	Density(Liq/Vap)	lb / ft ³	48.066 /	49.985 /	47.301 /	44.631 /		
16	Viscosity (Liq/Vap)	cp	0.818 /	1.249 /	0.546 /	0.371 /		
17	Therm. Cond. (Liq./Vap)	Btu / h ft °F	0.0431 /	0.0464 /	0.0475 /	0.0425 /		
18	Specific Heat (Liq./Vap.)	Btu / lb°F	0.6778 /	0.6367 /	0.6243 /	0.6684 /		
19	Latent Heat	Btu / lb						
20	Operating Temperature	°F	540	449	394.3	490.1		
21	Velocity Average	ft / s	1.31		3.56			
22	Pressure Drop/Shell	PSI Allowed	Calc.	3.44	Allowed	Calc. 3.6		
23	Inlet Operating pressure	PSIG	220		377.49			
24	Fouling Factor	h ft ² °f / Btu	0.005		0.005			
25	Side Heat Transfer Coeff.	Btu / h ft ² °F						
26	Heat Duty	15.48 *10E6 Btu / h	MTD (corr.) °F:	50.5				
27	Transfer rate	Btu / h ft ² °F	Service	40.95	Clean	76.92		
28	CONSTRUCCION OF ONE SHELL							
29		Shell Side			Tube Side			
30	Design/Test Press.	PSIG	270	530				
31	Design Temperature	°F	650	620				
32	No. of Passes Per Shell		1	4				
33	Corrosion Allowance	in.						
34	Connections	In	3					
35	Size in. &	Out	4					
36	Rating	In	5					
37	Insulation						MATERIALS (According to ASTM())	
38	Tube No.	978	O.D. in.	0.75	Thk(BWG)	14		
39	Lenght ft.	20	30	60	90	45	X	
40	Shell :I.D.	40.30	in.	:O.D.	40.86	in.		
41	Baffles :Type	SEGMENTADO		:Cut	16	% Vert.		
42	Spacing :Central	8.27	in.	:Inlet	in.			
43	No. of baffles	31		:No. of pairs of Scaling Strips				
44	Baffle Long:	GASKETS					Float. Head Cover A-515 GR 60	
45	Impingement Plate	Shell			Baffles A 283 C			
46	(FOR THERMOSIPHONS ONLY)	Chanel			Tube Supports A 283 C			
47	Liq. Static head Req.d	Floating Head					BOLTINGS	
48	dv2	lb / ft s ²	Shell Nozzle	Bundle	Shell/Channel	Shell Cover A193 B7/1942H		
49	In				Test Ring	Shell / Channel A193 B7/1942H		
50	Out				Test Flange	Floating Head A193 B7/1942H		
51	Intermediate				Expansion Joint	Channel Cover A193 B7/1942H		
52	T.E.M.A. Class	R		Code Requirements				
53	Weight: Empty:	lb. Full of Water:		lb. Tube Bundle		lb.		
54	NOTES: 1- CONDICIONES DE OPERACIÓN CRUDO CUSIANA							
55								


Apéndice C4. Hoja de especificaciones de E-2005.

		HEAT EXCHANGER SPECIFICATION SHEET				PIT-00-F-024	
COMPLEJO INDUSTRIAL DE BARRANCABERMEJA				PLANTA: U-2000		TAG	
PROJECT:		UNIT: 2000	DOC. TYPE:	PROGR:	REV.	SHEET OF	DATE: 20-10-00
1	SERVICE OF UNIT	REFLUJO INFERIOR ATMOSFERICO			Item		E-2005
2							MR
3	Size	45 x 240	Type	AES	Connected in:	1 Parallel	1 Series
4	Surface Per Unit	5030 sq.ft	No. of Shells per Unit	1	Surface per Shell(ef.)	5030 sq.ft	
PERFORMANCE OF ONE UNIT (No. of Units Required:)							
5	Fluid allocation	Shell Side (in/out)			Tube Side(in/Out)		
6	Fluid Name	REFLUJO INFERIOR T-2000			CRUDO		
7	Total Fluid	lb / h			169110		
8	Vapor	lb / h					
9	Liquid	lb / h			169110	169110	267775
10	Steam	lb / h					
11	Water	lb / h			247	247	
12	Non Condensables	lb / h					
13	MW(Vapors/Non Condensables)						
14	Density(Liq/Vap)	lb / ft ³	41.335 /	43.149 /	44.630 /	43.468 /	
15	Viscosity (Liq/Vap)	cp	0.295 /	0.371 /	0.371 /	0.313 /	
16	Therm. Cond. (Liq./Vap)	Btu / h ft °F	0.0382 /	0.0412 /	0.0425 /	0.0405 /	
17	Specific Heat (Liq./Vap.)	Btu / lb°F	0.7185 /	0.6935 /	0.6684 /	0.6852 /	
18	Latent Heat	Btu / lb					
19	Operating Temperature	°F			623.6	562.3	490.1
20	Velocity Average	ft / s			1.0	4.25	
21	Pressure Drop/Shell	PSI	Allowed 10.0	Calc. 1.71	Allowed 10.0	Calc. 6.42	
22	Inlet Operating pressure	PSIG	190			370.03	
23	Fouling Factor	h ft ² °f / Btu	0.01			0.02	
24	Side Heat Transfer Coeff.	Btu / h ft ² °F					
25	Heat Duty	7.316 *10E6 Btu / h	MTD (corr.) °F:	71.6			
26	Transfer rate	Btu / h ft ² °F	Service 20.56	Clean 88.72			
CONSTRUCCION OF ONE SHELL							
27		Shell Side			Tube Side		
28	Design/Test Press.	PSIG	350	530			
29	Design Temperature	°F			630	500	
30	No. of Passes Per Shell	1			6		
31	Corrosion Allowance	in.					
32	Connections	In 3					
33	Size in. &	Out 4					
34	Rating	Inte 5					
35	Insulation				MATERIALS (Acording to ASTM())		
36	Tube No.	1283	O.D. in.	0.75	Thk(BWG)	14	Tubes A-179
37	Lenght ft.	20	30	60	90	45	X
38	Shell :I.D.	44.60	in.	;O.D.	45	in.	Tube Sheet A-515 GR 60
39	Baffles :Type	SEGMENTADO	;Cut	16	% Vert.		Shell Cover A-515 GR 60
40	Spacing :Central	6.16	in.	;Inlet		in.	Channel A-515 GR 60
41	No. of baffles	31	;No. of pairs of Scaling Strips			Channel Cover A105 GR 73	
42	Baffle Long:				GASKETS		
43	Impingement Plate	YES	Shell			Float. Head Cover A-515 GR 60	
44	(FOR THERMOSIPHONS ONLY)	Chanel			Baffles A 283 C		
45	Liq. Static head Req.d	Floating Head			Tube Supports A 283 C		
46	dv2	lb / ft s ²	Shell Nozzle	Bundle	Shell/Channel	BOLTINGS	
47	In				Test Ring	Shell Cover A193 B7/1942H	
48	Out				Test Flange	Shell / Channel A193 B7/1942H	
49	Intermediate				Expansion Joint	Floating Head A193 B7/1942H	
50	T.E.M.A. Class	R	Code Requirements				
51	Weight: Empty:	lb. Full of Water:			lb. Tube Bundle		lb.
52	NOTES: 1- EQUIPO RELOCALIZADO , CAMBIO DE SERVICIO, CAMBIO DE 4 A 6 PASOS. REVAMPING 1998						
53	2 - CONDICIONES DE OPERACION CRUDO CUSIANA						


Apéndice C5. Hoja de especificaciones de E-2007.

		HEAT EXCHANGER SPECIFICATION SHEET				PIT-00-F-024	
COMPLEJO INDUSTRIAL DE BARRANCABERMEJA		PLANTA: U-2000		TAG			
PROJECT:	UNIT: 2000	DOC. TYPE:	PROGR:	REV.	SHEET OF	DATE: 20-10-00	
1	SERVICE OF UNIT	REFLUJO INFEROR ATMOSFERICO			Item	E-2007	
2					MR		
3	Size	43 x 240	Type	AES	Connected in:	1 Parallel	1 Series
4	Surface Per Unit	4551 sq.ft	No. of Shells per Unit	1	Surface per Shell(eff.)	4551 sq.ft	
5	PERFORMANCE OF ONE UNIT (No. of Units Required:)						
6	Fluid allocation	Shell Side (in/out)			Tube Side(in/Out)		
7	Fluid Name	REFLUJO INFERIOR T-2000			CRUDO		
8	Total Fluid	lb / h	169110		268022		
9	Vapor	lb / h					
10	Liquid	lb / h	169110	169110	267775	267775	
11	Steam	lb / h					
12	Water	lb / h				247	247
13	Non Condensables	lb / h					
14	MW(Vapors/Non Condensables)						
15	Density(Liq/Vap)	lb / ft ³	41.335 /	43.184 /	44.883 /	43.699 /	
16	Viscosity (Liq/Vap)	cp	0.295 /	0.373 /	0.383 /	0.323 /	
17	Therm. Cond. (Liq./Vap)	Btu / h ft ² °F	0.0382 /	0.0413 /	0.0430 /	0.0409 /	
18	Specific Heat (Liq./Vap.)	Btu / lb°F	0.7185 /	0.693 /	0.6645 /	0.6819 /	
19	Latent Heat	Btu / lb					
20	Operating Temperature	°F	623.6	561.0	483.0	527.3	
21	Velocity Average	ft / s	1.08			4.67	
22	Pressure Drop/Shell	PSI	Allowed 10.0	Calc. 2.03	Allowed 15.0	Calc. 7.67	
23	Inlet Operating pressure	PSIG	190			370.09	
24	Fouling Factor	h ft ² °f / Btu	0.01			0.02	
25	Side Heat Transfer Coeff.	Btu / h ft ² °F					
26	Heat Duty	7.469 *10E6 Btu / h	MTD (corr.) °F:	79.8			
27	Transfer rate	Btu / h R2 °F	Service 20.31	Clean 93.71			
28	CONSTRUCCION OF ONE SHELL						
29		Shell Side			Tube Side		
30	Design/Test Press.	PSIG	200	530			
31	Design Temperature	°F	670	550			
32	No. of Passes Per Shell		1	6			
33	Corrosion Allowance	in.					
34	Connections	In 3					
35	Size in. & Rating	Out4					
36		Inte5					
37	Insulation				MATERIALS (Acording to ASTM())		
38	Tube No.	1160	O.D. in.	0.75	Thk(BWG)	14	
39	Lenght ft.	20	30	60	90	45	X
40	Shell :I.D.	42.50	in.	:O.D.	43.03	in.	Tube Sheet A-515 GR 60
41	Baffles :Type	SEGMENTADO	:Cut	16	% Vert.	Shell Cover A-515 GR 60	
42	Spacing :Central	6.05	in.	:Inlet	in.	Channel A-515 GR 60	
43	No. of baffles	31	:No. of pairs of Scaling Strips			Channel Cover A105 GR 73	
44	Baffle Long:				GASKETS		
45	Impingement Plate				Shell Float. Head Cover A-515 GR 60		
46	(FOR THERMOSIPHONS ONLY)				Chanel Baffles A 285 C		
47	Liq. Static head Req.d				Floating Head Tube Supports A 285 C		
48	dv2 lb / ft s ²	Shell Nozzle	Bundle	Shell/Channel		BOLTINGS	
49	In				Shell Cover A193 B7/1942H		
50	Out				Shell / Channel A193 B7/1942H		
51	Intermediate				Test Ring Floating Head A193 B7/1942H		
52	T.E.M.A. Class	R	Code Requirements			Expansion Joint Channel Cover A193 B7/1942H	
53	Weight: Empty:	lb.	Full of Water:	lb.	Tube Bundle	lb.	
54	NOTES: 1- EQUIPO MODIFICADO, CAMBIO DE 4 A 6 PASOS. REVAMPING 1998						
55	2 - CONDICIONES DE OPERACIÓN CRUDO CUSIANA						

Apéndice C6. Hoja de especificaciones de E-2010AC.

		HEAT EXCHANGER SPECIFICATION SHEET				PIT-00-F-024	
COMPLEJO INDUSTRIAL DE BARRANCABERMEJA				PLANTA: U-2000		TAG	
PROJECT:	UNIT: 2000	DOC. TYPE:	PROGR:	REV.	SHEET OF	DATE: 20-10-00	
1	SERVICE OF UNIT	CRUDO/ASFALTO		Item	E-2010 AD		
2				MR			
3	Size	37 x 240	Type	AES		Connected in:	1 Parallel 2 Series
4	Surface Per Unit	6150 sq.ft	No. of Shells per Unit	2		Surface per Shell(eff.)	3075 sq.ft
PERFORMANCE OF ONE UNIT (No. of Units Required:)							
6	Fluid allocation	Shell Side (in/out)		Tube Side(in/Out)			
7	Fluid Name	CRUDO		ASFALTO			
8	Total Fluid	lb / h	268022		98934		
9	Vapor	lb / h					
10	Liquid	lb / h	267775	267775	98934	98934	
11	Steam	lb / h					
12	Water	lb / h	247	247			
13	Non Condensables	lb / h					
14	MW(Vapors/Non Condensables)						
15	Density(Liq/Vap)	lb / ft ³	43.573 /	42.218 /	50.120 /	52.322 /	
16	Viscosity (Liq/Vap)	cp	0.324 /	0.266 /	0.303 /	0.631 /	
17	Therm. Cond. (Liq/Vap)	Btu / h ft °F	0.0407 /	0.0383 /	0.0405 /	0.044 /	
18	Specific Heat (Liq/Vap.)	Btu / lb °F	0.6821 /	0.7014 /	0.7326 /	0.6736 /	
19	Latent Heat	Btu / lb					
20	Operating Temperature	°F	527.1	574.4	665	539.6	
21	Velocity Average	ft / s	2.06		3.68		
22	Pressure Drop/Shell	PSI	Allowed 30.0	Calc. 7.51	Allowed 20.0	Calc. 10.18	
23	Inlet Operating pressure	PSIG	291.87		295		
24	Fouling Factor	h ft ² °f / Btu	0.005		0.008		
25	Side Heat Transfer Coeff.	Btu / h ft ² °F					
26	Heat Duty	8.675 *10E6 Btu / h	MTD (corr.) °F:	31.4			
27	Transfer rate	Btu / h ft ² °F	Service 60.37	Clean 76.94			
CONSTRUCCION OF ONE SHELL							
29		Shell Side		Tube Side			
30	Design/Test Press.	PSIG	530	350			
31	Design Temperature	°F	660	760			
32	No. of Passes Per Shell		1	10			
33	Corrosion Allowance	in.					
34	Connections	In 3					
35	Size in. &	Out4					
36	Rating	Inte5					
37	Insulation			MATERIALS (Acording to ASTM())			
38	Tube No.	784	O.D. in.	0.75	Thk(BWG)	14	
39	Lenght ft.	20	30	60	90	45	X
40	Shell .I.D.	36.80	in.	O.D.	37.36	in.	Tube Sheet A-515 GR 60
41	Baffles :Type	SEGMENTADO	Cut	16	% Vert.	Shell Cover A-515 GR 60	
42	Spacing :Central	6.14	in.	Inlet	in.	Channel A-3875 CL1	
43	No. of baffles	30	No. of pairs of Scaling Strips				
44	Baffle Long:			GASKETS		Float. Head Cover A-3875 CL1	
45	Impingement Plate	NO		Shell	Baffles A 285 C		
46	(FOR THERMOSIPHONS ONLY)			Chanel	Tube Supports A 285 C		
47	Liq. Static head Req.d			Floating Head	BOLTINGS		
48	dv2	lb / ft s ²	Shell Nozzle	Bundle	Shell/Channel	Shell Cover A193 B7/1942H	
49	In			Test Ring	Shell / Channel A193 B7/1942H		
50	Out			Test Flange	Floating Head A193 B7/1942H		
51	Intermediate			Expansion Joint	Channel Cover A193 B7/1942H		
52	T.E.M.A. Class	R		Code Requirements			
53	Weight: Empty:	lb. Full of Water:		lb. Tube Bundle		lb.	
54	NOTES: 1-EQUIPO MODIFICADO CAMBIO DE 6 A 10 PASOS REVAMPING 1998						
55	2 - CONDICIONES DE OPERACIÓN CRUDO CUSIANA						

Apéndice C7. Hoja de especificaciones de E-2010BD.

		HEAT EXCHANGER SPECIFICATION SHEET				PIT-00-F-024	
COMPLEJO INDUSTRIAL DE BARRANCABERMEJA		PLANTA: U-2000		TAG			
PROJECT:	UNIT: 2000	DOC. TYPE:	PROGR:	REV.	SHEET OF	DATE: 20-10-00	
1	SERVICE OF UNIT CRUDO/ASFALTO			Item E-2010 BC			
2				MR			
3	Size 37 x 240	Type AES		Connected in: 1	Parallel	2 Series	
4	Surface Per Unit 6150 sq.ft	No. of Shells per Unit 2		Surface per Shell(ef.) 3075 sq.ft			
5	PERFORMANCE OF ONE UNIT (No. of Units Required:)						
6	Fluid allocation		Shell Side (in/out)		Tube Side(in/Out)		
7	Fluid Name		CRUDO		ASFALTO		
8	Total Fluid	lb / h	268022		98934		
9	Vapor	lb / h	1651				
10	Liquid	lb / h	267775	266124	98934	98934	
11	Steam	lb / h					
12	Water	lb / h	247	219			
13	Non Condensables	lb / h					
14	MW(Vapors/Non Condensables)						
15	Density(Liq/Vap)	lb / ft ³	43.351 /	42.116 / 0.819	50.120 /	52.162 /	
16	Viscosity (Liq/Vap)	cp	0.313 /	0.262 / 0.012	0.303 /	0.596 /	
17	Therm. Cond. (Liq./Vap)	Btu / h ft ² °F	0.0403 /	0.0381 / 0.0242	0.0405 /	0.0437 /	
18	Specific Heat (Liq./Vap.)	Btu / lb °F	0.6853 /	0.7029 / 0.6373	0.7236 /	0.6775 /	
19	Latent Heat	Btu / lb					
20	Operating Temperature	°F	535	578.1	665	548.1	
21	Velocity Average	ft / s	2.35		3.68		
22	Pressure Drop/Shell	PSI Allowed	Calc.	7.55	Allowed	Calc. 10.18	
23	Inlet Operating pressure	PSIG	293.06		295		
24	Fouling Factor	h ft ² °f / Btu	0.005		0.008		
25	Side Heat Transfer Coeff.	Btu / h ft ² °F					
26	Heat Duty	8.610 *10E6 Btu / h	MTD (corr.) °F:	33.1			
27	Transfer rate	Btu / h ft ² °F	Service	60.37	Clean	76.94	
28	CONSTRUCCION OF ONE SHELL						
29		Shell Side		Tube Side			
30	Design/Test Press.	PSIG	360	360			
31	Design Temperature	°F	700	700			
32	No. of Passes Per Shell		1	10			
33	Corrosion Allowance	in.					
34	Connections	In 3					
35	Size in. & Rating	Out4					
36		Inle5					
37	Insulation					MATERIALS (Acording to ASTM())	
38	Tube No. 784	O.D. in. 0.75	Thk(BWG) 14	Tubes A-199 TS			
39	Lenght ft. 20	30	60	90	45	X	
40	Shell :I.D. 36.80	in.	:O.D. 37.36	in.	Tube Sheet	A-515 GR 60	
41	Baffles :Type SEGMENTAL	:Cut 16		% Vert.	Shell Cover	A-515 GR 60	
42	Spacing :Central 8.68	in.	:Inlet	in.	Channel	A-3875 CL1	
43	No. of baffles 30	:No. of pairs of Scaling Strips		Channel Cover	A 182 FS		
44	Baffle Long:	GASKETS			Float. Head Cover	A-3875 CL1	
45	Impingement Plate	Shell		Baffles	A 285 C		
46	(FOR THERMOSIPHONS ONLY)	Chanel		Tube Supports	A 285 C		
47	Liq. Static head Req.d	Floating Head		BOLTINGS			
48	dv2 lb / ft s ²	Shell Nozzle	Bundle	Shell/Channel	Shell Cover	A193 B7/1942H	
49	In			Test Ring	Shell / Channel	A193 B7/1942H	
50	Out			Test Flange	Floating Head	A193 B7/1942H	
51	Intermediate			Expansion Joint	Channel Cover	A193 B7/1942H	
52	T.E.M.A. Class	Code Requirements					
53	Weight: Empty:	lb. Full of Water:	lb. Tube Bundle	lb.			
54	NOTES: 1-EQUIPO MODIFICADO, CAMBIO DE 6 A 10 PASOS, REVAMPING 1998						
55	2 - CONDICIONES DE OPERACIÓN CRUDO CUSIANA						

Apéndice D. Datos Históricos de proceso del segundo tren de precalentamiento de la U-2000.

Apéndice D1. Datos históricos (cada 30días) de E-2005A, E-2010AC y E-2010BD.

Tiempo de Corrida (Día)	E-2005A						E-2010 AC						E-2010 BD					
	Lado Corriente Fria (Crudo)			Lado Corriente Caliente (Asfalto)			Lado Corriente Fria (Crudo)			Lado Corriente Caliente (Asfalto)			Lado Corriente Fria (Crudo)			Lado Corriente Caliente (Asfalto)		
	Flujo Crudo BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Asfalto BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Crudo BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Asfalto BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Crudo BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Asfalto BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F
	U2000-FIT20077	U2000-TIT20057	U2000-TIT20058	Fondo Calc	U2000-TIT20168	U2000-TIT20169	U2000-FIT20005	U2000-TIT20062	U2000-TIT20064	Fondo Calc	U2000-TIT20165	U2000-TIT20166	U2000-FIT20004	U2000-TIT20061	U2000-TIT20063	Fondo Calc	U2000-TIT20165	U2000-TIT20167
1	46.653	336	405	20.128	581	474	22277	491	572	9486	665	518	23176	495	556	9552	673	527
32	47.630	346	394	18.792	531	463	22284	488	569	9370	670	519	22553	489	551	9335	664	523
62	46.213	333	384	16.907	527	457	23230	492	571	9485	673	522	22917	496	557	8737	663	532
90	46.403	341	390	18.093	529	468	22692	491	567	9303	669	522	23320	495	555	8728	664	534
123	47.053	325	373	19.461	510	455	23979	487	561	9799	666	523	21898	488	552	8875	665	531
153	47.318	337	383	18.775	523	459	23627	492	564	9771	667	529	23673	495	553	8484	664	535
184	46.763	326	377	18.533	522	472	23210	480	540	8972	657	512	21221	485	534	8031	647	516
214	45.751	338	387	19.003	532	474	22439	495	566	9418	669	536	21192	497	551	8127	664	534
241	46.994	328	376	19.676	526	464	19175	497	568	7882	666	531	21621	495	551	7658	666	534
273	46.894	328	374	20.464	517	461	22370	472	539	8655	650	512	21785	472	524	8568	643	514
302	45.673	339	387	18.074	536	470	22605	493	556	8425	663	531	20089	495	552	7675	666	539
332	45.440	335	385	18.716	545	477	22743	473	539	8340	656	515	21636	479	526	8086	652	521
360	46.295	326	373	19.227	519	469	22647	471	534	8035	651	511	20642	475	520	7090	657	519
392	45.485	327	378	17.903	539	477	22240	473	538	7911	658	515	20297	472	511	6335	661	512
422	45.068	339	386	19.282	539	475	21810	481	546	8672	659	531	18637	480	529	6360	666	535
454	43.977	344	389	18.564	530	473	22503	468	537	9025	661	526	19545	470	515	5605	669	524
485	43.091	325	378	18.143	529	486	18952	487	549	6392	669	526	20766	493	555	9296	662	526
510	47.274	313	360	17.136	513	466	18858	484	536	5722	656	521	22962	481	542	9685	657	520
540	47.477	318	369	18.124	558	472	18048	483	538	5658	664	525	24823	489	541	9693	661	524
573	45.999	307	356	18.586	519	460	22190	493	561	8711	666	529	22320	493	552	9295	666	531
600	46.417	310	362	18.287	522	490	21942	467	542	9208	659	517	22625	489	544	9699	658	527
630	47.225	324	375	17.868	566	481	23139	461	532	9099	653	511	23347	478	533	9268	653	516
660	45.624	311	360	15.586	524	466	23302	461	535	9614	660	519	23061	477	534	9224	656	518
690	45.138	323	372	16.603	539	478	21586	479	554	9736	670	539	20353	488	543	8247	670	522
720	44.896	320	367	19.137	521	472	23083	475	547	9794	670	536	22768	488	545	9599	669	535
754	45.441	323	371	16.885	536	481	22593	459	532	9036	660	517	22051	485	539	4573	661	518
779	45.024	315	362	19.358	528	466	21604	476	548	9320	669	536	22659	482	536	9215	664	534
811	43.527	334	376	15.136	521	463	23897	463	527	8415	657	515	22499	472	525	8971	657	525
842	42.222	337	381	17.948	525	474	23801	464	526	8314	657	517	22160	462	508	8251	657	514
870	42.155	353	390	16.887	517	467	22820	467	535	9148	663	530	19785	463	464	6861	644	521

Tiempo de Corrida (Día)	E-2005A						E-2010 AC						E-2010 BD					
	Lado Corriente Fria (Crudo)			Lado Corriente Caliente (Asfalto)			Lado Corriente Fria (Crudo)			Lado Corriente Caliente (Asfalto)			Lado Corriente Fria (Crudo)			Lado Corriente Caliente (Asfalto)		
	Flujo Crudo BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Asfalto BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Crudo BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Asfalto BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Crudo BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Asfalto BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F
	U2000-FIT20077	U2000-TIT20057	U2000-TIT20058	Fondo Calc	U2000-TIT20168	U2000-TIT20169	U2000-FIT20005	U2000-TIT20062	U2000-TIT20064	Fondo Calc	U2000-TIT20165	U2000-TIT20166	U2000-FIT20004	U2000-TIT20061	U2000-TIT20063	Fondo Calc	U2000-TIT20165	U2000-TIT20167
902	43.751	318	361	16.117	512	455	23283	447	520	9158	664	519	22265	484	546	9786	662	521
930	46.632	319	361	17.143	520	459	21127	443	519	7967	680	522	22877	477	537	9370	660	516
960	45.151	335	380	17.905	538	486	22912	428	489	7151	657	504	23010	468	528	9335	657	509
990	44.006	317	360	18.843	518	450	23039	474	542	9259	651	517	22873	477	531	9880	666	519
1020	42.212	334	378	16.943	529	473	22748	471	544	9057	662	517	22882	477	531	9794	660	519
1050	42.125	322	370	14.261	534	472	23353	490	556	8764	673	536	21481	493	531	9722	670	522
1080	43.676	316	365	15.692	542	473	22847	463	538	9175	667	519	22981	475	529	9837	660	520
1110	41.919	314	363	13.013	532	469	23458	476	541	8597	665	525	22940	471	527	10264	667	521
1140	42.089	345	387	18.479	546	474	22404	483	548	8369	669	531	19783	489	547	9678	671	535
1170	43.245	312	359	19.407	530	467	21925	460	538	9295	670	525	23730	462	526	8690	656	516
1200	43.898	316	362	19.175	532	470	24123	463	532	9062	667	523	23026	472	523	9993	664	520
1230	45.307	326	370	18.431	539	479	21732	479	541	7509	666	525	22208	477	529	9136	671	521
1259	46.367	317	356	17.530	515	453	23416	462	531	8947	667	524	22534	461	522	10160	670	520
1290	46.230	311	352	18.094	512	463	21757	489	547	7256	670	533	22569	487	532	8633	669	525
1319	45.413	324	362	19.222	521	452	22211	463	529	7825	668	521	23218	464	526	8314	657	519
1353	46.513	325	362	19.225	515	464	23747	476	534	7869	667	529	21344	492	536	8492	673	529
1379	45.252	317	356	18.350	518	456	21820	472	535	7446	672	528	23453	472	524	9731	671	527
1410	43.093	323	365	18.929	528	468	22170	474	534	7096	675	529	22621	479	534	8839	669	532
1440	44.732	326	365	18.638	523	473	20805	482	537	6190	674	526	21203	481	536	7154	673	524
1469	42.754	339	379	19.986	532	482	21729	470	528	6834	670	526	21704	477	530	9381	670	533
1500	43.460	322	361	17.325	515	458	20805	472	523	5775	666	521	21711	471	523	7680	669	518
1535	42.319	319	357	12.296	512	452	22608	477	528	8680	669	564	22151	473	522	7468	666	518
1560	44.704	313	355	16.503	530	473	22018	475	524	7873	666	559	22605	474	521	7617	666	520
1590	44.522	331	370	18.586	529	478	23068	461	511	9018	664	563	22324	470	518	8401	677	522
1624	43.640	331	369	18.359	528	477	20097	471	524	9548	668	579	21951	479	528	7358	667	527
1656	43.073	322	360	18.875	525	464	20094	476	526	9029	670	583	21141	479	528	7145	672	527
1685	42.589	298	340	14.008	528	454	22829	491	528	7962	669	586	20700	489	529	7163	671	529
1709	42.816	321	357	19.290	517	461	20697	471	515	7363	669	572	22143	489	532	7964	672	540
1740	43.368	310	345	14.687	510	454	20991	467	510	7324	670	572	21397	478	520	7483	671	524
1769	44.475	343	371	18.993	523	454	22752	478	514	6909	668	575	20633	484	522	6917	668	522

Apéndice D2. Datos históricos (cada 30días) de E-2009AD y E-2009BC.

Tiempo de Corrida (Día)	E-2009 AD						E-2009 BC					
	Lado Corriente Fria (Crudo)			Lado Corriente Caliente (GPV)			Lado Corriente Fria (Crudo)			Lado Corriente Caliente (GPV)		
	Flujo Crudo BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo GPV BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Crudo BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo GPV BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F
U2000-FIT20005	U2000-TIT20058	U2000-TIT20060	GPV Calculado	U2000-TIT20159	U2000-TIT20160	U2000-FIT20004	U2000-TIT20058	U2000-TIT20059	GPV Calculado	U2000-TIT20159	U2000-TIT20161	
4	27638	385	467	28052	503	420	23738	385	470	27610	503	432
30	27434	378	460	28231	496	415	24908	378	459	26854	496	423
59	22959	361	440	28360	482	383	23438	361	450	27059	482	411
93	27535	364	445	28277	485	402	24741	364	448	26340	485	411
119	23586	390	469	25733	503	421	21857	390	472	28130	503	438
150	24901	377	458	26860	495	410	23241	377	463	28231	495	429
180	23385	371	454	27108	493	399	23102	371	458	27118	493	423
210	24915	374	458	25725	496	408	22879	374	460	25872	496	422
240	22406	377	461	27125	495	411	23314	377	461	28204	495	427
274	22866	375	456	27175	489	409	23125	375	456	27008	489	421
303	22892	369	453	27200	488	404	23304	369	454	27337	488	420
331	24790	368	441	26380	481	396	21449	368	452	26091	481	416
363	23541	367	452	27193	490	403	22717	365	451	23698	488	411
391	23234	363	446	27214	490	393	23775	363	448	23266	490	406
420	22998	397	473	27598	507	431	23446	397	474	26655	507	441
451	22037	370	462	25266	502	404	22617	370	455	26287	502	419
479	22607	363	455	26429	495	400	23065	363	454	26258	495	415
512	23484	371	450	27234	490	405	22467	371	457	27178	490	422
540	23336	374	453	27225	491	407	21304	374	461	27366	491	426
569	22412	367	461	27263	502	407	21301	367	464	26017	502	423
600	22423	366	460	23986	502	404	22991	366	459	23899	502	416
628	23267	367	448	27357	486	403	22341	367	452	27357	486	418
660	22855	369	451	27277	490	401	22357	369	455	27200	490	422
691	21859	372	465	26161	507	408	23118	372	463	24439	507	422
722	22209	370	455	27255	490	409	22127	370	456	27361	490	424
750	21960	365	456	26843	499	403	23141	365	457	24411	499	416
779	22293	371	452	27336	489	405	20721	371	459	27279	489	424
812	22487	362	450	27737	491	398	22871	362	450	26859	491	414
840	21809	376	462	27339	496	416	22462	376	461	26971	496	429
869	21572	373	458	27366	492	412	22626	373	458	27036	492	425

Tiempo de Corrida (Día)	E-2009 AD						E-2009 BC					
	Lado Corriente Fria (Crudo)			Lado Corriente Caliente (GPV)			Lado Corriente Fria (Crudo)			Lado Corriente Caliente (GPV)		
	Flujo Crudo BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo GPV BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Crudo BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo GPV BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F
	U2000-FIT20005	U2000-TIT20058	U2000-TIT20060	GPV Calculado	U2000-TIT20159	U2000-TIT20160	U2000-FIT20004	U2000-TIT20058	U2000-TIT20059	GPV Calculado	U2000-TIT20159	U2000-TIT20161
901	23463	375	458	25433	497	410	22527	375	458	26732	497	425
930	22884	353	437	27226	475	391	22394	353	438	27127	475	403
962	21681	371	456	27256	491	408	22554	371	456	26499	491	423
989	19827	383	469	27195	498	422	20879	383	465	26570	498	431
1020	23005	380	462	27511	498	419	21086	380	466	27116	498	433
1052	22497	376	456	25937	497	409	20460	376	464	24755	497	427
1078	21601	367	453	27444	489	405	20863	367	454	25590	489	419
1112	23068	369	456	25828	495	410	21603	369	457	25562	495	421
1141	22199	373	456	26087	496	406	20537	373	461	24777	496	424
1172	20805	368	451	27076	492	400	23116	368	454	27192	492	422
1200	22914	361	449	25372	498	400	23516	361	456	25857	498	419
1231	22987	378	456	26732	495	413	21259	378	463	27480	495	430
1263	19712	366	447	25997	477	402	21057	366	444	26890	477	413
1289	23015	367	448	25954	491	401	22341	367	451	26903	491	417
1318	20616	372	461	23349	506	404	22616	372	465	27424	506	432
1352	22839	371	451	26115	496	405	22666	371	458	26046	496	427
1381	23435	365	448	26112	494	402	21879	365	455	27250	494	423
1411	22617	352	442	27001	485	393	22035	352	443	25820	485	408
1439	22287	360	452	25841	498	399	21424	360	456	25841	498	420
1468	23591	357	452	23409	504	398	23201	357	454	25785	504	418
1502	22820	374	455	26965	494	412	22584	374	454	26021	494	423
1531	22231	361	448	25839	490	399	20461	361	454	26538	490	420
1560	20805	349	442	24782	485	386	21003	349	443	26081	485	408
1589	24379	355	442	27440	486	397	21052	355	445	25815	486	413
1620	22373	359	456	26846	505	404	22964	359	451	24596	505	412
1652	24058	329	412	26196	465	366	22371	329	419	26001	465	389
1679	21095	368	448	26057	488	408	20277	368	455	27076	488	427
1710	23220	361	444	24468	491	404	20709	361	448	23560	491	416
1738	20850	375	462	23854	503	419	20861	375	459	23671	503	430
1770	23611	348	437	27358	508	389	23253	348	440	27358	508	404

Apéndice D3. Datos históricos (cada 30días) de E-2005 y E-2007.

Tiempo de Corrida (Día)	E-2005						E-2007					
	Lado Corriente Fria (Crudo)			Lado Corriente Caliente (Reflujo Inferior T2001)			Lado Corriente Fria (Crudo)			Lado Corriente Caliente (Reflujo Inferior T2001)		
	Flujo Crudo BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Ref. Inf. BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Crudo BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Ref. Inf. BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F
	U2000-FIT20005	U2000-TIT20060	U2000-TIT20062	Ref. Inferior Calculado	U2000-TIT20091	U2000-TIT20092	U2000-FIT20004	U2000-TIT20059	U2000-TIT20061	Ref. Inferior Calculado	U2000-TIT20091	U2000-TIT20093
3	23520	463	486	4062	643	465	22630	478	500	3704	643	479
30	20805	451	483	5120	625	458	22337	473	506	6574	625	483
59	23551	441	449	3902	621	442	22336	471	503	6579	621	482
92	23122	469	493	5401	645	477	22764	477	499	3904	645	478
121	23715	460	472	6358	632	471	23859	465	486	3849	632	467
149	22032	453	467	5014	631	459	23251	456	491	6374	631	469
181	22020	464	493	5368	643	473	22021	467	490	4062	643	469
212	22568	451	474	3906	632	454	22266	452	478	4009	632	454
241	21746	462	493	5836	635	474	23304	466	487	3828	635	468
269	24006	460	465	5463	628	467	22166	456	481	4062	628	459
301	22881	471	488	5466	644	479	22817	472	494	3835	644	474
330	26540	458	486	4136	637	462	20038	461	499	5728	637	472
361	22347	474	494	5351	648	464	23188	475	505	5350	648	483
389	22767	470	488	5440	644	478	21931	470	502	5401	644	479
418	22292	470	475	3982	639	472	22630	469	491	3917	639	472
449	22117	466	496	4826	636	473	21624	470	491	3894	636	472
478	26371	455	456	4065	627	458	22446	459	487	5106	627	465
513	22800	474	488	6533	634	487	21623	470	493	4452	634	473
542	26337	458	480	3839	636	461	23002	453	479	4663	636	458
571	23396	446	463	4350	630	450	22035	443	477	4810	630	451
600	23713	451	451	6297	625	462	22717	451	482	5374	625	460
632	22979	441	451	3898	623	444	23962	441	463	3857	623	444
660	27291	456	445	3824	630	462	23190	453	475	3908	630	455
688	26326	460	443	3825	629	461	22232	454	480	3903	629	457
720	23122	451	455	3990	627	454	22545	459	481	3904	627	462
749	22852	449	465	4740	629	455	22964	452	479	4291	629	457
777	22917	452	463	4710	626	458	22341	452	474	3912	626	454
810	21731	453	474	4001	625	457	23418	453	476	3841	625	471
840	22635	462	459	3826	641	464	23783	463	493	5171	641	472

Tiempo de Corrida (Día)	E-2005						E-2007					
	Lado Corriente Fria (Crudo)			Lado Corriente Caliente (Reflujo Inferior T2001)			Lado Corriente Fria (Crudo)			Lado Corriente Caliente (Reflujo Inferior T2001)		
	Flujo Crudo BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Ref. Inf. BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Crudo BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F	Flujo Ref. Inf. BPD	T° Entrada °F	T° Salida °F
	U2000-FIT20005	U2000-TIT20060	U2000-TIT20062	Ref. Inferior Calculado	U2000-TIT20091	U2000-TIT20092	U2000-FIT20004	U2000-TIT20059	U2000-TIT20061	Ref. Inferior Calculado	U2000-TIT20091	U2000-TIT20093
870	22581	456	458	3914	627	459	23299	460	482	3861	627	463
899	23270	464	451	3922	637	466	22950	460	485	4136	637	464
931	23159	455	460	4002	632	458	23107	454	477	3914	632	457
958	22667	457	468	4639	636	464	22799	453	479	4245	636	458
992	23418	443	436	3910	611	445	22291	448	469	3856	611	451
1021	21091	470	489	3865	647	474	22862	466	490	3927	647	470
1048	23047	453	464	4610	629	459	21652	456	481	3899	629	460
1083	22019	462	450	4570	639	460	22066	463	496	5337	639	474
1110	21809	462	463	4062	631	466	21767	464	489	4062	631	468
1140	22609	459	446	4240	642	463	22359	455	489	5277	642	466
1171	23118	454	454	3858	634	457	23382	452	483	5314	634	462
1203	23498	453	454	3821	635	456	22849	455	479	3802	635	459
1232	21809	453	465	3916	637	458	21697	453	484	4665	637	461
1261	23443	451	451	3825	634	455	20863	454	484	4497	634	461
1293	23023	464	442	3901	639	467	22930	457	482	3951	639	461
1322	22191	448	471	4757	638	458	21245	454	482	4283	638	459
1350	20745	466	454	3875	629	469	19896	467	491	3938	629	471
1381	24802	463	443	3834	632	465	21868	463	491	4692	632	470
1412	21378	460	464	4029	634	464	19440	471	496	3874	634	474
1440	21907	467	440	4078	638	470	20797	462	490	4152	638	468
1470	22892	457	455	3826	634	461	20980	460	492	5497	634	471
1498	22974	464	425	3924	642	466	20460	464	491	3998	642	468
1529	20097	464	471	3877	640	469	21019	465	491	3996	640	470
1562	21681	456	462	3900	635	461	23116	454	478	3828	635	458
1591	22841	463	415	3926	640	465	22143	465	489	4434	640	470
1618	24265	452	451	4221	639	459	20656	452	485	4704	639	461
1651	19346	437	471	6354	611	464	23073	429	456	3905	611	435
1683	21425	458	417	3899	636	461	23546	458	482	4435	636	465
1712	25793	459	396	4072	638	462	22016	463	485	3823	638	467
1741	23468	448	324	3980	629	451	20709	448	476	3980	629	455
1771	24305	464	275	3897	628	465	20066	461	487	4027	628	468