

**ANALISIS DEL ENSUCIAMIENTO EN LOS INTERCAMBIADORES DE FONDO
E-4841A Y E-4841B DE LA UNIDAD DESPOJADORA DE AGUAS AGRIAS
U-4840 DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA (GRB): ORIGEN,
MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN EN ESTADO PSEUDO-ESTABLE**

CARINA YASMIN SANDOVAL FERREIRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

**ANALISIS DEL ENSUCIAMIENTO EN LOS INTERCAMBIADORES DE FONDO
E-4841A Y E-4841B DE LA UNIDAD DESPOJADORA DE AGUAS AGRIAS
U-4840 DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA (GRB): ORIGEN,
MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN EN ESTADO PSEUDO-ESTABLE**

CARINA YASMIN SANDOVAL FERREIRA

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

Director:

JULIO ANDRÉS PEDRAZA AVELLA.

Dr. en Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. DIAGNÓSTICO	16
2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	19
2.1 ANTECEDENTES	19
2.2 JUSTIFICACIÓN	22
3. HIPÓTESIS	24
4. OBJETIVOS	25
4.1. OBJETIVO GENERAL	25
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
5. MARCO TEÓRICO	26
5.1 GENERALIDADES DE LAS PLANTAS DESPOJADORAS DE AGUAS AGRIAS	26
5.2 GENERALIDADES SOBRE EL ENSUCIAMIENTO	29
5.3 GENERALIDADES SOBRE MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN APLICADA A LAS PLANTAS DE PROCESAMIENTO INDUSTRIAL	32
5.4 GENERALIDADES SOBRE MODELAMIENTO APLICADO A ENSUCIAMIENTO EN INTERCAMBIADORES DE CALOR	33
6. METODOLOGÍA	40
6.1 PRIMERA ETAPA: ANÁLISIS DE LABORATORIO	40
6.2 DESARROLLO MODELO DE ENSUCIAMIENTO LADO CASCO E-4841A/B	42
6.3 DESARROLLO SIMULACIÓN	53
6.4 ANÁLISIS COMPARATIVO COSTOS DE MANTENIMIENTO DURANTE LA OPERACIÓN DE LA UNIDAD SIN FILTRO FILTER-4841 Y OPERACIÓN DE LA UNIDAD CON LA INCLUSIÓN DEL NUEVO FILTRO FILTER-4841.	61

7. ANÁLISIS RESULTADOS DEL TRABAJO DE APLICACIÓN.....	63
7.1 CARACTERIZACIÓN DEL LODO PRECIPITADO.....	63
7.2 DATOS DE CAMPO PARA EL DESARROLLO DEL MODELO DE ENSUCIAMIENTO.	67
7.3 MODELO DE ENSUCIAMIENTO.....	70
7.4 SIMULACIÓN DE LA UNIDAD DESPOJADORA DE AGUAS AGRIAS	81
7.5 EVALUACIÓN POR SIMULACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN FILTRO EN EL SISTEMA DE AGUAS AGRIAS.....	88
7.6 COSTOS ESTIMADOS DE MANTENIMIENTO CONSIDERANDO LA ETAPA DE FILTRACIÓN.	93
8. CONCLUSIONES	103
9. RECOMENDACIONES.....	105
BIBLIOGRAFÍA.....	106
ANEXOS.....	110

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cálculos Rd lado tubos y lado casco.	50
Tabla 2. Ecuación de estado Peng Robinson.	54
Tabla 3. Resultados análisis lodos del tambor de carga D-4841	64
Tabla 4. Resultado análisis de laboratorio lodos muestra rehervidor E4842.	64
Tabla 5. Tabla ANOVA reportada por la regresión de la resistencia del ensuciamiento.....	74
Tabla 6. Ecuaciones del modelo de la resistencia de transferencia de calor Rds, modelo de crecimiento y peso de la capa de sólido.....	78
Tabla 7. Análisis laboratorio corriente carga de aguas agrias D4841.	81
Tabla 8. Concentración de sólidos en Filter-4841.....	82
Tabla 9, Cuadro comparativo número de elementos y carcasas a emplear para elementos de filtración en polipropileno y metálicos.	94
Tabla 10. Costos de mantenimiento por limpieza mecánica.....	96
Tabla 11. Cálculo mensual consumo elementos filtrantes en polipropileno.....	98
Tabla 12. Costos de limpieza y valor de los elementos metálicos	99
Tabla 13. Cuadro de costos comparativo en dos años para elementos filtrantes en polipropileno y en acero inoxidable.....	100
Tabla 14. Cuadro de costos comparativo, incluyendo limpieza mecánica y filtración en un periodo de dos años.	101

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Muestra de las aguas agrias de carga al tambor D-4841.	16
Figura 2. Foto tomada en el año 2014, durante limpieza del haz de tubos del rehervidor E4842A asociado a la torre T-4841.	17
Figura 3. Diagrama esquemático de distribución de las corrientes de aguas agrias en la GRB	21
Figura 4. Diagrama esquemático en donde se muestra la ubicación del filtro de material particulado propuesto como alternativa de solución.	23
Figura 5. Diagrama esquemático de la torre despojadora de aguas agrias T-4841 de la unidad U-4840.....	29
Figura 6. Distribución de la temperatura a través de la superficie de un tubo con <i>fouling</i>	31
Figura 7. Distribución de los depósitos en el tiempo.....	36
Figura 8. Ubicación puntos de toma de muestras en planta para análisis de laboratorio.....	41
Figura 9. Representación gráfica intercambiadores E-4841A/B	45
Figura 10. Variables que se usaron para especificar la T4841.	55
Figura 11. Especificaciones lado casco, lado tubos E-4841A/B usadas en la simulación.....	56
Figura 12. PFD de la unidad de aguas agrias U-4840 simulado en Hysys	57
Figura 13. Herramienta Spreadsheet empleada para incluir las ecuaciones de R_{ds} , \emptyset , y W	58
Figura 14. Representación de la herramienta <i>Case Study</i> empleada en la simulación.....	59
Figura 15. Imagen que ilustra la calidad de la parte acuosa de la carga al D-4841.	64

Figura 16. Fotografía que ilustra la parte de hidrocarburo del flujo de entrada de agua agria al D-4841.	65
Figura 17. Imagen SEM realizada a los lodos extraídos en el rehervidor E4842...	66
Figura 18. Difractogramas	66
Figura 19. Gráfico de dispersión lado tubos	68
Figura 20. Gráfico de dispersión lado casco	69
Figura 21. Temperaturas de salida operación E-4841A/B	69
Figura 22. Calor transferido en el E-4841A/B	70
Figura 23. $LMDT_{\text{corregido}}$ calculado en la ventana de operación E-4841A/B.....	71
Figura 24. Coeficientes de transferencia de calor limpio (U_c) y sucio (U_d).....	72
Figura 25. Resistencia a la transferencia de calor debida al ensuciamiento lado casco R_{ds} y global E-4841A/B.....	73
Figura 26. Espesor de la capa de ensuciamiento lado casco E4841A/B con el tiempo de operación.	75
Figura 27. Gráfica comparativa entre caudal y espesor ensuciamiento en el lado casco.	77
Figura 28. Gráfica tendencia del peso (kg) de la capa de ensuciamiento con el tiempo.	79
Figura 29. Estimación caída de presión lado casco E-4841A/B.	80
Figura 30. Estimación caída de presión lado tubos E-4841A/B	80
Figura 31. R_{ds} obtenido por simulación usando modelo Tabla 17.....	83
Figura 32. Variación del espesor de la capa de ensuciamiento con relación al flujo al E-4841A/B según resultados de simulación.....	84
Figura 33. Línea base en kg de la variación de la masa de sólido con el tiempo en los E-4841A/B.	84
Figura 34. Comparación dato de laboratorio y por simulación para la cantidad de H_2S a la salida de la T-4841.....	85
Figura 35. Comparación dato de laboratorio y por simulación para la cantidad de NH_3 a la salida de la T-4841.	85
Figura 36. PFD de la unidad de aguas agrias U-4840 simulado en HYSYS.....	86

Figura 37. Variación de la caída de presión a altos flujos en el E4841A/B variando el Rds.....	87
Figura 38. Variación del Rds al disminuir la concentración de sólidos en la carga a la unidad.	89
Figura 39. Variación del peso de la capa de ensuciamiento en unidades kg.....	90
Figura 40. Variación del espesor de la capa de ensuciamiento en unidades de longitud pie (ft).	90
Figura 41. Variación de la caída de presión a través del lado casco de los E-4841A/B a diferente concentración de sólido en la carga de aguas agrias.....	91
Figura 42. Evaluación del incremento del ciclo de corrida de los E-4841A/B al disminuir la carga de sólidos.....	93
Figura 43. Esquemático sistema filtración disponible para ser habilitado en la unidad de aguas agrias U-4840.	95
Figura 44. Costos de mantenimiento por limpieza mecánica a diferentes % de retención de material sólido en el filtro.....	97

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Metodología aplicada a análisis de laboratorio.....	110

RESUMEN

TITULO: ANALISIS DEL ENSUCIAMIENTO EN LOS INTERCAMBIADORES DE FONDO E 4841A Y E 4841B DE LA UNIDAD DESPOJADARA DE AGUAS AGRIAS U-4840 DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA (GRB): ORIGEN, MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN EN ESTADO PSEUDO-ESTABLE*

AUTOR: CARINA YASMIN SANDOVAL FERREIRA**

PALABRAS CLAVES: simulación de procesos, sistema de despojo de aguas agrias, ensuciamiento.

CONTENIDO:

El presente trabajo de aplicación encuentra una expresión matemática que modela el proceso de ensuciamiento del lado casco de los intercambiadores de calor E-4841A y E-4841B, determinando el coeficiente de resistencia a la transferencia de calor por presencia de depósitos, usando la metodología propuesta por el autor Donald Q. Kern¹, en función del cálculo de los coeficientes de transferencia de calor de diseño U_d y coeficiente de transferencia de calor limpio U_c . Para cumplir con lo anterior se hizo seguimiento a las variables de proceso, de flujos, temperatura, presión de las corrientes de entrada y salida asociadas a los intercambiadores de calor de interés durante un periodo de tiempo correspondiente a un ciclo de corrida de la unidad, con el fin de determinar la curva que representara su comportamiento.

Con análisis de laboratorio se hace el análisis de la composición de la masa depositada en el lado casco de los equipos de estudio, con el fin de determinar su naturaleza química, de tal manera que se pueda inferir su conductividad térmica y su densidad, propiedades que se requieren para aplicar la metodología propuesta por el autor².

Se hace la simulación de la unidad U-4840 usando el paquete de simulación HYSYS versión 9; y para el cálculo del coeficiente de resistencia a la transferencia de calor por depósitos R_d , espesor de la capa de ensuciamiento y peso de esta capa en los E-4841A/B se usaron las expresiones matemáticas encontradas en el modelamiento.

* Trabajo aplicado

** Facultad de Ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Química. Director: Ph.D Julio Andres Pedraza

¹ KERN D. Q., Procesos de transferencia de calor, Compañía editorial Mexicana, 1999

² Ibíd.

ABSTRACT

TITLE: FOULING ANALYSIS IN THE E-4841A AND E-4841B EXCHANGERS OF THE SOUR WATER STRIPPING U-4840 UNIT OF THE BARRANCABERMEJA REFINERY (GRB): ORIGIN, MODELING AND SIMULATION IN PSEUDO-STABLE STATE*.

AUTHOR: CARINA YASMIN SANDOVAL FERREIRA**

KEYWORDS: process simulation, sour water stripping, design, engineering, financial analysis

CONTENTS:

The present application work finds a mathematical expression that models the fouling process on the shell side of the E-4841A and E-4841B heat exchangers, determining the coefficient of resistance to heat transfer by the presence of deposits, using the proposed methodology by the author Donald Q. Kern³, based on the calculation of the design heat transfer coefficients U_d and clean heat transfer coefficient U_c . To comply with the above, the process, flow, temperature and pressure variables of the inlet and outlet currents associated with the heat exchangers of interest during a period of time corresponding to a unit run cycle were followed up, in order to determine the curve that would represent its behavior.

With laboratory analysis is made the composition of the mass deposited on the shell side of the study equipment, in order to determine its chemical nature, so that its thermal conductivity and density can be inferred, properties that are required to apply the methodology proposed by the author ⁴

The simulation of the U-4840 unit was done using the HYSYS simulation package version 9; for the calculation of the coefficient of resistance to heat transfer by deposits R_d in E-4841A / B the mathematical expression found in modeling was used.

* Applied work

**Physical chemistry engineering faculty. Chemical engineering school. Master of Chemical Engineering Director: Ph.D Julio Andres Pedraza

³ Ibíd.

⁴ Ibíd.

INTRODUCCIÓN

Uno de los subproductos generados en las refinerías son las aguas agrias, las cuales resultan del lavado de efluentes gaseosos de proceso provenientes de las unidades de craqueo catalítico, de hidrot ratamiento, de viscorreducción y de hidrocraqueo. Comúnmente, el lavado industrial se hace con agua para absorber, de los efluentes gaseosos, los contenidos de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y de amoníaco (NH_3), los cuales al reaccionar entre sí forman bisulfuro de amonio, una sal altamente corrosiva. Las aguas agrias resultantes deben ser tratadas antes de su disposición final, según la normatividad colombiana para vertimientos 631 del año 2015.

La refinería de Barrancabermeja cuenta con dos unidades despojadoras de aguas agrias, las unidades U-2590 y U-4840, esta última en operación desde el 2010. Estas unidades fueron diseñadas para el tratamiento de aguas agrias con contenidos promedio de 5000 ppm de H_2S y 5000 ppm de NH_3 y con un contenido máximo de 1% en volumen de hidrocarburo. Asimismo, el diseño presume que el afluente no contiene sólidos en cantidades importantes que puedan afectar la normal operación de estas unidades. Sin embargo, cantidades importantes de sólidos han sido detectadas durante las tomas de muestras y en los respectivos mantenimientos de los equipos de la unidad, especialmente en los intercambiadores. Estos sólidos forman depósitos que afectan el ciclo de operación, reduciendo los tiempos entre mantenimientos, ocasionando pérdidas económicas y reducción de la capacidad de procesamiento.

De análisis del sistema se ha encontrado que los equipos de tratamiento de aguas agrias presentan ensuciamiento debido a que el afluente contiene cantidades importantes de hidrocarburos y óxidos de hierro. Los óxidos de hierro son el

resultado de los procesos de corrosión en los equipos aguas arriba. La mezcla entre hidrocarburo y óxidos de hierro favorece el ensuciamiento en los intercambiadores de calor, especialmente en el lado casco de estos equipos, limitando la unidad a ciclos de operación con duración menor a 6 meses.

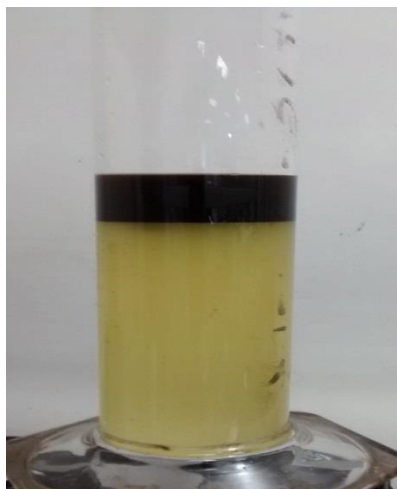
El presente trabajo de aplicación se centra en el análisis de una etapa de filtración en el sistema de carga de las unidades despojadoras de aguas agrias, como una alternativa para disminuir la cantidad de material sólido entrante a las torres de despojo e intercambiadores del sistema e incrementar de esta forma los ciclos de operación de la unidad. El análisis incluye la proposición de un modelo de crecimiento para los depósitos en el lado casco de los intercambiadores basado en datos históricos de proceso, así como, simulaciones del sistema utilizando Aspen Hysys para la validación del crecimiento de los depósitos y la predicción del desempeño de la operación ante una etapa primaria de filtración.

1. DIAGNÓSTICO

El objetivo de la unidad despojadora de aguas agrias U-4840 es remover de las aguas agrias generadas en la GRB el ácido sulfhídrico (H_2S) y el amoniaco (NH_3) contenidos en estas aguas, con el fin de obtener una corriente de agua despojada entre los limites aceptados para estos contaminantes (H_2S menor a 10 ppm y NH_3 menor a 50 ppm) de tal manera que pueda ser enviada hacia la planta PTAR.

El diseño de esta unidad está concebido como un sistema limpio (sólo H_2S y NH_3 en solución acuosa), con una concentración máxima de hidrocarburo libre de 1% en volumen, sin presencia de hidrocarburos emulsionados, libre de arrastre de material particulado y sólo con posibles trazas de contaminantes sin interés para el proceso de despojo. En la operación diaria, las aguas agrias de carga al sistema de despojo pueden llegar con alta concentración de hidrocarburo libre (3-4%), con arrastre de material particulado e hidrocarburo emulsionado 1%. En la Figura 1 se observa visualmente una muestra de la carga de aguas agrias, en donde se identifica un porcentaje importante de hidrocarburo libre en la parte superior de la muestra.

Figura 1. Muestra de las aguas agrias de carga al tambor D-4841.



Se ha evidenciado cuatro impactos en la operación actual del sistema de despojo de las aguas agrias en la GRB:

- El primer impacto es el ensuciamiento frecuente de los equipos que conforman la unidad despojadora U-4840, como lo son la torre T-4841, los intercambiadores de fondo de la torre E-4841A y E-4841B, los rehervidores E-4842A y E-4842B. La foto de la Figura 2 fue tomada en el año 2014 durante una limpieza del haz de tubos del rehervidor E-4842A, este ensuciamiento hace que las paradas de mantenimiento para la limpieza de los E-4841A y E-4841B se haga en promedio cada 6 meses.

Figura 2. Foto tomada en el año 2014, durante limpieza del haz de tubos del rehervidor E4842A asociado a la torre T-4841.



- El segundo impacto se observa en la limitación del volumen de carga a la torre y en la pérdida del rendimiento del despojo, medido en función del contenido de H_2S y NH_3 en la corriente de agua despojada, siendo los límites máximos establecidos de 10 ppm para el H_2S y 50 ppm para el NH_3 .

- El tercer impacto se presenta al incrementarse el contenido de hidrocarburo en la corriente de cima de despojo (GADAR), corriente rica en H₂S y NH₃ que se utiliza como carga a la unidad de azufre. Este aumento de hidrocarburo incrementa la formación de carbón en la unidad de azufre, con taponamiento del primero reactor catalítico de la unidad de azufre.
- El cuarto impacto es el aspecto económico, por mayores costos de mantenimiento por frecuencias mayores de limpiezas mecánicas tanto de los intercambiadores como de la torre.

En la GRB se ha trabajado en tres aspectos importantes con el fin de mejorar la confiabilidad operacional en el sistema de despojo de aguas agrias. Siendo estos aspectos los siguientes:

- Trabajo en la fuente con el fin de minimizar el arrastre de hidrocarburo.

En este ítem se busca minimizar el arrastre de hidrocarburo desde la fuente con las aguas agrias, se incluyen actividades de mantenimiento, desarrollo de ingenierías y se incluyen actualizaciones en los procedimientos operacionales con actividades que ayudan a minimizar el arrastre de hidrocarburo, en especial en procesos de parada y puesta en servicio de plantas.

- Actualización de diseños de algunos equipos separadores de aguas agrias como el tambor D-338.
- Aplicación de tecnología que permita mejorar la calidad del agua agria de carga a las torres despojadoras: Este ítem está enfocado a la implementación de mejoras directamente en las unidades despojadoras de aguas agrias, con el fin de disminuir el ensuciamiento en los equipos que conforman las unidades.

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

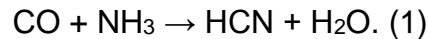
2.1 ANTECEDENTES

La refinería de Barrancabermeja fue diseñada inicialmente para trabajar con crudos de carga con una gravedad API entre 26 y 33, con el paso de los años la disponibilidad de crudos con alto API disminuyó, entre los años 2013 -2017 el API de la mezcla de carga a la GRB ha variado entre 18 y 22, este tipo de crudos contienen mayores cantidades de fracciones pesadas y asociadas a estas, mayores contenidos de azufre, carbón, nitrógeno y metales, incrementado a su vez el contenido de estos compuestos en las corrientes de proceso aguas abajo de la cadena productiva.

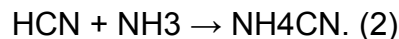
El incremento de azufre en la carga a la refinería genera mayor producción de H₂S en las unidades de craqueo catalítico y en las unidades de hidrotreatmento. El H₂S en las unidades cracking e hidrotreatmento se maneja de dos formas: una como componente del gas ácido el cual se remueve en las plantas de tratamiento con amina y se envía posteriormente a las plantas de azufre y dos, disuelto en agua, la cual se envía como carga a las unidades de aguas agrias para ser despojado y finalmente ser enviado a las unidades de azufre. La presencia y el incremento de N₂ en los crudos de carga a la refinería, incrementa a su vez el N₂ de carga a las unidades cracking, con un potencial de incremento de la corrosión en equipos y líneas de acero al carbono debido a la formación de bisulfuro de amonio como elemento corrosivo para la superficie del metal y formación de cianuros como elemento destructor de la capa pasivante de FeS. Según el autor Miguel A. González⁵ la formación de cianuros en las unidades cracking se atribuye a

⁵ GONZÁLEZ GUERRERO M. A., Efecto de la carga de crudo en la integridad y en otras variables de las unidades Cracking de la GRB, 2016

reacciones en el *riser* (base del reactor de las unidades cracking), a partir de los compuestos orgánicos de la carga a cracking (gasóleos) que contienen nitrógeno. Inicialmente se forma NH_3 a partir del rompimiento de las moléculas durante las reacciones de cracking catalítico; posteriormente se forma el cianuro a partir de la reacción entre el NH_3 y el CO , de acuerdo con la reacción:



El HCN puede mantenerse así o puede formar Cianuro de Amonio mediante su reacción con el NH_3 , de acuerdo con la reacción:



Ambas formas de cianuro pueden ionizarse en presencia de agua formando iones CN^- .

Debido a la corrosión por H_2S o por bisulfuro de amonio se forman capas de FeS sobre las superficies de equipos y líneas fabricados en acero; estas capas tienen aceptables características pasivantes, que una vez formadas protegen contra el posterior ataque corrosivo. Sin embargo, los iones CN^- que se puedan formar en los sistemas pueden reaccionar con las capas de FeS destruyéndolas y formando ferrocianuro y sulfuro de amonio como productos de corrosión, estos productos de corrosión son arrastrados por las corrientes de proceso los cuales pueden generar problemas de obstrucciones en los sistemas, problemas de integridad mecánica por desgaste de la metalurgia de los equipos que puedan ser afectados por estos fenómenos de corrosión⁶. Particularmente en la Gerencia Refinería Barrancabermeja (GRB), las aguas agrias provienen de las unidades de craqueo catalítico: Modelo IV, Orthoflow, UOP I y UOP II, de las unidades de

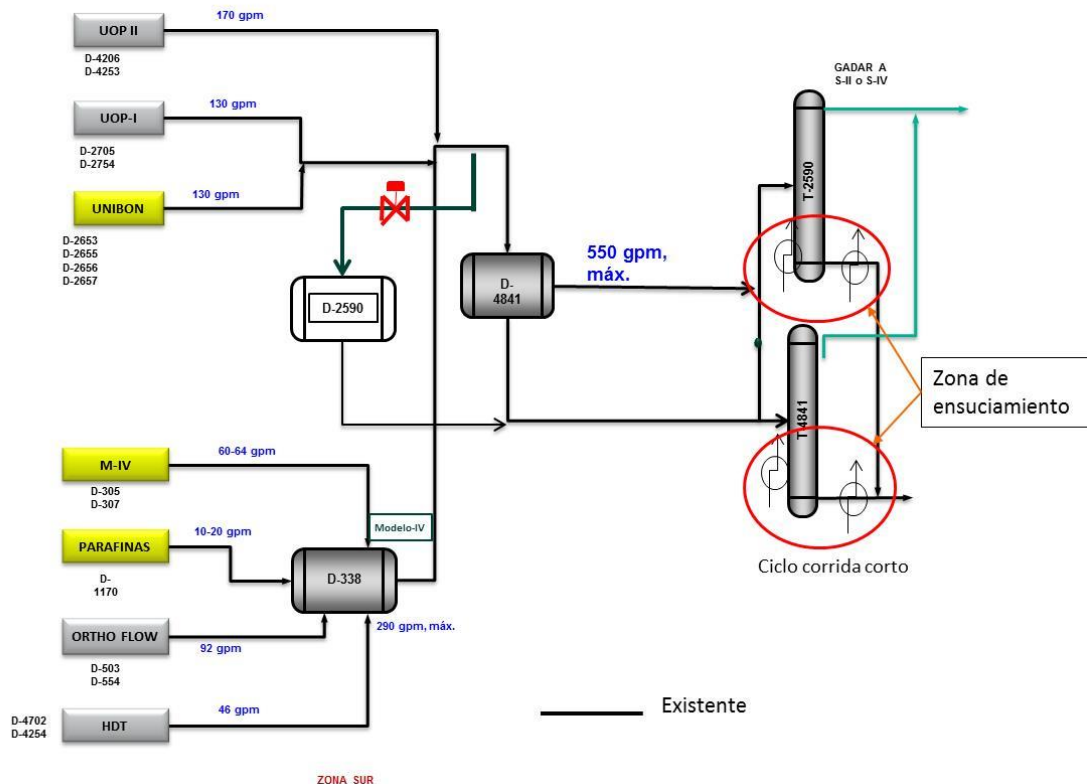
⁶ *Ibíd.*

hidrotratamiento: Diesel y Gasolina, Parafinas y Unibón y de la unidad viscorreductora. Todas las corrientes de aguas agrias de la GRB, se mezclan en punto común y son enviadas a las unidades de despojo de aguas agrias (U-2590 y U-4840).

En la Figura 3, se muestra el diagrama esquemático de generación de las aguas agrias en la GRB. Desde la puesta en servicio en el año 2010 de la segunda torre despojadora de aguas agrias T-4841, la carga total de aguas agrias ha sido distribuida en las dos torres despojadoras, T-4841 (55%) y en la torre T-2590 (45%).

Figura 3. Diagrama esquemático de distribución de las corrientes de aguas agrias en la GRB

ESQUEMA ACTUAL DE AGUAS AGRIAS - GRB

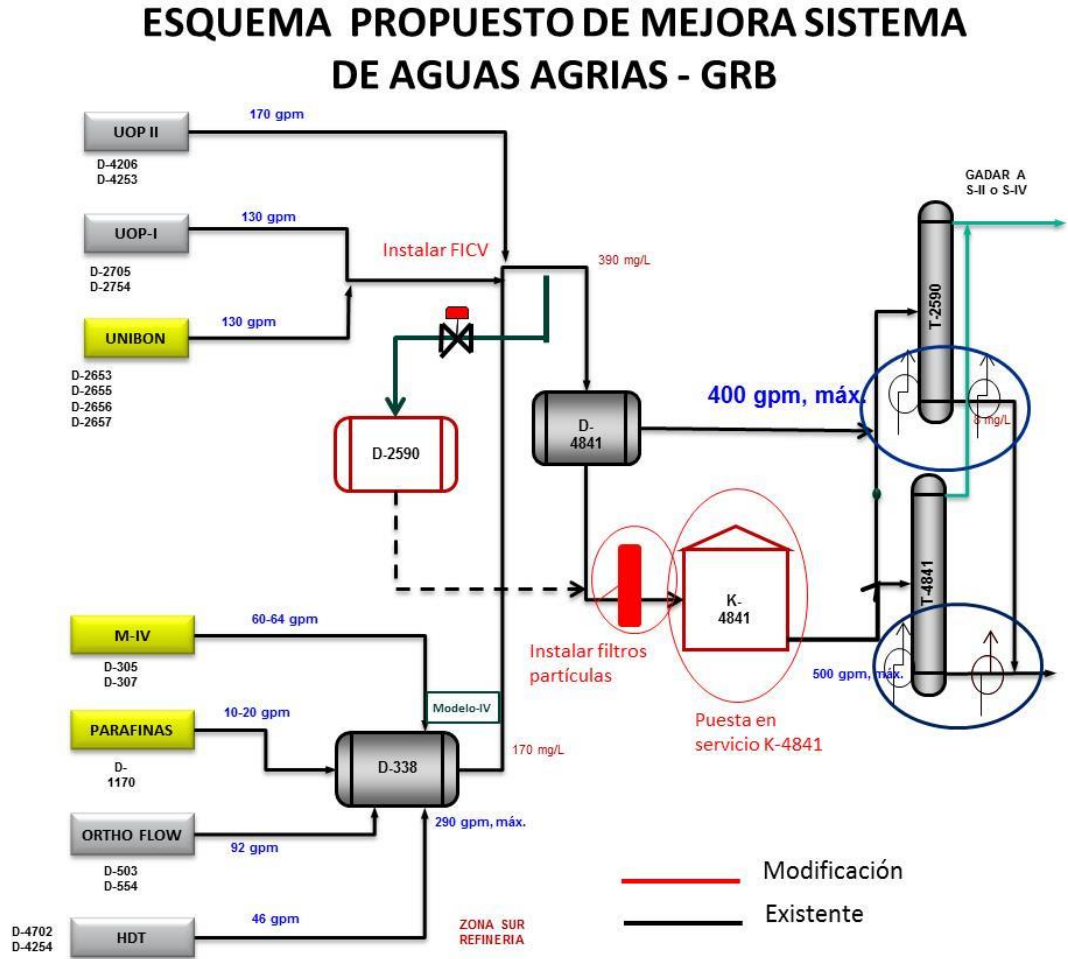


Durante los últimos 5 años se ha incrementado el ensuciamiento de las torres e intercambiadores asociados a las dos unidades de tratamiento de aguas agrias, el cual se manifiesta por el incremento de presión a través de los equipos de proceso y por la disminución en la calidad del agua despojada, afectándose de forma directa el tiempo de servicio de estas unidades. Se estimaba un tiempo de servicio de tres años de operación continua para estos sistemas de despojo, sin embargo se evidencia que las torres deben ser intervenidas anualmente para limpieza y los intercambiadores del sistema de enfriamiento del fondo de las torres deben ser intervenidos en promedio cada seis meses para limpieza mecánica.

2.2 JUSTIFICACIÓN

Con el trabajo de aplicación propuesto enfocado en el modelamiento y simulación del ensuciamiento en los intercambiadores E-4841A/B, se busca evaluar el impacto de una etapa de filtración ubicada después del D-4841, para lograr disminuir el ensuciamiento a través de los intercambiadores de calor E-4841A y E-4841B, permitiendo mayor estabilidad operacional y menores costos de mantenimiento por intervención mecánica de estos equipos. En la medida en que se mejore la calidad de la carga a la unidad, la refinería podría operar con una sola torre despojadora de aguas agrias, permitiendo que la segunda torre se encuentre fuera de servicio en espera, para entrar a operar cuando la torre que esté en servicio deba salir a mantenimiento, teniendo así una mayor flexibilidad operacional para el manejo de las aguas agrias. En la Figura 4 se muestra esquemáticamente la ubicación del nuevo filtro, el cual estará después del tambor de carga y antes del tanque de almacenamiento K4841, el cual no está actualmente en servicio pero que entrará en servicio como parte de la solución integral para mejorar el problema de ensuciamiento.

Figura 4. Diagrama esquemático en donde se muestra la ubicación del filtro de material particulado propuesto como alternativa de solución.



3. HIPÓTESIS

El ensuciamiento de la torre despojadora de aguas agrias y de los intercambiadores del sistema de fondo de la unidad U-4840, se debe a la llegada de una emulsión de hidrocarburo y material sólido (óxidos de hierro) arrastrado con las aguas agrias; con el retiro de los sólidos en una etapa de filtración se desestabilizará la emulsión incrementando el retiro de hidrocarburo en el tanque K-4841, con lo cual se disminuirá el ensuciamiento en la torre y en todos sus sistemas.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto de incluir una etapa de filtración sobre el ensuciamiento en los intercambiadores de fondo E-4841A y E-4841B de la unidad despojadora de aguas agrias U-4840 de la refinería de Barrancabermeja (GRB) mediante simulación en estado pseudo-estable.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar la condición actual de ensuciamiento de los intercambiadores de fondo E-4841A y E-4841B de la unidad despojadora de aguas agrias U-4840.
- Simular la operación actual en estado estable de la unidad despojadora de aguas agrias U-4840 usando ASPEN HYSYS (Versión 9).
- Evaluar el efecto de adicionar una etapa de filtración, antes de la torre despojadora T-4841, mediante su inclusión en el proceso y la simulación de la unidad despojadora de aguas agrias U-4840 a diferentes tiempos de operación.
- Realizar un análisis comparativo de la operación actual y la alternativa propuesta teniendo en cuenta implicaciones técnicas y económicas.

5. MARCO TEÓRICO

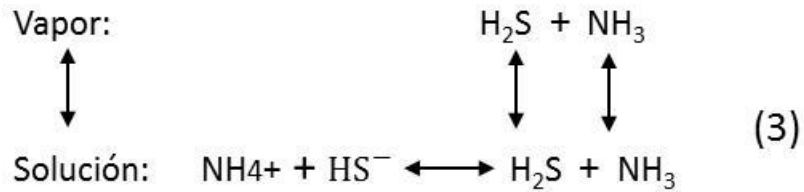
5.1 GENERALIDADES DE LAS PLANTAS DESPOJADORAS DE AGUAS AGRIAS

Las plantas despojadoras de aguas agrias de una refinería se encargan de despojar los compuestos de H_2S y NH_3 de las aguas agrias generadas en los diferentes procesos que se llevan a cabo en ella. Las aguas agrias también pueden contener otros compuestos como fenoles, cianuros, tiocianatos, dióxido de carbono, halógenos y diferentes ácidos, como el ácido acético y el ácido fórmico.

Cuando el NH_3 se encuentra en las aguas, el proceso de despojo es más difícil, este es un compuesto básico el cual reacciona con un compuesto ácido como el H_2S para formar sales solubles. La presencia del NH_3 en las aguas hace que el pH de estas sea superior a 7. El despojo de los compuestos ácidos del agua se hace en una torre de despojo, la cual cuenta con una zona superior de rectificación y una zona inferior de despojo, la división de estas dos zonas lo da el plato de alimento de carga. El agua agria de carga entra a la torre en la parte superior de la zona de despojo, en la zona inferior de la torre se tiene un rehervidor el cual mediante el uso de energía calienta la masa de líquido del fondo de la torre generando el vapor de agua que se usa en el despojo. El vapor generado en el fondo de la torre disminuye la presión parcial de los gases disueltos, permitiendo que los compuestos volátiles puedan pasar de la fase líquida a la fase vapor en cada uno de los platos.

En las aguas agrias, el H_2S y el NH_3 están presentes como NH_4HS , es una sal de una base débil y un ácido débil, en solución esta sal experimenta una hidrólisis considerable para formar nuevamente H_2S y NH_3 .

El equilibrio total se describe como:



La constante del equilibrio de hidrólisis está definida como:

$$KH = \frac{[\text{H}_2\text{S}] * [\text{NH}_3]}{[\text{HS}^-] * [\text{NH}_4^+]} \quad (4)$$

El H₂S y el NH₃ en la fase acuosa son volátiles y ejercen una presión parcial en la fase vapor (Ley de Henry), el H₂S y el NH₃ en estado gaseoso pueden ser removidos usando vapor o un medio de despojo. La hidrólisis aumenta con la temperatura.

En la refinería de Barrancabermeja se cuenta con dos unidades despojadoras de aguas agrias, la unidad U-2590 y la unidad U-4840, las dos unidades tienen las mismas etapas de proceso, el diseño de estas unidades es un diseño convencional de una sola torre de despojo.

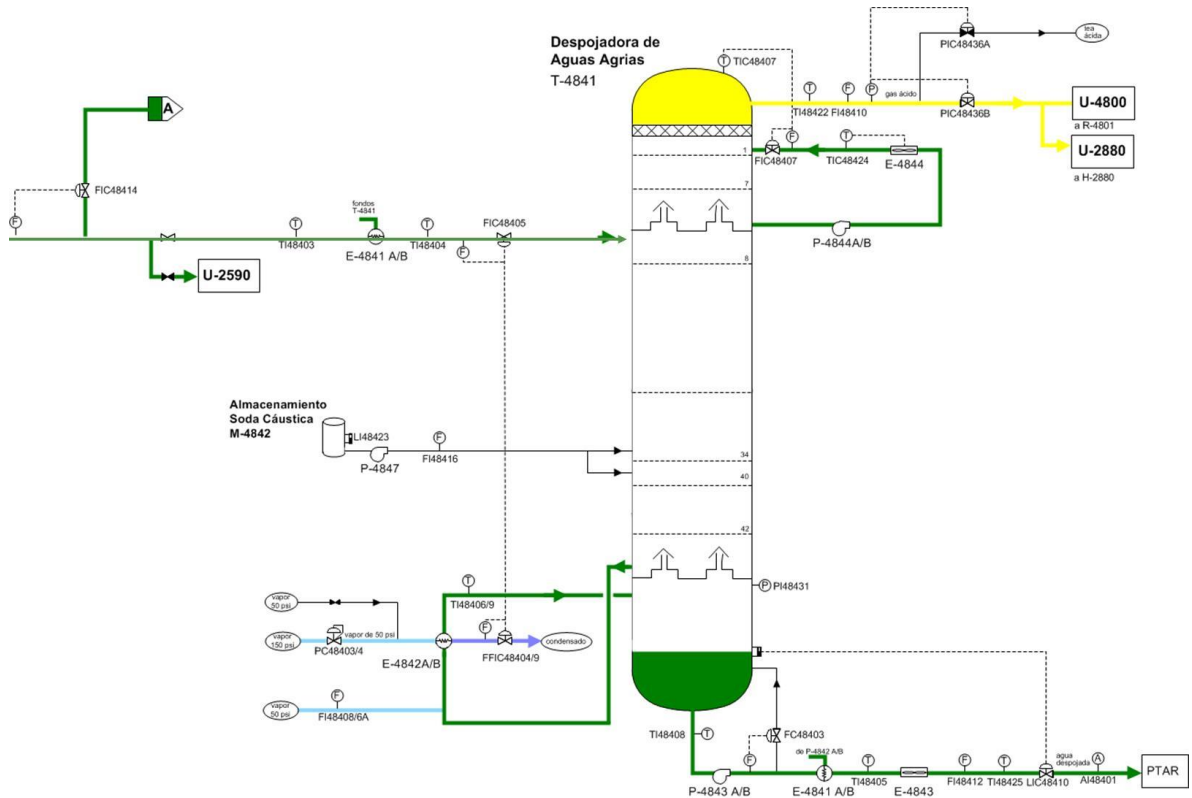
El trabajo de aplicación se centrará en la evaluación de la unidad U-4840, a continuación se hace una descripción general de la unidad U-4840:

1. **Sistema de carga.** Esta etapa está conformada por un tambor de recibo de las aguas de carga, tambor D-4841. En este tambor se separan los gases livianos y los hidrocarburos libres que son arrastrados con las aguas agrias. El tiempo de residencia por diseño de este tambor es de 20 minutos.

2. **Pre calentamiento de la carga:** La unidad cuenta con los precalentadores E-4841A y E-4841B, llevan la corriente de carga a la torre a una temperatura de 198°F, estos intercambiadores precalienta la carga con la corriente caliente de salida del fondo de la torre T-4841.
3. **Torre despojadora:** La unidad U-4840 cuenta con una torre despojadora, en donde se separa en forma paralela el H₂S y el NH₃. La torre T-4841 tiene 42 platos. La carga entra por el plato número 8 enumerado de arriba hacia abajo. El despojo de los compuestos ácidos se logra disminuyendo la presión parcial de estos compuestos en cada uno de los platos, mediante la inclusión en la torre de una fase de vapor de agua ascendente, la cual se genera en el rehervidor E-4842A/B. La corriente de cima de la torre (GADAR) rica en los contaminantes H₂S y NH₃, es enviada como carga a las unidades de azufre; la corriente de agua despojada del fondo de la torre, va hacia la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR.
4. **Sistema de enfriamiento de fondo:** La unidad con dos intercambiadores de fondo, que son a su vez los mismos precalentadores de carga E-4841A y E-4841B, por el lado tubos entra la carga a la torre y por el lado casco circula la corriente de agua despojada de salida de la T-4841.
5. **Sistema de reflujo de cima:** La torre T-4841 cuenta con un sistema de *pump-around* en la zona de cima, en donde la corriente del *pump-around* se toma del colector del plato de carga 8, posteriormente esta corriente se enfría para ser descargada en la zona de cima de la torre. Esta configuración de *pump-around* y no de reflujo convencional es preferida cuando las aguas agrias de las unidades de craqueo catalítico contienen cianuros como lo es en el caso actual. Los cianuros pueden generar corrosión en el esquema convencional de reflujo de cima, ya que se podría presentar una fuerte corrosión en la interfase vapor líquido en el condensador de cima y en el tambor acumulador. En la Figura 5 se

muestra el esquemático de la T-4841, allí se observa el *pump-around*, cuya boquilla de carga está ubicada en el mismo plato de la boquilla de carga de la torre.

Figura 5. Diagrama esquemático de la torre despojadora de aguas agrias T-4841 de la unidad U-4840



5.2 GENERALIDADES SOBRE EL ENSUCIAMIENTO

Uno de los principales problemas en la continuidad de la operación de las plantas industriales es el ensuciamiento, es decir el incremento de depósitos de materiales no deseados en equipos o en líneas de proceso. En la mayoría de los procesos de la industria del petróleo se presentan ensuciamientos, algunos tipos de ensuciamientos pueden ser tolerables y otros no. Uno de los equipos que más se

ven afectados por ensuciamiento son los intercambiadores de calor y las torres de proceso.

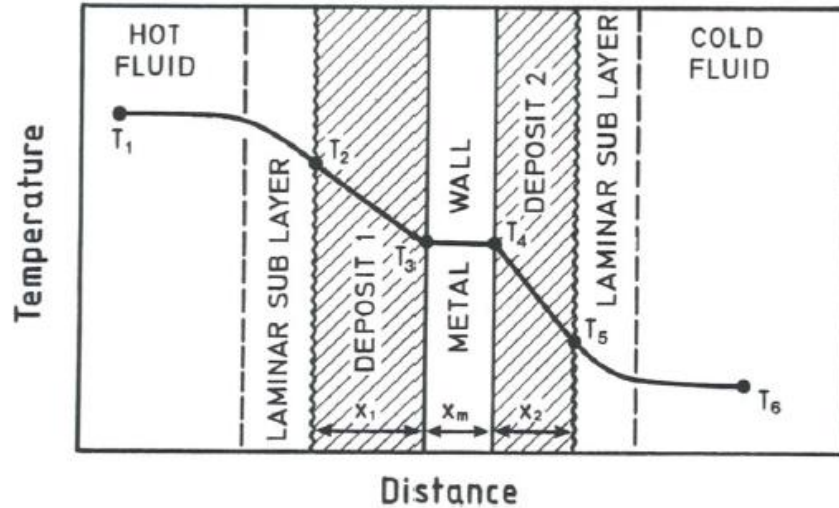
Existen varios tipos de ensuciamientos, los más comunes en la industria del petróleo son:

Ensuciamiento químico: Se da por la reacción de los compuestos al interior de los fluidos, por el cambio de las condiciones de proceso pH, temperatura, presión, generando una capa de depósitos o ensuciamiento sobre la superficie de la pared del equipo en donde se encuentre contenido el fluido.

Ensuciamiento biológico: Este ensuciamiento es generado por el crecimiento de organismos vivos en el fluido, los cuales se depositan en la superficie del fluido

Ensuciamiento por depósitos: Específicamente hablando de intercambiadores de calor, este ensuciamiento se denomina fouling, y consiste en una depositación de materiales no deseados en la superficie de transferencia de calor, afectando la transferencia de calor. A medida que se va depositando se va formando una capa que ofrece resistencia a la transferencia de calor, disminuyendo la eficiencia térmica del intercambiador de calor. Esta capa puede tener baja conductividad térmica y causa un considerable gradiente de temperatura. En la Figura 6 [18, página 19], se muestra la distribución de la temperatura a través de la superficie de un tubo incrustado, en esta figura se observa el efecto de la caída de la temperatura por el incremento de la capa de depósito. La temperatura T1 hace referencia a la temperatura del fluido caliente, la temperatura T6 hace referencia al fluido frío, bajo condiciones de flujo turbulento, en esta gráfica se nota la resistencia que ejerce las incrustaciones tanto en la parte interna como externa del tubo a la transferencia de calor.

Figura 6. Distribución de la temperatura a través de la superficie de un tubo con *fouling*.



La resistencia a la transferencia de calor a través de una superficie sólida está dada por X/λ , en donde X es el espesor de la superficie sólida y λ la conductividad térmica del material. Con base en la Figura 6 la resistencia del depósito 1 sería X_1/λ_1 , y la resistencia del depósito dos sería X_2/λ_2 , la resistencia de la pared del tubo sería X_m/λ_m . La resistencia total a la transferencia de calor está definida como la suma de todas las resistencias incluyen la resistencias a la transferencia de calor del fluido caliente y el fluido frío, la cual está definida como $1/\alpha$, en donde α es el coeficiente de transferencia de calor para el fluido, la suma de todas las resistencias queda como en la ecuación 5.

$$R_T = \frac{x_1}{\lambda_1} + \frac{x_2}{\lambda_2} + \frac{x_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{hot}} + \frac{1}{\alpha_{cold}} \quad (5)$$

$$Q = \frac{A * (T_1 - T_6)}{R_T} \quad (6)$$

5.3 GENERALIDADES SOBRE MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN APLICADA A LAS PLANTAS DE PROCESAMIENTO INDUSTRIAL

Un modelo consiste en la representación numérica de todos los elementos de un sistema, la representación numéricas de las propiedades físicas de estos, permite ver las relaciones entre las diferentes variables asociados a estos y los parámetros que permiten contextualizar el desempeño del sistema de acuerdo con las características del entorno y las relaciones del sistema del mundo real con el mismo. En los últimos 35 años gracias al desarrollo computacional se ha podido realizar y resolver un mayor número de modelos los cuales han permitido conocer mejor los procesos. Los modelos matemáticos pueden ser útiles en todas las fases de la ingeniería química, desde la investigación y desarrollo de operaciones a nivel industrial, así como para el uso de negocios y estudios económicos.

Las etapas generales en el desarrollo de un modelo son:

- **Conceptualización:** En esta etapa se definen los elementos de estudio, los aspectos importantes del sistema a evaluar, se realiza un adecuado planteamiento del problema a evaluar y un adecuado planteamiento de las restricciones del modelo.
- **Formalización:** En esta etapa se definen las variables del modelo. Se desarrollan las ecuaciones que representan los fenómenos de evaluación.
- **Implementación:** En esta etapa se hace la codificación del modelo en un lenguaje de computador, existen muchas herramientas informáticas para este desarrollo como el C++, Basic, Fortran, Matlab, simuladores comerciales como Pro II, Hysys, etc. Todos estos modelos se basan en el uso de métodos numéricos para el desarrollo de las ecuaciones.

- **Validación:** Le etapa final de todo proceso de modelamiento implica la comprobación del modelo con datos independientes, esta etapa de comparación puede darse con la comparación de los resultados del modelo planteado con respecto a otros modelos similares de otros autores.

A nivel industrial existen compañías que han invertido en investigación y se han especializado en el modelamiento matemático, desarrollando herramientas de simulación, que se encuentran en el mercado, las cuales permiten simular la mayoría de los procesos químicos de la industria de la refinación del petróleo. Los modelos matemáticos se basan en las ecuaciones matemáticas de continuidad, energía, transporte, movimiento, ecuaciones de estado, de equilibrio químico, equilibrio termodinámico y de reacción química. Unas de las herramientas más populares tanto en la industria como en la academia para la simulación de procesos son los paquetes de simulación de las compañías SIMSCI (Pro II) y ASPEN (Hysys), estos *software* permiten realizar cálculos rigurosos y a su vez permiten realizar corridas a diferentes condiciones de proceso según sea la necesidad del usuario.

5.4 GENERALIDADES SOBRE MODELAMIENTO APLICADO A ENSUCIAMIENTO EN INTERCAMBIADORES DE CALOR

El ensuciamiento es la acumulación de un depósito en una superficie, y es un proceso de transferencia de masa. Debido al impacto que el ensuciamiento genera en los sistemas, ha sido necesario estudiar el fenómeno del ensuciamiento con el fin de predecir en qué momento de la operación este ensuciamiento se vuelve crítico, para el caso específico del ensuciamiento este fenómeno también se puede predecir mediante el modelamiento matemático.

Según T.R. Bott⁷ el crecimiento de un depósito en una superficie está definido como la diferencia entre la velocidad de depositación menos la velocidad de remoción del depósito.

$$\frac{dm}{dt} = \phi_D - \phi_R \quad (7)$$

En donde: m = masa que se deposita por m^2 ; ϕ_D = flujo másico que se deposita por unidad de área; ϕ_R = flujo másico que se remueve por unidad de área.

El balance de masa en una interfase fluido/sólido que se deposita sería:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} \quad (8)$$

En tuberías de intercambiadores de calor los depósitos incrementan la resistencia a la transferencia de calor, si el depósito tiene un espesor pequeño este se puede despreciar, pero si el espesor del depósito es considerable, a parte de la resistencia a la transferencia de calor también generará problemas de incremento de velocidad del fluido el cual se ve reflejado en el incremento en la caída de presión en el equipo. Si el tubo está limpio y su diámetro es d_1 , y el flujo volumétrico a través es V , su velocidad está dada por v_1 :

$$v_1 = V * \frac{4}{\pi d_1^2} = 4V / \pi d_1^2 \quad (9)$$

Si debido al ensuciamiento d_1 se reduce a la mitad es decir $d_1/2$, entonces su nueva velocidad v_2 :

⁷ BOTT T.R., Fouling of heat exchanger, Elsevier Science & Technology Books, april 1995

$$v_2 = V * \frac{4 * 4}{\pi d_1^2} = \frac{16V}{\pi d_1^2} \quad (10)$$

En la ecuación 10 se evidencia que si el diámetro del tubo se reduce a la mitad la velocidad del mismo flujo volumétrico a través del diámetro reducido se incrementa cuatro veces, igualmente el número de Reynolds también se ve afectado aumentando cuando aumenta la velocidad.

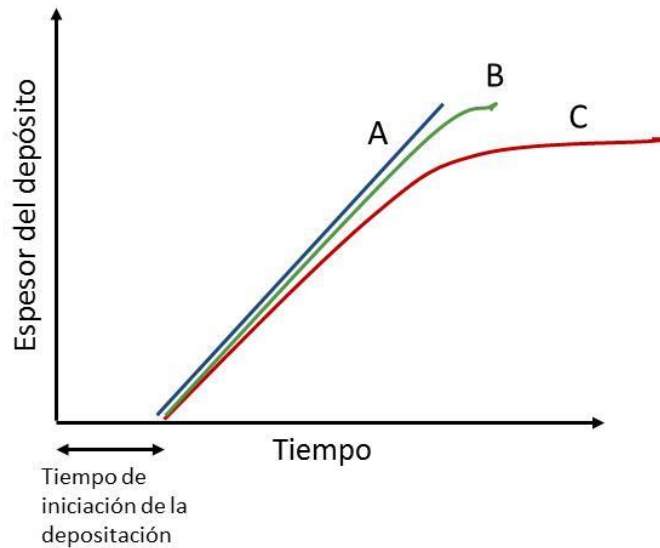
La rugosidad de la superficie del depósito es diferente a la rugosidad de la superficie del intercambiador limpio. Bott y Walker⁸ describieron de la siguiente manera los efectos del ensuciamiento sobre la resistencia a la transferencia de calor en intercambiadores de calor,

$$\begin{array}{l} \text{Cambios en el} \\ \text{coeficiente de} \\ \text{transferencia} \\ \text{de calor} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Cambios} \\ \text{debido a la} \\ \text{resistencia} \\ \text{térmica del} \\ \text{depósito} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Cambios} \\ \text{debida a la} \\ \text{rugosidad del} \\ \text{depósito} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Cambios} \\ \text{debido al} \\ \text{cambio del} \\ \text{número} \\ \text{Reynolds por la} \\ \text{presencia del} \\ \text{depósito} \end{array} \quad (11)$$

La interpretación matemática de la ecuación anterior es la base para el desarrollo de cualquier modelo de ensuciamiento en tuberías en intercambiadores de calor.

⁸ BOTT T. R., and WALKER R.A, Fouling in Heat Transfer Equipment. The Chemical Engineer, 1971

Figura 7. Distribución de los depósitos en el tiempo



La descripción del proceso de ensuciamiento se describe en la Figura 7 suministrada por Bott [18, página 25], en donde el ensuciamiento puede ser lineal con el tiempo (A), levemente asintótico en el tiempo (B) y completamente asintótico en el tiempo (C), e igualmente se describe un tiempo de iniciación, es decir no necesariamente cuando entra en servicio un intercambiador inicia el proceso de depositación, este puede iniciar un espacio de tiempo posterior a su puesta en servicio, aunque no siempre se puede identificar con facilidad este tiempo de iniciación de la depositación.

En general los modelos matemáticos desarrollados para describir el ensuciamiento en intercambiadores es un arreglo de las ecuaciones que describen los comportamientos lineales, levemente asintóticos y completamente asintóticos, los valores e iniciación típicos se encuentran entre 40-500 horas, sin embargo en la mayoría de los modelos matemáticos este tiempo de iniciación se asume 0⁹.

⁹ Ibíd.

El modelo lineal (A) de la Figura 7, indica que la diferencia entre la velocidad de depositación y remoción es constante, es representada como

$$x_f = \frac{dx}{dt} * t \quad (12)$$

En donde x_f es el espesor del depósito en el tiempo, si se cuenta con un tiempo de iniciación entonces la ecuación 12 queda,

$$x_f = \frac{dx}{dt} * (t - t_i) \quad (13)$$

En donde t_i es el tiempo antes de que se comience a presentar el ensuciamiento.

Reemplazando la ecuación 13 en términos de resistencia a la transferencia de calor

$$R_{ft} = \frac{dR_f}{dt} * (t - t_i) \quad (14)$$

El modelo levemente asintótico (B) de la Figura 7, indica que la velocidad de depositación disminuye con el tiempo y no alcanza el estado estable, se representa de forma general como,

$$\frac{dR_f}{dt} = q^n \quad (15)$$

En donde R_f es la resistencia en un momento dado, q es el flux de calor por unidad de área a través de una superficie, n coeficiente.

$$q = U_D \Delta T = \frac{\Delta T}{R_c + R_f} \quad (16)$$

En U_D es el coeficiente de transferencia de calor a las condiciones de ensuciamiento, U_c es el coeficiente de transferencia de calor a condiciones limpias. R_D es la resistencia a la transferencia de calor a condiciones sucias y R_c es la resistencia a la transferencia de calor en condiciones limpias, en donde $R_D=1/U_D$; $R_c=1/U_c=1/\alpha$. Asumiendo que la diferencia de temperatura es constante, y al reemplazar la ecuación 16 en la 15 resulta la ecuación 17 en donde K es una constante.

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{K}{(R_c + R_f)^n} \quad (17)$$

Integrando los dos lados de la ecuación 17 en el tiempo 0 y en el tiempo t , sabiendo que en el tiempo 0 R_f es igual a R_c , resulta,

$$(R_c + R_f)^{n+1} - R_c^{n+1} = K(n - 1)t \quad (18)$$

Los valores de K y n , dependen del mecanismo que induce la depositación, ya sea por reacción química, por transferencia de masa, por presencia de partículas, etc.

El modelo asintótico (C) de la Figura 7, indica que la velocidad de depositación disminuye con el tiempo y alcanza el estado estable cuando la velocidad de depositación es igual a la velocidad de remoción. En este modelo se asume que la velocidad causa una fuerza de cizalla sobre la capa de ensuciamiento, la cual remueve algo de esta capa, este modelo fue ampliamente desarrollado por Kern y Seaton en el año 1959 en donde,

$$R_{ft} = R_{f\infty}(1 - e^{-\beta t}) \quad (19)$$

R_{ft} es la resistencia a la transferencia de calor en un momento t , y $R_{t\infty}$ es la resistencia a la transferencia de calor en un tiempo infinito, β es una constante que

depende de las propiedades del sistema. Kern y Seaton comenzaron realizando una modificación a la ecuación básica de deposición (7),

$$\frac{dX_f}{dt} = K_1 C' M - K_2 \tau X_{ft} \quad (20)$$

En donde $K_1 C' M$ es la velocidad de depositación, $K_2 \tau X_{ft}$ es la velocidad de remoción, K_1 y K_2 son constantes, C' es la concentración del depósito, M es el flujo másico, X_t es el espesor de la capa de depósito en un tiempo t , τ es el coeficiente de cizallamiento.

Integrando la ecuación 17 y asumiendo que C' y M son constantes, queda

$$X_f = \frac{K_1 C' M}{K_2 \tau} (1 - e^{-K_2 \tau}) \quad (21)$$

La ecuación 21 tiene la misma forma que la ecuación 19, $\frac{K_1 C' M}{K_2 \tau}$ es una constante y equivale a $R_{f\infty}$ en la ecuación 19, $K_2 \tau$ también es una constante y equivale a β en la ecuación 19.

La velocidad inicial de depositación y la resistencia al ensuciamiento asintótico puede ser obtenido haciendo $X=0$ y la $\frac{dX_f}{dt} = 0$ en la ecuación 20.

Entonces $\left(\frac{dx_f}{dt}\right)_{t=0} = K_1 C' M$, en donde $K_1 C' M$ es una constante para un set de condiciones operacionales. La capa de depositación asintótica $X_\infty = K_1 C' M / K_2 \tau$, siendo esta también una constante para un set de condiciones operacionales.

6. METODOLOGÍA

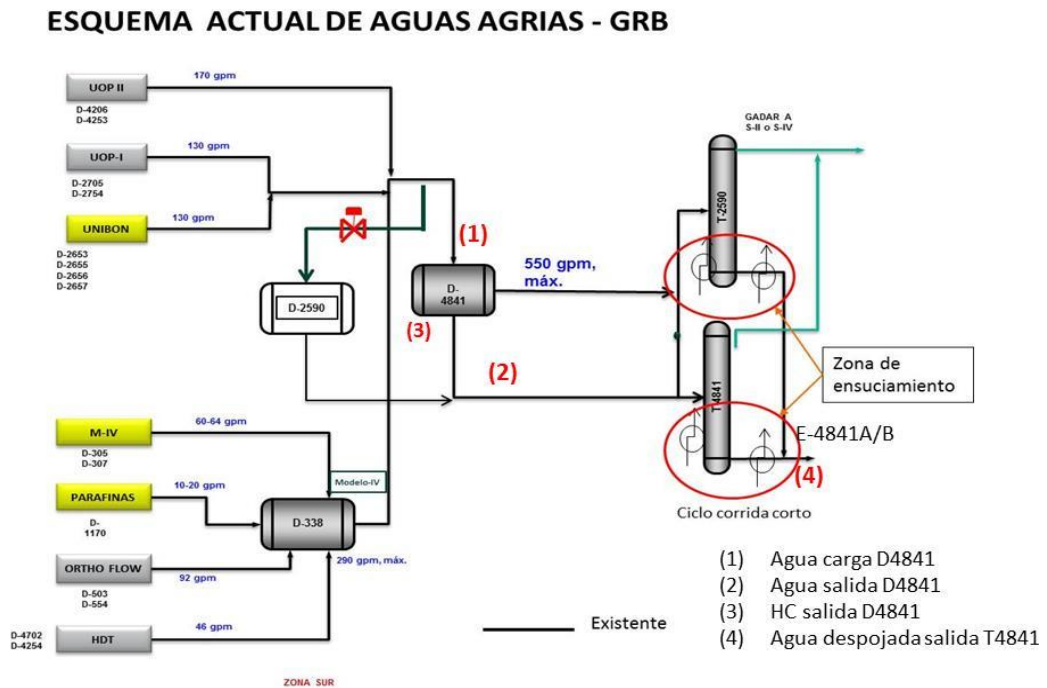
La metodología para el desarrollo de este trabajo de aplicación se dividió en cinco etapas, la primera etapa hace referencia a la caracterización de los depósitos encontrados en los intercambiadores de calor de fondo de la unidad U-4840 y el desarrollo de los análisis de laboratorio con el fin de determinar el contenido de llegada de material sólido a la planta, lo anterior para definir la fuente que genera la precipitación, y realizar el balance de masa de entrada de material particulado a la unidad; en la segunda etapa se hace todo el desarrollo numérico para definir el modelo matemático que representa el ensuciamiento en el periodo de tiempo evaluado, en el lado carcaza de los intercambiadores de calor E-4841A y E-4841; la tercera etapa hace referencia a la simulación de la unidad usando el paquete de simulación HYSYS versión 9 para representar el proceso operativo actual de la unidad y representar el ensuciamiento en el tiempo; la cuarta etapa es la simulación del sistema incluyendo una etapa adicional de filtración; la quinta etapa hace referencia al análisis de resultados de las etapas uno, dos, tres y cuatro.

6.1 PRIMERA ETAPA: ANÁLISIS DE LABORATORIO

Como se explicó en el ítem 5.2 GENERALIDADES SOBRE EL ENSUCIAMIENTO, inicialmente se debe determinar el tipo de ensuciamiento y su origen, con base en lo anterior se podrá definir si la implementación de una etapa de filtración es una alternativa válida de solución para disminuir el ensuciamiento en los E4841A/B. Se evaluaron las corrientes de carga de agua agria de entrada y salida del tambor de carga D-4841, se analizó la corriente de hidrocarburo de salida del tambor de carga D-4841, se analizó la corriente de salida de agua despojada en la torre T-4841. En la Figura 8 se identifican en color rojo, entre paréntesis y con números del 1 al

4 los cuatro puntos de toma de muestras de corrientes de proceso, usadas para determinar la carga de sólidos a la planta. Igualmente se tomaron muestras de residuos sólidos encontrados al interior de la torre despojadora T-4841, residuos encontrados en el lado casco del rehervidor de fondo de la torre E-4842A, residuos encontrados en el lado casco del E-4841A, los resultados de los análisis de los depósitos sirven de base para determinar su naturaleza química, para determinar la densidad del sólido precipitado y determinar la conductividad térmica de este sólido, propiedades requeridas para encontrar el espesor de la capa de ensuciamiento y peso de la capa formada en el interior del casco de los E-4841A/B. Las muestras de los depósitos al interior de los equipos se tomaron durante paradas de planta de la unidad. Las muestras de las corrientes de proceso, se tomaron en un espacio de tiempo de tres semanas.

Figura 8. Ubicación puntos de toma de muestras en planta para análisis de laboratorio



A cada una de las muestra de un volumen de un (1) litro de agua, tanto a la entrada de la planta como salida de la planta se les hizo los análisis de pH, análisis de Sulfuros y Mercaptanos, análisis de Nitrógeno Amoniacal, análisis de grasas y aceites, y se les determinó el peso del material particulado contenido en cada muestra. A la corriente de hidrocarburo del D-4841 se le hicieron análisis de contenido de grasas y aceites, análisis de API, densidad, y determinación del peso del material particulado contenido en la muestra.

A las muestras de sólidos recuperados del interior de los equipos se les hizo análisis de composición química para determinar su naturaleza orgánica e inorgánica, se le determinó su densidad y se le hizo distribución de tamaño de partícula. Los análisis de distribución de tamaño de partícula sólo se le hizo a las muestras recogidas al interior de los equipos, ya que la masa de sólidos recuperada en las muestras de las corrientes de proceso eran insuficiente para aplicar el análisis de distribución de tamaño de partícula mediante análisis de tamizado. En el Anexo A, se encuentra la descripción de los métodos empleados para los análisis realizados.

6.2 DESARROLLO MODELO DE ENSUCIAMIENTO LADO CASCO E-4841A/B

El ciclo de corrida de la unidad de aguas agrias U-4840 actualmente está definido por el ciclo de servicio de los intercambiadores de calor E-4841A/B, más específicamente por el ciclo de servicio del lado casco de estos equipos. Actualmente la torre T-4841 presenta ensuciamiento en sus internos, pero esta puede operar de forma continua durante un año, los rehervidores de fondo de la torre E-4842A/B se ensucian en promedio cada 6 meses al igual que los E-4841A/B, sin embargo como los dos rehervidores operan de forma independiente cuando un equipo de estos se ensucia se puede operar con el que estaba fuera de servicio, permitiendo sacar a mantenimiento el equipo que se ha ensuciado sin necesidad de parar la planta, todo lo contrario ocurre cuando el lado casco de los E-4841A/B se

ensucia, debe parar completamente la unidad para su mantenimiento, como estos son los equipos que están impactando los ciclos de corrida de la unidad a seis meses, se hace necesario conocer el comportamiento del ensuciamiento actual del lado casco de estos equipos con el fin de determinar cómo se comportaría el ensuciamiento del lado casco después de implementar una etapa de filtración en la unidad.

Para el desarrollo del modelo matemático que representa el ensuciamiento actual del lado casco de los E-4841A/B, se usó la metodología propuesta por el autor Donald Q. Kern establecida en su libro Procesos de Transferencia de Calor [26], aplicada para intercambiadores de calor de tubos y carcaza. Esta metodología plantea calcular una resistencia a la transferencia de calor Rd debida a formación de depósitos, mediante el cálculo del coeficiente de transferencia de calor limpio Uc y el cálculo del coeficiente de transferencia de calor de diseño Ud .

$$Rd = \frac{Uc - Ud}{Uc * Ud} \quad \frac{h.pie3.^{\circ}F}{Btu} \quad (22)$$

El valor de la resistencia a la transferencia de calor calculada, es a su vez una medida indirecta del espesor de la capa que se encuentra depositada, al ser multiplicada por la conductividad térmica del depósito (λ) ya sea en la parte externa del tubo o en la parte interna de los tubos del intercambiador.

$$X_{espesor} = Rd * \lambda \quad (pie), \quad (23)$$

Con la variación en el espesor de la capa del depósito en la parte externa de los tubos y en la parte interna de estos, se recalculó el nuevo diámetro equivalente tanto lado tubos como lado casco, con este nuevo valor se hizo el cálculo de la caída de presión a través de los dos lados usando la metodología propuesta por el autor

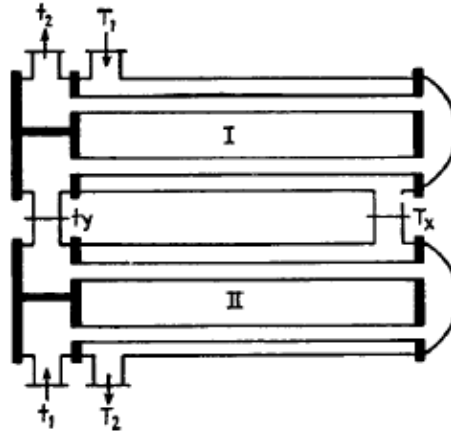
Donald Q. Kern establecida en su libro Procesos de Transferencia de Calor [26], página 186.

Para la aplicación de esta metodología lo primero que se hace es obtener una matriz de operación de la unidad, en donde se toman datos de proceso de las principales variables operativas, como presión, temperaturas y flujos, para un total de 180 días de operación continua de la planta, tomados entre el 1 de octubre del año 2016 y el 30 de marzo del año 2017, fecha inicial y final de un ciclo de corrida de la planta. La matriz desarrollada se usó tanto para la validación del modelo de simulación desarrollado en Hysys versión 9 y para desarrollar y validar el modelo de ensuciamiento del lado casco de los E-4841A/B.

Los datos operacionales de la matriz se obtuvieron del DCS (sistema de control distribuido) de la unidad y también de la toma de datos en campo. Todos los datos operativos de la matriz corresponden a valores puntuales del día.

Los intercambiadores de calor E-4841A/B son dos intercambiadores en serie de igual tamaño cada uno, cada uno de un paso por el lado casco y dos pasos por el lado tubos. En la Figura 9, se encuentra una representación gráfica de los intercambiadores E-4841A/B, el intercambiador E-4841A es el intercambiador inferior, el intercambiador E-4841B es el intercambiador superior. La corriente de proceso caliente que sale del fondo de la torre T-4841 es bombeada con la bomba P4843A/B a la entrada lado casco del E4841B con una temperatura T1 y saliendo con una temperatura T2. La corriente de carga fría que sale del D-4841 entra al lado tubos del E-4841A a una temperatura t1, saliendo por el lado tubos a una temperatura t2, esta corriente va como carga a la torre despojadora T-4841.

Figura 9. Representación gráfica intercambiadores E-4841A/B



Específicamente para el modelo de ensuciamiento del lado casco de los E-4841A/B, se tomaron del DCS los datos de temperatura de entrada y salida del agua de proceso lado tubos y lado casco ($^{\circ}\text{F}$), así como el valor del flujo de agua lado tubos y lado casco (gpm), los valores de presión entrada y salida lado tubos y casco (psig) corresponden a valores tomados en campo. Con esta data se construyó la matriz inicial de trabajo constituida por 180 filas y 10 columnas.

En los siguientes pasos se plasma la metodología de trabajo empleada para definir el modelo matemático del ensuciamiento en los E-4841A/B. Todos los cálculos definidos se hacen para cada una de las 180 líneas de la matriz inicial de trabajo.

- a. Una vez definida la matriz 180 x 10, el primer cálculo que se hace es el cálculo del Q, el cual es el calor transferido medido en unidades BTU/h.

$$Q = \text{flujo másico} * c_p * \Delta T \quad (24)$$

El cálculo del Q se hace tanto para el lado casco y el lado tubos de forma independiente, teóricamente el valor de Q para ambos lados debe ser igual cuando no se tienen pérdidas por transferencia de calor, sin embargo en los

datos reales de planta se pueden tener unas pequeñas diferencias producto de los errores en la medición de los instrumentos. Para el caso de los E-4841A/B se validó el Q calculado tanto por el lado casco como por el lado tubos.

Para el flujo, los datos del DCS están en flujo volumétrico gpm, para pasar este valor a flujo másico se hace multiplicando el valor de flujo volumétrico gpm por 500, quedando en unidades de medida en lb/h. La capacidad calorífica c_p [Btu/lb*°F] se calculó en el valor promedio de temperatura ΔT de diseño de los intercambiadores tanto en el lado casco y lado tubos, se manejó constante estos valores durante el desarrollo del modelo, ya que su variación es muy pequeña con relación a los cambios de temperatura al ser el fluido de proceso agua por ambos lados. El ΔT de temperatura correspondiente para cada lado es la diferencia de temperatura entre la temperatura de entrada y salida de cada lado dividida entre dos.

- b. Se realiza el cálculo de la temperatura media logarítmica corregida de los E-4841A/B denominada como $LMTD_{\text{corregido}}$, esta temperatura se hace calculando el ΔT de temperatura caliente (T_1-t_2) y el Δt temperatura frío (T_2-t_1) Figura 9, posteriormente se calcula el LMTD sin corregir de acuerdo con la ecuación 25.

$$LMTD = \frac{\Delta T_{\text{caliente}} - \Delta t_{\text{frío}}}{\ln \frac{\Delta T_{\text{caliente}}}{\Delta t_{\text{frío}}}} \quad (25)$$

Se hace el cálculo de R y S, con base en la Figura 9.

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}; \quad S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}; \quad (26)$$

Se aplica la ecuación de corrección F_t aplicada para intercambiadores 2-4 (dos pasos carcaza, cuatro pasos por tubos).

$$F_t = \frac{\left(\frac{\sqrt{R^2 + 1}}{2(R - 1)}\right) * \ln \frac{(1 - S)}{(1 - RS)}}{\ln \frac{\left(\frac{2}{S}\right) - 1 - R + \left(\frac{2}{S}\right)}{\left(\frac{2}{S}\right) - 1 - R + \left(\frac{2}{S}\right)} * \frac{\sqrt{(1 - S) * (1 - RS)} + \sqrt{R^2 + 1}}{\sqrt{(1 - S)(1 - RS)} - \sqrt{R^2 + 1}}} + 1 \quad (27)$$

$$LMTD_{\text{corregido}} = LMTD * F_t \quad (28)$$

Una vez se obtiene F_t , se multiplica el LMTD ecuación (25) por F_t ecuación (27) para obtener el $LMTD_{\text{corregido}}$.

- c. El siguiente paso es el cálculo del área transversal de transferencia de calor. Para todos los cálculos realizados se asume que el área transversal de transferencia de calor en los E-4841A/B es constante en el tiempo. El área transversal depende de la longitud de los tubos 20 ft, del número de tubos 552 por casco y la superficie por longitud de tubo 0.2618 ft^2 , como son dos intercambiadores de calor se multiplica por 2, el área de transferencia de calor calculada fue 6936.65 ft^2 .

$$A_{\text{trans}} = L * \#tubos * a'' * 2 \text{ ft}^2 \quad (29)$$

- d. Una vez se ha obtenido el Q, $LMTD_{\text{corregido}}$, A_{trans} , se puede aplicar la ecuación de fourier para calcular el coeficiente de transferencia de calor de diseño U_d

$$\text{Ecuación de Fourier } Q = U_d * A_{\text{trans}} * LMTD_{\text{corregido}} \quad (30)$$

Se despeja U_d ,

$$U_d = \frac{Q}{A_{\text{trans}} * LMTD_{\text{corregido}}} ; \quad \frac{BTU}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F} \quad (31)$$

- e. Con base en los resultados obtenidos en la primera etapa **6.1 ANÁLISIS DE LABORATORIO** se hace el cálculo de la densidad y de la conductividad térmica del sólido depositado.

De los resultados obtenidos, se encuentra que los sólidos arrojados en el lado casco de los E-4841A/B son una mezcla, la cual cuenta con una parte orgánica y una parte inorgánica. Para la composición de los sólidos se toma en cuenta los compuestos más representativos arrojados en los análisis de laboratorio, que son óxidos de hierro tipo hematita (45% peso), agua (9,53% peso), hidrocarburo HC tipo nafta craqueada (45% peso) y cobre (0,17% peso).

Para el cálculo de la densidad se toma la densidad de cada uno de los elementos que forman parte del sólido depositado en unidades g/ft^3 a la temperatura promedio lado casco multiplicada por su porcentaje en la mezcla. Para cada uno de los 180 días analizados se obtiene la densidad usando la ecuación (46) puntos analizados se obtiene un valor de densidad.

$$g = g_{\text{hematita}} * 0.45 + g_{\text{hidrocarburo}} * 0.45 + g_{\text{agua}} * 0.0953 + g_{\text{cobre}} * 0.0017 \quad (32)$$

Aunque la composición del sólido depositado puede variar en el tiempo, durante los cálculos de densidad realizados se asume que la composición del sólido es constante, se usaron los valores de composición resultantes de los análisis de laboratorio realizados a las muestras encontradas al interior de los intercambiadores E-4841A/B.

Para el cálculo de la conductividad térmica del sólido depositado se toma el valor de la conductividad térmica por compuesto de la mezcla multiplicada por su composición en la mezcla.

El valor de la conductividad térmica de la hematita se calculó con base en la ecuación (33), obtenida en el artículo [27] página 4, la cual aplica para un rango de temperatura entre 152°F y 755°F.

$$K(\text{hematita}) = 0.0839 - 6.63 \cdot 10^{-5} \cdot T, \quad (33)$$

en donde T es en °k y se toma a la temperatura promedio del lado casco. *K* está en unidades W/°k- cm, para pasar a unidades BTU/h-ft-°F, se multiplica *K* por 0.57782.

$$K_{\text{final}}(\text{hematita}) = (\text{hematita}) \cdot 0.57782, \text{ BTU/h-ft-}^\circ\text{F} \quad (34)$$

- f. Se realiza el cálculo del coeficiente de transferencia de calor h_o para el lado casco. Para realizar este cálculo se necesita de la información de diseño del intercambiador, se calcula el número de *Reynolds*, el número de *Prandtl*, se calcula el área transversal de flujo.
- g. Se realiza el cálculo del coeficiente de transferencia de calor h_{io} para el lado tubos. Se requiere de la información de diseño de los tubos del intercambiador, se debe realizar los cálculos para completar la Tabla 9 hasta encontrar el h_{io} .
- h. Una vez se obtienen los valores de los coeficientes de transferencia de calor lado tubos y casco se procede a obtener el coeficiente de transferencia de calor limpio U_c . En la ecuación (35) ***h_o*** hace referencia al coeficiente de transferencia de calor del fluido lado casco, ***h_{io}*** hace referencia al coeficiente de transferencia de calor del fluido lado tubos pero teniendo en cuenta el diámetro exterior del tubo.

$$U_c = \frac{h_o \cdot h_{io}}{h_o + h_{io}}, \quad \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}} \quad (35)$$

- i. Una vez obtenido el U_c y el U_d se calcula el R_d de diseño.

$$R_d = \frac{U_c - U_d}{U_c * U_d} ; \frac{h.ft^2.^{\circ}F}{BTU}, \quad (36)$$

La resistencia R_d calculada es la suma de las resistencias debido a los depósitos presentes en el lado casco y lado tubos. Debido a que el lado tubos de los E-4841A/B durante el ciclo de corrida de interés no presenta obstrucción importante (caídas de presión menores a 10 psi), se toma la resistencia por el lado tubos como el 28% del total de la resistencia R_d .

- j. Con base en el valor de R_d de diseño se realiza el cálculo de la resistencia lado tubos y lado casco, de acuerdo a la Tabla 1.

Tabla 1. Cálculos R_d lado tubos y lado casco.

$R_d = (U_c - U_d) / (U_c * U_d)$, h-ft ² -°F/Btu	Resistencia interna tubo, h-ft ² -°F/Btu	Resistencia lado casco, h-ft ² -°F/Btu
Calculado	28% del R_d calculado	72% del R_d calculado

- k. Se aplica la ecuación (23) para calcular el espesor de la capa de ensuciamiento medido en ft en el lado casco.

$$X_{\text{espesor}} = R_{ds} * \lambda \quad (\text{pie}), \quad (23)$$

- l. Se realiza el cálculo del volumen de la capa de depósito, se asume que el espesor de la capa de depósitos es constante a través de toda la longitud del tubo.

$$V_{\text{capa sólido}} = X_{\text{espesor}} * \# \text{tubos} * a'' * \text{longitud tubo} * 2 \quad \text{ft}^3 \quad (37)$$

- II. Con la densidad de la capa del sólido depositado ecuación (32) y con el volumen de la capa de sólido ecuación (37), se calcula la masa existente de la capa de sólido al interior del lado casco.

$$Peso_{capa\ sólido} = V_{capa\ sólido} * \frac{g_{mezcla}}{1000}, \quad kg \quad (38)$$

El peso calculado corresponde a la capa de sólido, es una mezcla, es decir hematita, hidrocarburo, agua y cobre. Para determinar la masa sola de hematita en la mezcla se debe multiplicar el peso de la capa de sólido calculada por 0.45, este valor corresponde a la fracción másica encontrada en la mezcla del sólido analizado en laboratorio.

- m. Una vez terminado el cálculo del Rd, se procede a realizar el cálculo de la caída de presión lado casco y lado tubos.
- n. Se calcula el diámetro equivalente para el lado casco en función del espesor de la capa de sólido depositada en el lado casco.

$$De = \frac{4 * (pithc^2 - \pi * (DEtubo + 2 * X_{depósito})/4}{\pi(DEtubo + 2 * X_{depósito})} \quad (39)$$

- ñ. Se realiza el cálculo de la caída de presión lado casco.

$$\Delta P = \frac{fanning * Gs * Ds * (N + 1)}{5.22 * 10^{10} * De * 0.98}, \quad psi \quad (40)$$

- o. Para realizar el cálculo de la caída de presión lado tubos, se debe determinar primero el espesor de la capa de ensuciamiento, para lo cual se usan los datos del Rdt calculado para el lado tubos, para efectos del cálculo se asume que el

depósito lado tubos tiene la misma composición química del lado casco, se usan los mismos valores de conductividad térmica y densidad del depósito.

Se debe aplicar la ecuación (23).

- p. Una vez se tiene el dato del espesor, se calcula el área transversal de flujo al interior del tubo, para lo cual se deberá tener presente el espesor de la capa de ensuciamiento, el nuevo diámetro interno es el DI del tubo menos dos veces el espesor de la capa de ensuciamiento.
- q. Con la nueva área transversal de flujo se calcula la masa velocidad Gt .
- r. Se realiza el nuevo cálculo del número de Reynolds con el cual se determina en nuevo número de fanning.
- s. Se realiza el cálculo de la caída de presión

$$\Delta P_{tubos} = \frac{fanning * Gt^2 * Ltubo * \# \text{ pasos por haz tubos} * 2}{5.22 * 10^{10} * DI_{restringido}}, \text{psi} \quad (41)$$

- t. Una vez terminado de realizar todos los cálculos se genera **una matriz de tamaño 180 filas x 134 columnas**, se revisan los datos y se eliminan aquellos datos que corresponden a puntos de inestabilidad operacional.
- u. Con los valores obtenidos para el Rds lado casco durante los 180 días evaluados, se define cuál es el máximo valor de Rds encontrado
- v. Una vez obtenido para cada uno de los 180 puntos evaluados los valores de resistencia a la transferencia de calor lado tubos Rds , obtenido los valores de espesor de la capa de ensuciamiento \emptyset , y obtenido el peso de la capa de

ensuciamiento W , se procede a realizar la gráfica de cada uno de estos valores encontrados v & el tiempo, de esta manera se obtienen tres curvas diferentes.

- w. Se realiza regresión lineal a cada una de las curvas con el fin de obtener la ecuación matemática que representa la curva obtenida para cada una de las tres variables analizadas.

6.3 DESARROLLO SIMULACIÓN

Con el desarrollo de la simulación se busca representar la operación de la unidad de aguas agrias U-4840 durante el periodo de evaluación, posteriormente usar la simulación para predecir el comportamiento de la resistencia a la transferencia de calor, el espesor del ensuciamiento y el peso de la capa depositada en los E-4841A/B si se hubiera usado el filtro Filter-4841 en el mismo periodo de evaluación. El filtro se evaluará a tres capacidades teóricas de filtración, capacidades del 30% de filtración, 50% de filtración y 75% de filtración con relación al total de la masa de entrada de sólidos al filtro. Cuando la capacidad de filtración del Filter-4841 sea 0% la composición de sólidos del agua agria de salida del filtro será igual a la composición de sólidos de entrada al filtro, esta composición será la línea base de evaluación de la simulación C_b y es definida con base en los resultados de los análisis de laboratorio de la corriente de carga de aguas agrias a la unidad. El simulador utilizado fue ASPEN HYSYS versión 9.

La simulación se desarrolló siguiendo las siguientes etapas:

- Definición del esquema de operación a representar en la simulación. Se incluyó el sistema de carga comprendido por el D4841 y la bomba de carga P4842A/B, se incluyó la torre despojadora T-4841 representada con su sistema de

pumparound de cima y su rehervidor, se incluyó la simulación de los intercambiadores de calor E-4841A/B.

- Paquete termodinámico: Para la simulación se seleccionó la ecuación de estado Sour Peng Robinson, que combina la ecuación de estado de Peng Robinson y el modelo de Wilson para el modelamiento de sistemas de aguas agrias. El modelo de Wilson usa ecuaciones de estado para representar las fugacidades de las fases de hidrocarburos en estado líquido y vapor.. Los K valores (ecuación 19) para la fase acuosa son calculados usando el método de Wilson Sour-API, este modelo representa la ionización del H₂S, el CO₂ y el NH₃ en la fase acuosa. El modelo en la fase acuosa emplea una modificación del modelo original de Van Krevelen [28]. En la Tabla 2 se presenta la ecuación de estado general de Peng Robinson básica usada en el simulador.

Tabla 2. Ecuación de estado Peng Robinson.

Peng Robinson	
	$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)+b(V-b)}$ $Z^3 - (1-B)Z^2 + (A-2B-3B^2)Z - (AB-B^2-B^3) = 0$
where:	
$b =$	$\sum_{i=1}^N x_i b_i$
$b_i =$	$0.077796 \frac{RT_{ci}}{P_{ci}}$
$a =$	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j (a_i a_j)^{0.5} (1 - k_{ij})$

- Una vez se selecciona el método termodinámico de trabajo, se seleccionan los compuestos que entran a formar parte del proceso, en la simulación se representó el NH₃, el H₂S, el hidrocarburo y los sólidos. Los sólidos en la simulación se crearon bajo la opción “Solid Hypotheticals”¹⁰.

¹⁰ ASPEN TECH Document Simulation Basis, Manual HYSYS®, , 2005

- La T-4841 se simuló como una torre de 42 platos reales enumerados de arriba hacia abajo con una eficiencia del 25%; la torre se especificó con su *pumparound* de cima y su rehervidor de fondo. Se corre el modelo en estado estable, se definen las variables de convergencia del sistema.

La Figura 10 muestra las variables de proceso usadas para la convergencia de la torre T-4841.

Figura 10. Variables que se usaron para especificar la T4841.

	Specified Value	Active	Current	Fixed/Ranged	Prim/Alt	Lower	Upper
PumpA_CIMA Rate	450,0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fixed	Primary	<empty>	<empty>
Gases Cima	1595	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fixed	Primary	<empty>	<empty>
Flujo Agua despojada	414,4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fixed	Primary	<empty>	<empty>
Comp Fraction Amoniz	5,000e-005	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fixed	Primary	<empty>	<empty>
Comp Fraction H2S Ag	5,000e-006	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fixed	Primary	<empty>	<empty>
DRAW to Rehervidor R	53,00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fixed	Primary	<empty>	<empty>
Temperature	188,0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fixed	Primary	<empty>	<empty>
Relacion Reflujo de Cir	1,750	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Fixed	Primary	<empty>	<empty>
Relacion Retorno Rehe	0,2100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Fixed	Primary	<empty>	<empty>

- El intercambiador de calor E-4841A/B se simula usando la especificación mecánica de diseño de estos equipos. En la Figura 11 se muestran las especificaciones de diseño del intercambiador empleadas en la simulación.

Figura 11. Especificaciones lado casco, lado tubos E-4841/A/B usadas en la simulación.

The figure displays two screenshots of a software interface for shell and tube specifications. The top screenshot shows the 'Tube' sizing data, and the bottom screenshot shows the 'Shell' sizing data.

Top Screenshot (Tube Sizing):

- Rating: Overall Shell Tube
- Dimensions:

OD [in]	1,000
ID [in]	0,834
Tube Thickness [in]	0,083
Tube Length [ft]	24,000
- Tube Properties:

Tube Fouling [F-hr-ft ² /Btu]	0,002500
Thermal Cond. [Btu/hr-ft-F]	0,3310
Wall Cp [Btu/lb-F]	<empty>
Wall Density [lb/ft ³]	<empty>

Bottom Screenshot (Shell Sizing):

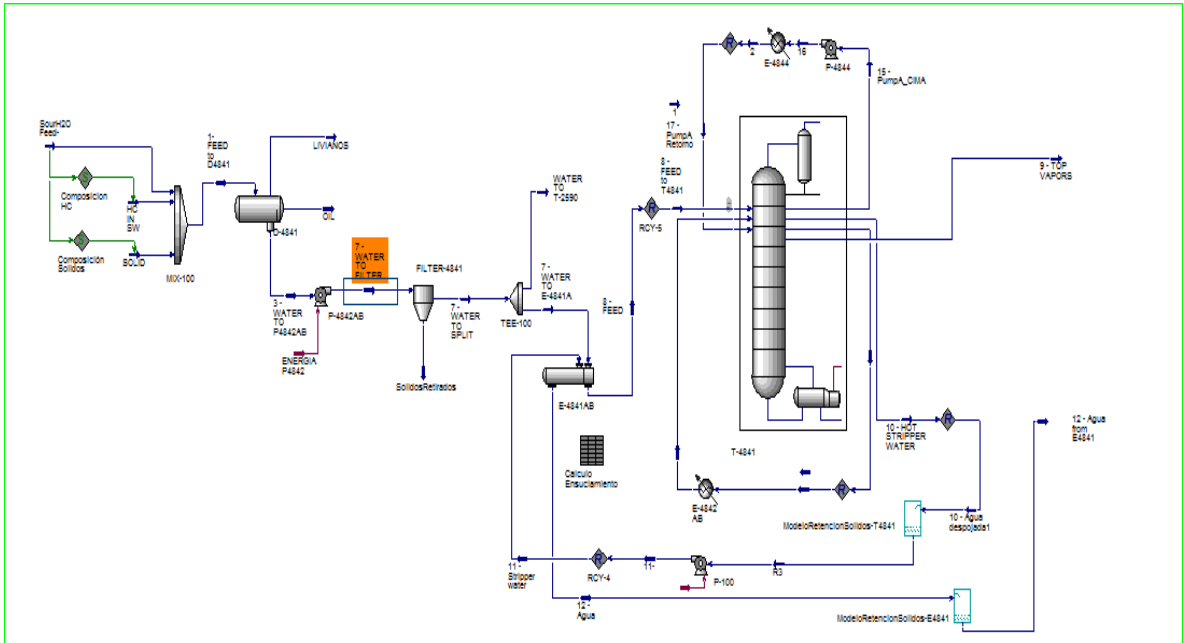
- Rating: Overall Shell Tube
- Shell and Tube Bundle Data:

Shell Diameter [in]	38,00
Number of Tubes per Shell	554
Tube Pitch [in]	1,500
Tube Layout Angle	Square (90 degrees)
Shell Fouling [F-hr-ft ² /Btu]	0,002000
- Shell Baffles:

Shell Baffle Type	Single
Shell Baffle Orientation	Vertical
Baffle Cut (%Height) [%]	20,00
Baffle Spacing [in]	31,50

- Se construye en el simulador la representación gráfica del sistema a evaluar, el PFD de la unidad es representado en la Figura 12.

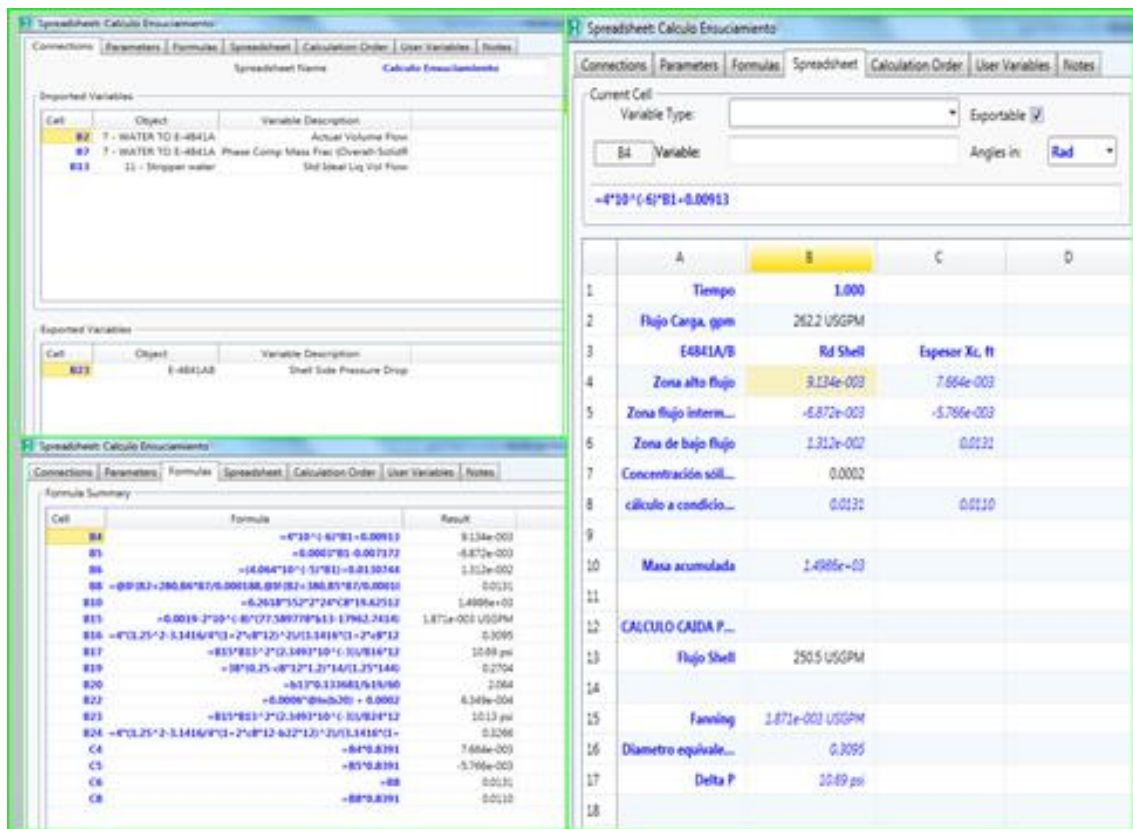
Figura 12. PFD de la unidad de aguas agrias U-4840 simulado en Hysys



- En el simulador Figura 12, después del sistema de carga D-4841, entre la bomba de carga P-4842A/B y los intercambiadores E-4841A/B se usa un elemento divisor de flujo TEE-100 con el fin de representar el flujo de carga que va al sistema de la T-2590 y el flujo de carga que va al sistema de la T-4841.
- Con base en los datos de laboratorio y los resultados de las ecuaciones de modelamiento, se estimó la concentración de sólidos húmedos tanto en la corriente de carga a la planta como en la corriente de entrada al lado casco de los E-4841A/B para el periodo de evaluación. Concentración de sólidos: 0.000148 fracción másica, 34.01 lb/h, 370 kg/día, siendo esta la concentración de sólidos de la línea base del estudio Cb, a su vez la concentración de entrada de sólidos al nuevo filtro Filter-4841.
- El nuevo filtro Filter-4841 se instaló entre la descarga de las bombas P-4842A/B y el divisor TEE-100, ver Figura 12.

- Para llevar la simulación a un estado pseudo-estable y para incluir las ecuaciones que representan el coeficiente de resistencia a la transferencia de calor R_{ds} , el espesor de ensuciamiento δ , el peso del espesor W y las ecuaciones que representan la caída de presión se usó la herramienta *Spreadsheet* del simulador la cual permite que estas ecuaciones sean incluidas dentro de los cálculos del simulador. En la Figura 13 se muestra la herramienta *Spreadsheet* con las ecuaciones que se incluyeron para ser tenidas en cuenta en la simulación.

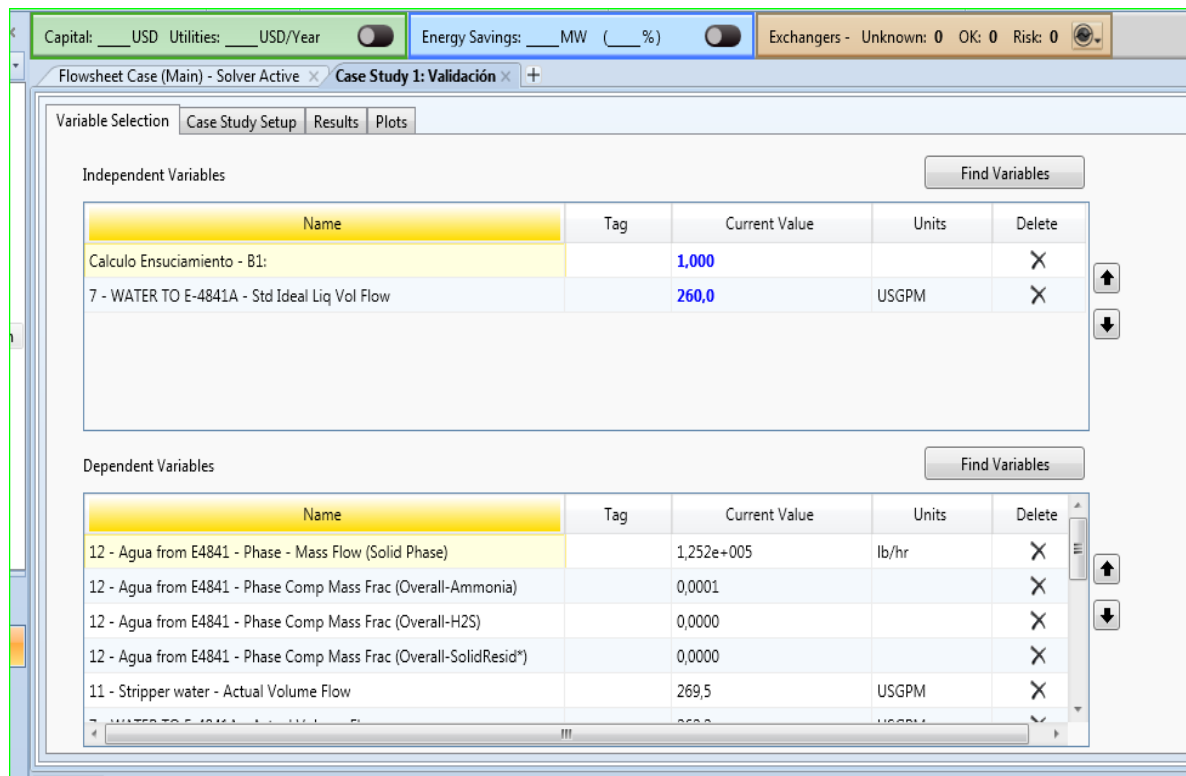
Figura 13. Herramienta Spreadsheet empleada para incluir las ecuaciones de R_{ds} , δ , y W



- Para representar los días de evaluación en el simulador, se usó la herramienta *Case Study*, en la cual se puso a variar en el tiempo el flujo de carga lado tubos a los E-4841A/B, la variación de la carga en el simulador se hizo de igual forma a la variación del flujo de carga de aguas agrías en los días de evaluación de la

unidad. El simulador para cada día evaluado usó las ecuaciones definidas en el *Spreadsheet*. En la Figura 14, se muestra una foto del Case Study usado en la simulación, la variable a cambiar en el tiempo fue el flujo de carga de entrada lado tubos a los E-4841A/B.

Figura 14. Representación de la herramienta *Case Study* empleada en la simulación.



- Para relacionar el modelo de resistencia al ensuciamiento lado casco R_{ds} con la concentración de sólidos en la corriente de carga al lado casco, en la simulación se multiplica el modelo R_{ds} obtenido por modelamiento, por un factor de corrección el cual depende de la relación de la concentración de los sólidos en la corriente de carga al lado casco de los E-4841A/B que se esté evaluando, contra la concentración de sólidos de la línea base C_b , de acuerdo con la ecuación 42.

$$Rds^* = \frac{C_e}{C_b} * Rds \quad (42)$$

En donde:

- ✓ C_e es la concentración sólidos corriente de carga al lado casco de los E-4841A/B que se esté evaluando en el momento.
- ✓ C_b es la concentración sólidos línea base.

Cuando se esté realizando la simulación con los datos de la línea base, el Rds^* calculado será igual al valor del modelo, en este caso C_e y C_b son iguales.

- En la simulación el cálculo de la capa de espesor (ϕ) y el peso (w) de esta capa para el lado casco de los E-4841A/B se hace aplicando las ecuaciones 23, 37 y 38, pero teniendo en cuenta el valor calculado de Rds con la ecuación 42.
- Una vez se tiene establecida la simulación convergiendo en estado estable y sin la operación del filtro, se corre la simulación usando el *Spreadsheet* y corriendo el *Case Study*, se valida convergencia de la torre, posteriormente se comparan los resultados de la resistencia a la transferencia de calor Rds , espesor de la capa de ensuciamiento y peso de la capa, calculados durante el desarrollo del modelo matemático y calculados en la simulación usando el *Case Study*. Si los resultados de la simulación representa adecuadamente los resultados del modelo, significa que la simulación representa de forma adecuada la operación de la unidad durante el periodo evaluado de los 180 días.
- Una vez validada la simulación, se corre nuevamente la simulación, el *Spreadsheet* y el *Case Study*, teniendo en cuenta la operación del nuevo filtro a tres diferentes capacidades teóricas de filtración. La primera evaluación se hace a una eficiencia teórica de retención del 30% con relación a la masa de sólidos de entrada al filtro es decir el filtro permitiendo el paso del 70% de los sólidos que

entran al filtro hacia el lado tubos de los E-4841A/B, la segunda evaluación se hace a una capacidad teórica de retención del 50% con relación a la masa total de entrada de sólidos al filtro, la tercera evaluación se hace con una capacidad de retención teórica del 75% del total de la masa de sólidos que entra al filtro, es decir el filtro permitiendo el paso del 25% del total de masa de sólidos hacia el lado casco de los E-4841A/B. La composición de entrada de sólidos al filtro para cada una de las tres simulaciones a diferentes eficiencias teóricas del filtro, es igual a la composición de la línea base Cb.

- Se usan los datos de la simulación para evaluar a cuánto se extendería el ciclo de corrida de los intercambiadores E-4841A/B en los tres modos de capacidad teórica del filtro Filter-4841. Para lo anterior se compara cuanto tiempo se necesitaría, para llevar el valor de Rds calculado en estos modos de filtración al mismo valor calculado de Rds al final del ciclo de corrida sin el uso del filtro Filter-4841.

6.4 ANÁLISIS COMPARATIVO COSTOS DE MANTENIMIENTO DURANTE LA OPERACIÓN DE LA UNIDAD SIN FILTRO FILTER-4841 Y OPERACIÓN DE LA UNIDAD CON LA INCLUSIÓN DEL NUEVO FILTRO FILTER-4841.

Para el análisis comparativo de los costos, no se tendrá en cuenta el costo capital de los nuevos filtros, se tiene la posibilidad de utilizar en la unidad U-4840 unas carcasas de filtración ya existentes instaladas y que se encuentran fuera de servicio en la planta de gas de Ecopetrol ubicada en el corregimiento del Centro-Ecopetrol. Se dispone de 8 carcasas de filtración, con la configuración ilustrada en la Figura 43 (sección de resultados), sólo se requeriría hacer la adecuación de los internos de las carcasas con elementos filtrantes para el nuevo servicio.

El análisis de los costos se hará para un periodo de dos años tiempo mínimo que se espera sea el ciclo de corrida entre paradas para limpieza general de la unidad U-4840; se tendrá en cuenta los costos de mantenimiento mecánico realizados a los equipos de la unidad bajo la frecuencia actual de ensuciamiento, y para la evaluación de los filtros se tendrá en cuenta los costos de mantenimiento por limpieza para la unidad bajo las nuevas frecuencias de ensuciamiento según los resultados obtenidos en las simulaciones a diferentes eficiencias de los filtros, usando tres diferente capacidades de retención de sólidos de 30%, 50% y 75%. Adicional a lo anterior se tendrá en cuenta el costo de los cambios de elementos filtrantes a las tres diferentes condiciones de operación del filtro. La especificación detallada de los internos de los filtros a usar en la planta, se hará en una etapa posterior durante el desarrollo de la ingeniería detallada de montaje.

En la comparación de los costos de mantenimiento, se tendrá en cuenta dos tipos de material de fabricación de los elementos filtrantes, fabricados en polipropileno, siendo estos desechables y se tendrá en cuenta costos de elementos metálicos, el tiempo de servicio de estos elementos metálicos supera los 6 años de servicio.

Para determinar el número de elementos a instalar en la carcasa de filtración, se tendrá en cuenta el flujo de carga de aguas agrias al sistema de carga en este caso 600 gpm, y se tendrá en cuenta la masa total de sólidos de carga al sistema de aguas agrias, este valor será un resultado del presente trabajo de aplicación. Se toma como base una capacidad máxima de retención (*holding capacity*) de masa de 20 kg por elemento de filtración fabricado en polipropileno y de 2 kg por elemento de filtración metálica. El valor de los elementos filtrantes se tomó de base de datos de precios de Ecopetrol.

7. ANÁLISIS RESULTADOS DEL TRABAJO DE APLICACIÓN

7.1 CARACTERIZACIÓN DEL LODO PRECIPITADO

Los resultados de las pruebas de laboratorio efectuadas en las muestras recolectadas en el tambor de carga D-4841 y en el rehervidor de fondo E-4842 son mostrados en las Tablas 3 y 4. Según estas Tablas los resultados muestran que los lodos están compuestos por una parte orgánica y una parte inorgánica; la parte orgánica hace referencia a hidrocarburos y la parte inorgánica hace referencia en su mayoría a óxidos de hierro. La composición de hidrocarburos en los dos puntos de muestreo resultó diferente, con una mayor cantidad de estos en el fondo de la torre (corriente hacia los rehervidores E-4842), lo cual reduce la composición de óxido de hierro (Tabla 4). Lo anterior puede explicarse debido a que las condiciones de operación en la zona de fondo de la torre despojadora T-4841 (20 psig y 254°F) promueven la agregación entre el hidrocarburo y las partículas de óxido de hierro, resultando en un material de consistencia tipo betún que forma depósitos en las paredes internas de los equipos (ver Figura 2). El flujo de entrada de agua agria de carga a la unidad está compuesto por agua agria, hidrocarburo y sólidos como se aprecia en las Figuras 15 y 16; la Figura 15 muestra la parte acuosa del flujo de entrada y la Figura 16 muestra la parte de hidrocarburo del mismo flujo de carga. Estas dos partes son separadas en el tambor de carga D-4841, sin embargo el agua agria arrastra una porción de hidrocarburos y sólidos que llegan a la torre T-4841. A las condiciones de operación del fondo de la torre T-4841 se favorecen el contacto entre el hidrocarburo y los sólidos ocasionando la formación de una capa de lodo similar a la mostrada en la Figura 16 pero en menor proporción.

Tabla 3. Resultados análisis lodos del tambor de carga D-4841

Elemento	Porcentaje en peso
Carbono	4±1
Oxigeno	28±1
Aluminio	Tr
Silicio	1.7±0.4
Azufre	9±1
Manganeso	Tr
Hierro	47±4
Cobre	5.0±0.4
Zinc	3.0±1

Tabla 4. Resultado análisis de laboratorio lodos muestra rehervidor E4842.

Elemento	Porcentaje en peso
Carbono	46±1
Oxigeno	19±1
Aluminio	Tr
Silicio	0.5±0.1
Azufre	11.0±0.8
Hierro	16.0±0.8
Cobre	5.6±0.9

Figura 15. Imagen que ilustra la calidad de la parte acuosa de la carga al D-4841.

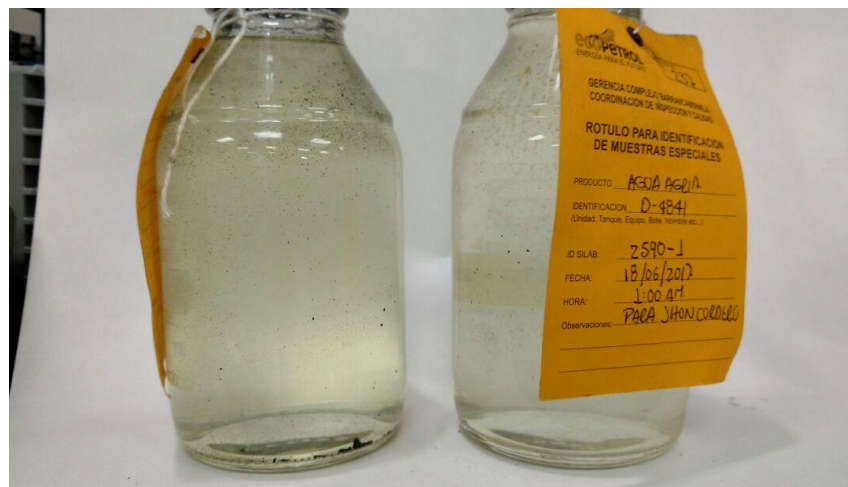


Figura 16. Fotografía que ilustra la parte de hidrocarburo del flujo de entrada de agua agria al D-4841.



La corriente de líquido que va al rehervidor corresponde al agua agria despojada de H_2S y NH_3 . La Figura 17 muestra el análisis SEM realizado a los sólidos obtenidos de las muestras tomadas en el rehervidor, según esta imagen la capa de sólido presenta un aspecto arenoso. Según la Tabla 4 cerca del 50% del lodo está constituido por hidrocarburo. En los difractogramas RX de la Figura 18 se muestra la composición de dos puntos escogidos al azar que fueron analizados de la muestra, en estos gráficos se evidencia la presencia de S, carbón, Fe, cobre en la muestra de residuo analizada.

Figura 17. Imagen SEM realizada a los lodos extraídos en el rehervidor E4842

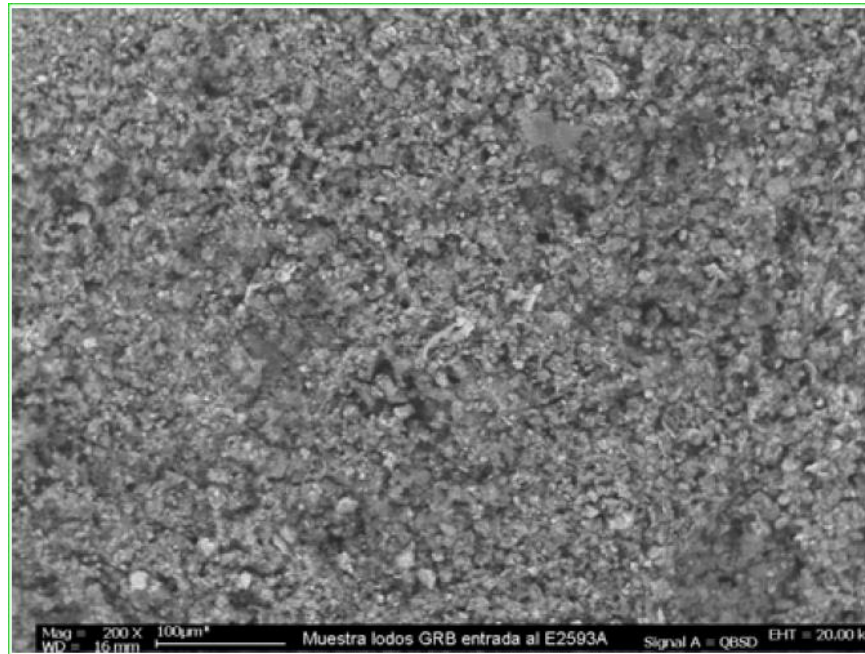
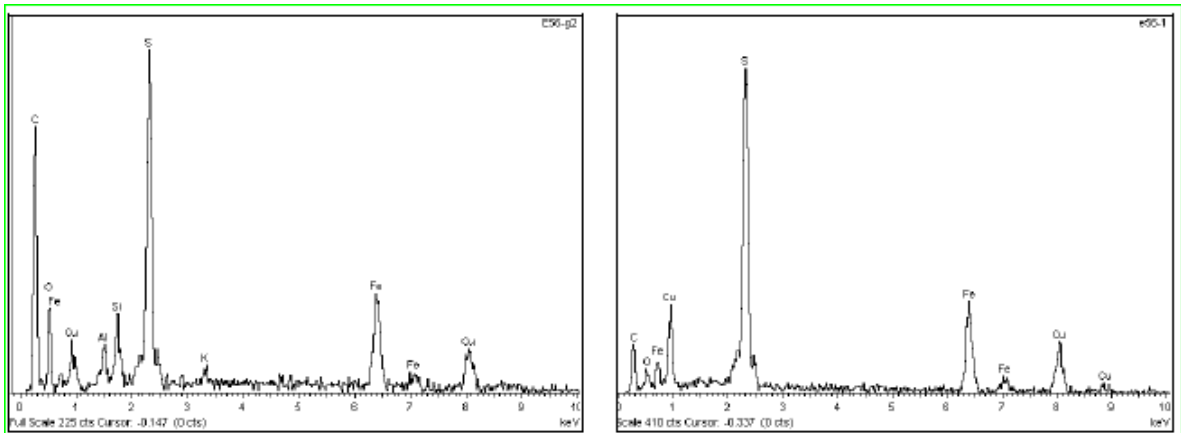


Figura 18. Difractogramas



Con lo anterior, los depósitos formados en el interior de los equipos del sistema de fondo de la torre despojadora T-4841 de la unidad de aguas agrias, son consecuencia de los sólidos y el hidrocarburo que vienen en el flujo de carga a la unidad. Una solución a la disminución a estos depósitos corresponde a la adaptación de un filtro después del tambor de carga y antes de la torre despojadora T-4841.

7.2 DATOS DE CAMPO PARA EL DESARROLLO DEL MODELO DE ENSUCIAMIENTO.

Para el desarrollo del modelo de ensuciamiento se tomaron datos de una corrida completa de operación de la unidad U-4840; la corrida inició 1ro de octubre del año 2016 y terminó el 30 de marzo de 2017, fecha en que la unidad sale de servicio para mantenimiento general que incluye limpieza mecánica de los E-4841A/B. Los datos históricos recolectados formaron una matriz de 180 filas y 10 columnas, estas últimas representando las variables de proceso: temperaturas a la entrada lado casco y tubos del E-4841/AB, flujos volumétricos de entrada lado casco y lado tubos. En la Figura 19 se presenta la dispersión para los datos de caudal (gpm) en la ventana de operación considerada. Según esta Figura, la carga de flujo a la unidad, exhibe dos zonas con tendencia diferente de operación; en la primera zona el caudal presenta una alta dispersión con valores por encima de 270 gpm, esta dispersión presenta un promedio de 380 gpm con una desviación estándar de 48.8 gpm, a nivel operativo este comportamiento se da por salida de servicio de una de las dos torres despojadoras de aguas agrias, igualmente este comportamiento también se presenta por cambios en el volumen de carga de las unidades aportantes de aguas agrias. De otro lado la segunda zona muestra un comportamiento estable, a baja carga y durante un tiempo más prolongado; el flujo promedio en la segunda zona es de 274 gpm y una desviación estándar de 3.2 gpm, los cuales reflejan una operación más estable de la unidad al operar con las dos torres en paralelo, porque las caídas de presión a través de los intercambiadores de calor de fondo de las dos torres son más bajas permitiendo que hidráulicamente los dos sistemas de fondo sean más estables. La Figura 20 gráfico de dispersión lado casco muestra el mismo comportamiento de la Figura 19 ya descrita anteriormente, lo cual indica que la unidad opera gran parte del tiempo cercana al estado estacionario; el flujo de entrada del lado de los tubos corresponde a la corriente de carga de aguas agrias a la torre T-4841, mientras que el flujo de entrada al lado casco corresponde a la corriente de agua despojada proveniente del fondo de la misma torre.

En la Figura 21 se muestra el comportamiento de la temperatura de salida lado tubo y lado casco en los E-4841A/B, en los puntos tomados para el análisis del modelo. La tendencia de las curvas muestra estabilidad de la operación en el tiempo, esto a pesar del ensuciamiento que presenta el intercambiador E-4841A/B durante la operación (ver Figura 2), la temperatura de salida del lado tubo presentó un promedio de 200°F y una desviación estándar de 2.68°F, mientras que la temperatura de salida lado casco reportó un promedio de 157.48 °F con una desviación estándar de 3.07°F. La estabilidad mostrada en la temperatura de operación del intercambiador, se debe a que al disminuir la carga a la T-4841, disminuye el flujo de agua tanto lado casco y tubos de los E-4841A/B, bajo esta condición disminuye el requerimiento calórico; el delta de temperatura permanece estable mientras el coeficiente de transferencia de calor de diseño U_d es modificado por el ensuciamiento del sistema, ver ecuación (27). Lo anterior confirma la operación en estado pseudo-estacionario de la unidad U-4840 y del intercambiador E-4841A/B.

Figura 19. Gráfico de dispersión lado tubos

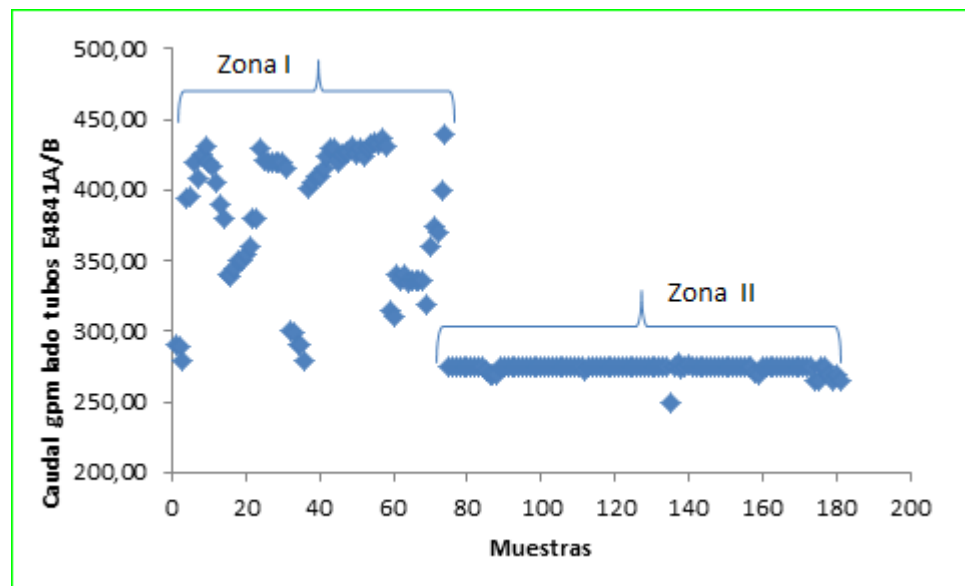


Figura 20. Gráfico de dispersión lado casco

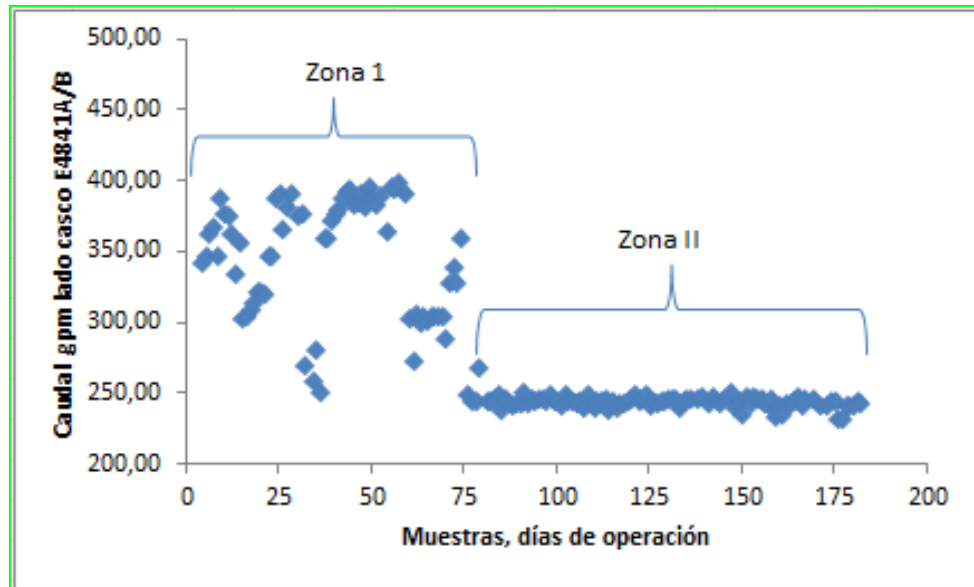
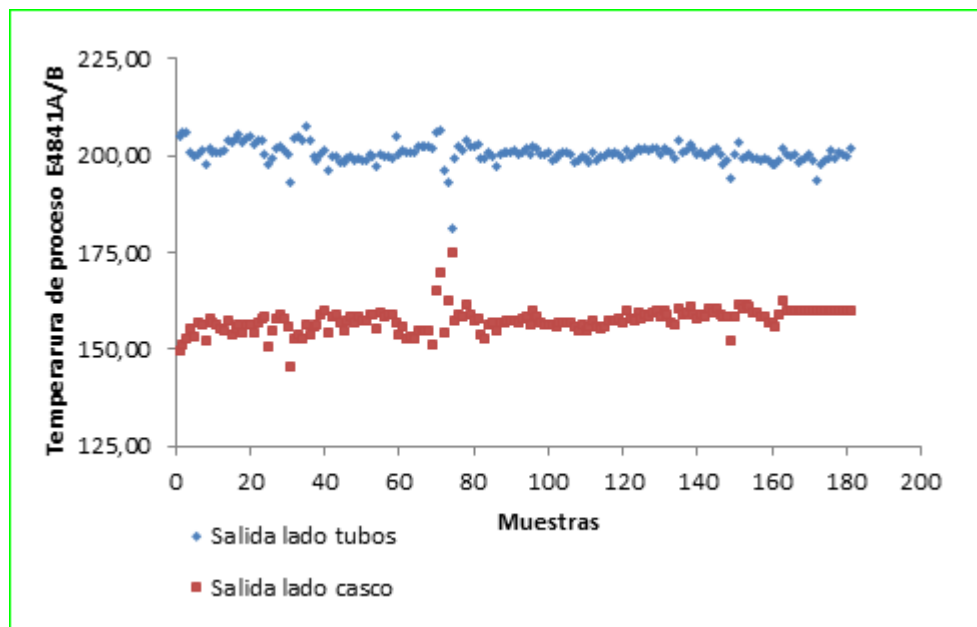


Figura 21. Temperaturas de salida operación E-4841A/B



7.3 MODELO DE ENSUCIAMIENTO.

El desarrollo del modelo matemático para el espesor del ensuciamiento lado casco del E-4841A/B fue descrito en la sección de metodología numeral 6.2. La variación del calor transferido y la temperatura media logarítmica corregida $LMTD_{\text{corregido}}$ en el intercambiador durante la ventana de operación son mostradas en las Figuras 22 y 23. Según la Figura 22 de calor transferido, se observa que sigue la tendencia del caudal de operación del intercambiador (Figuras 19 y 20); en la primera región de operación el calor transferido presenta valores elevados debido a los caudales altos de operación, mientras que en la zona II la transferencia de calor es baja y permanece estable en el tiempo como consecuencia del bajo caudal en este periodo de operación (ecuación 24). Por otra lado la Figura 23 es consistente con el comportamiento de la estabilidad de las temperaturas de salida lado casco y tubos, mostradas en la Figura 21.

Figura 22. Calor transferido en el E-4841A/B

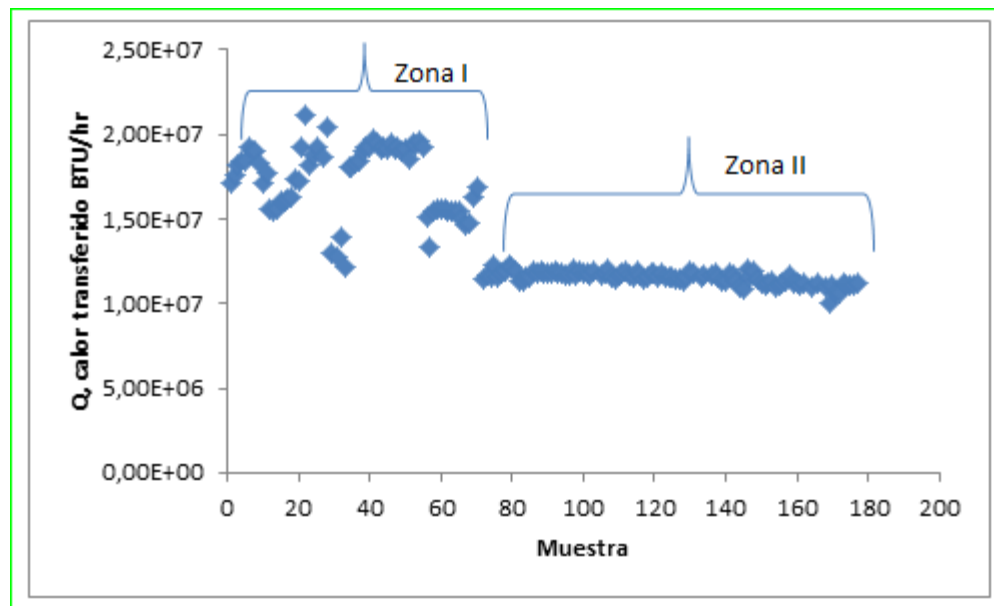
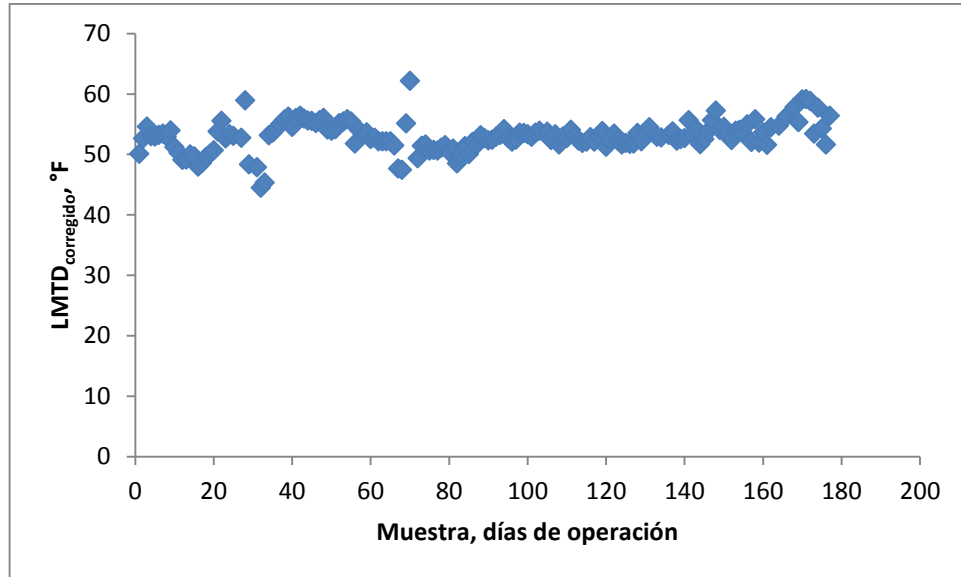


Figura 23. $LMTD_{\text{corregido}}$ calculado en la ventana de operación E-4841A/B

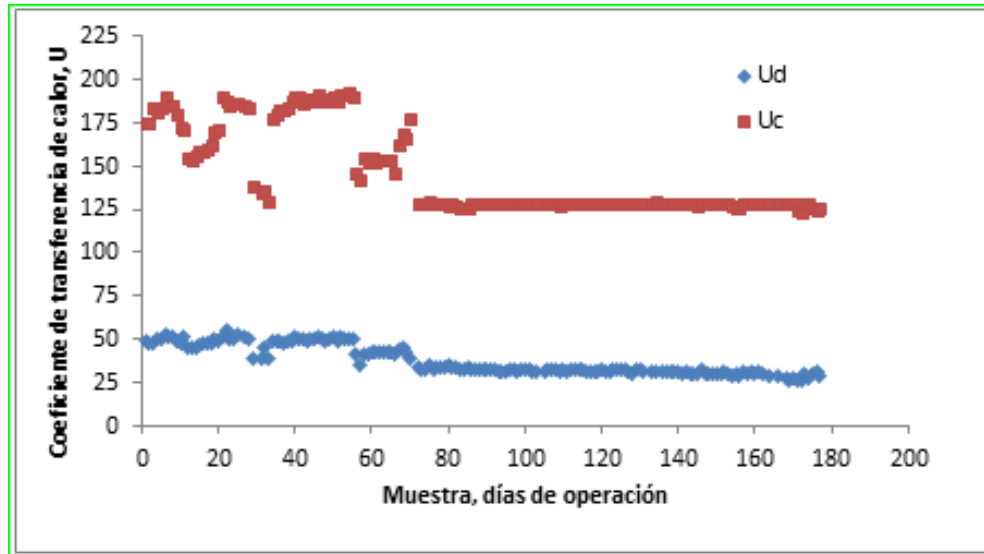


Los resultados obtenidos para el calor transferido, la $LMTD_{\text{corregido}}$ y el área de transferencia de calor del equipo son la base para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor de operación U_d . En la Figura 24 se muestra la tendencia de estos coeficientes de transferencia de calor para el periodo de tiempo de análisis, el U_c el cual es el coeficiente cuando el intercambiador está limpio muestra el mismo comportamiento de la corriente de carga a la unidad; este coeficiente fue calculado según lo especificado por Kern¹¹, y enunciado en este documento. En la zona I el valor del U_c es cercano al valor de diseño del intercambiador E-4841A/B de 212 BTU/ °F-ft²-h para una carga de 500 gpm. La tendencia de la gráfica muestra que el U_c varía en forma directamente proporcional con el caudal de operación, el cual es el comportamiento esperado. Para el caso del U_d , que es la representación del efecto del ensuciamiento sobre la transferencia de calor, la Figura 24 muestra que este disminuye con el tiempo de operación. Es importante mencionar que por comparación del U_c y del U_d , con poco tiempo de operación el efecto de la carga de sólidos e hidrocarburo impacta limitando la transferencia de calor por la

¹¹ KERN D. Q., Op. Cit.

formación de la capa de ensuciamiento. La pendiente negativa en el Ud manifiesta el crecimiento de esta capa de ensuciamiento a medida que avanza la operación.

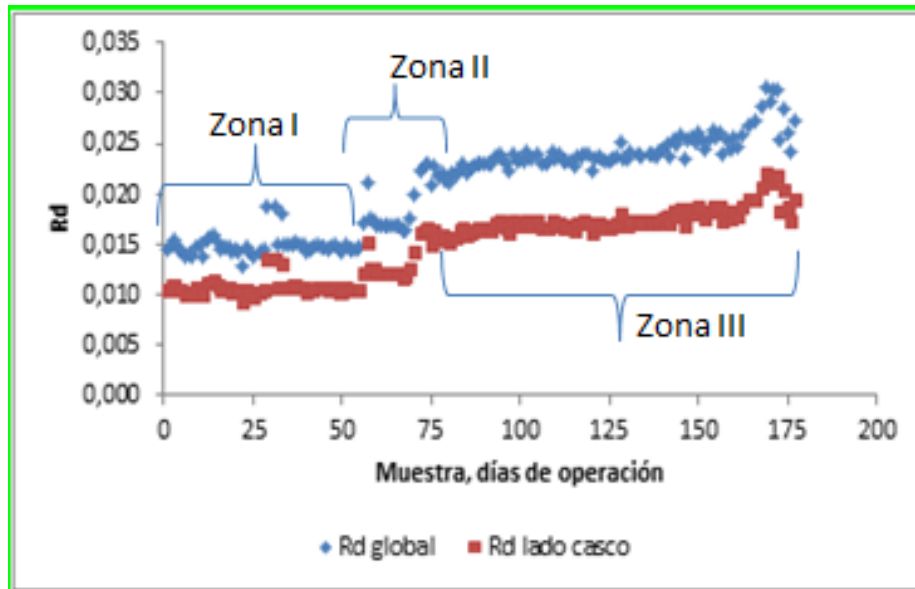
Figura 24. Coeficientes de transferencia de calor limpio (Uc) y sucio (Ud).



La resistencia de la capa de ensuciamiento a la transferencia de calor en el intercambiador puede ser estimada a partir de los valores de Uc y de Ud de acuerdo a la ecuación (36). La Figura 25 exhibe la variación de la resistencia al ensuciamiento global y en el lado casco del E-4841A/B; la resistencia del lado casco R_{ds} se tomó como el 70% de la contribución a la resistencia global (Figura 25), lo cual está soportado en el comportamiento de la caída de presión en el lado tubos durante la corrida del equipo en la operación de la unidad (aproximadamente 3 psi) y por mediciones realizadas en las paradas de planta. Así mismo el cálculo de la caída de presión por el lado tubos usando la metodología de Kern sin considerar el ensuciamiento (43) reportó valores entre 0.5 y 1.1 psi. Considerando el 30% de ensuciamiento en el lado tubos la caída de presión fue estimada en valores entre 1.2 y 2.7 psi coincidiendo con las mediciones de campo.

$$\Delta P_{tubos} = \frac{fanning * Gt^2 * Ltubo * \# \text{ pasos por haz tubos} * 2}{5.22 * 10^{10} * DI} \quad (43)$$

Figura 25. Resistencia a la transferencia de calor debida al ensuciamiento lado casco R_{ds} y global E-4841A/B.



En el comportamiento de la resistencia a la transferencia de calor (Figura 25) muestra tres zonas de operación con una tendencia creciente, lo cual refleja un proceso de acumulación del ensuciamiento en el tiempo. Comparando con las Figuras 19 y 20, es posible inferir que la resistencia a la transferencia de calor aumenta con la disminución del flujo a través del intercambiador E-4841A/B. Por lo anterior una disminución en el caudal de operación incrementa el proceso de depositación como era de esperarse.

La metodología utilizada para el cálculo de la resistencia térmica del ensuciamiento resulta dispendiosa. Para fines prácticos la estimación de la resistencia global de esta capa de ensuciamiento calculada a partir de la metodología expuesta fue ajustada con un modelo de regresión utilizando las variables de proceso $LMTD_{\text{corregido}}$, Delta P lado casco, y Q la transferencia de calor. La regresión para el modelo de R_d obtenida corresponde a,

$$R_d = 10^{3,6682} * LMTD_{\text{corre}}^{1,3169} * \text{Delta Presión casco}^{0,0157} * Q^{-1,073} \quad (44)$$

El coeficiente de determinación R^2 calculado para el modelo fue de 0.99. Asimismo, el modelo reporta el cumplimiento de los supuestos para las regresiones lineales; la matriz ANOVA de la regresión puede ser analizada en la Tabla 5.

Con el modelo de regresión (44) es posible determinar la resistencia global al ensuciamiento R_d en los E-4841A/B en cualquier momento de la operación durante el rango de tiempo evaluado. Una validación en otros periodos de operación es requerida para determinar la efectividad de este modelo de regresión.

Tabla 5. Tabla ANOVA reportada por la regresión de la resistencia del ensuciamiento.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,999
Coeficiente de determinación R^2	0,999
R^2 ajustado	0,999
Error típico	0,003

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	1,76583313	0,441458283	36801,2884	9,647E-240
Residuos	163	0,0019553	1,19957E-05		
Total	167	1,76778843			

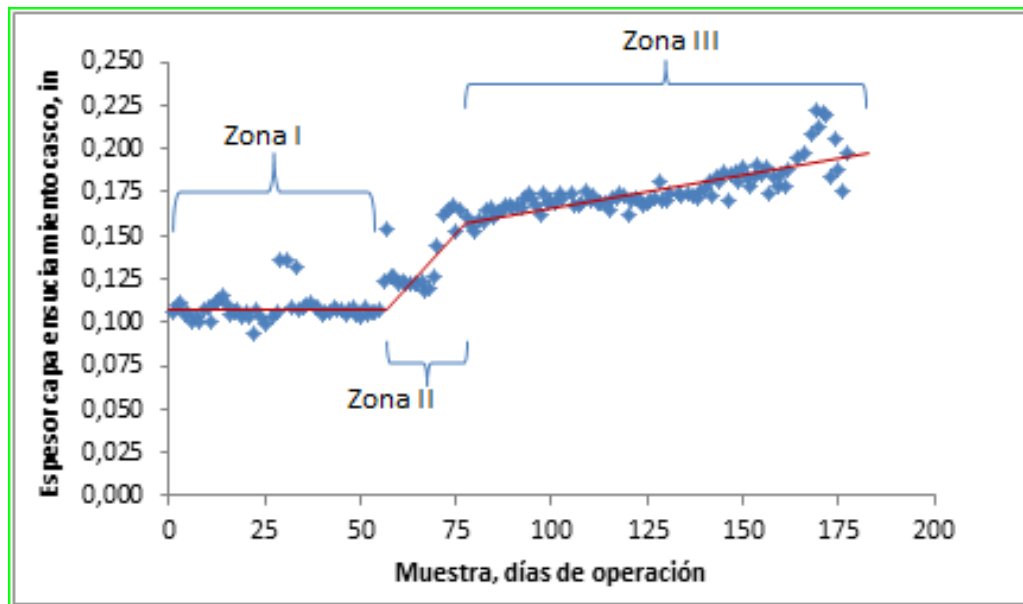
	<i>Coefficientes</i>
Intercepción	3,6682
Variable X 1	0,0000
Variable X 2	1,3169
Variable X 3	0,0157
Variable X 4	-1,0734

Igualmente se definió para la resistencia a la transferencia de calor lado casco R_{ds} , un modelo lineal en función del tiempo para cada una de las tres zonas de

operación, en la Tabla 6 se encuentran descritas las ecuaciones que representan el ensuciamiento para el lado casco.

Por otra parte, el espesor de la capa de ensuciamiento es calculado considerando la conductividad térmica como un promedio de los aportes individuales de cada uno de los componentes en el sólido; al igual que en el caso de la densidad esta propiedad puede considerarse constante en el intervalo de temperatura del lado cados de los E-4841A/B; el valor promedio de la temperatura del lado casco durante el periodo evaluado (180 días), tuvo una desviación estándar de 1.7°F, el valor más bajo del promedio obtenido fue 200.15°F, el valor más alto del promedio obtenido fue 213.11°F; esta reducida diferencia de temperatura registrada en el periodo evaluado no afecta de forma significativa las propiedades del sólido depositado por efecto de la temperatura. El valor de la conductividad térmica estimado fue de 0.84 BTU/h-°F-ft. La Figura 26 ilustra la variación de la capa de ensuciamiento en el lado casco con el avance en la operación.

Figura 26. Espesor de la capa de ensuciamiento lado casco E4841A/B con el tiempo de operación.

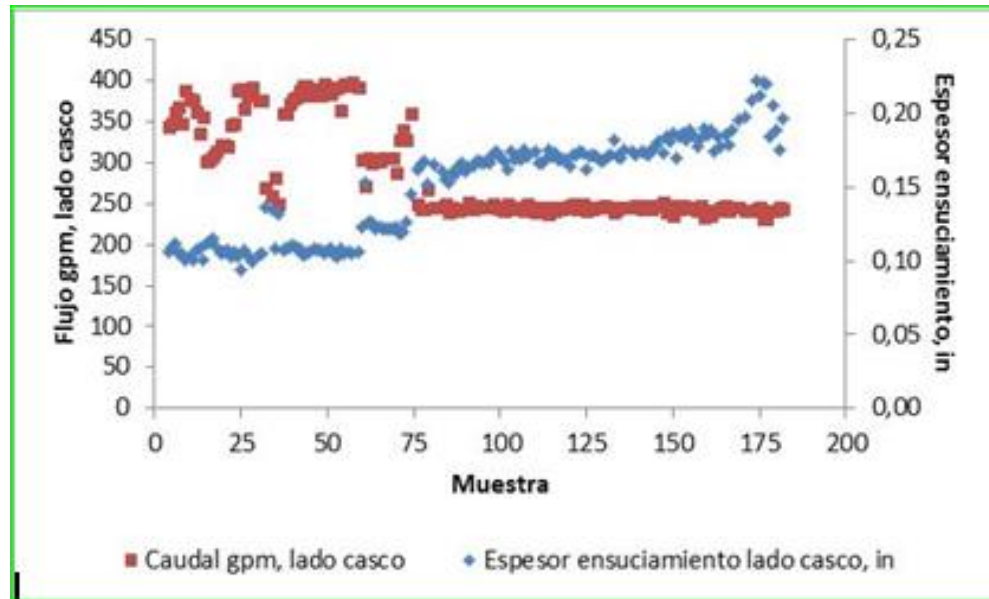


La variación del espesor de la capa de ensuciamiento para el periodo analizado muestra tres zonas definidas; la primera zona presenta un comportamiento estacionario para el espesor de la capa de ensuciamiento hasta aproximadamente el día 50 de operación. Después de este punto inicia, se presenta la zona II en la cual se incrementa el espesor de ensuciamiento con una pendiente pronunciada hasta aproximadamente el día 77; el espesor en esta zona aumentó cerca del 70%. Posteriormente, en la zona III la pendiente del incremento del espesor de ensuciamiento disminuye en comparación con la zona anterior. Estas variaciones en el espesor están directamente relacionadas con el volumen de carga al lado casco de los E-4841A/B. La zona II corresponde a una zona de corta de operación en donde se hizo la transición de operación de la unidad de alto flujo a bajo flujo.

Con base en la Figura 27 la cual presenta la tendencia del caudal y el espesor de ensuciamiento para el lado casco, es posible inferir que el espesor de la capa de ensuciamiento es inversamente proporcional al caudal de flujo; en esta figura se aprecia que la zona intermedia para el caudal es menos definida que para el espesor de ensuciamiento. En la zona I se exhibe un menor espesor de ensuciamiento debido a los caudales de operación altos, mientras que en la zona III se observa una tendencia creciente en el espesor de ensuciamiento debido a menores flujos de operación. La zona II es una zona de transición en donde el caudal disminuye ocasionando un aumento en el espesor de ensuciamiento; esta disminución de carga en la T-4841 se presentó debido a la necesidad de poner en servicio la torre despojadora de aguas agrias T-2590 como respuesta al incremento total de aguas agrias a la unidad. A nivel fenomenológico la tendencia del espesor del ensuciamiento en la zona I se puede explicar debido a que los altos flujos de operación conllevan velocidades elevadas las cuales favorece la erosión evitando el crecimiento de la capa de sólidos formados; con lo cual el espesor se mantiene en un estado estable, coincidiendo con lo reportado en la literatura ver referencia [18]. En la zona III los valores de flujo bajos favorecen el crecimiento de la capa de ensuciamiento debido a que la velocidad de depositación del sólido es mayor que

la velocidad de remoción del ensuciamiento. En la zona II, la velocidad de depositación del sólido incrementa rápidamente la capa de ensuciamiento debido a la disminución del flujo y las fuerzas de atracción entre la pared del tubo y la capa delgada de depósito. La zona III presenta una menor pendiente de crecimiento del depósito, comparado con la zona II, debido a la disminución de las fuerzas de atracción entre el tubo y las partículas ocasionadas por el espesor del depósito ya formado. El espesor de ensuciamiento (ϕ) para cada una de las zonas puede ser representado por medio de modelos lineales, según la Tabla 6.

Figura 27. Gráfica comparativa entre caudal y espesor ensuciamiento en el lado casco.



El peso del depósito acumulado en el lado casco de los intercambiadores fue calculado utilizando la densidad de los componentes de la mezcla evaluada en laboratorio. La densidad medida para el lodo seco reportó el valor de 0.5 g/mL, la del hidrocarburo reportó el valor de 0.81 g/mL, con los valores anteriores y la composición de la Tabla 15, la densidad promedio fue de 0.69 g/mL (ver ecuación 32). La Figura 28 presenta la variación del peso del ensuciamiento en el lado casco de los intercambiadores E-4841A/B durante la operación. Según esta Figura, la

variación del peso del depósito exhibe también las tres zonas características de la tendencia en el espesor de ensuciamiento (Figura 26). La Tabla 6 presenta los modelos de variación del peso de la capa de sólido depositado (w) para cada una de las zonas.

Tabla 6. Ecuaciones del modelo de la resistencia de transferencia de calor R_{ds} , modelo de crecimiento y peso de la capa de sólido

ZONA ENSUCIAMIENTO	MODELO RESISTENCIA A LA TRANSFERENCIA DE CALOR ($R_{d,h-ft^2-°F/BTU}$) DE CRECIMIENTO (ϕ, in) Y PESO DE LA CAPA DE SÓLIDO (w, kg)*
ZONA I	$R_{ds} = 0.00913 + 4 * 10^{-6} * t$ $\phi = 0.092$ $w = 1202 + 0.1066 * t$
ZONA II	$R_{ds} = -0.007172 + 0.0003 * t$ $\phi = -0.072 + 0.003 * t$ $w = 1215.9 + 22.169 * t$
ZONA III	$R_{ds} = 0.0130174 + 4.064 * 10^{-5} * t$ $\phi = 0.13 + 4.1 * 10^{-4} * t$ $w = 1779.1 + 4.0675 * t$

* t es el tiempo en días, la zona I va desde el día 1 al día 56, la zona II va desde el día 57 al día 79 y la zona III va desde el día 80 hasta el día 180.

En el modelo de ensuciamiento también se incluye la predicción de la caída de presión según lo dispuesto en la metodología. Esta predicción consideró el efecto de la variación del espesor de la capa de ensuciamiento durante el periodo de operación (Figura 26). Las Figuras 29 y 30 muestran los comportamientos estimados para las caídas de presión lado casco y lado tubos, respectivamente. En la Figura 29 los puntos azules representan la caída de presión calculada, mientras

que los puntos rojos corresponden a las mediciones realizadas en el equipo durante la operación; estas mediciones fueron efectuadas utilizando instrumento de presión local (PI), ya que la unidad no cuenta con transmisor de presión en línea para la evaluación de esta variable. Por otra parte comparando las Figuras 29 y 30 la caída de presión por el lado tubos resulta insignificante respecto a la caída de presión lado casco. En promedio la caída de presión por el lado tubos presenta un valor de 2 psi.

Figura 28. Gráfica tendencia del peso (kg) de la capa de ensuciamiento con el tiempo.

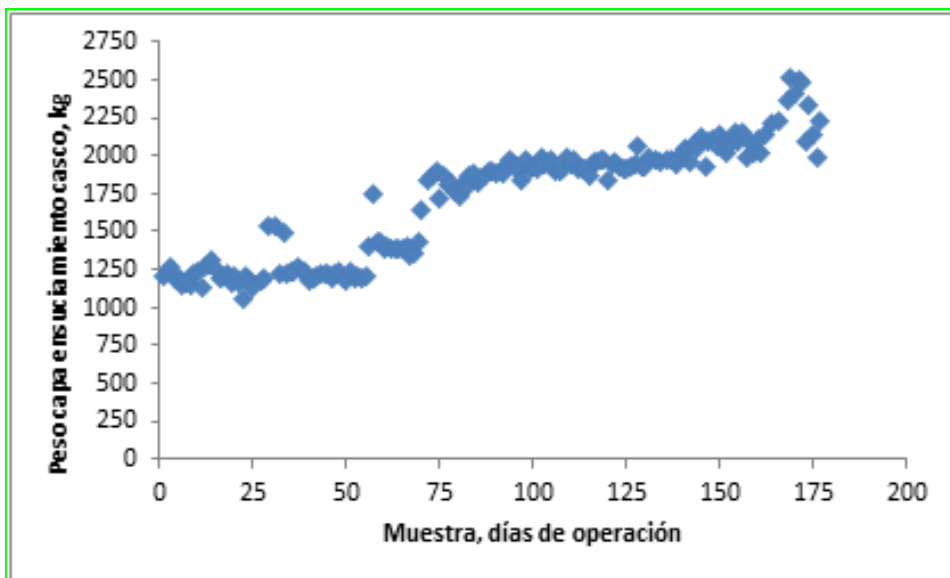


Figura 29. Estimación caída de presión lado casco E-4841A/B.

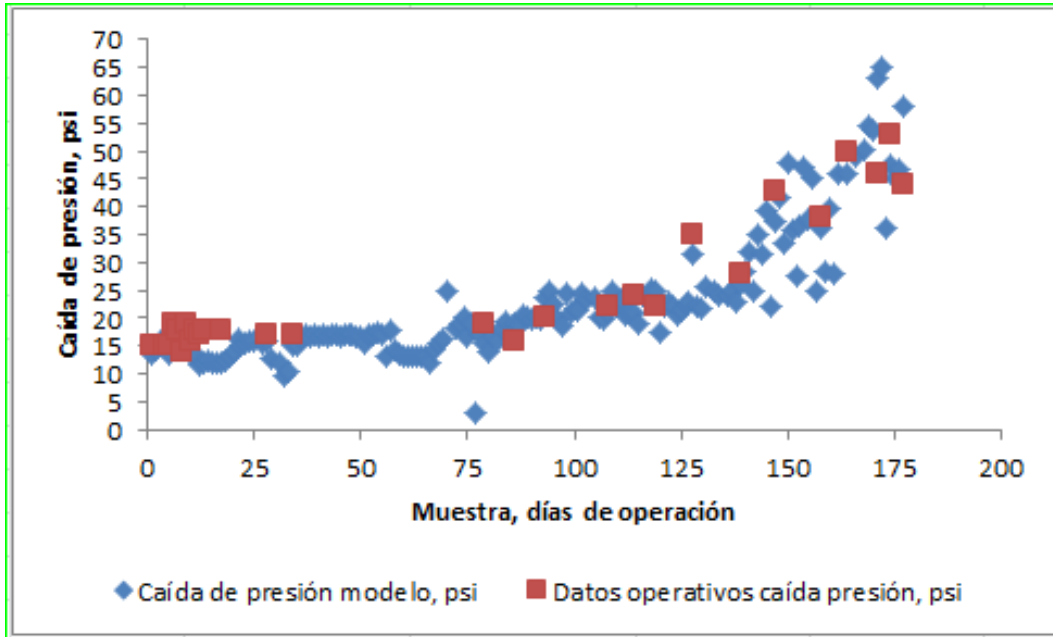
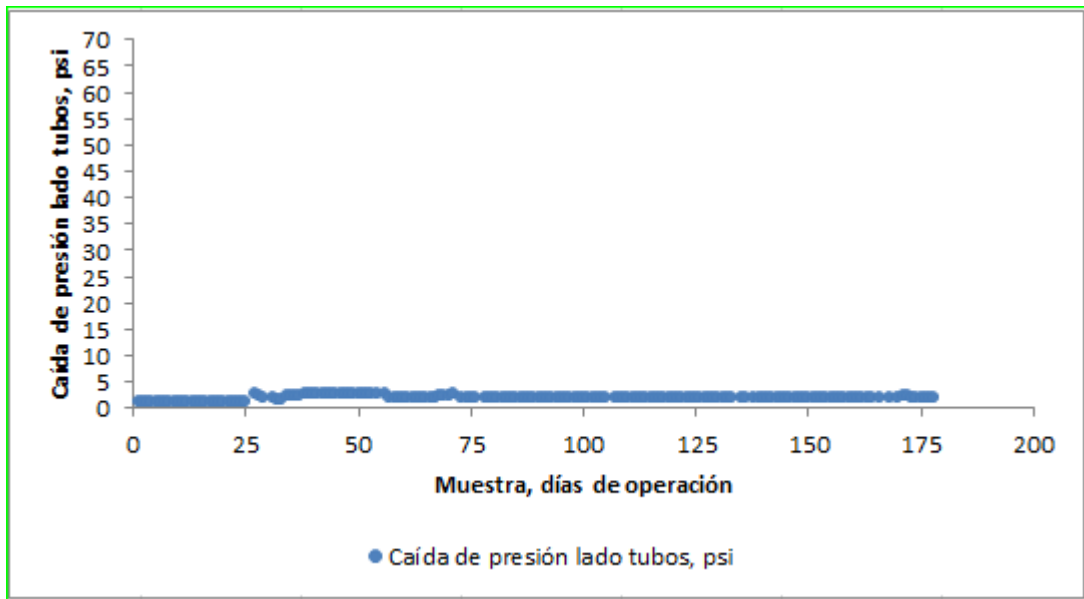


Figura 30. Estimación caída de presión lado tubos E-4841A/B



7.4 SIMULACIÓN DE LA UNIDAD DESPOJADORA DE AGUAS AGRIAS

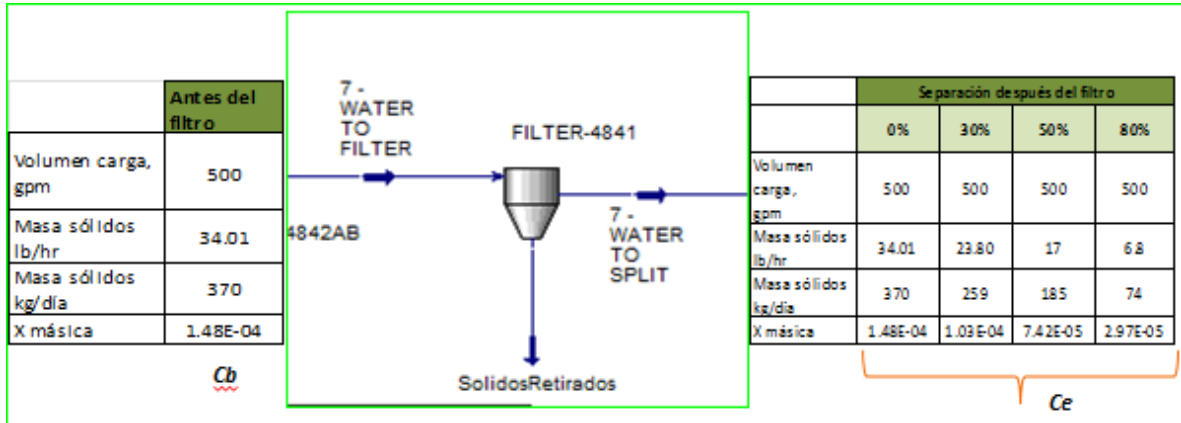
El desarrollo de la simulación de la unidad U-4840 fue descrito en la sección de metodología numeral 6.3; la Figura 36 presenta el diagrama de flujo establecido en HYSYS para la simulación. De otro lado, los datos de entrada de masa de sólidos utilizados en la simulación son presentados en la Tabla 7, en donde se evidencia la llegada permanente de sólidos con la corriente de agua agría de salida del D-4841, que a su vez es la carga a la T-4841; el arrastre de sólidos en la corriente de carga no es uniforme en el tiempo.

Tabla 7. Análisis laboratorio corriente carga de aguas agrías D4841.

Muestra Sample ID	Análisis de Grasas y Aceites		Masa proyectada en 500 gpm
	(SM-5520)	masa/litro	
	ppm	(g)	Kg/día
C(2)17062017	700,18	0,0856	233,302545
C(2)28062017	411,86	0,0224	61,0511334
C(2)01072017	604,42	0,1685	459,246249
C(2)03072017	224,83	0,2933	799,388277
C(2)05072017	789,99	0,1479	403,10101
C(2)07102017	14625,32	0,1169	318,610602
C(2)09102017	494,13	0,0755	205,775025
C(2)12102017	832,32	0,2367	645,125146
C(2)14102017	42694,11	0,2943	802,113774
C(2)16102017	298,61	0,0314	85,5806066
C(2)19102017	601,58	0,0236	64,3217298
Promedio	5661	0,136	370

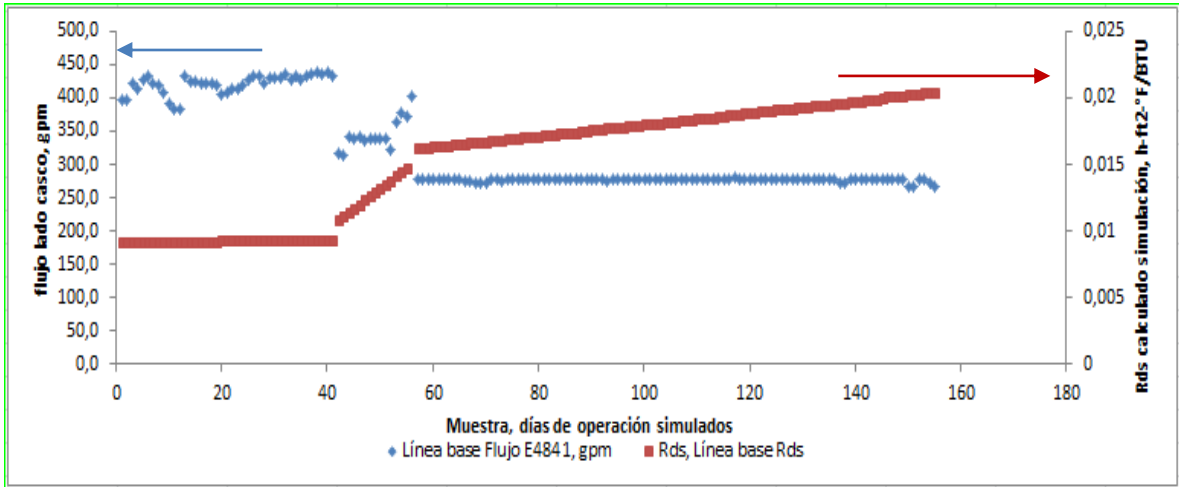
Con base en los datos de laboratorio y el análisis de los modelos que predicen la masa de sólido (w), se construyó la Tabla 8 que es la línea base de concentración de sólidos en las corrientes de proceso de entrada a la planta y al intercambiador E-4841A/B, valores a usar en la simulación. Para la simulación se considera un flujo de carga de 500 gpm al sistema de carga, de este flujo 260 gpm van como carga a la torre T-4841 y la diferencia va como carga a la torre despojadora T-2590.

Tabla 8. Concentración de sólidos en Filter-4841.



Para evaluar la simulación, se usaron 155 puntos de operación de la matriz trabajada durante el desarrollo del modelo; para la simulación se usó la concentración de sólidos de la línea base Cb de la Tabla 8. En la Figura 31 se presenta la predicción de la simulación respecto a la resistencia a la transferencia de calor. Según esta figura, se observa el mismo comportamiento obtenido con el modelo matemático (sección anterior) con tres zonas definidas encontradas en la Figura 25 para el Rd. La Figura 31 reporta el máximo $R_{ds}=0,02 \text{ h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}/\text{BTU}$ en 270 gpm. La Figura 31 confirma que el modelo empleado en la simulación para el R_{ds} representa adecuadamente el comportamiento de la resistencia a la transferencia de calor por ensuciamiento en los E-4841A/B durante el rango de operación evaluado.

Figura 31. Rds obtenido por simulación usando modelo Tabla 17



Las Figuras 32 y 33 al igual que la Figura 31 muestran el mismo comportamiento de las tres zonas para el espesor de la capa de ensuciamiento y la masa de la capa de ensuciamiento. Los resultados de la simulación muestran una variación de un 0.5% con relación a los valores calculados mediante el modelo matemático.

Figura 32. Variación del espesor de la capa de ensuciamiento con relación al flujo al E-4841A/B según resultados de simulación.

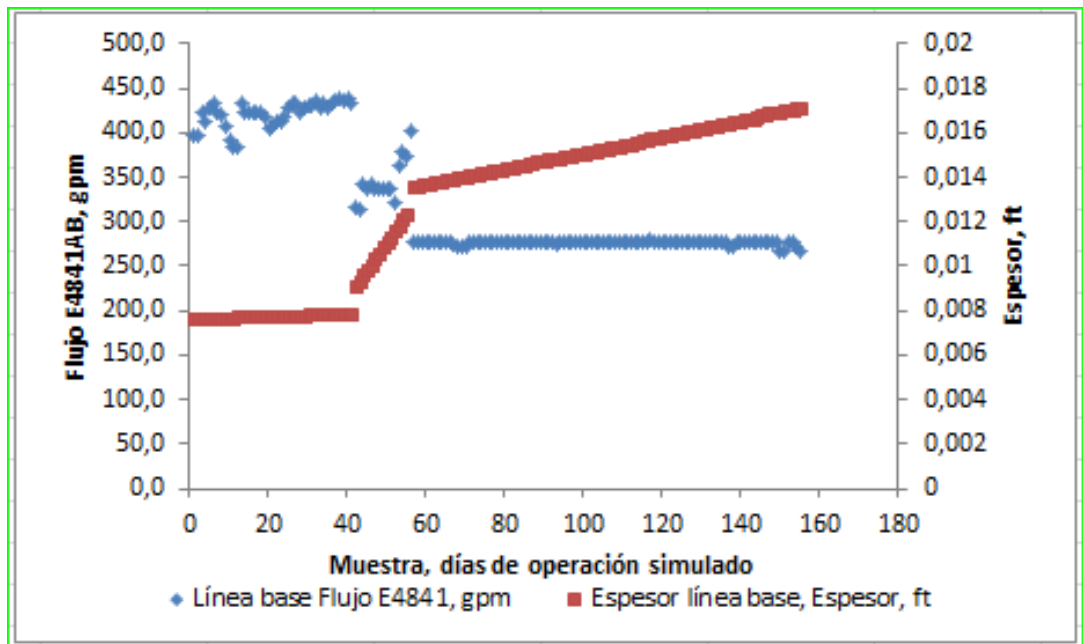


Figura 33. Línea base en kg de la variación de la masa de sólido con el tiempo en los E-4841A/B.

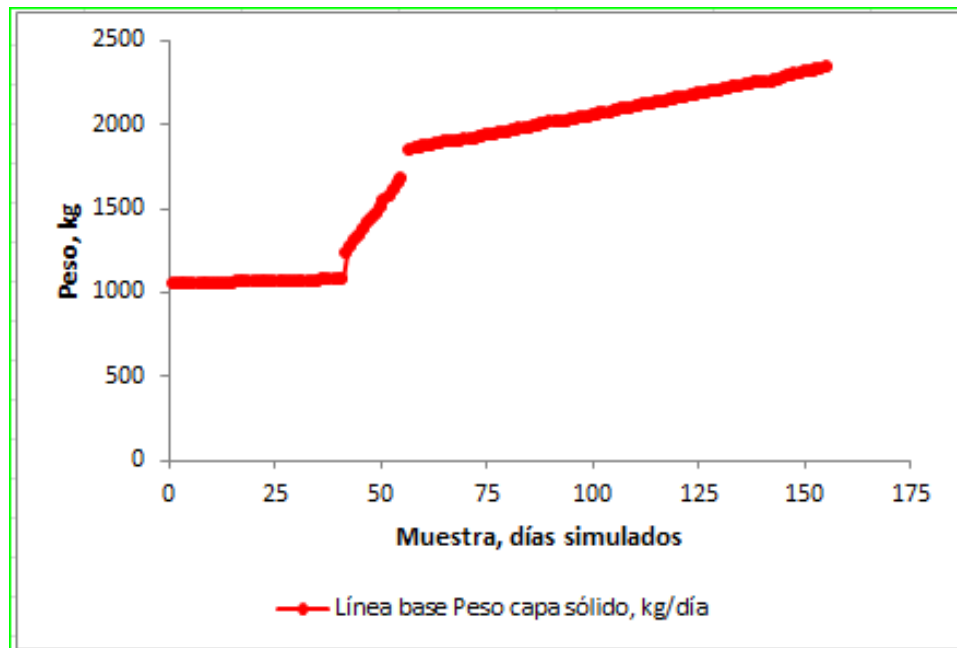


Figura 34. Comparación dato de laboratorio y por simulación para la cantidad de H₂S a la salida de la T-4841.

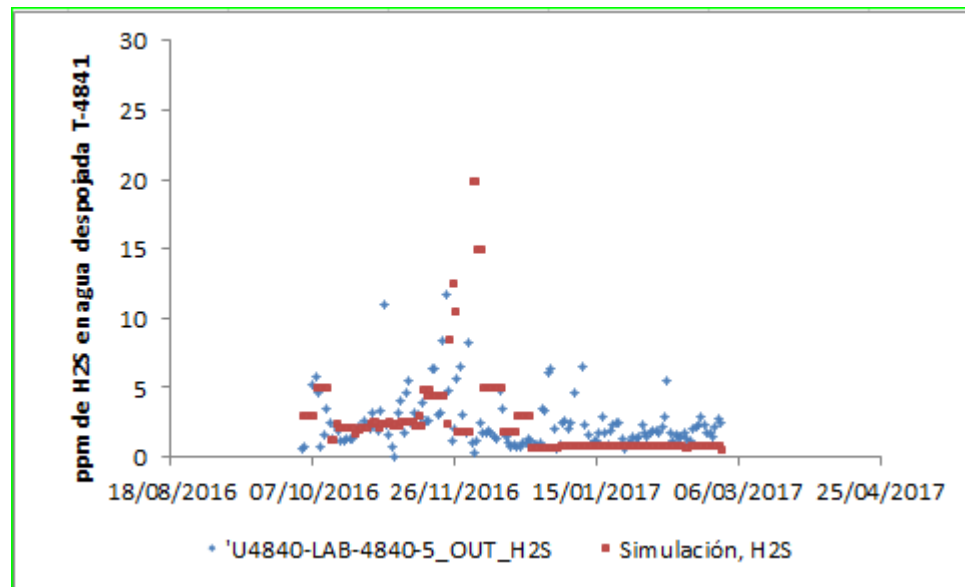
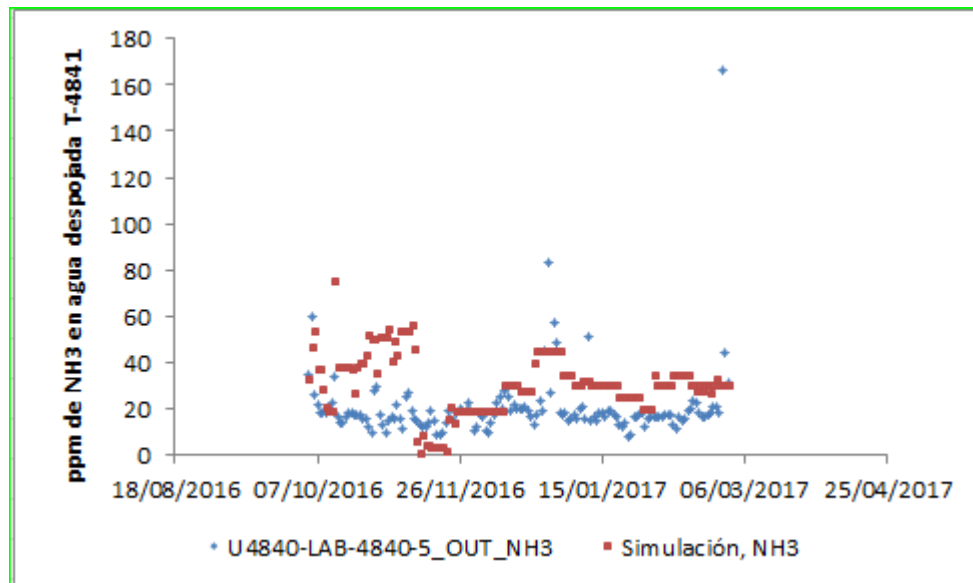
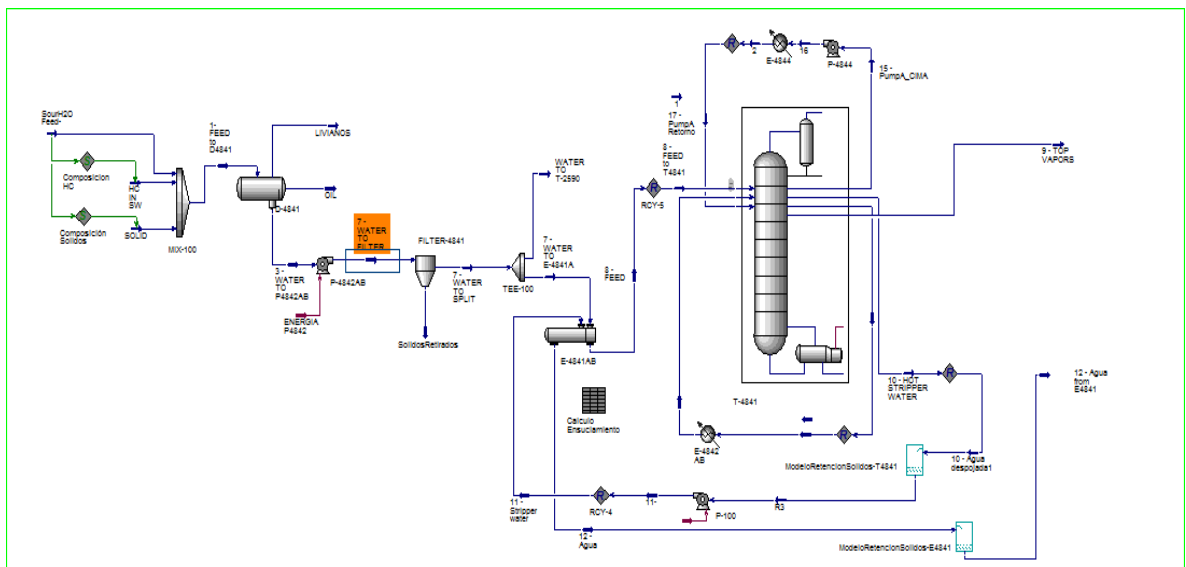


Figura 35. Comparación dato de laboratorio y por simulación para la cantidad de NH₃ a la salida de la T-4841.



En las Figuras 34 y 35, se muestra la comparación de los resultados de laboratorio y los resultados de la simulación, para el contenido de H₂S y NH₃ en la corriente de aguas despojadas de salida de la torre T-4841. La raíz del error cuadrático medio para el H₂S y el NH₃ reportaron los valores de 8 ppm y 21 ppm, respectivamente. Asimismo, los errores absolutos promedio para la reproducción de estas mismas concentraciones por el simulador reportaron los valores de 3 ppm y 15 ppm. Los valores de error obtenidos son apreciables debido a factores externos que no son considerados en la simulación; algunos son, fluctuaciones operacionales durante el día, la hora del muestreo para la prueba de laboratorio y los errores intrínsecos de las pruebas analíticas. A pesar de lo anterior, las simulaciones muestran resultados con los mismos órdenes de magnitud que los análisis del laboratorio, lo cual sugiere la validez de la simulación desarrollada en el presente trabajo. Pruebas adicionales considerando los factores externos son recomendables para una validación completa de la simulación de la torre.

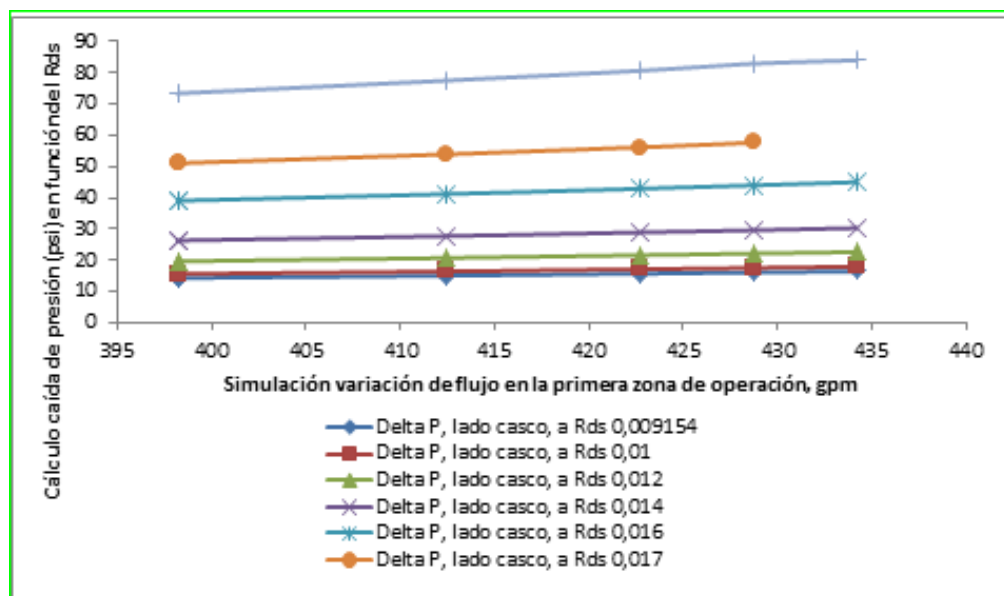
Figura 36. PFD de la unidad de aguas agrias U-4840 simulado en HYSYS



Para evaluar el comportamiento de la caída de presión del lado casco de los intercambiadores E-4841A/B, la simulación fue ejecutada generando la Figura 37,

en donde se observa que el máximo Rds se encuentra en 0.016 h-ft²-°F/BTU para altos flujos en los E-4841A/B (para una caída de presión máxima permitida en operación en planta de 45 psi), por arriba de este valor, las caídas de presión predichas se encuentran por fuera de lo medido en operación en campo; con una caída de presión de 45 psi y más en el lado casco de los E-4841A/B la planta debe alistarse para salida de servicio para limpieza mecánica de los E-4841A/B. De esta figura es posible deducir que el máximo Rds lado casco permisible dependerá del flujo de operación. Este comportamiento de alta caída de presión en el casco del E-4841A/B a alto flujo de operación se evidencia en la operación de la unidad, en especial cuando la unidad baja carga y posteriormente debe volver a subir carga, siendo en algunas ocasiones difícil de volver a llevar la operación de la unidad a un mayor flujo. El incremento en la caída de presión se debe al incremento en la depositación, la cual se ve favorecida al bajar carga.

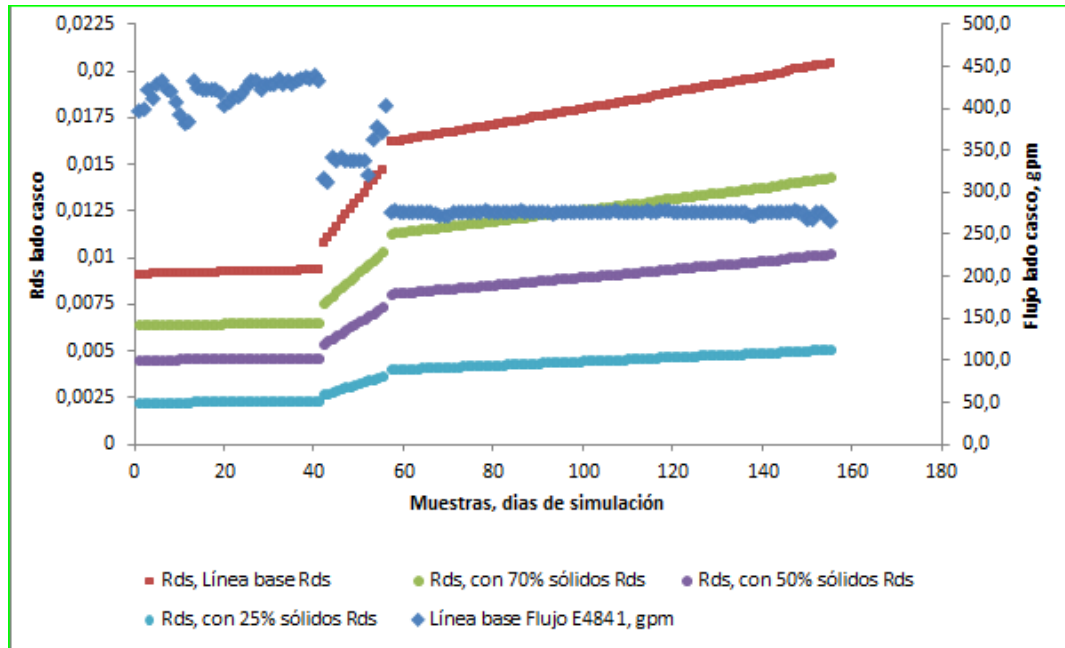
Figura 37. Variación de la caída de presión a altos flujos en el E4841A/B variando el Rds.



7.5 EVALUACIÓN POR SIMULACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN FILTRO EN EL SISTEMA DE AGUAS AGRIAS

Con el fin de disminuir el ensuciamiento en la unidad y aumentar el tiempo de servicio de los intercambiadores E-4841A/B, se propone instalar un filtro después del tambor de carga D-4841 y antes de las dos torres despojadoras de aguas agrias U-2590 y U-4840. La simulación realizada de la unidad U-4840 y el modelo desarrollado para calcular el factor de ensuciamiento R_{ds} en función de la concentración de los sólidos (ecuación 42), se usará para evaluar el efecto de la operación del filtro a tres diferentes capacidades de retención, sobre la resistencia al ensuciamiento R_{ds} , el espesor de la capa de ensuciamiento, y el peso de la masa depositada. La evaluación se desarrolló ejecutando simulaciones considerando que el filtro disminuye la concentración de sólidos en la carga de aguas agrias en valores de 30%, 50% y 75%. En la Figura 38 se comparan las tendencias de los diferentes R_{ds} de la línea base y los valores del R_{ds} para las tres simulaciones realizadas; todas las simulaciones consideraron las mismas condiciones de operación. Para efecto de la lectura de las etiquetas, en las Figuras 37 a la 41, el % que aparece en la etiqueta hace referencia al % de sólido que permanece en la corriente de agua despojada de entrada al E-4841A/B lado casco con relación a la concentración de sólidos de la línea base de estudio, si la etiqueta dice con 70% sólidos, significa que el filtro retiró 30% de la carga de sólidos a la unidad. Según esta Figura, al disminuir el contenido de sólidos en un 30% en la carga de aguas agrias, el R_{ds} disminuye de $0.02 \text{ h-ft}^2\text{-}^\circ\text{F/BTU}$ a $0,0130 \text{ h-ft}^2\text{-}^\circ\text{F/BTU}$ para el día 155; asimismo, si la carga de sólidos baja al 50%, el R_{ds} presenta una mayor disminución al valor de $0,009 \text{ h-ft}^2\text{-}^\circ\text{F/BTU}$. De otro lado, para un 75% de remoción de sólidos en el filtro, el R_{ds} presenta el mejor comportamiento para el R_d , el cual presenta valores por debajo de $0,005 \text{ h-ft}^2\text{-}^\circ\text{F/BTU}$.

Figura 38. Variación del Rds al disminuir la concentración de sólidos en la carga a la unidad.



En las Figuras 39 y 40 se presenta la cantidad de sólido acumulado en el ensuciamiento, así como el espesor de la capa para el mismo, respectivamente. En estas figuras se observa una disminución de la masa total y del espesor de la capa de ensuciamiento cuando se pone en servicio el filtro. Cuando el filtro disminuye la concentración de la carga de sólidos en un 30%, el peso de la capa de sólido disminuye de 2400 kg a 1500 kg, el espesor de la capa de depósito disminuye de 0,017 ft a 0,012 ft, ambos estimados para el día 155 de la simulación de la operación. Asimismo, al retirar el 75% de los sólidos en la carga se esperaría máximo un peso de 500 kg al finalizar el ciclo de operación evaluado y un espesor de la capa de sólido de 0,004 ft.

Figura 39. Variación del peso de la capa de ensuciamiento en unidades kg.

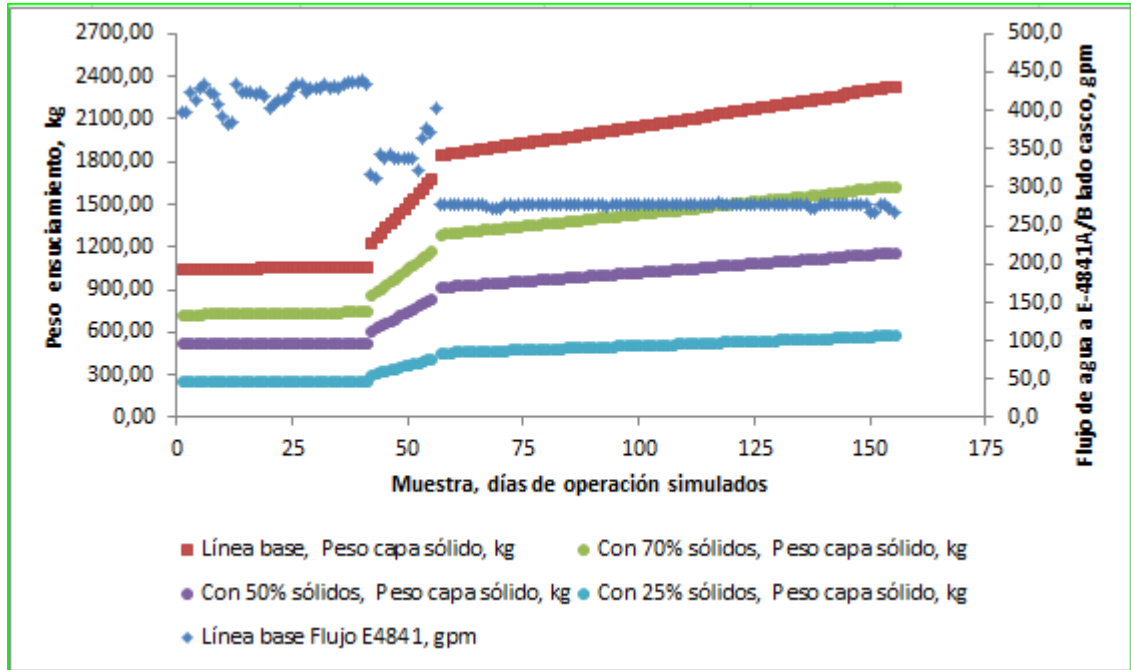
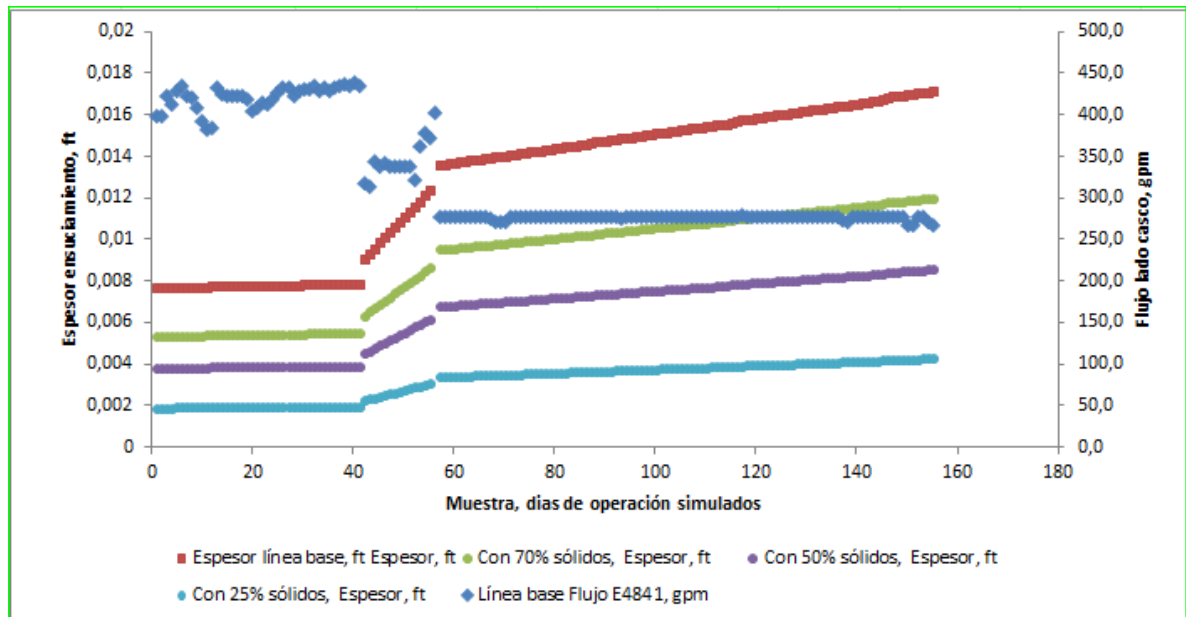
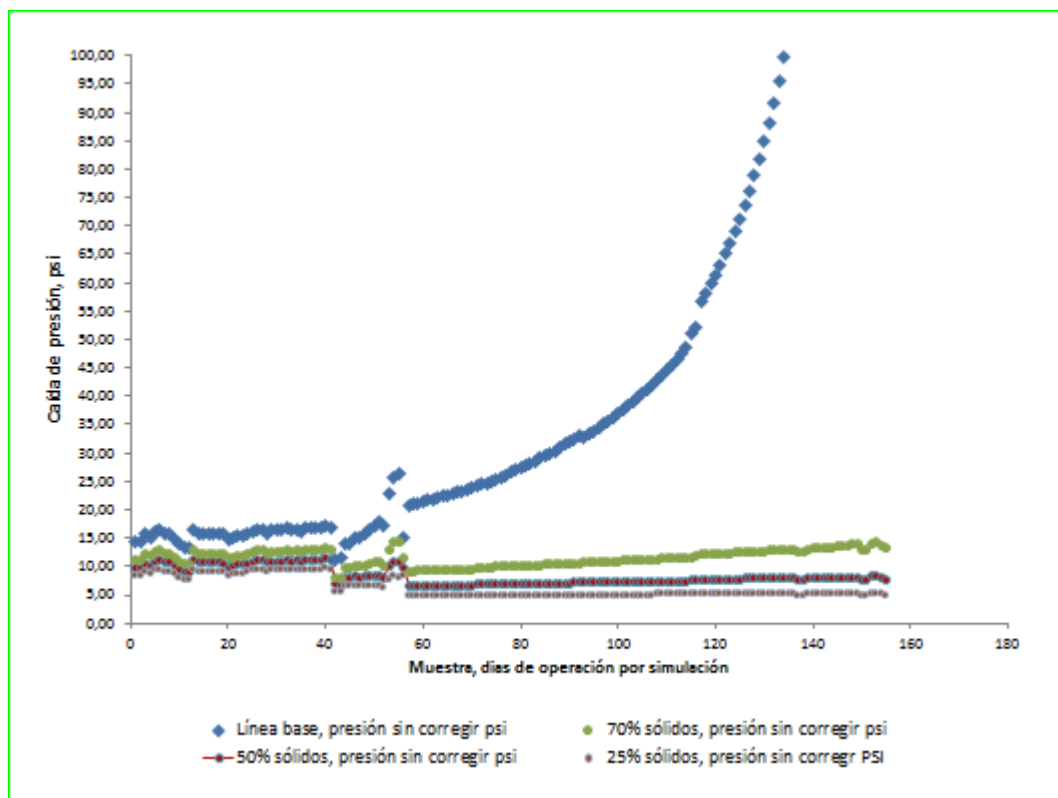


Figura 40. Variación del espesor de la capa de ensuciamiento en unidades de longitud pie (ft).



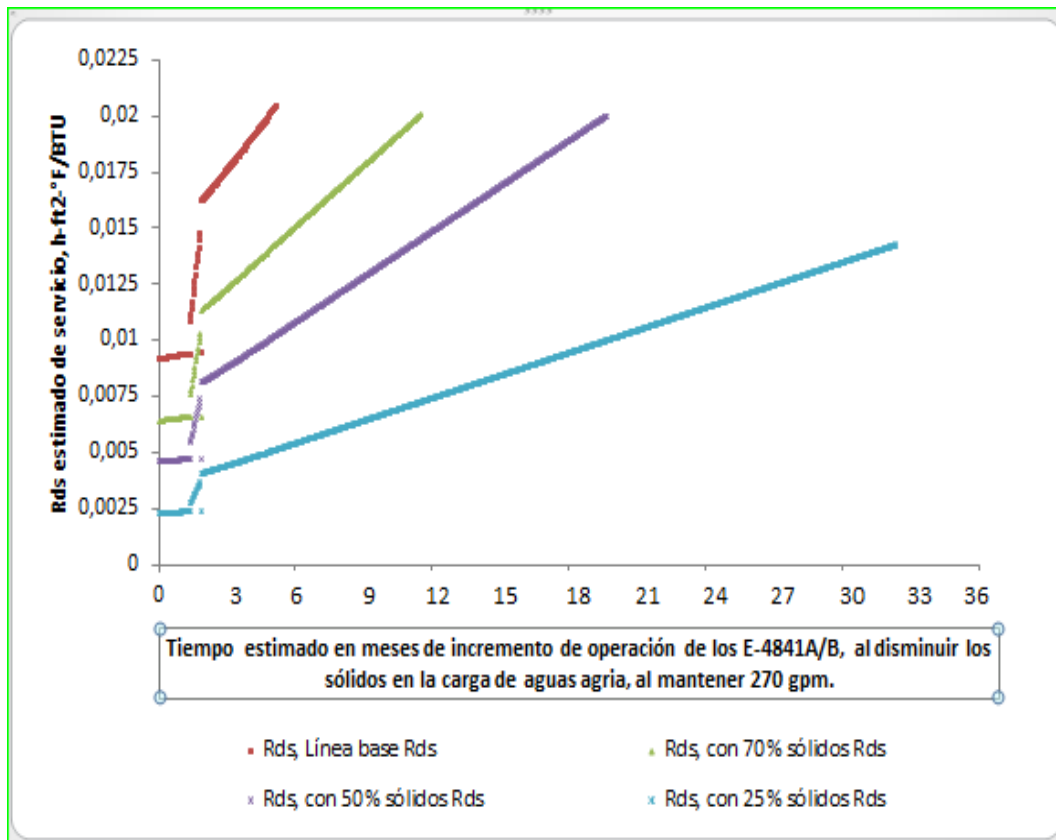
En la Figura 41 se muestra la variación de la caída de presión a diferentes contenidos de sólidos. Considerando la concentración de sólidos de la línea base, la caída de presión es elevada al final de la operación, lo cual indica que aunque el flujo es bajo el área de flujo se encuentra bastante restringida por el depósito ya formado, incrementando la velocidad del fluido en forma exponencial por el lado casco del intercambiador. La mejora por la disminución de la carga de sólidos ocasionada por el filtro, incide en la zona de mayor velocidad, según la simulación. Asimismo, en la Figura 36 la primera parte de la curva (alto flujo, Figura 19) presentó una caída de presión más cercana para las diferentes concentraciones de sólidos. El comportamiento presentado al finalizar la curva, indica que la caída de presión disminuye considerablemente con la disminución de la carga de sólidos al implementar el filtro.

Figura 41. Variación de la caída de presión a través del lado casco de los E-4841A/B a diferente concentración de sólido en la carga de aguas agrias.



En la Figura 42 se muestran los resultados del aumento en el tiempo de operación de los intercambiadores de calor E-4841A/B al disminuir la carga de sólidos al equipo. El ciclo de operación para la evaluación de la línea base en la simulación fue de 155 días, es decir 5.16 meses. Al disminuir la carga de sólidos en un 30% y manteniendo el mismo flujo de carga de la línea base, el ciclo de operación aumenta de 5.16 meses a 11 meses. Con la disminución de la carga en un 50% de sólidos, el tiempo de servicio del lado casco de los E-4841A/B pasó de 6 meses de servicio a 14.5 meses de servicio. Con el retiro del 75% de los sólidos en la carga el tiempo de servicio aumentó a más de 36 meses (Figura 42). Con lo anterior desde el punto de vista operativo el filtro más recomendable que tenga una retención de sólidos del 75%; sin embargo se deberá tener presente el aspecto económico para definir el % de retención óptimo para la operación.

Figura 42. Evaluación del incremento del ciclo de corrida de los E-4841A/B al disminuir la carga de sólidos.



7.6 COSTOS ESTIMADOS DE MANTENIMIENTO CONSIDERANDO LA ETAPA DE FILTRACIÓN.

Teniendo presente los resultados de las secciones anteriores, se requiere instalar un sistema de filtración para manejar un volumen de 600 gpm con una carga de 370 kg/día de sólidos. En la Tabla 9, se muestra el número de carcasas y elementos filtrantes que se requieren instalar en la planta, teniendo en cuenta dos tipos de elementos filtrantes, unos fabricados en polipropileno y otros metálicos. La capacidad de retención en masa (*holding capacity*) por elemento es de 20 kg para los fabricados en polipropileno y de 2 kg para los elementos metálicos. El diámetro

de las carcassas disponible son de 24" con boquillas de entrada y salida de 6" de diámetro y una longitud de 1.5 m de altura en el cuerpo del cilindro. En la Tabla 9 se muestra el número de elementos y carcassas que se requieren evaluar, siendo 21 elementos en material de polipropileno y 180 elementos metálicos fabricados en acero inoxidable, para los dos tipos de elementos filtrantes se requieren la operación de tres carcassas en paralelo

Tabla 9, Cuadro comparativo número de elementos y carcassas a emplear para elementos de filtración en polipropileno y metálicos.

	Capacidad de retención por elemento instalado	# elementos requeridos a 100% retención.	# de elementos por 1 carcassa de 24" de diámetro	# total de carcassas requeridas	# total de elementos requeridos
Elementos de filtración en polipropileno	20 kg	18,5	7	3	21
Elementos de filtración en acero inoxidable	2 kg	185	60	3	180

En este ejercicio de evaluación, se tuvo en cuenta los costos de mantenimiento por limpieza mecánica y los costos por reposición y limpieza de los elementos filtrantes, costos de mantenimiento asociados a condiciones de integridad no serán tenidos en cuenta. No forma parte del alcance de este trabajo de aplicación la especificación detallada del filtro a usar en el sistema de aguas agrias, esta será una etapa posterior. En la Figura 43 se muestra una foto de las carcassas de filtración que se encuentran disponibles, las cuales pueden habilitarse para su servicio en el sistema de aguas agrias.

Figura 43. Esquemático sistema filtración disponible para ser habilitado en la unidad de aguas agrías U-4840.



Con relación a los costos de mantenimiento por limpieza mecánica y por consumo de elementos filtrantes, se hizo una proyección estos costos en un periodo de dos años, tanto para la condición de operación actual línea base teniendo una frecuencia de limpieza de 5.16 meses para los E-4841A/B y un año para la T-4841, como para los casos cuando se tenga en servicio el sistema de filtración a las diferentes capacidades de retención evaluadas. Para la proyección de los costos de mantenimiento en la T-4841 se asumió el mismo porcentaje de aumento del tiempo de limpieza encontrado en las simulaciones para los E-4841A/B.

En la Tabla 10 se muestran los costos discriminados en MMCOL \$, por limpieza mecánica calculada para los equipos de la planta en el tiempo de mantenimiento de

la línea base, y en los tiempos de incremento del ciclo de operación calculado en la simulación a diferentes capacidades de retención de los filtros. En esta tabla se aprecia, que los costos por limpieza mecánica disminuyen con el incremento del porcentaje de retención en los filtros, lo anterior se da por la disminución en la frecuencia del mantenimiento de los equipos de la unidad.

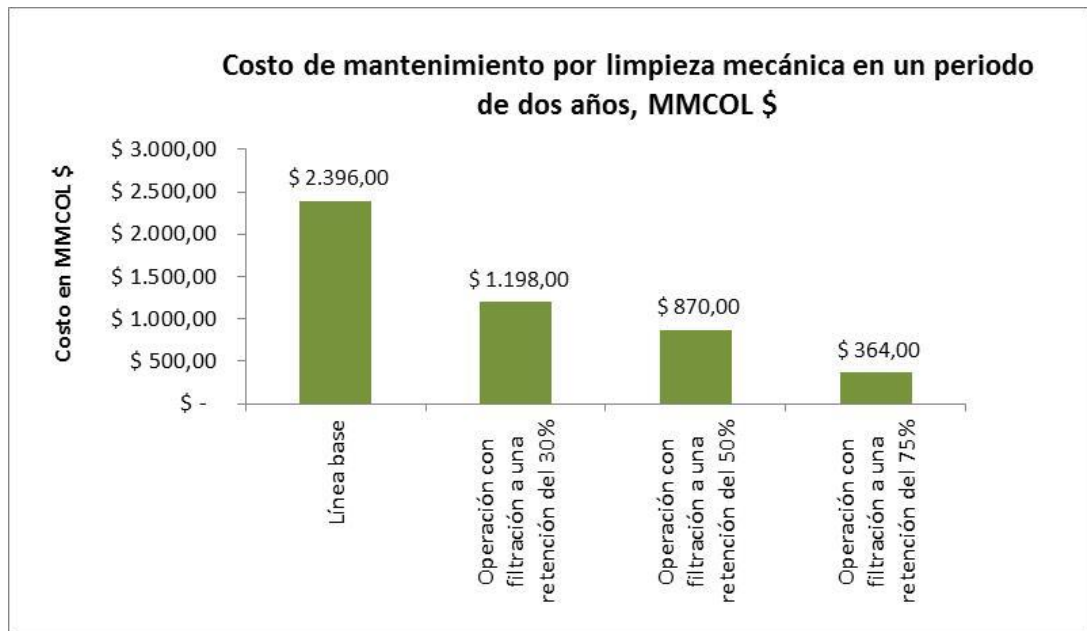
Tabla 10. Costos de mantenimiento por limpieza mecánica

Meses de servicio	Costos de mantenimiento en MMCOL \$, por limpieza mecánica en U-4840, a una frecuencia de limpieza mecánica en la línea base de evaluación				Costos de mantenimiento en MMCOL \$, por limpieza mecánica en U-4840, a una frecuencia de limpieza mecánica implementando filtración con un 30% de retención en masa.				Costos de mantenimiento en MMCOL \$, por limpieza mecánica en U-4840, a una frecuencia de limpieza mecánica implementando filtración con un 50% de retención en masa.				Costos de mantenimiento en MMCOL \$, por limpieza mecánica en U-4840, a una frecuencia de limpieza mecánica implementando filtración con un 75% de retención en masa.			
	T-4841	E-4841A/B	E-4842	Impacto a otras plantas y uso secuestrante	T-4841	E-4841A/B	E-4842	Impacto a otras plantas	T-4841	E-4841A/B	E-4842	Impacto a otras plantas	T-4841	E-4841A/B	E-4842	Impacto a otras plantas
1																
2																
3																
4																
5																
6		\$ 106	\$ 53													
7																
8																
9																
10																
11																
12	\$ 700	\$ 106	\$ 53	\$ 180		\$ 106	\$ 53									
13																
14																
15																
16										\$ 106	\$ 53					
17																
18		\$ 106	\$ 53													
19																
20																
21																
22																
23																
24	\$ 700	\$ 106	\$ 53	\$ 180	\$ 700	\$ 106	\$ 53	\$ 180	\$ 509	\$ 53	\$ 26	\$ 123	\$ 204	\$ 72	\$ 36	\$ 52
25																
26																
27																
28																
Total	\$ 1.400	\$ 424	\$ 212	\$ 360	\$ 700	\$ 212	\$ 106	\$ 180	\$ 509	\$ 159	\$ 79	\$ 123	\$ 204	\$ 72	\$ 36	\$ 52
Costo por limpieza mecánica	\$ 2.396,00				\$ 1.198,00				\$ 870,00				\$ 364,00			

En la Figura 44 mediante el gráfico de barras se hace un resumen de la Tabla 10, al usar retención del 30% los costos por limpieza mecánica bajan aproximadamente un 50%; cuando se aplica retención del 50% de sólidos se disminuyen un 64% y

al implementar retención del 75% se reducen los costos por limpieza mecánica en un 85%.

Figura 44. Costos de mantenimiento por limpieza mecánica a diferentes % de retención de material sólido en el filtro.



Para el cálculo de los costos por consumo de elementos de filtración se tuvo en cuenta un costo de COL\$ 700.000 por elemento fabricado en polipropileno y un costo de COL\$ 3.200.000 por elemento fabricado en acero inoxidable, estos valores se tomaron igual para los tres diferentes casos de retención del 30%, 50% y 75%.

En la Tabla 11, se presentan los valores mensuales estimados asociados al cambio de elementos filtrantes en polipropileno a diferentes grados de retención de material particulado. En esta tabla se toma un valor de 2 millones asociados a la actividad mecánica del cambio de elementos filtrantes y a la disposición final de estos, este valor aplica cada vez que se haga el cambio de los 27 elementos filtrantes en polipropileno.

Tabla 11. Cálculo mensual consumo elementos filtrantes en polipropileno

	Costo de 21 elementos polipropileno, COL\$	# de veces de reposición en un mes	Costo mensual estimado por cambio de elementos filtrantes, COL \$	Costo mensual asociado a la actividad del cambio y la disposición final del elemento, COL \$	Valor mensual estimado para el uso de elementos filtrantes en polipropileno, a # retenciones, COL \$
30% retención sólidos	\$ 14.700.000	9	\$ 132.300.000	\$ 18.000.000	\$ 150.300.000
50% retención sólidos	\$ 14.700.000	15	\$ 220.500.000	\$ 30.000.000	\$ 250.500.000
75% retención sólidos	\$ 14.700.000	22	\$ 323.400.000	\$ 44.000.000	\$ 367.400.000

Para el caso de los elementos filtrantes en acero inoxidable, estos elementos tienen un tiempo de servicio mayor a 6 años. Para efecto de la comparación de los costos, el costo total de estos elementos se aplicará sólo al primer mes de servicio, en los siguientes meses sólo se tendrá en cuenta el costo del consumo de vapor para la limpieza de los filtros, a nivel industrial cuando se tienen elementos filtrantes metálicos de gran tamaño se acostumbra a realizar su diseño con facilidades para realizar retrolavados, de tal manera que no se tenga que abrir frecuentemente los filtros. En la Tabla 12, se presenta el valor COL\$ de los 180 elementos en acero inoxidable, en la medida que aumenta el porcentaje de retención del filtro aumenta el número de veces que se necesita realizar limpieza en estos elementos, para este caso se tendrá un valor adicional por consumo de vapor para la limpieza de los elementos, este consumo será proporcional al número de veces que se intervenga este sistema.

Tabla 12. Costos de limpieza y valor de los elementos metálicos

	Valor COL\$ de 180 elementos metálicos	# veces de limpieza por mes	Costo mensual de la limpieza de los filtros metálicos
30% retención sólidos	\$ 576.000.000	15	\$ 9.000.000
50% retención sólidos	\$ 576.000.000	20	\$ 12.000.000
75% retención sólidos	\$ 576.000.000	25	\$ 15.000.000

Con la información de la Tabla 11 y la Tabla 12, se construye la Tabla 13, esta tabla muestra el valor del consumo de elementos filtrantes durante los dos años de operación, para los escenarios evaluados, de esta tabla se identifica un alto costo al usar elementos fabricados en polipropileno, estos son desechables y una vez se suturan deben reemplazarse, el costo de los elementos en acero inoxidable aunque es importante, tienen la ventaja que se pueden limpiar y no necesitan ser reemplazados en el corto tiempo, se estima un tiempo de servicio de 6 años para estos elementos, sin embargo, dependiendo del servicio de aplicación este tipo de elementos podrían operar hasta un tiempo de 10 años. El costo por el uso de elementos filtrantes en polipropileno para este caso de evaluación estaría entre 4 y 9 veces más alto al compararlo con los costos por el uso de elementos en acero inoxidable.

Para comparar los beneficios económicos de la implementación del sistema de filtración contra los ahorros por limpieza mecánica en un mismo periodo de tiempo, se debe tener en cuenta los costos por limpieza mecánica en la unidad U-4840 y los mismos costos en la unidad U-2590, el sistema de filtración a implementar será común para los dos sistemas de tratamiento de aguas agrías.

Tabla 13. Cuadro de costos comparativo en dos años para elementos filtrantes en polipropileno y en acero inoxidable.

Alternativas		Costos 1er año de servicio	Costos 2do año de servicio	Costo estimado COL\$ en dos años por cambio de elementos filtrantes, unidad U-4840
Instalar filtro retira 30% sólidos	Filtro mecánico	\$ 684.000.000	\$ 108.000.000	\$ 792.000.000
	Filtro polipropileno	\$ 1.803.600.000	\$ 1.803.600.000	\$ 3.607.200.000
Instalar filtro retira 50% sólidos	Filtro mecánico	\$ 720.000.000	\$ 144.000.000	\$ 864.000.000
	Filtro polipropileno	\$ 3.006.000.000	\$ 3.006.000.000	\$ 6.012.000.000
Instalar filtro retira 75% sólidos	Filtro mecánico	\$ 756.000.000	\$ 180.000.000	\$ 936.000.000
	Filtro polipropileno	\$ 4.408.800.000	\$ 4.408.800.000	\$ 8.817.600.000

De la Figura 24, se tiene un costo actual por limpieza mecánica de la U-4840 en un periodo de dos años de COL\$ 2.300.000, se considerará un costo similar para la limpieza mecánica de la segunda unidad de aguas agrias U-2590 ya que este sistema es homólogo a la unidad U-4840 en diseño y con los mismos problemas de ensuciamiento, y cuenta con las mismas frecuencias de mantenimiento mecánico; se considerará un valor de COL\$ 4.600.000, como costo total de mantenimiento por limpieza mecánica para los dos sistema de aguas agrias sin implementar sistema de filtración

En la quinta columna, de izquierda a derecha en la Tabla 14, se muestran los costos finales asociados a la suma por mantenimiento mecánico y los costos asociados a la implementación del sistema de filtración (consumo elementos filtrantes y servicios) para los diferentes casos evaluados en un periodo de dos años. De esta tabla es fácil identificar que al implementar la filtración los costos por mantenimiento mecánico disminuyen considerablemente como se había expresado anteriormente cuando se hizo referencia a la Figura 44, sin embargo los costos por consumo de

elementos filtrantes según sea el caso puede incluso ser mayor al valor del costo de mantenimiento mecánico. Para los tres casos en donde se usó elementos de filtración en polipropileno los costos finales de la quinta columna son mayores a los costos de la limpieza mecánica sin implementar filtración, por lo tanto no sería desde el punto de vista económico una alternativa viable de implementación; para el caso del uso de elementos filtrantes metálicos en los tres casos evaluados se observa una mejora considerable en el aspecto económico y esto se debe a que los elementos metálicos tienen una vida útil bastante alta. Al usar filtración metálica con un 30% de retención, los costos totales de mantenimiento bajan en una 33%, si se implementa filtración con un 50% de retención los costos bajan en un 46%, al implementar filtración con un 75% de retención los costos disminuyen en un 81% con relación a la línea base.

Con lo anterior, la aplicación de un sistema de filtración con una retención superior al 50% presenta los mayores beneficios económicos, esto sin considerar aspectos detallados relacionados con los costos de diseño y montaje del sistema.

Tabla 14. Cuadro de costos comparativo, incluyendo limpieza mecánica y filtración en un periodo de dos años.

Alternativas		Costos asociados por limpieza mecánica en las dos unidades U-4840 y U-2590, COL\$	Costo estimado COL\$ en dos años por cambio de elementos filtrantes, unidad U-4840	Costos totales por limpieza mecánica y consumo de elementos filtrantes en dos años, COL\$
Costos limpieza mecánica sin implementar filtración		\$ 4.792.000.000	0	\$ 4.792.000.000
Instalar filtro retira 30% sólidos	Filtro mecánico	\$ 2.392.000.000	\$ 792.000.000	\$ 3.184.000.000
	Filtro polipropileno	\$ 2.392.000.000	\$ 3.607.200.000	\$ 5.999.200.000
Instalar filtro retira 50% sólidos	Filtro mecánico	\$ 1.740.000.000	\$ 864.000.000	\$ 2.604.000.000
	Filtro polipropileno	\$ 1.740.000.000	\$ 6.012.000.000	\$ 7.752.000.000
Instalar filtro retira 75% sólidos	Filtro mecánico	\$ 728.000.000	\$ 936.000.000	\$ 1.664.000.000
	Filtro polipropileno	\$ 728.000.000	\$ 8.817.600.000	\$ 9.545.600.000

LOGROS DEL TRABAJO DE APLICACIÓN

Con el desarrollo del presente trabajo de aplicación se obtienen los siguientes logros:

- Se desarrolló el modelo de simulación de la planta de aguas agrias U-4840 en el paquete de simulación HYSYS versión 9, la cual puede usarse en cualquier momento para ayudar a resolver problemas operativos.
- Se conoce una metodología que se puede seguir implementando en otros intercambiadores de calor de las unidades de proceso, con la cual se puede calcular el coeficiente de resistencia a la transferencia de calor generado por presencia de sólidos.

8. CONCLUSIONES

1. Los análisis de laboratorio desarrollados durante la ejecución de este proyecto permitieron identificar que los lodos que se precipitan al interior de la torre despojadora y los equipos asociados en la zona de fondo, son generados por depositación de material particulado que contiene las aguas de carga a la unidad. Asimismo, los lodos son una mezcla de hidrocarburos livianos, óxidos de hierro y trazas de otros elementos, los cuales a las condiciones de operación de la torre despojadora T-4841 precipitan en las paredes del lado casco de los intercambiadores.
2. El modelo desarrollado para predecir el coeficiente de resistencia a la transferencia de calor R_d , en el periodo evaluado para el intercambiador E-4841A/B, muestra tres zonas diferentes de operación; a alta carga, la acumulación tiende a mantenerse constante en el tiempo, con lo cual, la velocidad de erosión y la velocidad de depositación se igualan. Cuando se baja el flujo de carga, los lodos tienden a precipitarse con mayor rapidez; la velocidad de erosión es menor a la velocidad de depositación por lo tanto se presenta acumulación, el incremento de la capa de ensuciamiento incrementa la caída de presión. Los resultados anteriores indican que con la carga actual de sólidos el mejor punto de operación de la unidad U-4840 es a alta carga.
3. Con base en las simulaciones, al disminuir la carga de sólidos a la unidad se disminuirá la resistencia a la transferencia de calor por depósitos, manteniendo menores caídas de presión y permitiendo ciclos de operación más largos. Por lo tanto, la implementación de una etapa de filtración ayudará a mejorar la operación del sistema.

4. Con base en la evaluación de costos, para el sistema de filtración lo recomendable es instalar filtros metálicos, con un porcentaje de retención superior al 50% de sólidos. Debido a la alta carga de sólidos en el sistema se hace inviable económicamente el uso de elementos filtrantes fabricados en polipropileno.

9. RECOMENDACIONES

- Todo el sistema de fondo asociado a la zona de despojo de la T-4841 presenta problemas de ensuciamiento, por lo cual, es conveniente continuar con el desarrollo de modelos de ensuciamiento en otros equipos de la unidad.
- Evaluar la regresión propuesta para el coeficiente global del ensuciamiento R_d del E-4841A/B, en periodos operacionales diferentes al caso de estudio, con el fin de validar si esta regresión puede ser representativa en tiempos diferentes al periodo de evaluación.
- Continuar con la evaluación económica considerando un mayor detalle en la operación del filtro y en los requerimientos para el mismo.

BIBLIOGRAFÍA

ADDINGTON, L, FITZ, C., LUNSFORD, K., LYDDON, L, & SIWEK, M. Sour Water. Where it Comes from and How to Handle it. In Prague GPA Europe Annual Conference 2011 (pp. 12013-10).

ASPEN TECH, Document Simulation Basis, Manual HYSYS®, 2005.

BARNEA, E.; MIZRAHI, J. A generalized approach to the fluid dynamics of particulate systems: Part 1. General correlation for fluidization and sedimentation in solid multiparticle systems. The Chemical Engineering Journal, 1973, vol. 5, no 2, p. 171-189.

BELLEN, Jed M. Design of Sour Water Stripping System. Fluor Daniel Inc. Philippines, 3rd Floor Asian Star Building 2402-2404 ASEAN Drive, Filinvest Corporate City.

BEQUETTE, Wayne, Process Dynamics, Modeling, Analysis and Simulation

BLOCHL R. and MULLER-STEINHAGEN H., Influence of Particle Size and Particle/Fluid Combination on Particulate Fouling in Heat Exchangers

BOTT T. R., and WALKER R.A, Fouling in Heat Transfer Equipment. The Chemical Engineer, 1971

BOTT T.R. and HUSSIN c.r., Studies of magnetite deposition from a flowing suspension, Oxfordshire, United Kingdom.

BOTT T.R., Fouling of heat exchanger, Elsevier Science & Technology Books, april 1995.

GARSIDE, John; AL-DIBOUNI, MAAN R. Velocity-voidage relationships for fluidization and sedimentation in solid-liquid systems. Industrial & engineering chemistry process design and development, 1977, vol. 16, no 2, p. 206-214.

GONZÁLEZ GUERRERO, M. A. Efecto de la carga de crudo en la integridad y en otras variables de las unidades Cracking de la GRB, 2016.

HEINS, Andrea VEIGA Ramón, RUIZ Carlos, and RIERA Andrés, "Fouling monitoring and cleaning optimisation in a heat exchanger network of a crude distillation unit" in "Heat Exchanger Fouling and Cleaning VII", Hans Müller-Steinhagen, Institute of Technical Thermodynamics, German Aerospace Centre (DLR) and Institute for Thermodynamics and Thermal Engineering, University of Stuttgart, Germany; M. Reza Malayeri, University of Stuttgart, Germany; A. Paul Watkinson, The University of British Columbia, Canada Eds, ECI Symposium Series, 2007

KAZI S.N, , Fouling and Fouling Mitigation on Heat Exchanger Surfaces, Department of Mechanical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia.

KERN D. Q., Procesos de transferencia de calor, Compañía editorial Mexicana, 1999.

LEE, D., et al. Dynamic simulation of the sour water stripping process and modified structure for effective pressure control. Chemical Engineering Research and Design, 2002, vol. 80, no 2, p. 167-177.

LEE, Seong-Young, et al. Improvement in steam stripping of sour water through an industrial-scale simulation. Korean Journal of Chemical Engineering, 2004, vol. 21, no 3, p. 549-555.

LUYBEN, William, Process Modeling Simulation and Control for Chemical Engineers, Lehigh University

MALDONADO GRANADOS, Luis Facundo, El modelamiento matemático en la formación del ingeniero, Bogotá, 2013.

MOLGAARD J. and SMELTZER W. W., Thermal Conductivity of Magnetite and Hematite, AIP Journal of Applied physics.

MONTGONERY HOPKINS, Robert. Fouling of heated stainless steel tubes with ferric oxide from flowing water suspensions. Tesis doctoral, 1973, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

NABGAN, Bahador, et al. Process Simulation for Removing Impurities From Wastewater Using Sour Water 2-Strippers system via Aspen Hysys. Chemical Product and Process Modeling, 2016, vol. 11, no 4, p. 315-321.

NAGPAL, Soumitro. Fine Tune the Design of Sour-water Strippers Using Rate-based Simulation. Chemical Engineering, 2014, vol. 121, no 6, p. 42.

OLIVEIRA, BSc, L MELO, PhD and J D PINHEIRO, PhD, Fouling by aqueous suspensions of kaolin and Magnetite, University of Minho, Braga, Portugal.

OROZCO, Luis Gómez, CAPERA URREGO, Ana Ilva, Modelos De Ensuciamiento en Intercambiadores de calor tubulares. En Sistemas Indirectos en Procesos Uht en la industria láctea.

RICHARDSON, J. F.; ZAKI, W. N. The sedimentation of a suspension of uniform spheres under conditions of viscous flow. *Chemical Engineering Science*, 1954, vol. 3, no 2, p. 65-73.

RODRIGUEZ, S. M. Desarrollo de un simulador para análisis y control del ensuciamiento en intercambiadores de calor y tubos, Universidad de Sevilla, Sevilla España, 2014.

SANABRIA RODRIGUEZ, Luis Bayardo, capítulo 1 “Visión del modelamiento a partir de la historia de los objetos”, del libro *El modelamiento matemático en la formación del ingeniero*, Bogotá, 2013.

VAN NESS, Smith, *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*, pág 601 a la 607 equilibrio sólido-líquido, 5ta edición.

WATKINSON, A. P.; FAN, Z.; PETKOVIC, B. Extending fouling concepts from heat exchangers to process equipment. En *Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*. 2011. p. 15-22.

ANEXOS

Anexo A. Metodología aplicada a análisis de laboratorio.

MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA DETERMINAR EL pH DEL AGUA (ASTM D1293)

El método empleado cubre la determinación de pH por medición electrométrica usando el electrodo de vidrio como sensor.

El pH del agua es un parámetro crítico que afecta la solubilidad de trazas de minerales, la habilidad del agua para formar escama o para causar corrosión metálica, y la aptitud del agua para sostener organismos vivientes. Es una escala definida, basada en un sistema de soluciones buffer con valores asignados. En agua pura a 25°C, el pH 7,0 es el punto neutral, pero éste varía con la temperatura y la fuerza iónica de la muestra. El agua pura en equilibrio con aire tiene un pH de aproximadamente de 5.5, y la mayoría de las aguas naturales no contaminadas están en un rango entre pH 6 y pH 9.

Interferencias del método:

- El electrodo de vidrio mide confiablemente el pH en casi todas las soluciones acuosas y en general no está sujeto a interferencias de solución por color, turbidez, materia coloidal, oxidante o reductora.
- El pH verdadero de una solución o un extracto acuoso es afectado por la temperatura. La fuerza electromotriz entre el vidrio y el electrodo de referencia es una función de la temperatura así como del pH. El efecto de la temperatura puede compensarse automáticamente en muchos instrumentos o puede

compensarse manualmente. La compensación de la temperatura se corrige por el efecto de cambios sobre la pendiente del electrodo con la temperatura pero no se corrige por efectos de la temperatura sobre el sistema químico que está siendo monitoreado. Esto no ajusta el pH medido para una temperatura común; por lo tanto, la temperatura se reporta para cada medición de pH.

Resumen del método de prueba:

- El medidor de pH y los electrodos asociados son estandarizados contra dos soluciones buffer de referencia entre las cuales estará el pH de la muestra. La medición se hace de forma directa sumergiendo el electrodo sobre la muestra a un nivel apropiado, bajo condiciones estrictamente controladas y técnicas prescritas.
- Se coloca la muestra de agua en un beaker de vidrio limpio provisto con una barra de agitación y un termómetro (para medidores con compensación manual de temperatura) y/o una probeta ATC (para medidores con compensación automática de temperatura).
- Se agita durante el periodo de medición de pH a una velocidad que previene las salpicaduras y que evita pérdidas o ganancias de gases ácidos o básicos por intercambio con la atmósfera.
- Se registra el pH y la temperatura de la muestra.

MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA DENSIDAD Y DENSIDAD RELATIVA DE CRUDOS POR MEDIO DEL DENSIMETRO DIGITAL

La densidad es una propiedad física fundamental que se utiliza junto con otras propiedades para caracterizar la calidad de los Hidrocarburos.

El método empleado para este análisis cubre la determinación de la densidad o densidad relativa de hidrocarburos que pueden ser manejados de manera normal como líquidos a temperaturas de ensayo entre 15 y 35 °C.

Este método de ensayo fue evaluado en un programa “round robin” usando crudos en el rango de 0.75 a 0.95 g/mL. Los crudos livianos pueden requerir manejo especial para prevenir pérdida de vapores. Los crudos pesados requieren mediciones a altas temperaturas para eliminar burbujas de aire en la muestra.

El equipo empleado para el análisis es un analizador que consta de un tubo de prueba oscilante en forma de U, un sistema de estimulación electrónica, conteo de frecuencia y pantalla digital. El analizador debe ajustar exactamente la temperatura de la muestra durante la medición o debe controlar la temperatura de la muestra. El equipo debe reunir los requerimientos de precisión descritos en el método de ensayo D 4052.

Resumen del método de prueba:

Se introduce aproximadamente 0.7 mL de muestra de crudo en el tubo de prueba oscilante y el cambio en la frecuencia de oscilación causado por el cambio en la masa del tubo se usa junto con los datos de calibración para determinar la densidad de la muestra.

METODO DE ENSAYO ESTANDAR PARA DESTILACION DE PRODUCTOS DEL PETROLEO Y COMBUSTIBLES LÍQUIDOS A PRESION ATMOSFERICA SIMDIS

La distribución del rango de ebullición de fracciones del petróleo proporciona una información sobre la composición de cargas y productos relacionados con los procesos de refinación del petróleo. La simulación cromatográfica de gases de esta

determinación puede usarse para reemplazar los métodos de destilación convencionales para el control de las operaciones de refinación.

Las distribuciones del rango de ebullición obtenidas por este método de ensayo son esencialmente equivalentes a aquellas obtenidas en la destilación del punto de ebullición verdadero (TBP).

El método de ensayo es aplicable a productos y fracciones del petróleo con un punto final de ebullición a presión atmosférica, menor o igual que 538°C (1000°F) determinado por este método.

Resumen del método de prueba:

La determinación de la distribución del rango de ebullición por destilación se simula mediante cromatografía de gases. Se usa una columna cromatográfica no-polar empacada o tubular abierta (capilar) para eluir los componentes hidrocarbonados de la muestra en orden de punto de ebullición creciente. La temperatura de la columna se eleva a una velocidad lineal reproducible y el área bajo el cromatograma se registra a través del análisis. En el eje del tiempo se asignan los puntos de ebullición a partir de una curva de calibración, la cual se obtiene bajo las mismas condiciones cromatográficas, al analizar una mezcla conocida de hidrocarburos que cubre el rango de ebullición esperado en la muestra. A partir de estos datos, se obtiene la distribución del rango de ebullición.

MÉTODO PARA LA DETERMINACION DE GRASAS Y ACEITES EN AGUA POR PARTICION GRAVIMETRICA SM 5520B

El objetivo del método es determinar el contenido de grasas y aceites en aguas industriales, se entiende por "Grasas y Aceites" cualquier sustancia o grupo de sustancias recuperadas por solubilidad con solventes como Freón, Hexano, Eter

Metil-Tert-Butil o Eter de Petróleo y que no se volatilizan durante la prueba y los resultados se obtienen con base el peso del extracto seco. Por este método no se mide la cantidad absoluta de una sustancia específica, sino grupos de sustancias con características físicas similares.

Resumen del método de prueba:

Tomar una muestra desplazando casi horizontalmente sobre la superficie del agua un frasco de vidrio y de boca ancha con una capacidad de (500 o 1000) mL preferiblemente de marca SCHOTT tapa azul, llenar hasta la mitad del cuello y adicionar Ácido Clorhídrico Analítico hasta obtener un pH menor de 2. Tapar inmediatamente y refrigerar a una temperatura de 4°C hasta el momento del análisis. La muestra tomada no se debe subdividir y se debe evitar al máximo la contaminación de la parte externa de la rosca del frasco con crudo o aceite.

Las grasas y aceites disueltas o emulsificadas son extraídas del agua acidulada previamente, por contacto íntimo con 10 a 20mL de un solvente; para posterior filtración de la fase orgánica, a través de un sistema de filtración que contenga 10g de Sulfato de Sodio (Na_2SO_4), -Procedimiento de extracción que se repite tres veces, el filtrado se recoge en un balón previamente pesado, el cual se somete a evaporación cuidadosa del solvente, para luego dejar enfriar y pesar el residual de grasas y aceites contenidos en la muestra problema. Algunas grasas y ácidos grasos se oxidan fácilmente por lo que se debe tener precaución con la temperatura y los vapores del solvente. Algunos solventes orgánicos forman emulsiones difíciles de romper.

MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA ANÁLISIS DE MERCAPTANOS Y SULFUROS EN SOLUCIONES ALCALINAS DE REFINERÍA (UOP 209)

Este método sirve para determinar por titulación la concentración de azufre presente como sulfuro de sodio y mercaptanos de sodio, para el control de planta de las soluciones cáusticas de refinería utilizadas para remover sulfuro de hidrógeno, mercaptanos y otros ácidos débiles de los productos del petróleo.

Durante la titulación los mV son registrados hasta que permanecen constantes, en este método se debe permitir suficiente tiempo para que el equilibrio sea alcanzado; la inflexión alrededor de -350 mV indica iones sulfuros y la otra inflexión, ocurre alrededor de +100 mV, indicando iones mercaptanos.

Resumen del método de prueba:

Se somete a titulación la muestra problema con Nitrato de Plata Alcohólico 0.01N en un vaso de titulación con el electrodo de referencia de plata/sulfuro de plata y solvente de hidróxido de sodio; Se agrega la solución de nitrato de plata en incrementos de 1 mL, se registra los mV después de cada adición y se permite el tiempo necesario para el equilibrio, hasta que el punto final se aproxima. Cuando se llega a este punto se reducen los incrementos a 0.1 mL. El punto final se alcanza cuando el cambio en mV por incremento de titulante agregado es máximo.

MÉTODO PARA DETERMINAR NITRÓGENO AMONIACAL

El método empleado para la detección y análisis del ion Amonio (NH_4^+), es por cromatografía iónica (Equipo Cromatógrafo Iónico ICS 1100 con número de TAG AE37435) en muestras de agua industrial, y posterior cálculo a nitrógeno amoniacal.

El procedimiento descrito se usa especialmente para concentraciones de nitrógeno amoniacal en un rango de operación equiparable al de la curva de calibración, cuya concentración va desde 5mg/L a 150mg/L, se realizan diluciones para muestras que se encuentran por fuera de estos valores.

La cromatografía iónica está relacionada con los métodos modernos y eficaces para la separación y determinación de iones que se basan en el uso de las resinas de intercambio iónico. En la cromatografía iónica se demostró que mediante las columnas de HPLC rellenas con resinas de intercambio catiónico o aniónico, se podían determinar fácilmente mezclas de cationes o aniones y, la detección se realizaba con medidas de conductividad.

El Cromatógrafo ICS-1100 es un sistema integrado y pre conFigurado, diseñado para llevar a cabo separaciones isocráticas con detección por conductividad, su sistema incluye bomba isocrática de doble pistón, desgasificación por vacío en línea y, detector de conductividad con celda termostatzada que posibilita la supresión química como electroquímica proporcionada por el medio de arrastre “eluyente” del ácido metilsulfónico.

Tabla 15. Descripciones componentes principales del cromatógrafo ICS-1100

El equipo incluye:	Características generales:
<ul style="list-style-type: none"> • Bomba isocrática inerte y libre de metal • Válvulas de inyección tipo Rheodyne. • Detector de conductividad (incluye Celda de conductividad). • Software Chromeleon S.E. 	<ul style="list-style-type: none"> • Compatible con el sistema de regeneración de eluyente RFIC-ER. • Ampliable al sistema de generador de eluyente RFIC-EG. • Soporta columnas de 2, 3, 4 y 5 mm. • Compatible con cualquier tipo de eluyente inorgánico o solventes orgánicos. • Incluye desgasificación interna por vacío.

Tabla 16. Distribución tamaño de partícula sólidos encontrado en interior equipos. Muestra 1.

DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS LIVIANOS					
Muestra	Tamaño de malla en micras	Peso Tamiz Vacío	Peso Tamiz + Muestra	% Retenido	MUESTRA
0,5962	149	71,8096	71,9492	23,41	0,1396
	105	68,9717	69,4194	75,09	0,4477
	90	70,4131	70,4219	1,48	0,0088
	75	71,7984	71,7985	0,02	0,0001
	60	71,5697	71,5697	0,00	0
	45	74,6691	74,6691	0,00	0
	30	70,9134	70,9134	0,00	0
	20	70,9419	70,9419	0,00	0
	Fondo	67,1475	67,1475	0,00	0
TOTAL				100,00	0,5962

Tabla 17. Distribución tamaño de partícula sólidos encontrado en interior equipos. Muestra 2.

DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS PESADOS					
Muestra	Tamaño de malla en micras	Peso Tamiz Vacío	Peso Tamiz + Muestra	% Retenido	MUESTRA
1,7566	149	71,8096	72,4384	35,80	0,6288
	105	68,9717	69,3325	20,54	0,3608
	90	70,4131	70,6994	16,30	0,2863
	75	71,7984	71,8978	5,66	0,0994
	60	71,5697	71,7643	11,08	0,1946
	45	74,6691	74,7777	6,18	0,1086
	30	70,9134	70,9908	4,41	0,0774
	20	70,9419	70,9426	0,04	0,0007
	Fondo	67,1475	67,1475	0,00	0
TOTAL				100,00	1,7566