

**ESTUDIO TÉCNICO PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO OPERACIONAL DEL
SISTEMA DE FONDOS DE LA FRACCIONADORA PRINCIPAL DE LA
CRACKING UOP II DE LA GERENCIA REFINERÍA BARRANCABERMEJA**

JAUREGUI BALLESTEROS MURCIA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2016**

**ESTUDIO TÉCNICO PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO OPERACIONAL DEL
SISTEMA DE FONDOS DE LA FRACCIONADORA PRINCIPAL DE LA
CRACKING UOP II DE LA GERENCIA REFINERÍA BARRANCABERMEJA.**

JAUREGUI BALLESTEROS MURCIA

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

**Director:
HERNANDO GUERRERO AMAYA
Ingeniero Químico, Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2016**

Dedicatoria

A Dios,

*Por darme la fortaleza para que cada día
tuviera las fuerzas necesarias para
seguir adelante con este proyecto.*

A mis hijos,

*Por el tiempo sedido, los momentos que no los pude
acompañar en la realización de sus tareas,
por los espacios que no logramos compartir.*

A mi esposa,

*Por la paciencia que me tuvo durante las largas horas
en las que solo interactuaba con una pantalla,
por las palabras de aliento cuando
mi energía no alcanzaba.*

AGRADECIMIENTOS

A **ECOPETROL S.A.** por darme la oportunidad de crecer como persona y prepararme técnicamente.

Al profesor **Hernando Guerero Amaya**, por su aporte y acompañamiento como director en el desarrollo del proyecto.

A la profesora **Luz Marina Ballesteros Rueda**, por sus valiosas observaciones en el desarrollo del proyecto.

A los Ingenieros **Oswaldo Andres Muñoz Espinosa, Carlos Alberto Meza Mendez, Juan Camilo Peña Lizcano y Pedro Nel Perez** por sus aportes en el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero **Nelson Fernando Angulo Pedrozo** por confiar en mis capacidades para sacar adelante la realización de la Maestría.

Al Gerente General de Refinería **Orlando Díaz Montoya** por su alto compromiso en lograr que sus funcionarios cada día estén mejor preparados para la operación de cada una de las unidades de proceso.

Al equipo de trabajo del **Departamento de Craqueo Catalítico 2** de la Gerencia Refinería Barrancabermeja por su apoyo en la realización de actividades de campo y por su voz de aliento para sacar adelante este gran reto.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	23
1. OBJETIVOS	32
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	32
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
2. METODOLOGÍA	33
2.1 Fase 1: Análisis Químico	33
2.1.1 Análisis de caracterización de muestra de coque	33
2.2 Fase 2: Análisis de mezclas de slurry, ALC y APC	34
2.2.1 Análisis de la corriente de slurry	34
2.2.2 Análisis de la corriente de ALC	34
2.2.3 Análisis de la corriente de APC	35
2.3 Fase 3: Análisis Operacional.....	36
2.3.1 Análisis de variables operacionales	36
2.4 Fase 4: Alternativas para disminuir la pérdida de transferencia de calor en el sistema de fondos de la FCC UOP II.	38
3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	39
3.1 Descripción del proceso	39
3.2 Secciones de la planta FCC UOP II	41
3.2.1 Sección sistema de carga:	42
3.2.2 Sección sistema de reacción:.....	42
3.2.3 Sección sistema de reacción:.....	42
3.2.4 Sección de enfriamiento de gases del regenerador:	43
3.2.5 Sección de fraccionamiento:	44
3.2.6 Sección sistema de fondos (Circuito de Slurry).....	44
3.2.7 Sección de compresión:	46
3.2.8 Sección de recuperación de vapores (VRU)	46
3.2.9 Sección de recuperación de Etano/Etileno (UREE):	47
3.3 El ensuciamiento y sus posibles causas.	47
3.4 Los asfaltenos	50
3.4.1 Asfaltenos: Definición, Formación y Caracterización	51
3.4.2 Precipitación de asfaltenos	52

4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
4.1	Análisis de las incrustaciones en los intercambiadores.....	54
4.1.1	Caracterización química de las incrustaciones de la muestra del 8 de abril de 2014.....	55
4.1.2	Caracterización química de las incrustaciones de la muestra del 8 de octubre de 2016.....	59
4.2	Evaluación del punto de corte slurry.....	63
4.3	Correlación de variables operacionales.....	70
4.3.1	Correlación de variables de transferencia de calor vs velocidad de flujo por los tubos de los intercambiadores de calor.....	71
4.3.2	Correlación de variables de transferencia de calor y °API en el slurry.....	81
4.3.3	Comportamiento entre nivel de la torre fraccionadora y la temperatura de fondo de la torre.....	83
4.4	CONDICIONES OPERACIONALES PROPUESTAS PARA MEJORAR LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SISTEMA DE FONDOS DE LA FCC UOP II	85
4.4.1	Variables asociadas al sistema de fondos de la torre fraccionadora.....	85
	Temperatura del fondo de la torre fraccionadora:	86
	Nivel de la torre fraccionadora:	86
	Velocidad en los tubos de los intercambiadores:	86
	Gravedad API (°API) del slurry:	87
	Cenizas en el slurry:	87
	Índice de Inestabilidad Coloidal (I.I.C):	87
4.5	ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN PARA MEJORAR LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LOS INTERCAMBIADORES DEL SISTEMA DE FONDOS DE LA FCC UOP II.....	88
4.5.1	Aumentar API en el slurry	88
4.5.1.1	Impacto económico por disminución de carga para limpieza de los E4204A/B ó E4205A/B.....	89
4.5.1.2	Beneficio económico de la propuesta de aumentar °API al Slurry	89
4.5.2	Aumentar velocidad de flujo por los tubos de los Intercambiadores de calor	90
4.5.2.1	Cálculo de la velocidad para el intercambiador E-4203A/B/C/D	91
4.5.2.2	Cálculo de la velocidad para el intercambiador E-4204A/B.....	92
4.5.2.3	Cálculo de la velocidad para el intercambiador E-4205A	92
4.5.2.4	Cálculo de la velocidad para el intercambiador E-4205B.....	93
4.5.2.5	Beneficio económico de la propuesta de aumentar la velocidad por los intercambiadores E4203A/B/C/D, E4204A/B y E4205A/B	93
4.5.3	Independizar los intercambiadores E4203A/B y E4203C/D	94

4.5.3.1 Simulación en PRO II.....	95
4.5.3.2 Impacto económico por parada de planta para limpieza de los E4203A/B/C/D.....	97
4.5.3.3 Impacto económico por disminución de carga para limpieza de los E4203A/B ó E4203C/D	98
4.5.3.4 Beneficio económico de la propuesta de independizar los E4203A/B/C/D	98
4.5.4 Tratamiento químico para el tren de slurry	99
4.5.4.1 Prueba de dispersión	100
4.5.4.2 Objetivos del Tratamiento	101
4.5.4.3 Tratamiento Químico Propuesto	101
4.5.4.4 Beneficios del Tratamiento	102
4.5.4.5 Beneficio económico	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
BIBLIOGRAFÍA.....	108
ANEXOS.....	110

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Obstrucción de tubos de intercambiadores.....	28
Figura 2. Etapas de la metodología.	33
Figura 3. Diagrama de cargas y productos UOP II.....	41
Figura 4. Diagrama de flujo de proceso FCC UOP II	41
Figura 5. Esquema típico de separación de hidrocarburos en fracciones SARA [17].....	51
Figura 6. Estructura molecular hipotética de los asfaltenos. a) Forma de archipiélago. b) Forma de isla [20].....	52
Figura 7. Aspecto de la Muestra recibida (SID 200976969).....	55
Figura 8. Perfil IR de la muestra sólida identificada como Coque Fondos UOP II	57
Figura 9. Micrografía 1. Detalle de partícula	61
Figura 10. Micrografía 2. Ampliación micrografía 1	61
Figura 11. Cambio en la °API del Slurry – APC de la FCC UOP II	65
Figura 12. Cambio en los saturados del Slurry – APC de la FCC UOP II	66
Figura 13. Cambio en los saturados del Slurry – APC de la FCC UOP II	66
Figura 14. Cambio en los aromáticos del Slurry – APC de la FCC UOP II	66
Figura 15. Cambio en los aromáticos del Slurry – ALC de la FCC UOP II.....	67
Figura 16. Cambio en las resinas del Slurry – APC de la FCC UOP II	67
Figura 17. Cambio en las resinas del Slurry – ALC de la FCC UOP II.....	67
Figura 18. Cambio en los asfaltenos del Slurry – APC de la FCC UOP II.....	68
Figura 19. Cambio en los asfaltenos del Slurry – ALC de la FCC UOP II.....	68
Figura 20. Cambio en (Satu+Asfa)/(Resi+Arom) del Slurry – APC de la FCC	68

Figura 21. Cambio en (Satu+Asfa)/(Resi+Arom) del Slurry – ALC de la FCC UOP II.....	69
Figura 22. Cambio en el IIC Slurry vs la °API del Slurry de la FCC UOP II.....	69
Figura 23. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y la velocidad de flujo por los tubos en el intercambiador de calor E4205A para el año 2010.....	74
Figura 24. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y la velocidad de flujo por los tubos en el intercambiador de calor E4205A para el año 2011.....	75
Figura 25. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y la velocidad de flujo por los tubos en el intercambiador de calor E4205A para el año 2014.....	75
Figura 26. Evolución en el tiempo para la transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205A para el año 2010 y 2011.....	75
Figura 27. Evolución en el tiempo para el coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205A para el año 2010 y 2011.....	76
Figura 28. Evolución en el tiempo para la transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205A para el año 2014.....	76
Figura 29. Evolución en el tiempo para el coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205A para el año 2014.....	76
Figura 30. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y la velocidad de flujo por los tubos en el intercambiador de calor E4205B para el año 2010.....	77
Figura 31. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y la velocidad de flujo por los tubos en el intercambiador de calor E4205B para el año 2011.....	78
Figura 32. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y la velocidad de flujo por los tubos en el intercambiador de calor E4205B para el año 2014.....	78
Figura 33. Evolución en el tiempo para la transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205B para el año 2010 y 2011.....	79
Figura 34. Evolución en el tiempo para el coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205B para el año 2010 y 2011.....	80

Figura 35. Evolución en el tiempo para la transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205B para el año 2014.	80
Figura 36. Evolución en el tiempo para el coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205B para el año 2014.	80
Figura 37. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y °API en el intercambiador de calor E4205A para el año 2010.....	82
Figura 38. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y °API en el intercambiador de calor E4205A para el año 2011.....	82
Figura 39. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y °API en el intercambiador de calor E4205A para el año 2014.....	82
Figura 40. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales nivel de la torre fraccionadora y la temperatura de fondo de la torre para el año 2010	84
Figura 41. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales nivel de la torre fraccionadora y la temperatura de fondo de la torre para el año 2011	85
Figura 42. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales nivel de la torre fraccionadora y la temperatura de fondo de la torre para el año 2014	85
Figura 43. Pruebas de dispersión del slurry	100

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos del lado tubos de los intercambiadores	26
Tabla 2. Distribución de la carga de diseño de la FCC UOP II	39
Tabla 3. Distribución de productos por diseño de la FCC UOP II	39
Tabla 4. Categorías del ensuciamiento	48
Tabla 5. Identificación de la muestra recibida	55
Tabla 6. Resultado de la extracción realizada a la muestra sólida, Coque Fondos UOP II	57
Tabla 7. Resultado del análisis SARA realizado a la fracción orgánica.....	58
Tabla 8. Resultado del análisis semicuantitativo de la fracción inorgánica, Coque Fondos UOP II	58
Tabla 9. Identificación de la muestra recibida	59
Tabla 10. Resultado de la extracción realizada a la muestra sólida, Coque Fondos UOP II	60
Tabla 11. Resultado del análisis SARA realizado a la fracción orgánica, Coque UOP 2	60
Tabla 12. Composición química de componentes mayoritarios del catalizador de equilibrio.	62
Tabla 13. Distribución de tamaño de partícula de catalizador	63
Tabla 14. Análisis de corriente de slurry, APC y ALC de la FCC UOP II	64
Tabla 15. Análisis de mezclas de corriente de slurry y APC de la FCC UOP II	64
Tabla 16. Análisis de corriente de slurry y ALC de la FCC UOP II	65
Tabla 17. Simulación de los E4203 A/B con flujo de slurry de 3690 BPD	95
Tabla 18. Simulación de los E4203 A/B/C/D con flujo de slurry de 3690 BPD	96
Tabla 19. Resumen de la prueba de dispersión del slurry	100

LISTA DE DIAGRAMAS

	Pág.
Diagrama 1. Sección de carga en la unidad de cracking catalítico	42
Diagrama 2. Reactor de la FCC UOP II	43
Diagrama 3. Caldera de la FCC UOP II	44
Diagrama 4. Torre fraccionadora principal en la FCC UOP II	45
Diagrama 5. Sistema de fondos de la fraccionadora principal en la FCC UOP II..	46
Diagrama 6. Clasificación del ensuciamiento según Hunt et al. [9].....	48
Diagrama 7. Esquema de los E4203 A/B/C/D de diseño vs propuesta de cambio.	94
Diagrama 8. Puntos de inyección de dispersante en el sistema de fondos de la FCC UOP II.....	101

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Principales licenciadores de unidades FCC en el mundo.....	110
Anexo B. Carga a la unidad Cracking UOP II	110
Anexo C. Normas técnicas usadas en análisis número 200976969.	113
Anexo D. Descripción de la norma utilizada en la realización del espectro FT-IR	113
Anexo E. Resultados análisis TGA del slurry de UOP II (ID 101224082)	114
Anexo F. Normas técnicas usadas en análisis número 201094170.....	116
Anexo G. Aspectos metodológicos bajo los cuales se realizó el análisis de la muestra 201094170.	116
Anexo H. Correlación entre la velocidad de flujo del intercambiador E4205A y la transferencia de calor para el periodo 2010.....	117
Anexo I. Correlación entre la velocidad de flujo del intercambiador E4205A y la transferencia de calor para el periodo 2011.....	121
Anexo J. Correlación entre la velocidad de flujo del intercambiador E4205A y la transferencia de calor para el periodo 2014.....	126
Anexo K. Correlación entre la velocidad de flujo del intercambiador E4205B y la transferencia de calor para el periodo 2010.....	131
Anexo L. Correlación entre la velocidad de flujo del intercambiador E4205B y la transferencia de calor para el periodo 2011.....	135
Anexo M. Correlación entre la velocidad de flujo del intercambiador E4205B y la transferencia de calor para el periodo 2014.....	140
Anexo N. Correlación entre la °API del slurry y la transferencia de calor por el intercambiador E4205 para el periodo 2010.	145
Anexo O. Correlación entre la °API del slurry y la transferencia de calor por el intercambiador E4205 para el periodo 2011.	149

Anexo P. Correlación entre la °API del slurry y la transferencia de calor por el intercambiador E4205 para el periodo 2014.	153
Anexo Q. Cálculo de la densidad en función de la temperatura en la corriente de slurry de la FCC UOP II	157
Anexo R. Simulación de los E4203 A/B con flujo de slurry de 3690 BPD	158
Anexo S. Simulación de los E4203 A/B/C/D con flujo de slurry de 3690 BPD	160

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO TÉCNICO PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO OPERACIONAL DEL SISTEMA DE FONDOS DE LA FRACCIONADORA PRINCIPAL DE LA CRACKING UOP II DE LA GERENCIA REFINERÍA BARRANCABERMEJA*

AUTOR: JAUREGUI BALLESTEROS MURCIA**

PALABRAS CLAVE: Sistema de fondos, slurry, proceso FCC, ensuciamiento, precipitación de asfaltenos, arrastre de catalizador, cenizas, ALC, APC, coque, transferencia de calor.

DESCRIPCIÓN

En la unidad de Cracking Catalítico Fluidizado – FCC UOP II de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja - Ecopetrol S.A. se presentaron problemas de pérdida de transferencia de calor en los intercambiadores del sistema de fondos por el lado de los tubos debido a formación de coque con composición de material orgánico e inorgánico. Por tal motivo se recurre a implementar metodologías de análisis de diseño, calidad de cargas y condiciones operacionales. Asimismo, variables importantes como temperatura, velocidad de flujo y volumen de carga a cracking se controlan para mitigar los niveles de ensuciamiento y taponamiento. En adición se ha recurrido a disminuir el rendimiento de aceite liviano de ciclo ALC para que el exceso rebose hacia el fondo de la torre disminuyendo la viscosidad del Slurry circulante, disminuyendo así, la resistencia a fluir y por consiguiente mejorar el desempeño de los intercambiadores de calor.

En este documento se presentan los resultados de un estudio técnico que se dividió en 3 focos fundamentales: análisis de la composición química de las incrustaciones encontradas en los intercambiadores, análisis de las variables operacionales y análisis de mezclas de slurry con ALC y APC para incrementar °API sin afectar el Índice de Inestabilidad Coloidal; lo cual permitió identificar las posibles causas del ensuciamiento en el sistema de fondos.

A partir de dichas causas, este estudio también genera diferentes tipos de recomendaciones orientadas a la solución del problema del sistema de fondos de la UOP II, los cuales pueden ser extendidos a las otras unidades de Cracking Catalítico de la refinería.

* Tesis de Maestría

** Facultad de Ingenierías Físico - Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Hernando Guerrero Amaya, Ingeniero Químico. Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL STUDY TO IMPROVE THE OPERATING PERFORMANCE OF THE BOTTOMS MAIN TOWER SYSTEM FROM THE CRACKING UOP II MANAGEMENT REFINERY IN BARRANCABERMEJA*

AUTHOR: JAUREGUI BALLESTEROS MURCIA**

KEY WORDS: System, bottom, slurry, FCC process, fouling, precipitation of asphaltenes, catalyst carry over, ashes, ALC, APC, coke, heat transfer.

CONTENTS:

In the Fluidized Catalytic Cracking unit - FCC UOP II of Management Refinery in Barrancabermeja-Ecopetrol S.A. Problems of loss of heat transfer were presented in the bottoms exchangers system inside the tubes due to coke formation with composition of organic and inorganic material. For this reason, it is required to implement design analysis methodologies, quality feeds and operating conditions. Important variables such as temperature, flow rate and volume feed to cracking are also controlled to mitigate fouling and plugging levels. In addition, it has been required to decrease the performance of light oil cycle (LAC) so that the excess overflows to the bottom of the tower lowering the viscosity of the circulating slurry and thereby reducing the resistance to flow improving the performance of exchangers heat.

In this document, the results of a technical study has been divided into 3 main focus and are presented as follows: Chemical composition analysis of the found scales inside the exchangers, analysis of operational variables and analysis of slurry mixtures with ALC and APC to increase API without affecting the Instability Colloidal Index identifying the possible causes of fouling in the bottoms system.

From these causes, this study also generates different types of recommendations aimed at solving the problem of bottoms UOP II system and can be extended to other Refinery Catalytic Cracking units.

* Master Thesis.

** Physicochemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director: Hernando Guerrero Amaya, Chemical Engineer. Ph.D.

GLOSARIO

Análisis SARA: es un análisis fisicoquímico que se realiza a los hidrocarburos, para cuantificar la proporción de los componentes saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos presentes, expresándolos como porcentaje en peso. Consiste en el fraccionamiento de la muestra para separar los asfaltenos por medio de precipitación al agregar un hidrocarburo de bajo peso molecular (n-pentano o n-heptano), obteniéndose dos fracciones; a la fracción insoluble se le denomina asfaltenos y a la soluble máltenos; estos últimos que a su vez, pueden separarse en saturados, aromáticos y resinas sobre una columna empacada con adsorbentes de sílice/alúmina/arcilla.

Asfaltenos: son fracciones de hidrocarburos similares a las resinas, pero de mayor peso molecular (500-2000 g/mol) y estructuras más compactas (clústeres), se considera como la fracción de la carga o crudo que son insolubles en parafinas livianas como pentano, hexano y heptano y solubles en solvente aromático como tolueno (ó benceno). Los asfaltenos se caracterizan por estar formados de sistemas poli aromáticos (PNA) condensados con altas concentraciones de heteroátomos (O, S, N) y compuesto organometálicos (Ni, V, Fe). Los tamaños moleculares de los asfaltenos según los investigadores están en el rango entre 12-24 Å, lo que significa que difícilmente pueden entrar a los poros de la zeolita (7-8 Å).

Aromáticos: son fracciones de hidrocarburos que contienen uno o más anillos aromáticos, estos anillos pueden estar conectados con anillos nafténicos y/o cadenas laterales parafínicas. Los aromáticos se clasifican como Mono, Di, Tri, Tetra, según el número de anillos bencénicos condensados en la estructura. Los aromáticos son hidrocarburos polares y los de alto peso molecular se van a encontrar en las resinas y asfaltenos. Sus pesos moleculares están comprendidos entre 1000 y 50000 g/mol.

Catalizador de equilibrio: es el catalizador que está circulando entre el reactor y el regenerador, que ya ha tenido reacción de craqueo y tiene menor actividad que el catalizador fresco.

Coefficiente de correlación de Pearson: En estadística, el coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables. De manera menos formal, podemos definir el coeficiente de correlación de Pearson como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas.

Coefficiente global de transferencia U: Se define como la intensidad total de transferencia de calor a través de un material.

Compatibilidad: en una mezcla de hidrocarburos, como sería las cargas combinadas (GAO+CR/GAO+DMOH/GAO+DMO) a las FCC según los expertos, se define como el grado en la cual dos o más corrientes de hidrocarburos (cargas individuales) se pueden mezclar sin formar una mezcla inestable.

Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC): es un proceso que convierte las fracciones pesadas del crudo en fracciones ligeras, más valiosas. Este proceso se lleva a cabo a temperatura elevada y presión moderada en presencia de un catalizador finamente dividido a base de sílice/alúmina, el cual se comporta como un fluido cuando se inyecta aire o vapor.

Diagrama PFD: es el diagrama de una planta que muestra el flujo del proceso mediante sus tuberías principales con sus respectivos equipos, acompañado de una tabla de información sobre características básicas de los equipos (dimensiones, presión, temperatura, etc.), así como características de los flujos como caudal, temperatura y presión.

Diagrama P&ID: es el diagrama de una planta que muestra el flujo del proceso con sus respectivos equipos, las tuberías e instrumentación de medición y control, con sus líneas de transmisión y símbolos, definiendo si es control remoto o local.

Data sheet: es la hoja de especificaciones de los equipos de la planta, la cual debe contener las características principales del equipo, incluyendo su función, material de construcción, dimensiones, características especiales de operación y mantenimiento, así como también las características de operación y propiedades fisicoquímicas del fluido a transportar.

Duty: La transferencia de calor es el proceso de propagación del calor en distintos medios. La parte de la física que estudia estos procesos se llama a su vez Transferencia de calor o Transmisión de calor. La transferencia de calor se produce siempre que existe un gradiente térmico o cuando dos sistemas con diferentes temperaturas se ponen en contacto.

Estabilidad: en una mezcla de hidrocarburos (de dos o más cargas), es la resistencia a la formación de material insoluble a partir de la misma mezcla que se caracteriza con el fenómeno de precipitación de los asfaltenos.

Gravedad específica (°API): es una medida de la densidad de un hidrocarburo, para describir qué tan pesado o liviano es un aceite comparado con el agua o con las mismas fracciones extraídas del petróleo.

Guía de control (GC): le describe al operador los parámetros de las variables críticas de control de la unidad, guiándolo hacia el control dentro de los valores admisibles para lograr una operación segura, confiable y eficiente. Se entiende como guía de control baja (GCL) y guía de control alta (GCH).

Índice de Inestabilidad Coloidal (IIC): permite comprender la interacción entre los componentes SARA y la formación de coque por inestabilidad de un hidrocarburo. Los índices de estabilidad coloidal descrito por Yen en 2001 [1], pronostica la estabilidad por medio de las relaciones resinas/asfaltenos. Se calcula con base a las fracciones SARA del petróleo por medio de la siguiente relación:

$$IIC = \frac{\text{Saturados (\%wt)} + \text{Asfáltenos (\%wt)}}{\text{Aromáticos (\%wt)} + \text{Resinas (\%wt)}}$$

Esta relación representa una medida de la Inestabilidad de las cargas individuales o de mezclas de las a cargas. Cuando el índice de estabilidad coloidal CII es menor que 0.7, los asfaltenos se encuentran estables en el petróleo, si la relación es mayor a 0.9, los asfaltenos se encuentran inestables. Un aumento en la concentración de los componentes saturados + asfaltenos y una disminución en la concentración de los componentes aromáticos + resinas, aumenta la inestabilidad de los asfaltenos en la solución.

Información de plantas (PI): es un sistema de información de las variables operativas y de calidad de las unidades mediante un acceso rápido, preciso y en tiempo real de la operación de la planta para el personal de operaciones, supervisión, ingeniería y gerencia.

Plano isométrico: es un plano realizado en perspectiva axonométrica – isométrica con proyecciones a 30 ° de cada una de las direcciones ortogonales y con las tuberías verticales sin cambio. Incluye entre otra información, el nombre de la tubería, su diámetro y longitud.

Saturados: son fracciones de hidrocarburos no-polares del tipo Parafinas y Cicloparafinas o Naftenos (de uno o más anillos), con cadenas largas y ramificadas, sin anillos en su estructura. Los Saturados son las fracciones más livianas de la Carga, con estructuras moleculares más ricas en Hidrógeno, responsables por los altos rendimientos de Gasolina, GLP (Olefinas) en FCC. Su peso molecular está comprendido entre 300 y 2000 g/mol.

Resinas: son fracciones de hidrocarburos compuestos de moléculas polares y a veces contienen heteroátomos como son Nitrógeno, Oxígeno y Azufre. Las Resinas son solubles en parafinas livianas (n-C5 y n-C7). Las Resinas tiene alta relación H/C (1,2-1,7) en comparación con los asfaltenos (0.9-1.2), con estructura similar a los asfaltenos, pero de menor Peso Molecular (< 1000 g/mol). Las Resinas + Aromáticos son promotores de la estabilidad de los Asfaltenos, porque los mantienen en "solución". La fracción soluble del aceite se denomina MALTENOS, compuesta por saturados, aromáticos y resinas, que se separan en una columna de cromatografía, durante la técnica analítica del análisis SARA.

Slop: Mezcla de hidrocarburos líquidos que se generan como residuo en cada planta de proceso por drenado de equipos, toma de muestras, que son colectadas y almacenadas en tanques para ser suministrada a Cracking como carga.

Slurry: es un líquido con partículas sólidas en suspensión, caracterizado por ser un fluido muy pesado conformado por moléculas de carácter aromático.

URCs: Unidades de Rompimiento Catalítico.

Ventana operativa (VO): describe los parámetros de las variables críticas de control de la unidad, que no deben ser excedidos porque podrían ocasionar incidentes con o sin consecuencias. Las consecuencias podrían conducir a apagadas súbitas de equipos, paradas de planta, daños catastróficos y en general, impacto significativo en el desempeño de las áreas de proceso y HSE. Se entiende como ventana operativa baja (VOL) y ventana operativa alta (VOH).

Zeolita (catalizador): es un polvo fino y poroso formado por micro esferas compuesto por óxidos de silicio y aluminio y de otros elementos como sodio y tierras raras. Se caracteriza por su fuerte carácter ácido y su comportamiento fluido cuando se airea. Es utilizada en el proceso de craqueo de las fracciones pesadas de hidrocarburos y su formulación depende del objetivo de producción (mayor rendimiento a productos livianos o productos pesados).

INTRODUCCIÓN

La Gerencia General Refinería de Barrancabermeja (GRB) de ECOPETROL S.A., es la refinería más grande que tiene Colombia, con una capacidad instalada de 250.000 barriles de crudo por día (BPD). Su carga está compuesta por crudos de diversas calidades para producir diferentes tipos de productos requeridos por el mercado nacional tales como gasolina, diésel, jet, bases lubricantes, parafinas, aromáticos, polietileno, Gas Licuado del Petróleo (GLP), asfaltos, Azufre Petroquímico, entre otros. Actualmente es una de las cinco principales petroleras de Latinoamérica y pertenece al grupo de las 39 más importantes en el mundo [\[2\]](#).

La refinería tiene cuatro unidades de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC), encargadas de procesar cargas pesadas para obtener naftas para la producción de gasolinas, destilados (Aceite Liviano de Ciclo - ALC) para maximizar diésel de bajo azufre y olefinas (Etileno hacia Polietileno y Propileno hacia Polipropileno), fracción i-C4 y olefinas C4 como carga para la unidad de Alquilación y GLP para el uso doméstico.

El Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC), es un proceso de ruptura catalítica (Catalytic Cracking) que convierte fracciones de hidrocarburos pesados en productos más livianos y de mayor valor comercial, empleando un catalizador en forma de partículas esféricas a base de sílice/alúmina (zeolita). En la zona de reacción, el catalizador es puesto en contacto con la carga produciendo cortes de hidrocarburos (gases, GLP, gasolina, ALC y slurry) que son recuperados en la zona de fraccionamiento de la unidad. El proceso de cracking requiere convertir un porcentaje de la carga a coque para generar la energía necesaria que requiere el proceso. Aunque la eficiencia del proceso es alta, existen reacciones secundarias no deseadas que promueven la formación de coque, éste se deposita principalmente en la superficie del catalizador afectando su actividad, la cual se

restaura con la quema del coque en el regenerador. Por lo tanto, el proceso FCC contempla el transporte continuo y cíclico del catalizador entre el reactor y el regenerador a través de los bajantes de catalizador gastado y regenerado. El regenerador de la FCC UOP II trabaja en modo de combustión total permitiendo por un lado, el aporte de energía térmica al proceso y por otro lado, la reactivación del catalizador por la eliminación del coque formado, llevándolo a niveles de carbón sobre el catalizador regenerador (CRC por sus siglas en inglés) entre 0,02 – 0,05%peso. [\[2\]](#), [\[3\]](#).

Existen diversas empresas que comercializan licencias para uso autorizado de unidades FCC en el mundo (**Anexo A**), entre los principales se encuentra UOP (Universal Oil Products), quien vendió una licencia de uso a Ecopetrol, permitiéndole a éste la instalación y operación de estas unidades. La unidad FCC presente en la refinería de Barrancabermeja, diseño UOP II, procesa principalmente como carga fresca: gasóleo pesado de vacío (VGO), DMOH, Residuo atmosférico y DMO, para producir Aceite Liviano de Ciclo (ALC), una mezcla etano-etileno, un corte gasolina, Gas Licuado del Petróleo (GLP, conformado principalmente de butano y propano) y Slurry.

La FCC – UOP II tiene capacidad de carga de 35.000 BPD. El equipo principal para la separación de componentes del efluente del reactor es la fraccionadora principal, donde en el fondo quedan los compuestos más pesados (slurry) y en la cima los más livianos (gasolina liviana, GLP y gases) y lateralmente gasolina pesada y ALC. En el fondo de la fraccionadora existe un sistema intercambiadores para el retiro de aproximadamente el 30% del total del calor del efluente que viene del reactor (985 – 995°F). Desde que se arrancó la FCC UOP II en 1995 la refinería tenía un esquema operacional favorable por la presencia del crudo Cusiana que en 1995 inicio producción comercial hasta mediados de 2003 cuando empezó a decaer la producción.

Desde 2003 se ha venido observando que el sistema de fondo viene perdiendo con más frecuencia la eficiencia en el retiro de calor e incrementando los tiempos de mantenimiento. Actualmente no se logra el retiro del 30% del calor del sistema de fondos de la fraccionadora por pérdida acelerada de eficiencia en los intercambiadores de calor. En consecuencia, por incremento en la caída de presión en cada intercambiador y con ello su disminución en velocidad de flujo, se refleja en menor retiro de calor; esta anomalía afecta el control de nivel de la torre fraccionadora, la cual conlleva a alta temperatura del sistema, (mayor a 680°F) condiciones que favorecen la formación de coque por mayor tiempo de residencia del slurry y precipitación de asfaltenos en el sistema.

En el proceso de mantenimiento establecido para los intercambiadores del sistema de fondos se ha encontrado en los tubos material depositado con características de carbón de diferentes tamaños y formas, que obstruyen el ingreso de flujo por algunos tubos. Una vez realizado el mantenimiento a los intercambiadores, la planta retorna a su operación normal, llevando la carga a sus valores de diseño, manteniendo condiciones estables de temperatura y nivel en la fraccionadora principal, pero la pérdida de transferencia de calor se vuelve a presentar lentamente en el tiempo afectando el factor de servicio de la FCC. Dentro de las posibles causas del ensuciamiento de los intercambiadores de calor del sistema de fondos de la fraccionadora principal se atribuye al arrastre de catalizador desde el reactor, calidad de la carga a cracking y composición del slurry circulante.

Por tanto, el sistema de fondos de la FCC UOP II presenta de forma recurrente pérdida de velocidad de flujo por los intercambiadores de calor E4202A/B, E4203A/B/C/D, E4204A/B y E4205A/B, los cuales tienen condiciones de diseño descritos en la **Tabla 1**.

Esta condición ocasiona que se incremente el nivel de fondo de la torre fraccionadora T4201 y la temperatura del slurry circulante favoreciendo la formación de carbón por alta temperatura y mayor tiempo de residencia del slurry

en el sistema. La condición de aumento de temperatura y aumento de nivel en el fondo de la fraccionadora principal T4201 genera disminución en la carga a la unidad de FCC para mantener las variables dentro de rangos seguros de operación que no afecten la estabilidad y la integridad del proceso. La disminución de carga a la FCC tiene impacto directo sobre el margen de la refinería, por lo cual es una situación no deseada.

Tabla 1. Datos del lado tubos de los intercambiadores

DATOS DE LOS INTERCAMBIADORES - LADO TUBOS				
Variab les	Unidades	E4203 A/B/C/D	E4204 A/B	E4205 A/B
Temperatura de operación	°C	265	360	360
	°F	500	680	680
Presión de operación	Pa	528139	613634	612254
	psig	76,6	89	88.8
Caída de presión diseño	Pa	186159	137895	137895
	psig	27	20	20
Número de tubos	tubos	73	544	320
Transferencia de calor	kJ/s	1732,19	17380,55	10502.77
	MMBtu/h	5,91	59,3	35.84
Factor de ensuciamiento	m ² KW	0,0170	0,0198	0.0113
	pie ² .h.F/Btu	0,003	0,0035	0,002
Área por unidad	m ²	34,93	256,5	151.1
	pies ²	376	2761	1626
Diámetro externo del tubo	m	0.0254	0.0254	0.0254
	pulg.	1	1	1
Flujo total	kg/s	7,38	69,27	59.24
	lb/h	58546	549849	470200
Tipo de intercambiador		1 - 4	1 - 4	1 - 6
		cabezal flotante	cabezal flotante	Kettle

Fuente: Data Sheet de los intercambiadores

Los intercambiadores E4204 A/B y E4205 A/B se intervienen cada año para realizar limpieza mecánica, en el proceso de limpieza se ha encontrado en los tubos material depositado con características de carbón de diferentes tamaños y formas. Una vez realizado el mantenimiento a los intercambiadores, la planta retorna a su operación normal, llevando la carga a sus valores de diseño, manteniendo condiciones estables de temperatura y nivel en la fraccionadora principal T-4201.

Los intercambiadores E4203A/B/C/D tienen por diseño una caída de presión de 27 psig, pero al transcurrir el tiempo de corrida aumenta su diferencial de presión hasta valores de 70 psig, es decir 41 psig más a los 27 permitidos por diseño. La alta caída de presión por los E4203A/B/C/D disminuye el flujo disponible para la operación del sistema de bombeo P4202A/B que envía el slurry a tanque, generando afectación en la operación de la torre fraccionadora por alto nivel en el fondo.

Los cuatro intercambiadores E4203 A/B/C/D operan en serie para disminuir la temperatura del slurry de 500 a 350 °F y posteriormente con los E4202 A/B/C se disminuye la temperatura a 250 °F para enviar a almacenamiento. En la actualidad cada dos años se requiere sacar de servicio la FCC UOP II para realizar limpieza mecánica los intercambiadores E4203A/B/C/D.

Operacionalmente, se ha recurrido a disminuir el rendimiento de ALC para aumentar la °API del slurry. El ajuste consiste en sacar menor producción de ALC, dejando que el excedente rebose al fondo de la fraccionadora con lo cual se aumenta la gravedad °API del slurry. Al aumentar el °API se disminuye la viscosidad y se mejora la circulación del sistema de fondos. Adicionalmente se realiza un procedimiento de soplado con vapor en contracorriente a cada uno de los intercambiadores E4203 A/B/C/D, E4204 A o B y los E4205 A o B para retirar el posible carbón que se deposita en la entrada de los tubos y obstruye el paso del flujo, o para remover parte de lo que se deposita internamente en el tubo. Este

procedimiento se ejecutaba una vez por semana y es de alto riesgo para la operación de la FCC. La ejecución del procedimiento tiene un tiempo de ejecución aproximado de 3 minutos, durante este tiempo se debe sacar de servicio la bomba del sistema de fondos P4203 para bajar la presión al sistema y luego inyectar vapor de alta presión. La carga a la FCC se disminuye de 35.000 a 30.000 bpd durante la ejecución del procedimiento.

El problema de obstrucción se refleja en los intercambiadores de calor y en los filtros de las bombas generando limitación de carga máxima permitida por la unidad, lo que genera incumplimiento del programa de cargas, mayores costos de mantenimiento por limpieza mecánica de los intercambiadores de calor (lado tubos y casco) y de los filtros de las bombas, y disminución en la generación de vapor (Ver **Figura 1**).

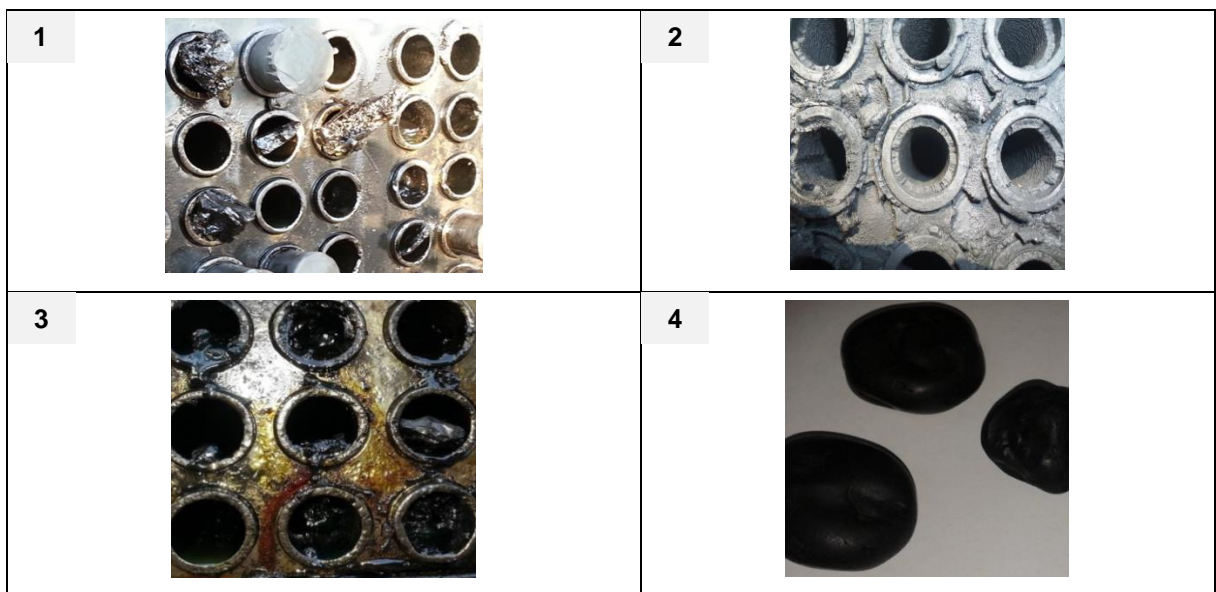


Figura 1. Obstrucción de tubos de intercambiadores.

(1) obstrucción en los tubos del intercambiador E4204A. (2) obstrucción encontrada en la pared de los tubos del intercambiador E4205A. (3) obstrucción con catalizador encontrado en los tubos del intercambiador E4204B. (4) obstrucción encontrada en la succión de la bomba principal P4203A durante la limpieza del filtro de succión.

El problema de pérdida de transferencia de calor en los intercambiadores del sistema de fondos de la FCC UOP II afecta de forma continua la operación de la

unidad y tiene impacto directo sobre la economía de la refinería de la siguiente manera:

- Disminución en el flujo volumétrico de carga a la unidad de 8 KBPD respecto a la de diseño; incumpliendo el programa de cargas (ver **Anexo B**).
- Aumento del costo de caja por un aumento en el mantenimiento por limpieza mecánica de los intercambiadores de calor y los filtros de las bombas cerca de 0,5 millones de dólares por año (MU\$/año); afectando el margen de refinación.
- Los intercambiadores E4204A/B y los E4205A/B se les realiza limpieza mecánica una vez por año para recuperar su transferencia de calor, siendo necesario bajar carga a la FCC para sacar de servicio un intercambiador. Cada intercambiador dura 6 días fuera de servicio para su intervención de limpieza y puesta en servicio.
- Los intercambiadores E4203A/B/C/D no tienen facilidad de sacarlos de servicio sin sacar de servicio la FCC, para realizar limpieza mecánica cuando pierden transferencia de calor es necesario sacar de servicio la FCC UOP II.

Desde el año 2010 se viene trabajando en conjunto Ingeniería de proceso de la Gerencia Refinería Barrancabermeja y el Instituto Colombiano del petróleo – ICP en busca de identificar las causas y las condiciones de mejora en la operación del sistema de fondos de las unidades FCC de la Refinería. Para ello se han realizado análisis de laboratorio especializado para identificar el grado de estabilidad de cada corriente de acuerdo a sus componentes. Asimismo, en el año 2014 hizo parte de este equipo de trabajo el estudiante en práctica industrial de la Universidad Industrial de Santander (UIS) Luis Fernando Carvajal Gualdrón. En el año 2015 el estudiante UIS Andrés Mauricio Santos realizó su proyecto de grado titulado “*Estudio del Efecto de la Composición de la Mezcla Slurry- Aceite Liviano de Ciclo en el Factor de Ensuciamiento de los Intercambiadores de Calor en el Proceso de Fraccionamiento Catalítico*”, en el cual se analizó el impacto en el

factor de ensuciamiento del sistema de fondos de acuerdo a la mezcla slurry – ALC.

Dentro de este proceso se han adelantado importantes avances en la definición de recomendaciones para implementar en el proceso para mejorar el desempeño operacional del sistema de fondos de la Cracking UOP II, relacionadas a continuación:

- a. Para el año 2017 dentro del alcance de la parada general de la unidad se tiene programado cambiar el diseño de los tubos de los intercambiadores de calor E4202A/B, actualmente tiene tubos aleteados y cambiará por intercambiador de carcasa y tubo. El diseño de tubos aleteados no favorece el proceso por la presencia de finos y coque que lleva el slurry, obstruyéndose frecuentemente, siendo necesario realizar procedimientos de soplado con vapor con la planta en operación.
- b. Se adelanta ingeniería para cambiar el diseño del sistema de salida de slurry producto. El cambio consiste en que la bomba de slurry producto reciba el slurry directamente del fondo de la torre fraccionadora y no se tenga caída de presión por intercambiadores antes de la llegada del slurry a la succión de la bomba.
- c. Se evalúa con el licenciador UOP el diseño e instalación de un filtro en paralelo para la retención de coque/catalizador en la succión de bombas de fondos (P-4203 A/B) de igual forma como se tiene en la FCC Orthoflow.
- d. En proceso de compra de equipos en laboratorio de la Refinería para revisión periódica del análisis SARA, para asegurar estabilidad de contaminantes en la carga a craquear y la corriente de producto slurry.
- e. Para el año 2022 se tiene aprobado presupuesto para cambio del diseño de la terminación del reactor, se cambia de un reactor tipo venteado por un reactor cerrado tipo vórtice en el cual se disminuye el arrastre de catalizador hacia la torre fraccionadora.

En el desarrollo de esta tesis de maestría se realizó el análisis a muestras de sedimentos y material encontrado en los intercambiadores de calor, (por su morfología y características visuales se cree que es 100% carbón), análisis de la composición del slurry circulante y relación de variables operacionales con la pérdida de transferencia de calor en el sistema de fondos de la fraccionadora para: definir condiciones adecuadas de operación del sistema, propuestas de mejores prácticas que permitan tener estabilidad operacional de la FCC – UOP II, disminuir sus costos de mantenimiento por intervención en limpieza mecánica de intercambiadores y aumentar el factor de servicio de la FCC UOP II, para lograr operación de forma estable con carga de acuerdo al diseño de 35.000 BPD. La FCC UOP II tiene un margen de venta aproximado de 10.5 U\$/barril.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las condiciones operacionales del Sistema de Fondos de la Fraccionadora Principal de la Unidad de Ruptura Catalítica UOP II, que no inhiba la transferencia de calor en los intercambiadores.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los compuestos que forman las incrustaciones en los intercambiadores de calor de la fraccionadora principal de la FCC UOP II.
- Relacionar las condiciones de operación de la fraccionadora principal de la FCC UOP II con las variables de transferencia de calor.
- Proponer alternativas para reducir las pérdidas en la transferencia de calor en el sistema de fondos de la fraccionadora principal de FCC UOP II

2. METODOLOGÍA

El presente trabajo de profundización se desarrolló según las etapas presentadas en la **Figura 2**.



Figura 2. Etapas de la metodología.

2.1 Fase 1: Análisis Químico

Durante esta etapa se realizó análisis de caracterización de dos muestras de coque: una muestra tomada de los intercambiadores de calor y otra muestra tomada del filtro de la bomba principal del sistema de fondos de la torre fraccionadora.

2.1.1 Análisis de caracterización de muestra de coque

Para las muestras de coque se realizaron los siguientes análisis en el Instituto Colombiano del Petróleo - ICP:

- ✓ Pretratamiento de muestras sólidas por extracción söxhlet
- ✓ Análisis SARA
- ✓ Espectro FT-IR en muestra líquida y sólida
- ✓ Análisis semicuantitativo por espectrometría de fluorescencia de rayos x
- ✓ Micrografía

Las muestras de coque se recogieron en la FCC y se entregaron a funcionarios del ICP debidamente identificada como coque fondos UOP II en dos periodos distintos, una en el año 2014 y la otra en el 2015. En el ICP se realizaron los análisis de acuerdo a los procedimientos que se tienen definidos.

2.2 Fase 2: Análisis de mezclas de slurry, ALC y APC

Durante esta etapa se recolectaron muestras de slurry, ALC y APC para enviar al laboratorio de la refinería y para enviar al laboratorio del ICP. El objetivo fue realizar caracterización de cada una de las muestras y luego realizar mezclas entre slurry y ALC, luego slurry y APC para determinar su inestabilidad coloidal. Adicionalmente se envió una muestra de slurry a los laboratorios de la UIS para realizar análisis termogravimétrico.

2.2.1 Análisis de la corriente de slurry

Para la corriente de slurry producto se realizaron los siguientes análisis:

- ✓ Gravedad °API @ 15.6°C (ASTM D-287)*.
- ✓ Contenido de Cenizas, %peso (ASTM D-482)*.
- ✓ Destilación ASTM D-1160*.
- ✓ Análisis termogravimétrico (TGA)**.
- ✓ Análisis SARA (IP-143)***.

*La muestra de slurry se tomó en planta en una botella de vidrio de 500 mL y se envió al laboratorio industrial de la refinería identificada como muestra 4200-14, donde se realiza los análisis de gravedad API y Cenizas de acuerdo a los procedimientos que se tienen definidos para cada caso.

**Se envió una muestra de slurry de 500 mL para los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander donde se realizó análisis termogravimétrico (TGA), identificada como slurry de FCC UOP II.

***Se envió 3 muestras de 1000 mL para los laboratorios del ICP para realizar análisis SARA y mezcla con ALC y APC. La muestra se identificó como slurry de FCC UOP II.

2.2.2 Análisis de la corriente de ALC

Para la corriente de ALC producto se realizaron los siguientes análisis:

- ✓ Gravedad °API @ 15.6°C (ASTM D-287)*.

- ✓ Destilación ASTM D-86*.
- ✓ Análisis SARA (IP-143)**.

*La muestra de ALC se tomó en planta en una botella de vidrio de 500 mL y se envió al laboratorio industrial de la refinería identificada como muestra 4200-5, donde se realizó los análisis gravedad API y destilación de acuerdo a los procedimientos que se tienen definidos para cada caso.

**Se envió 3 muestras de 1000 mL para los laboratorios del ICP para realizar análisis SARA y mezcla con slurry y APC. La muestra se identificó como ALC de FCC UOP II.

2.2.3 Análisis de la corriente de APC

Para la corriente de APC producto se realizaron los siguientes análisis:

- ✓ Gravedad °API @ 15.6°C (ASTM D-287)*.
- ✓ Destilación ASTM D-86*.
- ✓ Análisis SARA (IP-143)**.

*La muestra de APC se tomó en planta en una botella de vidrio de 500 mL y se envió al laboratorio industrial de la refinería identificada como muestra 4200-4, donde se realizaron los análisis de acuerdo a los procedimientos que se tienen definidos para cada caso.

**Se envió 3 muestras de 1000 mL para los laboratorios del ICP para realizar análisis SARA y mezcla con ALC y slurry. La muestra se identificó como APC de FCC UOP II.

Se realizó cálculo de inestabilidad coloidal (IIC) de la corriente de slurry al mezclarlo con ALC, (80% de slurry y 20% de ALC), para identificar el cambio de los porcentajes en peso de asfaltenos, saturados, resinas y aromáticos en el slurry. La mezcla se fue variando al aumentar de 20% en 20% el ALC en slurry para tener datos del cambio. De igual forma se realizó la mezcla de slurry con

APC. En cada cambio de porcentaje de mezcla se realiza el cálculo del IIC para evaluar la estabilidad del slurry.

2.3 Fase 3: Análisis Operacional

Es fundamental la operación de los sistemas dentro de los parámetros definidos de acuerdo a los estudios de integridad de las unidades de proceso en función de los datos de diseño para la estabilidad de la operación en el tiempo. En esta sección se realizó el análisis de variables operacionales en función de la pérdida de transferencia de calor de los intercambiadores del sistema de fondo de la torre fraccionadora de la FCC UOP II.

2.3.1 Análisis de variables operacionales

Esta etapa consiste en tomar información histórica de los años 2010, 2011 y 2014 de las siguientes variables de proceso:

- ✓ Temperatura del fondo de la torre fraccionadora.
- ✓ Nivel del fondo de la torre fraccionadora.
- ✓ Flujos por los intercambiadores E4205A/B.
- ✓ Velocidad de flujo por los tubos de los intercambiadores E4205A/B.
- ✓ Contenido de cenizas en el catalizador.
- ✓ Gravedad API del slurry.
- ✓ Transferencia de calor por los tubos de los intercambiadores E4205A/B
- ✓ Flujo de carga a cracking

Además se realizó análisis de tendencias y se identificó su correlación entre los cambios de las diferentes variables operacionales. Ecopetrol tiene una plataforma de información de planta (PI), la cual funciona como un complemento de Excel, desde esta plataforma se extrajo la información para el análisis. Se tomaron tres periodos de tiempo con lo cual se construyeron gráficas de control para analizar su comportamiento en el tiempo.

Para la correlación de variables se utilizó el método de coeficiente de correlación de Pearson, el cual es un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas.

Descripción del método de correlación de Pearson

Nombre de variable	Fórmula
Variables:	x, y
Calculamos las medias de x	$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$
Calculamos las medias de y	$\bar{y} = \frac{\sum y}{n}$
Calculamos al diferencia de x menos la media de x	$(x-\bar{x})$
Calculamos al diferencia de y menos la media de y	$(y-\bar{y})$
Elevamos al cuadrado (la diferencia de x y su media)	$(x-\bar{x})^2$
Elevamos al cuadrado (la diferencia de y y su media)	$(y-\bar{y})^2$
Multiplicamos (la diferencia de x menos la media de x) por (la diferencia de y menos la media de y)	$(x-\bar{x})(y-\bar{y})$
Sumamos todos los valores de (la diferencia de x y su media) elevados al cuadrado	$\sum(x-\bar{x})^2$
Sumamos todos los valores de (la diferencia de y y su media) elevados al cuadrado	$\sum(y-\bar{y})^2$
Multiplicamos (la diferencia de x menos la media de x) por (la diferencia de y menos la media de y)	$\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})$
Calculamos r	$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2}\sqrt{\sum(y-\bar{y})^2}}$

El valor del índice de correlación varía en el intervalo $-1,1$:

- ✓ Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
- ✓ Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva.
- ✓ Si $r = 0$, no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.
- ✓ Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.
- ✓ Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante.

2.4 Fase 4: Alternativas para disminuir la pérdida de transferencia de calor en el sistema de fondos de la FCC UOP II.

Producto del estudio de cada uno de los factores analizados, tales como: composición de los fragmentos de coque, calidad del slurry circulante, correlación de las condiciones operacionales, se plantearon propuestas para implementar y con ello disminuir la pérdida de transferencia de calor en los intercambiadores de calor.

3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

3.1 Descripción del proceso

La Unidad de Ruptura Catalítica FCC – UOP II, organizacionalmente adscrita al Departamento Cracking II (Ecopetrol Refinería de Barrancabermeja), tiene una capacidad de carga de 35.000 Barriles por día (BPD) (ver **Tabla 2**) y rendimientos de productos de acuerdo al diseño (ver **Tabla 3**).

Tabla 2. Distribución de la carga de diseño de la FCC UOP II

CARGA DE DISEÑO URC UOP II		
Corriente	BPD	%V
GAO (Gasóleo)	22.000	63%
DMOH (Aceite demetalizado hidrogenado)	8.000	23%
DMO (Aceite demetalizado)	5.000	14%
Total	35.000	

Fuente: Manual de diseño de la unidad [4]

Tabla 3. Distribución de productos por diseño de la FCC UOP II

RENDIMIENTOS DE PRODUCTOS EN LA URC UOP II		
Corriente	BPD	%V
GLP (Gas Licuado del Petróleo)	8750	25%
GASOLINA (Destilación C5 a 450°F).	17850	51%
ALC (Aceite Liviano de Ciclo, Destilación 450°F a 650°F)	5950	17%
SLURRY (Producto más pesado)	3500	10%

Fuente: Manual de diseño de la unidad [4]

Los procesos de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC, *Fluid Catalytic Cracking*), son el corazón de las refinerías modernas, siendo un proceso de ruptura catalítica para la conversión de fracciones pesadas de hidrocarburos en productos más livianos y de mayor valor comercial.

El FCC emplea un catalizador en forma de partículas esféricas a base de sílice/alúmina (zeolita). En la zona de reacción, el catalizador es puesto en contacto con la carga produciendo cortes de hidrocarburos más ligeros que son recuperados en la zona de separación de la unidad. El proceso de FCC contempla el transporte continuo y cíclico del catalizador entre el reactor y una zona de regeneración. En esta última se realiza la combustión del coque permitiendo por un lado, el aporte de energía térmica al proceso y por otro lado, la regeneración del catalizador por eliminación del coque formado [\[3\]](#), [\[4\]](#).

La planta FCC diseño UOP II del complejo Refinería Barrancabermeja procesa como materia prima Gasóleo proveniente del proceso de refinación de crudos y el DMO y DMOH de refinación de fondos. De igual forma tiene capacidad instalada para recibir como carga butanos líquidos del área de refinación, slop, gases del área de refinación, gases de las FCC Modelo IV y Orthoflow. (Ver **Figura 3**).

Las corrientes de producto de la FCC UOP II son:

- **Gas combustible:** es la corriente conocida como gases de cola. Antes de ser enviados a gas combustible se realiza tratamiento y fraccionamiento para recuperar el Etano – Etileno. Este es enviado a la unidad de recuperación de Etano-Etileno para que el Etileno posteriormente se utilice como materia prima para la producción de polietileno.
- **GLP:** es la corriente de gases más pesados, su composición principal es propano-propileno y butano-butilenos. El propano-propileno se envía como materia prima para *Esenttia* para la producción de polipropileno. El butano-butileno es enviado una parte como carga a la planta de alquilación y el restante para almacenamiento de la refinería.
- **Gasolina:** es obtenida del proceso de craqueo catalítico con el catalizador zeolítico. Normalmente se le conoce como nafta craqueada.
- **ALC:** se obtiene de la parte intermedia de la torre fraccionadora. Una parte de la corriente se utiliza para preparación de diesel y la otra como diluyente de corrientes pesadas.

- **Slurry:** es la corriente de fondos que sale de la torre fraccionadora y se envía a almacenamiento como producto, posteriormente se utiliza para la producción de alquitran aromático - Arotar

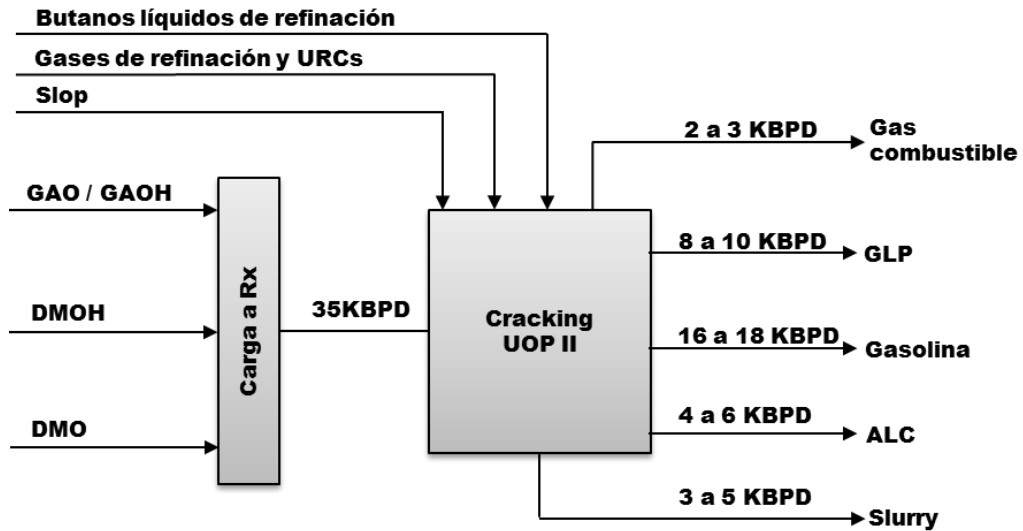


Figura 3. Diagrama de cargas y productos UOP II

3.2 Secciones de la planta FCC UOP II

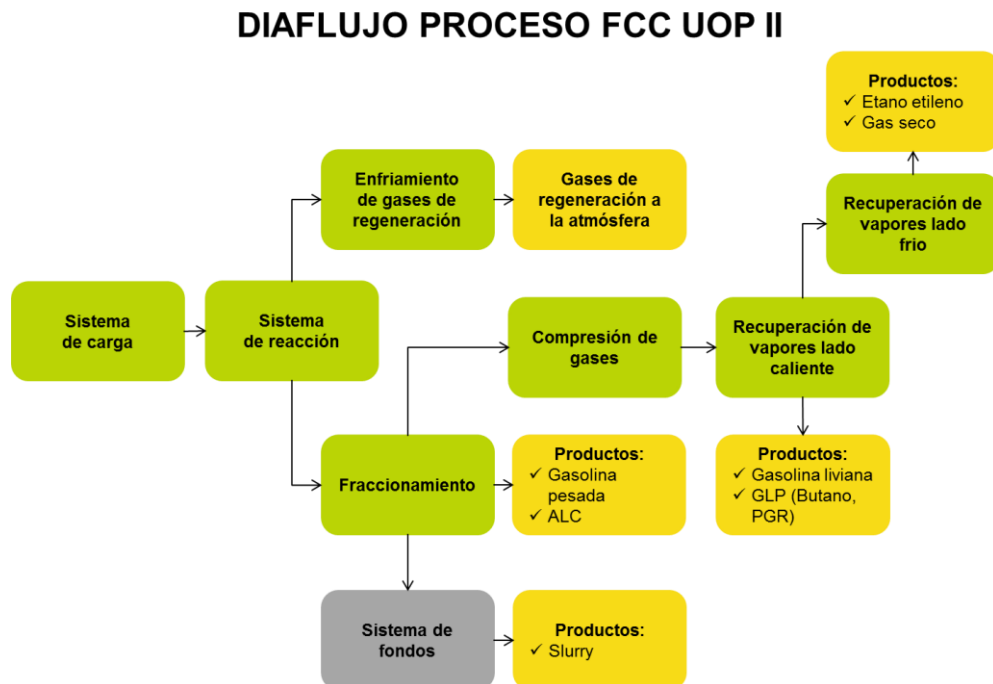


Figura 4. Diagrama de flujo de proceso FCC UOP II

catalítico y los vapores craqueados salen por la cima del reactor a través de unos ciclones que separan las partículas finas de catalizador y las envían al regenerador R-4202. El regenerador retira por medio de combustión el carbón excesivo que se deposita en la superficie del catalizador para retornar al reactor R-4201 y continuar con la reacción (ver **Diagrama 2**).

3.2.4 Sección de enfriamiento de gases del regenerador:

De la cima del R-4202 salen gases a altas temperaturas que son aprovechados por medio de la caldera B-4201 para la producción de vapor de 400 psig. Los gases enfriados fluyen luego al precipitador electrostático el cual retiene por medio de energía eléctrica las partículas más finas de catalizador para minimizar el impacto ambiental (Ver **Diagrama 3**).

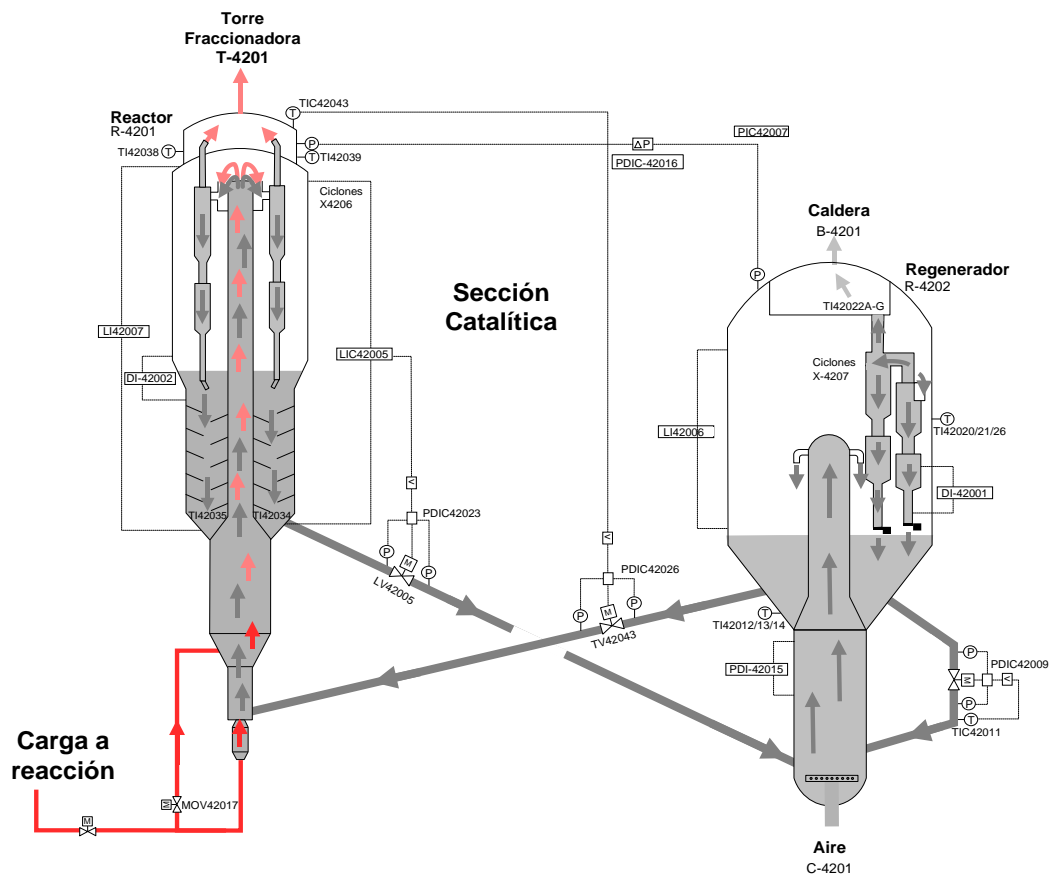


Diagrama 2. Reactor de la FCC UOP II

Fuente: RWD. Manual de Descripción de Procesos Cracking UOP II.2007 [5]

3.2.5 Sección de fraccionamiento:

El fraccionamiento ocurre en la torre fraccionadora principal T-4201 a la cual entra como carga los gases del reactor R-4201 para separarse en diferentes productos: Slurry, ALC, nafta pesada y gases (Gasolina principalmente) ver **Diagrama 4**

3.2.6 Sección sistema de fondos (Circuito de Slurry)

El Slurry abandona la T-4201 por el fondo y es enfriado por medio de una serie de intercambiadores de calor (E-4205 A/B, E-4204 A/B, E-4203 A-D y E-4202 A/B). El Slurry abandona la torre con temperaturas altas y es aprovechado para precalentar la carga al R-4201 por medio del intercambiador E-4204 A/B y para la generación de vapor de 400 psig con los generadores de vapor E-4205 A/B (ver **Diagrama 5**).

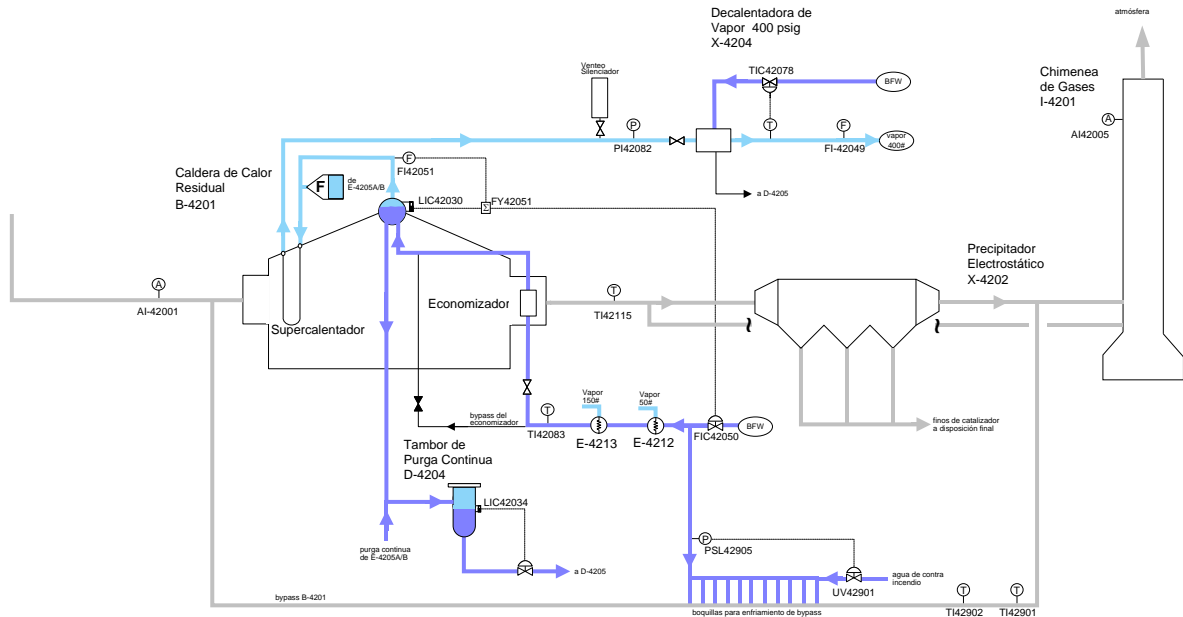


Diagrama 3. Caldera de la FCC UOP II

Fuente: RWD. *Manual de Descripción de Procesos Cracking UOP II.2007* [5]

Una cantidad de Slurry se enfría con los E-4203 A-D y E-4202 A/B para enviar a almacenamiento, mientras que la otra cantidad es retornada a la torre como slurry de recirculación con el fin de mantener el fondo de la torre a una temperatura

adecuada. Por diseño se debe mantener una recirculación de Slurry entre 1.3 a 1.6 veces el flujo que se carga a reacción.

- **Corriente de aceite pesado de ciclo (APC):** el APC se extrae por medio de dos corrientes, una corriente lateral de la T-4201 usada como fluido de intercambio de calor junto al rehervidor E-4264 de la Debutanizadora. Esta corriente se enfría y retorna a la torre con la finalidad de mantener los cortes en la fraccionadora. La otra corriente se usa como reciclo al elevador del reactor en caso de necesitarse.
- **Corriente de aceite liviano de ciclo (ALC):** el ALC que se extrae por medio de una corriente lateral de la T-4201 se envía a la sección de recuperación de vapores, se enfría y retorna a la torre fraccionadora (para mantener el perfil de temperatura) y a la torre despojadora de ALC T-4203.

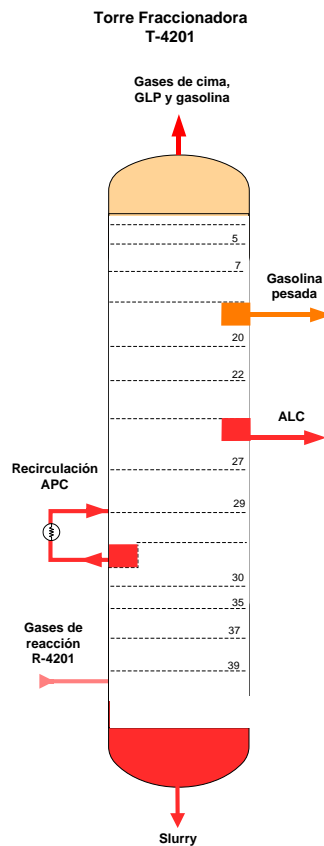


Diagrama 4. Torre fraccionadora principal en la FCC UOP II
Fuente: RWD. *Manual de Descripción de Procesos Cracking UOP II.2007* [5]

3.2.9 Sección de recuperación de Etano/Etileno (UREE):

Se describe la recuperación del etano/etileno de los vapores que se cargan mediante compresión, absorción y fraccionamiento. El Etano/Etileno de alta pureza es enviado a la unidad de Etileno II (Ver **Figura 4**).

3.3 El ensuciamiento y sus posibles causas.

En el proceso de FCC se puede encontrar coque en las paredes internas del reactor, la sección de la cima del reactor, dentro y fuera de los ciclones del reactor, la línea de vapor de cima del reactor y la parte inferior del fraccionador principal, siendo este coque aportante en el ensuciamiento del circuito de recirculación de los fondos [\[6\]](#).

El ensuciamiento es la “acumulación de sustancias indeseables en la superficie de intercambio de calor” [\[7\]](#); dicho ensuciamiento influye directamente en el desempeño del intercambiador debido a la reducción de la efectividad en el intercambio de calor por la resistencia adicional causada. Las categorías de ensuciamiento propuestas por KAKAÇ et al. [\[8\]](#) se resumen en la **Tabla 4**.

Hunt et al. [\[9\]](#) en 2008 realizaron investigaciones sobre el impacto que genera la presencia de asfaltenos en la corriente de carga a la unidad FCC. La concentración de asfaltenos en el slurry puede ser aumentada mediante reacciones de condensación térmica en el circuito de slurry. De igual forma, se concluye que mantener los asfaltenos en solución es clave para prevenir el ensuciamiento por coque suave. En su investigación recomiendan que las velocidades en los tubos del intercambiador de slurry debe ser de 1,83 a 3,05 m/s (6,0 a 10 ft/s). Velocidades inferiores a 1,83 m/s (6,0 ft/s) pueden resultar en que el catalizador, el coque u otras partículas se depositen en la superficie del tubo, lo que conlleva al ensuciamiento. Clasificaron el ensuciamiento inorgánico y orgánico y los estudiaron por separado, logrando disminuir la tasa de limpieza de sus intercambiadores del sistema de fondos. (Vea **Diagrama 6**). Al analizar la

composición del slurry de la FCC UOP II desde la perspectiva del análisis SARA se conoció la concentración de asfaltenos presente en esta corriente y se identificó que al agregar ALC se logra aumentar la °API del slurry y con ello aumentar la velocidad de flujo por los tubos de los intercambiadores sin perder la estabilidad coloidal de los asfaltenos.

Tabla 4. Categorías del ensuciamiento

TIPO DE ENSUCIAMIENTO	DESCRIPCIÓN
PARTICULADO	Consiste en la acumulación de partículas sólidas contenidas en alguna de las corrientes involucradas. La naturaleza de dichas partículas puede ser orgánica o inorgánica y con una gran variedad de tamaños.
BIOLÓGICO	Microorganismos como bacterias y algas, u organismos que pueden “incrustarse” en ciertas partes del intercambiador, generalmente cuando el agua de mar se emplea como fluido en los equipos de intercambio.
CORROSIÓN	Si la corriente de fluido es corrosiva, entonces puede reaccionar con la superficie del intercambiador con la que este en contacto y generar ensuciamiento.
POR CRISTALIZACIÓN	Cuando existen sales disueltas en alguna corriente, y debido al calentamiento o enfriamiento se sobrepasa la condición de “saturación”, entonces dichas sales se depositan en la superficie del intercambiador
POR REACCIÓN QUÍMICA	Algunos depósitos se forman por reacción química que ocurre en alguna corriente como resultado, por ejemplo, de la acción catalítica de la superficie del intercambiador.

Fuente: KAKAÇ et al. [8]

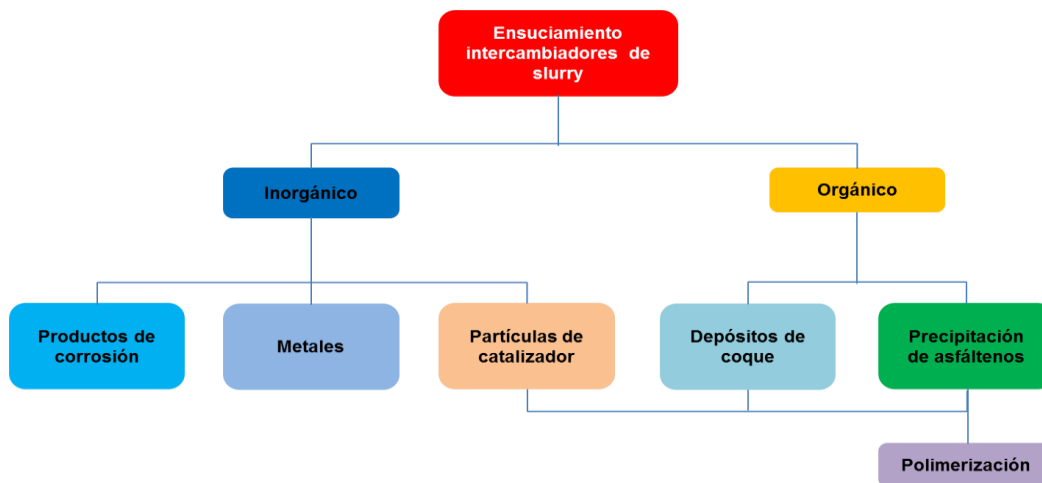


Diagrama 6. Clasificación del ensuciamiento según Hunt et al. [9]

Eaton and Lux [10] sugirieron que los asfaltenos son compuestos intermedios en la reacción de condensación y polimerización de compuestos intermedios cíclicos y aromáticos con alto peso molecular.

Lott et al [11] reportan datos referentes a la cocción de los asfaltenos por medio del craqueo térmico a temperaturas de 430°C, de esta manera se inicia la generación de residuo de ensuciamiento en el sistema.

Gayla et al [12] señala que la pirolisis de los grupos alquilo contribuye a la activación de los radicales libres, iniciando de esta manera la reacción de polimerización de los anillos y por lo tanto ayuda en la formación de depósitos.

Ungerer [13] sugirió que las reacciones de condensación y polimerización son llevadas fuera del rango de temperaturas 330-500°C con altos pesos moleculares para la eventual formación de coque. El sistema de fondo de la FCC UOP II opera con temperatura de máximo 362°C, con lo cual no se tiene riesgo de formación de coque por condensación.

Nandi et al [14] en sus estudios de las diferentes tendencias de coquizado para el aceite pesado, reportan que el coque producido por asfaltenos se genera más fácilmente que de las otras fracciones, dado a que los asfaltenos se polimerizan más fácilmente que las otras fracciones, resultando en compuestos de alto peso molecular que precipitan fuera de la suspensión con la que se trabaja. Teniendo en cuenta los estudios referentes al riesgo de precipitación de los asfaltenos, es necesario asegurar su estabilidad coloidal, agregando componente aromático al sistema para mantener diluida la mezcla.

Banerjee et al [15] propuso un sistema en el que los asfaltenos se degradan para formar aromáticos de gran peso molecular que luego se someten a condensación para formar compuestos de mayor peso molecular, que forman la molécula de coque en el rango de temperatura de 395- 510°C.

La materia prima de mayor punto de ebullición tiene alta aromaticidad, lo que resulta en mayor rendimiento de coque. Además, los compuestos aromáticos polinucleares y compuestos aromáticos que contienen heteroátomos (es decir, nitrógeno, oxígeno, y azufre) son más fáciles fabricantes de coque que los compuestos aromáticos simples (Speight) [16]. Sin embargo, la calidad del alimento por sí solo no es un método infalible para predecir dónde ocurrirá la coquización. Para disminuir fenómeno de pérdida de transferencia de calor realizar control sobre punto final de ebullición de la mezcla de carga a la FCC, teniendo en cuenta que la fracción pesada y de mayor peso molecular no será craqueada; las moléculas de asfaltenos con tamaño entre 12-24 Å no entran en los poros de la zeolita del catalizador (7-8 Å) por ser de mayor tamaño, al no entrar al poro de la zeolita no craquean y pueden condensar a través de la línea de transferencia, formando carbón que luego llega al fondo de la fraccionadora.

3.4 Los asfaltenos

El petróleo es una mezcla de múltiples compuestos orgánicos e inorgánicos en menor proporción, lo cual depende de la procedencia del crudo. Algunos compuestos no orgánicos son: el azufre, nitrógeno, oxígeno y en trazas pequeñas metales como el hierro, zinc y níquel. Los compuestos orgánicos son la mayor fracción y a esta mezcla de compuestos se le conoce como “hidrocarburos”, por estar formados solo por átomos de carbono e hidrógeno.

El número de compuestos presentes en el petróleo es desconocido, por ello se les clasifica en cuatro (4) grupos bien definidos, a saber: saturados (incluyen las parafinas), aromáticos, resinas y asfaltenos; a este conjunto se le llama SARA, en donde los compuestos se clasifican según el grado de solubilidad y polaridad. En el análisis SARA, la fracción de saturados contiene el material no polar, y en los aromáticos, las estructuras polares. Los asfaltenos y resinas son compuestos de alto peso molecular con componentes polares, se diferencian entre si debido a que

los asfaltenos son insolubles en n-pentano o n-heptano [17]. En la **Figura 5** se muestra el esquema típico de separación por el método SARA.

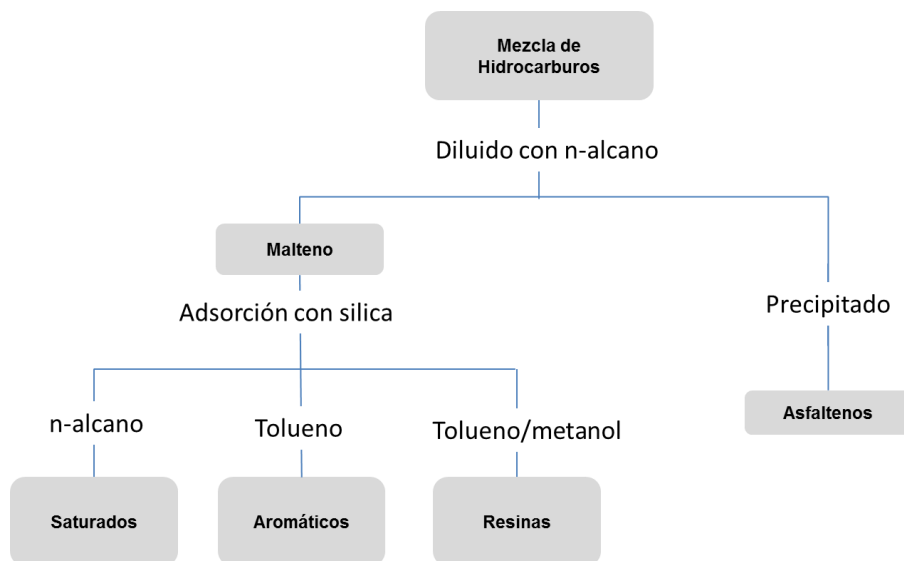


Figura 5. Esquema típico de separación de hidrocarburos en fracciones SARA [17].

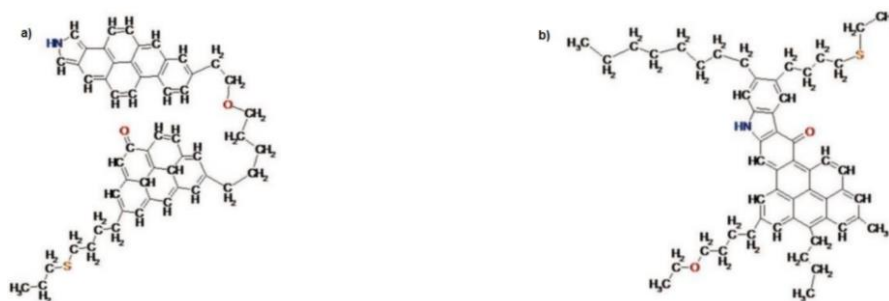
3.4.1 Asfaltenos: Definición, Formación y Caracterización

Los asfaltenos son compuestos aromáticos y nafténicos de alto peso molecular con un rango, que se encuentran en algunos crudos, cada crudo tiene mayor o menor grado de estabilidad de acuerdo a la concentración de sus compuestos. Se definen como fracciones que se encuentran en el crudo, solubles en solventes aromáticos como el benceno, tolueno y xileno, pero insoluble en n-alcanos de cadena corta (bajo peso molecular) como por ejemplo el n-pentano [18]. Los asfaltenos se caracterizan por ser de tipo polar, de estructura amorfa y de fórmula empírica promedio $C_{74}H_{87}NS_2O$. La mayor cantidad de heteroátomos (S, N, O, etc.) se concentra en los asfaltenos, y se ha reportado que más del 90% de los metales presentes en los aceites crudos se encuentran en la fracción asfáltica [19].

En estudios realizados se ha encontrado que los asfaltenos están en mayor proporción en los crudos pesados, y debido a su característica de ser no refinables, son motivadores de diversos problemas en su manejo, tales como

taponamiento en equipos, deposición en líneas, formación de coque en sistemas de procesos catalíticos, donde se aumenta su concentración en la fracción pesada de los productos de FCC. [19]. De igual forma al encontrar material particulado precipita y forma moléculas de mayor tamaño.

En la literatura se registran dos tipos de estructuras: la estructura en forma de archipiélago y la estructura en forma de isla. La segunda arquitectura es común en petróleo crudo y se usa para explicar la formación de agregados asfaltenicos en el petróleo [20].



a. Forma de archipiélago

b. Forma de isla

Figura 6. Estructura molecular hipotética de los asfaltenos. a) Forma de archipiélago. b) Forma de isla [20].

3.4.2 Precipitación de asfaltenos

La precipitación de asfaltenos es un fenómeno que se tiene presente desde las etapas de producción de crudo hasta la etapa de almacenamiento de productos terminados, lo cual puede ser en algunos casos, un verdadero problema, ya que puede ocasionar daños a equipos y generar afectación económica por pérdida de producción, afectación de la actividad de catalizadores de FCC [21].

Las cargas a la refinería cada vez son más pesadas llevando consigo mayor contenido de carbón, resinas y asfaltenos que a su paso por cada uno de los procesos de refinación salen con los productos más pesados que posteriormente van como carga a las FCC. Las cargas a las FCC han incrementado su punto final de ebullición (PFE) reflejando el contenido de material de mayor peso molecular, estas fracciones de productos pesados llegan a la FCC y parte se queda con el

catalizador como carbón y parte pasa con el efluente del reactor hacia la fraccionadora quedando con el slurry, donde de acuerdo a las condiciones operacionales puede favorecer su precipitación afectando la transferencia de calor en los intercambiadores de calor.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este trabajo para optar el título de Magister en Ingeniería Química se realizó el estudio desde tres perspectivas: Análisis químico de sólido de coque, análisis de mezcla de Slurry, ALC y APC y Análisis operacional. Desde la perspectiva química se analizaron muestras de material de incrustación encontrado en el filtro de la bomba de fondo de la torre T4201 y los intercambiadores de calor, se realizó análisis de estabilidad de mezclas de slurry y componentes más livianos como ALC y APC. Desde la perspectiva operacional se revisaron variables en tres periodos de tiempo 2010, 2011 y 2014.

Las variables analizadas desde la perspectiva operacional son:

- Transferencia de calor en los intercambiadores E4205A/B
- Velocidad de flujo por los intercambiadores E4205A/B
- Temperatura del fondo de la torre
- Flujo de carga a la cracking
- Gravedad API del Slurry
- Contenido de cenizas de catalizador en el slurry
- Flujo de Slurry por los intercambiadores E4205A/B
- Nivel del fondo de la torre fraccionadora.

4.1 Análisis de las incrustaciones en los intercambiadores

Se realizaron dos análisis de los compuestos que forman las incrustaciones en los intercambiadores de calor de la torre fraccionadora principal de la UOP II mediante las siguientes etapas:

- ✓ Análisis de la Muestra 1 (recolectada el 8 de abril de 2014) y muestra 2 (recolectada el 8 de octubre de 2015).
- ✓ Inspección visual de los intercambiadores de calor

Durante el proceso de limpieza mecánica que se realiza a los intercambiadores de calor del sistema de fondos de la FCC UOP II se ha identificado de forma visual el

alto grado de ensuciamiento con el que salen los equipos cuando son entregados a mantenimiento (Ver **Figura 1**).

4.1.1 Caracterización química de las incrustaciones de la muestra del 8 de abril de 2014

Los análisis realizados para la caracterización química de los compuestos de incrustación en los intercambiadores para la muestra recolectada el 8 de abril se realizaron siguiendo las especificaciones de los procedimientos del laboratorio de Espectroscopia del ICP basados en las normas descritas en el **Anexo C** con sus respectivos equipos.

El laboratorio de Espectroscopia del ICP recibe una muestra sólida (**Figura 7** y **Tabla 5**) depositada en bolsa plástica de sello hermético, la cual fue recolectada durante la parada de mantenimiento para la limpieza de los intercambiadores de calor y enviada a las instalaciones del Instituto Colombiano del Petróleo ICP. La **Tabla 5** contiene la identificación de la muestra extraída de los intercambiadores.

Tabla 5. Identificación de la muestra recibida

SAMPLE ID	IDENTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
200976969	COQUE FONDOS UOP II	MUESTRA COQUE LAB. CATÁLISIS DEL 08-04-14

Fuente: Laboratorio de Espectroscopia del ICP



Figura 7. Aspecto de la Muestra recibida (SID 200976969)

Fuente: Laboratorio de Espectroscopia del ICP

A la muestra de coque (SID 200976969) se le tomó un espectro IR utilizando el equipo infrarrojo Vertex 70V, el cual se operó bajo las condiciones descritas en el **Anexo D**.

De los análisis realizados a la muestra identificada Coque fondos UOP II, la fracción inorgánica representa el mayor porcentaje en la muestra extraída y corresponde a un 91,26%. La fracción orgánica representa un 8,73% del total de la muestra. La **Figura 8** presenta el perfil IR de la de la muestra sólida recibida.

Del espectro IR indica una región con las siguientes bandas de frecuencia (3041, 3015, 2954, 2921, 2854 cm^{-1}), son 5 picos, que pertenecen a las vibraciones moleculares típicas de hidrocarburos de enlace C-H aromáticos y CH_{AR} (3041 – 2954 cm^{-1}), estiramiento simétrico y asimétrico de enlaces C-H alifáticos, y $\text{CH}_3\text{-CH}_2$ (2921-2854 cm^{-1}).

También en la región intermedia con las siguientes bandas de frecuencia (1600, 1504, 1448, 1375 cm^{-1}), son 4 picos que corresponden a vibraciones de enlaces, bandas de deformación del grupo metilo δCH_3 (1375 cm^{-1}). La banda de absorción (1600 cm^{-1}) se atribuye a vibraciones de estiramiento de carbonos aromáticos de doble enlace conjugado $\nu\text{C}=\text{C}$, (Poliaromaticos PNA) afines a compuestos de Asfaltenos y Resinas e identificados en el slurry producto del fondo de la fraccionadora. Estas (1504 – 1448 cm^{-1}) son bandas de deformación del grupo $\nu\text{C}=\text{C}$ en estructura aromática, estiramiento simétrico.

Además en la región derecha, se encuentran las siguientes bandas de frecuencia (1035, 866, 806, 786, 741 cm^{-1}), son 5 picos que identifican vibraciones de deformación de sustitución de los anillos aromáticos $\lambda\text{CH}_{\text{AR}1}$ (866 – 806 cm^{-1}), $\lambda\text{CH}_{\text{AR}4}$ (786 – 741 cm^{-1}). Para la banda de frecuencia 1035 cm^{-1} se pueden atribuir las vibraciones de grupos funcionales C=O (si las Resinas son ricas en grupos funcionales de ácido carboxílico) y S=O, para el grupo funcional S=O en estructura aromática como alquil-sulfuro.

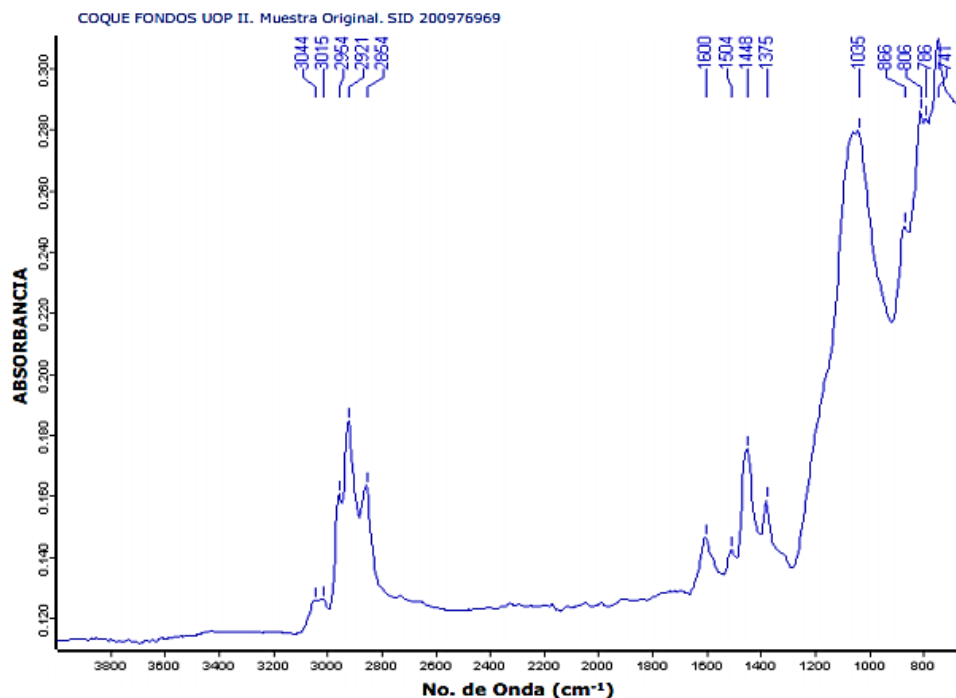


Figura 8. Perfil IR de la muestra sólida identificada como Coque Fondos UOP II
Fuente: Laboratorio de Espectroscopia del ICP

La **Tabla 6** muestra el resultado obtenido de la extracción realizada a la muestra sólida recibida e identificada como Coque Fondos UOP II.

Tabla 6. Resultado de la extracción realizada a la muestra sólida, Coque Fondos UOP II

MUESTRA SÓLIDA	IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	COQUE FONDOS UOP II
SUBMISSION ID 100161160	FECHA DE MUESTREO	08-ABR-14
Sample ID	Unidad	200976969
<i>Análisis de Laboratorio</i>		
PREPARACIÓN DE MUESTRA SÓLIDA (EXTRACCIÓN)		
FRACCIÓN ORGANICA	%Peso	8,730
FRACCIÓN INORGANICA	%Peso	91,26

Fuente: Laboratorio de Espectroscopia del ICP

A la fracción orgánica obtenida se le realizó análisis composicional SARA (SID 200979066) ver **Tabla 7** y a la fracción inorgánica análisis semicuantitativo por FRX (SID 200979067) ver **Tabla 8**.

Tabla 7. Resultado del análisis SARA realizado a la fracción orgánica

MUESTRA SÓLIDA	IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	COQUE FONDOS UOP II
SUBMISSION ID 100161160	FECHA DE MUESTREO	08-ABR-14
Sample ID	Unidad	200976969
<i>Análisis de Laboratorio</i>		
ANÁLISIS SARA		
SATURADOS	%Peso	19,06
AROMÁTICOS	%Peso	68,89
RESINAS	%Peso	7,010
ASFALTENOS	%Peso	2,870
RETENCIÓN EN COLUMNA	%Peso	0
INSOLUBLES EN TOLUENO	%Peso	0
PORCENTAJE RECUPERADO	%Peso	97,83
PORCENTAJE DE PÉRDIDA DE LIVIANOS	%Peso	2,160
PORCENTAJE TOTAL (RECUP+PÉRDIDAS)	%Peso	99,99

Fuente: Laboratorio de Espectroscopia del ICP

Tabla 8. Resultado del análisis semicuantitativo de la fracción inorgánica, Coque Fondos UOP II

200976969	
Fracción inorgánica Muestra: Coque Fondo UOP II	
Óxidos	Concentración (% peso)
SiO ₂	46,80
Al ₂ O ₃	35,06
La ₂ O ₃	3,99
SO ₃	3,94
V ₂ O ₅	2,04
Fe ₂ O ₃	1,59
Cl	1,49
P ₂ O ₅	1,46
NiO	1,14
CaO	0,96
TiO ₂	0,47
K ₂ O	0,16
ZrO ₂	0,02
SrO	0,01

Fuente: Laboratorio de Espectroscopia del ICP

De los resultados obtenidos se observa que la muestra está compuesta principalmente por material inorgánico (91,26%)¹, compuesto por óxidos de silicio, aluminio, lantano, azufre, vanadio e hierro. La fracción orgánica, tipo hidrocarburo, está constituida principalmente por compuestos tipo aromáticos (68,89%).

4.1.2 Caracterización química de las incrustaciones de la muestra del 8 de octubre de 2016

El 8 de octubre durante el proceso de limpieza del filtro de la bomba del sistema de fondo de la fraccionadora principal de la FCC UOP II se recolectó muestra de coque para enviar al laboratorio para su respectivo análisis. Los análisis realizados para la caracterización química de los compuestos de coque de la bomba de fondos de la torre fraccionadora se realizaron siguiendo las especificaciones de los procedimientos del laboratorio procesamiento geológico del ICP basados en las normas descritas en el **Anexo F** con sus respectivos equipos.

El laboratorio de procesamiento geológico del ICP recibe una muestra sólida (**Tabla 9**) depositada en bolsa plástica de sello hermético, la cual fue recolectada durante la limpieza de filtro de la bomba del sistema de fondos de la FCC UOP II y enviada a las instalaciones del Instituto Colombiano del Petróleo ICP.

Tabla 9. Identificación de la muestra recibida

SAMPLE ID	IDENTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
201094170	COQUE UOP 2	MUESTRA COQUE LAB. CATÁLISIS DEL 11-03-16

Fuente: Laboratorio de procesamiento geológico del ICP

A la muestra de coque (SID **201094170**) se le realizó estudio con el microscopio electrónico Leo 1450VP, el cual se operó bajo las condiciones descritas en el **Anexo G**.

¹ Nota: El total de óxidos obtenidos se normalizó al 100%.

A la muestra identificada como COQUE UOP 2 se realizaron dos análisis, la fracción inorgánica representa el mayor porcentaje en la muestra extraída y corresponde a un 88,53 y 88,29%. La fracción orgánica representa un 11,38 y 11,44% del total de la muestra.

Tabla 10. Resultado de la extracción realizada a la muestra sólida, Coque Fondos UOP II

MUESTRA SÓLIDA	IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	COQUE UOP 2
SUBMISSION ID 100161160	FECHA DE MUESTREO	11-03-16
Sample ID	Unidad	201094170
<i>Análisis de Laboratorio</i>		
PREPARACIÓN DE MUESTRA SÓLIDA (EXTRACCIÓN)		
Muestra 2.1		
FRACCIÓN ORGANICA	%Peso	11,38
FRACCIÓN INORGANICA	%Peso	88,53
Muestra 2.2		
FRACCIÓN ORGANICA	%Peso	11,44
FRACCIÓN INORGANICA	%Peso	88,29

Fuente: Laboratorio de procesamiento geológico del ICP

A la fracción orgánica obtenida se le realizó análisis composicional SARA (SID 201094170) ver **Tabla 11.**

Tabla 11. Resultado del análisis SARA realizado a la fracción orgánica, Coque UOP 2

MUESTRA SÓLIDA	IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	COQUE UOP 2
SUBMISSION ID 100161160	FECHA DE MUESTREO	11-03-16
Sample ID	Unidad	201094170
<i>Análisis de Laboratorio</i>		
ANÁLISIS SARA		
SATURADOS	%Peso	23,65
AROMÁTICOS	%Peso	62,97
RESINAS	%Peso	9,97
ASFALTENOS	%Peso	1,57
RETENCIÓN EN COLUMNA	%Peso	0
INSOLUBLES EN TOLUENO	%Peso	0
PORCENTAJE RECUPERADO	%Peso	98,16
PORCENTAJE DE PÉRDIDA DE LIVIANOS	%Peso	0
PORCENTAJE TOTAL (RECUP+PÉRDIDAS)	%Peso	98,16

Fuente: Laboratorio de procesamiento geológico del ICP

En la **Figura 9** y **Figura 10** se muestra detalle de micrografía realizada a la muestra de coque UOP II, donde se muestra partícula de catalizador guardando su esfericidad inmersos en el coque.

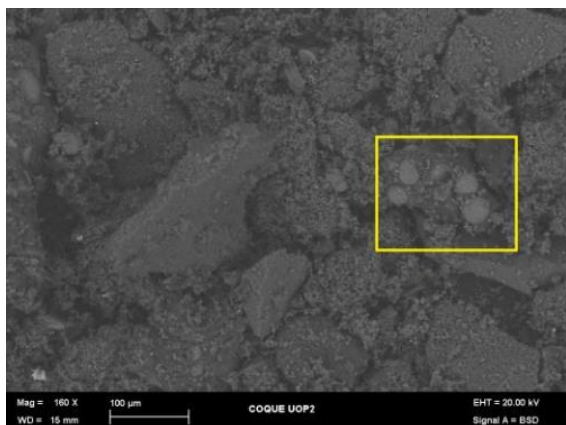


Figura 9. Micrografía 1. Detalle de partícula

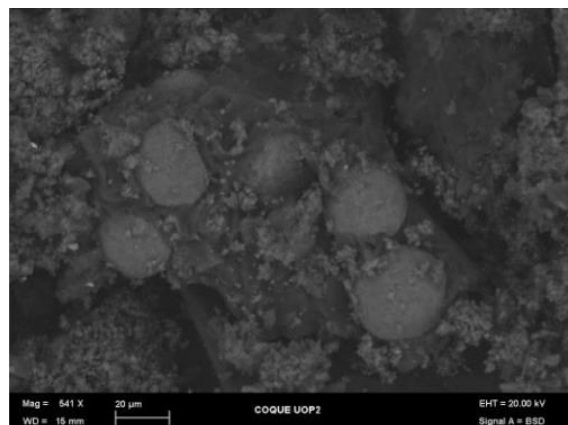


Figura 10. Micrografía 2. Ampliación micrografía 1

Una vez realizada la limpieza del filtro de la bomba de fondos de la torre fraccionadora se tomó la muestra de sólido para enviar al laboratorio, sólido que por su morfología se creía que era coque, pero tenía composición similar a la muestra anterior. A esta muestra le realizaron dos análisis similares para asegurar el resultado.

Los componentes de la fracción inorgánica de la muestra 1 corresponden al 91,26% del total de la muestra y la fracción inorgánica de la muestra 2 corresponden al 88,53 y 88,59% del total de la muestra. Estos componentes tienen características similares a la composición del catalizador de equilibrio relacionado en la **Tabla 12**. Teniendo en cuenta su relación directa entre los componentes de la fracción inorgánica y la composición del catalizador de equilibrio y adicionalmente que la fuente de llegada de SiO_2 y Al_2O_3 al sistema de fondos de la torre fraccionadora depende exclusivamente del material proveniente del reactor, se determina que la formación de las incrustaciones que afectan la transferencia de calor en los intercambiadores del sistema de fondo de la torre fraccionadora de la FCC UOP II se relaciona en parte con el arrastre de

catalizador desde el reactor que al llegar al sistema de intercambiadores y teniendo baja velocidad de flujo por los intercambiadores precipita en el sistema y forma partículas de mayor tamaño. El tamaño promedio de partícula de catalizador de equilibrio en su fracción de menor tamaño es inferior a 40 μm (ver **Tabla 13**), lo que hace más fácil su paso a través de los ciclones del reactor hacia la fraccionadora.

Dicha hipótesis, se comprobó por medio de un análisis termogravimétrico (TGA)² que se realizó al slurry que sale de los intercambiadores, confirmando arrastre de catalizador al obtener una concentración de cenizas del 0,38 % peso en atmósfera inerte y 0,34 % peso en aire (ver **Anexo E**), respecto a 0,2 % peso de máximo de cenizas que tiene por diseño la salida del reactor de la FCC – UOP II. Como complemento de comprobación de la hipótesis, en el análisis de la muestra 2 se realiza micrografía a la muestra de coque y se identifica partículas de catalizador inmersas en el coque guardando su esfericidad (ver **Figura 9** y **Figura 10**).

Tabla 12. Composición química de componentes mayoritarios del catalizador de equilibrio.

CATALIZADOR DE EQUILIBRIO DE FCC	
Componentes	% peso
SiO ₂	49
Al ₂ O ₃	48
La ₂ O ₃	1,1
Fe ₂ O ₃	0,68
TiO ₂	1,3

²Nota: El análisis TGA se realizó en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander con el apoyo del estudiante en práctica Luis Fernando Carvajal.

Tabla 13. Distribución de tamaño de partícula de catalizador

DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA DE CATALIZADOR DE FCC	
Rango de porcentaje en peso	Tamaño de partícula, μm
0 a 2%	<20
10 a 20%	<40
55 a 65%	<80
90 a 95%	<105
95 a 100%	<149

4.2 Evaluación del punto de corte slurry

La evaluación del punto de corte del slurry consiste en una serie de mezclas que se realizaron con slurry y ALC, slurry y APC, para aumentar en el slurry la resistencia a la formación de material insoluble y con ello disminuir el fenómeno de precipitación de asfaltenos.

Esta evaluación se realizó en octubre de 2014 en el ICP, con el objetivo de determinar el impacto potencial en el ensuciamiento de los intercambiadores del circuito de fondos de la FCC-UOPII por precipitación de asfaltenos, principalmente. Para dicha evaluación se realizó la caracterización del slurry, APC y ALC determinando la concentración en peso de saturados, asfaltenos, resinas, aromáticos, °API y sedimentos (ver **Tabla 14**). Con la información suministrada de los análisis se realizaron mezclas con estas corrientes para determinar en qué proporción es adecuado mezclarlos para no generar afectación por índice de inestabilidad coloidal (I.I.C).

Tomando la información de la **Tabla 14** donde se tiene la composición de cada compuesto (slurry, ALC y APC), se realiza mezcla con 20%peso de APC y 80%peso de slurry y se analizó el cambio en °API (cambió de -4.3 a -2,3), sedimentos (cambió de 0.062 a 0,05%peso), saturados (cambió de 10.4 a 12,6%peso), aromáticos (cambió de 69.76 a 70,6%peso), resinas (cambió de 14.9 a 14,2%peso), asfaltenos (cambió de 4.9 a 2,5%peso), no se presentó cambio en el I.I.C (0,18), relacionados en la **Tabla 15**.

Tabla 14. Análisis de corriente de slurry, APC y ALC de la FCC UOP II

	°API	Sedimentos (%peso)	Saturados (%peso)	Aromáticos (%peso)	Resinas (%peso)	Asfaltenos (%peso)	(Saturados + Asfaltenos) / (Aromáticos + Resinas)
Slurry (750°F+)	-4.3	0.062	10.4	69.76	14.9	4.9	0.18
APC	4.8	0.002	17.8	81	1.2	0	0.22
ALC	14.1	0.002	37.5	62.5	0	0	0.6

Para este punto de corte el IIC no cambió, pero aumentó la gravedad API de (-4.3 a -2,3), lo que disminuye la resistencia a fluir del slurry por los tubos de los intercambiadores, permitiendo que se tenga mayor velocidad de flujo por los tubos de los intercambiadores.

Tabla 15. Análisis de mezclas de corriente de slurry y APC de la FCC UOP II

Slurry (750°F+) (%peso)	APC (%wt)	°API	Sedimentos (%peso)	Saturados (%peso)	Aromáticos (%peso)	Resinas (%peso)	Asfaltenos (%peso)	(Saturados + Asfaltenos)/(Aromáticos + Resinas)
80	20	-2.3	0.05	12.6	70.6	14.2	2.5	0.18
60	40	-0.7	0.04	13.2	74.8	10.3	1.7	0.18
40	60	1.1	0.02	14.7	76.5	7.4	1.4	0.19
20	80	2.9	0.01	15.8	76.4	7	0.8	0.2

Tabla 16. Análisis de corriente de slurry y ALC de la FCC UOP II

Slurry (750°F+) (%peso)	ALC (%wt)	°API	Sedimentos (%peso)	Saturados (%peso)	Aromáticos (%peso)	Resinas (%peso)	Asfaltenos (%peso)	(Saturados + Asfaltenos)/(Aromáticos + Resinas)
80	20	-0.6	0.05	14.2	69.8	12.6	3.4	0.21
60	40	2.8	0.03	20.5	67.1	10.4	2	0.29
40	60	6.5	0.02	27.2	64.8	6.8	1.2	0.4
20	80	10.4	0.02	33.1	62.1	4.2	0.6	0.51

Se continúa realizando el cambio en la mezcla incrementando en 20%peso adicional de APC en el slurry hasta alcanzar el 80%peso de APC en el slurry. Posteriormente, se realiza la mezcla de forma similar con el ALC (ver **Tabla 16**).

De la **Figura 11** a la **Figura 22** se muestran los cambios obtenidos al realizar cada una de las mezclas referenciadas en las **Tabla 15** y **Tabla 16**.

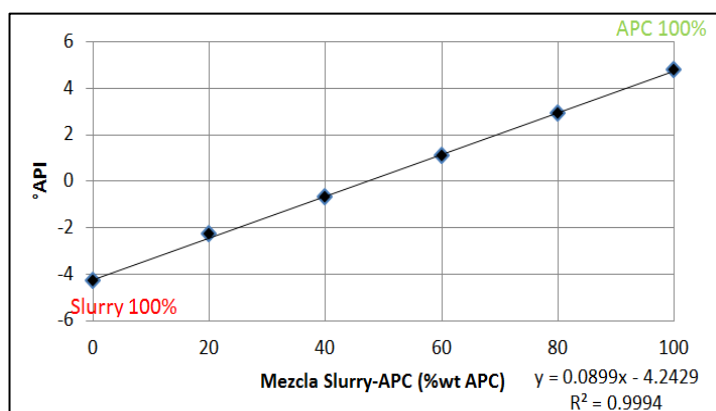


Figura 11. Cambio en la °API del Slurry – APC de la FCC UOP II

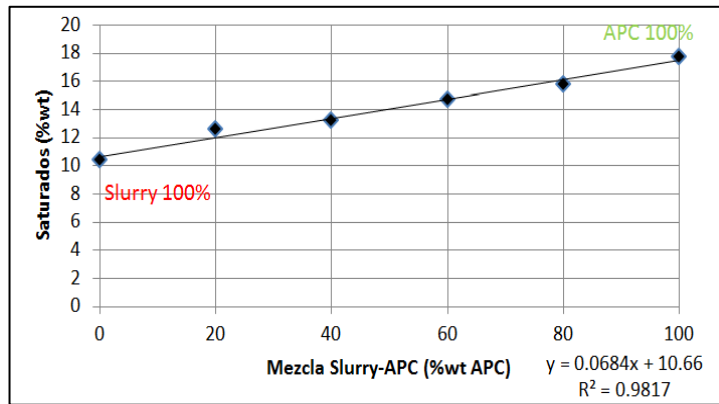


Figura 12. Cambio en los saturados del Slurry – APC de la FCC UOP II

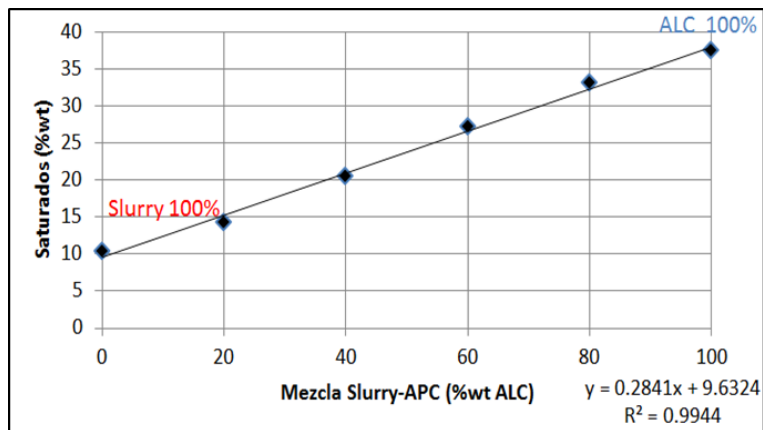


Figura 13. Cambio en los saturados del Slurry – APC de la FCC UOP II

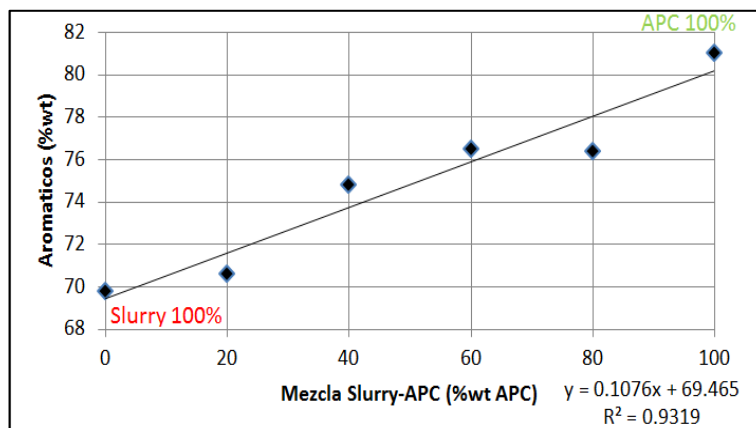


Figura 14. Cambio en los aromáticos del Slurry – APC de la FCC UOP II

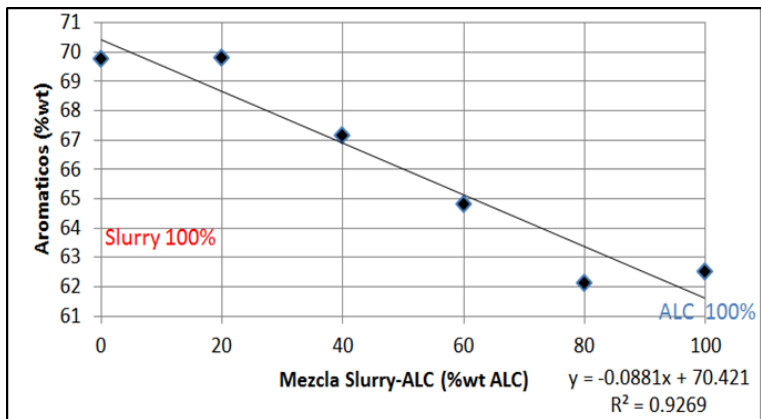


Figura 15. Cambio en los aromáticos del Slurry – ALC de la FCC UOP II

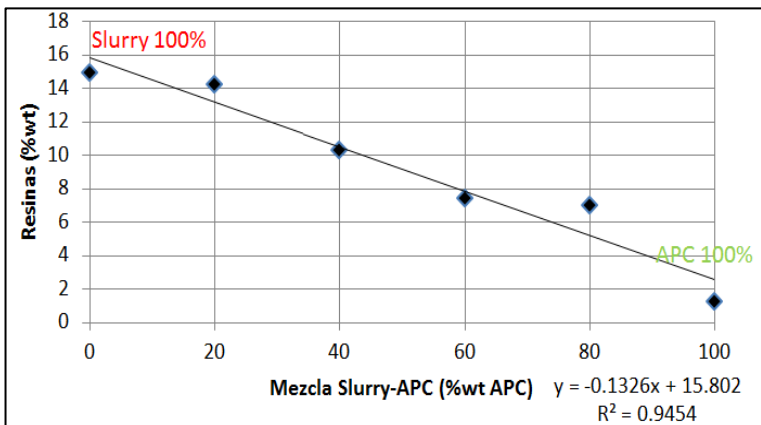


Figura 16. Cambio en las resinas del Slurry – APC de la FCC UOP II

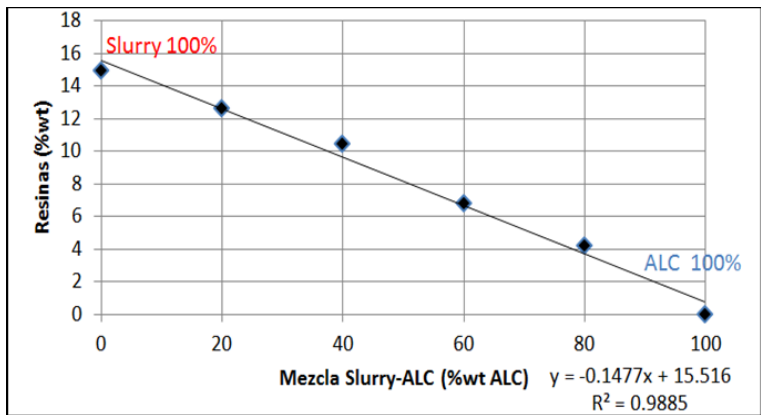


Figura 17. Cambio en las resinas del Slurry – ALC de la FCC UOP II

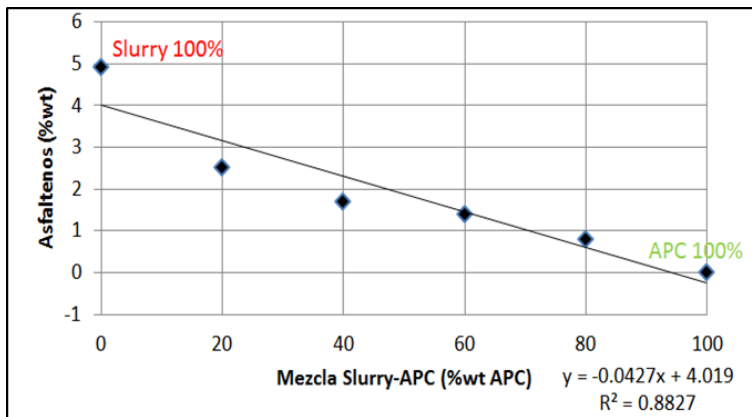


Figura 18. Cambio en los asfaltenos del Slurry – APC de la FCC UOP II

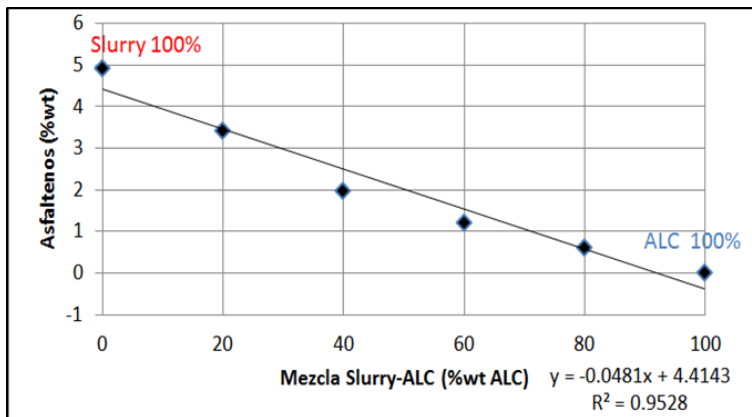


Figura 19. Cambio en los asfaltenos del Slurry – ALC de la FCC UOP II

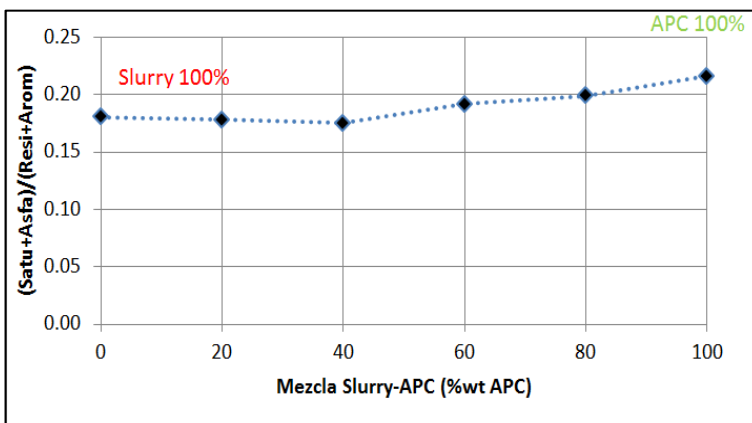


Figura 20. Cambio en (Satu+Asfa)/(Resi+Arom) del Slurry – APC de la FCC UOP II

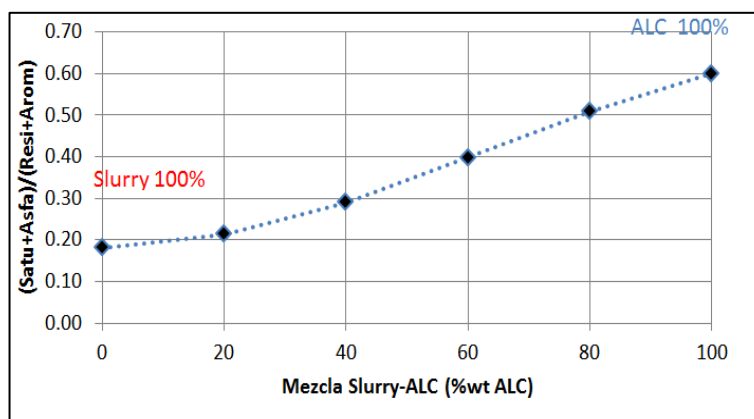


Figura 21. Cambio en (Satur+Asfa)/(Resi+Arom) del Slurry – ALC de la FCC UOP II

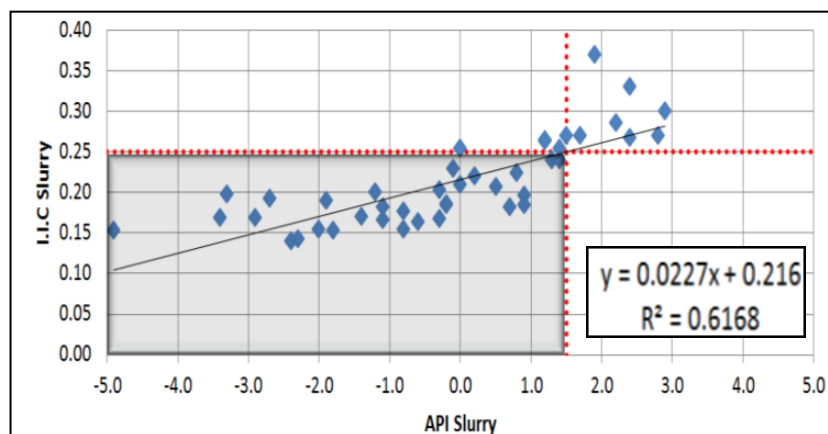


Figura 22. Cambio en el IIC Slurry vs la °API del Slurry de la FCC UOP II

De las mezclas realizadas con slurry, APC y ALC se identificó que al aumentar el %peso de APC y ALC en el slurry aumentó la °API del slurry (ver **Figura 11**), del mismo modo al aumentar el %peso de APC y ALC en el slurry aumento el %peso de saturados del slurry (ver **Figura 12** y **Figura 13**). Sin embargo, no se observó la misma tendencia con el %peso de aromáticos en el slurry, el cual aumentó al aumentar el %peso de APC, pero disminuyó al aumentar el %peso de ALC (ver **Figura 14** y **Figura 15**) obedeciendo a que el APC y el slurry tienen mayor %peso de aromáticos que el ALC. De igual forma de la **Figura 16** a la **Figura 19** se observó el comportamiento del %peso de las resinas y asfaltenos en el slurry, al

aumentar el %peso de APC y ALC disminuyó el %peso de las resinas y asfaltenos en el slurry, dado que el slurry tiene mayor %peso de resinas y asfaltenos que el APC y el ALC.

El incremento en el I.I.C en el slurry no es deseado, de acuerdo a los análisis y mezclas realizadas con el ICP se concluyó que al incrementar la °API del slurry el I.I.C incrementa de forma lineal hasta valores de °API de 1,5; sin embargo, el incremento de °API mayor a 1.5 hace al slurry más inestable. Para valores de °API de hasta 1.5 se obtienen valores de I.I.C de 0,2 a 0,3 (ver **Figura 22**). Al agregar ALC al Slurry, además de aumentar el °API, también se reduce la viscosidad del Slurry, en consecuencia se reduce la caída de presión y aumenta la velocidad por los tubos de los intercambiadores. Esta mayor velocidad por baja viscosidad del Slurry, disuelve los sólidos finos de catalizador y facilita su transporte, reduciendo el riesgo que estos sedimentos se depositen en la pared interna de los tubos obstruyéndolos (en codos y curvas de las tuberías) en el tiempo y se evacuen con el slurry producto. La presencia de fracciones de ALC en el Slurry aumenta la solubilidad de los asfaltenos en la emulsión (masa del Slurry) y reducen la posibilidad de precipitación de los asfaltenos. En estudio realizado por Gaona et al [\[1\]](#) pudieron establecer tendencias en cuanto a la estabilidad de una mezcla de crudo. Así, a mayor cantidad de saturados o asfaltenos, la muestra tiende a ser inestable. De igual forma concluyen que la estabilidad de los asfaltenos en los petróleos es un fenómeno que depende de una relación entre los parámetros (saturados, asfaltenos, resinas y aromáticos) y no puede ser asociado a uno de ellos exclusivamente.

4.3 Correlación de variables operacionales

La correlación de variables operacionales consiste en identificar la causalidad de afectación en la operación del sistema. Hunt et al. [\[5\]](#) en 2008 recomiendan que las velocidades en los tubos del intercambiador de slurry debe ser de 1,83 a 3,05 m/s (6,0 a 10 ft/s). Velocidades inferiores a 1,83 m/s (6,0 ft/s) pueden resultar en

que el catalizador, el coque u otras partículas se depositen en la superficie del tubo, lo que conlleva al ensuciamiento de los intercambiadores de forma más temprana. Se realizó correlación de variables, entre ellas: velocidad de flujo por el lado de los tubos de los intercambiadores, transferencia de calor, gravedad API del slurry, contenido de cenizas de catalizador en el slurry, temperatura de operación del sistema, nivel del fondo de la torre fraccionadora y coeficiente de transferencia de calor.

4.3.1 Correlación de variables de transferencia de calor vs velocidad de flujo por los tubos de los intercambiadores de calor.

Se realizó correlación de estas variables operacionales para tres periodos de tiempo diferentes, (2010, 2011 y 2014) donde se analizó el impacto que puede tener cada variable sobre la operación de los intercambiadores de calor. Las variables analizadas son: transferencia de calor y velocidad de flujo por los intercambiadores. De la **Figura 23** a la **Figura 25** se muestra el comportamiento a lo largo del tiempo para las dos variables operacionales: retiro de calor en el intercambiador de calor y la velocidad de flujo por los tubos del intercambiador de calor E4205A.

El intercambiador de calor tiene una capacidad de retiro de calor de 17,92 MMBTU/h, en la **Figura 23** se observa la pérdida continua de velocidad de flujo a través del intercambiador de calor para el periodo 2010, lo cual afecta directamente la transferencia de calor. Posteriormente se realiza soplado con vapor en sentido contracorriente, recuperando la transferencia de calor y logrando tener estabilidad por otro periodo de tiempo. Se obtuvo correlación de Pearson de 0,9842, con valores de referencia de (-1 a +1), entre la transferencia de calor y el cambio de velocidad de flujo por los tubos del intercambiador (ver Anexo H). Evidenciando la dependencia de la transferencia de calor al cambio de velocidad de flujo por los tubos del

intercambiador. Es lo normal que debe ocurrir, si aplicamos la (ecuación 1) para el cálculo de transferencia de calor sensible. Sin embargo dentro del análisis se revisaron tres periodos de tiempo, donde en algunos casos es más evidente el problema de ensuciamiento. En la **Figura 26** se relaciona la tendencia de la transferencia de calor en el E4205A para el periodo analizado de 2010 (entre junio y noviembre), en el mes de mayo se realizó limpieza mecánica del intercambiador, el cual se colocó en servicio y en el mes de junio se evidencia alta transferencia de calor con alto coeficiente de transferencia, sin embargo el coeficiente de transferencia de calor disminuye de forma continua y acelerada, de tal forma que para el mes de agosto había disminuido aproximadamente el 40% el coeficiente de transferencia de calor. Se realizó procedimiento operacional para mejorar transferencia de calor, que consiste en realizar soplado con vapor en sentido inverso para remover suciedad de los tubos del intercambiador (ver **Figura 27**).

$$Q = m * Cp * \Delta t \quad [BTU / h] \quad (5-1)$$

Siendo:

Q = calor [BTU / h]

M = masa [lb / h]

Cp = Calor específico a presión constante [BTU / lb °F]

Δt = diferencia de temperatura entre la entrada y la salida [°F]

$$U = \frac{Q}{A * LMTD} \quad [BTU / ft^2 * h * °F] \quad (5-2)$$

Siendo:

Q = calor en [BTU / h]

A = el área de la superficie de intercambio térmico [ft²]

LMTD = la diferencia media logarítmica de temperaturas [°F]

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{LN\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad [°F] \quad (5-3)$$

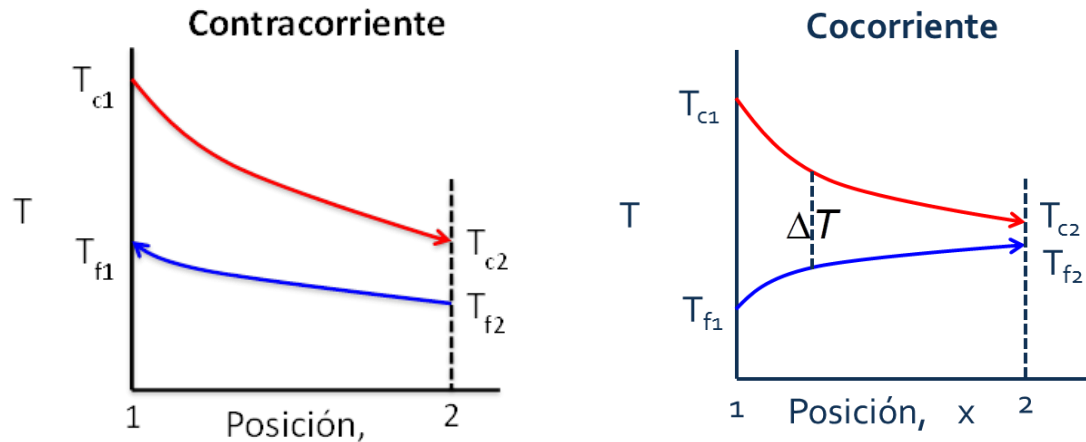
Ecuación del delta de temperatura logarítmico, contracorriente

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(T_{c1} - T_{f1}) - (T_{c2} - T_{f2})}{\ln\left(\frac{(T_{c1} - T_{f1})}{(T_{c2} - T_{f2})}\right)} \quad (5-4)$$

Ecuación del delta de temperatura logarítmico, cocorriente

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(T_{c1} - T_{f1}) - (T_{c2} - T_{f2})}{\ln\left(\frac{(T_{c1} - T_{f1})}{(T_{c2} - T_{f2})}\right)} \quad (5-5)$$

Regímenes de flujo en los intercambiadores de calor



En la **Figura 24** se aprecia el periodo de 2011, donde se inicia con operación estable y luego se observa una caída del flujo, afectando la transferencia de calor. La caída de velocidad de flujo por el intercambiador es continua, llegando a valores inferiores de 3 ft/s, lo cual es una velocidad no recomendable para intercambiadores de calor por incrementar su factor de ensuciamiento. Se obtuvo correlación de Pearson de 0,9642, con valores de referencia de (-1 a +1), entre la transferencia de calor y el cambio de velocidad de flujo por los tubos del intercambiador (ver **Anexo I**). Evidenciando que comparado con el periodo 2010, el equipo ha presentado pérdida de transferencia de calor asociado a la disminución de la velocidad de flujo por los tubos del intercambiador; la pérdida de velocidad de flujo es consecuencia del ensuciamiento que presenta los tubos del intercambiador, donde no permite aumentar el flujo. En la **Figura 26** se evidencia que desde junio de 2011 se tiene disminución en el coeficiente global de transferencia de calor afectando la transferencia de calor del intercambiador hasta la parada de planta para reparación general (ver **Figura 27**). En la **Figura 38** se evidencia que para este periodo de tiempo se tiene disminución en la °API del

slurry lo que aumenta la resistencia a fluir del slurry y promueve ensuciamiento por baja velocidad por los tubos de los intercambiadores.

Para el periodo de tiempo de mayo y junio de 2014 se observa en la **Figura 25** oscilaciones de velocidad de flujo y transferencia de calor, causadas por obstrucción continua de los intercambiadores, se realiza soplado con vapor en sentido contrario a la dirección del flujo de slurry, removiendo la obstrucción de los tubos de los intercambiadores. Posteriormente se incrementa la °API en el Slurry circulante de valores de -2 a 1 logrando disminuir la resistencia a fluir del slurry y con ello aumentando la velocidad de flujo por los intercambiadores. (Ver **Figura 25** y **Figura 39**). Se obtuvo correlación de Pearson de 0,9924, que comparado con los periodos 2010 y 2011, se evidencia mayor relación entre la transferencia de calor y el cambio de velocidad de flujo por los tubos del intercambiador (ver **Anexo J**). Sin embargo, al revisar el coeficiente de transferencia de calor nos muestra que para el periodo 2014 aunque se tiene muy buena transferencia de calor, el coeficiente de transferencia de calor disminuye aproximadamente 25% y se estabiliza. El aumento en la transferencia de calor se ve favorecida por el aumento de flujo por los intercambiadores, que a su vez se ve favorecido por el aumento de °API en el slurry para este periodo (ver **Figura 39**)

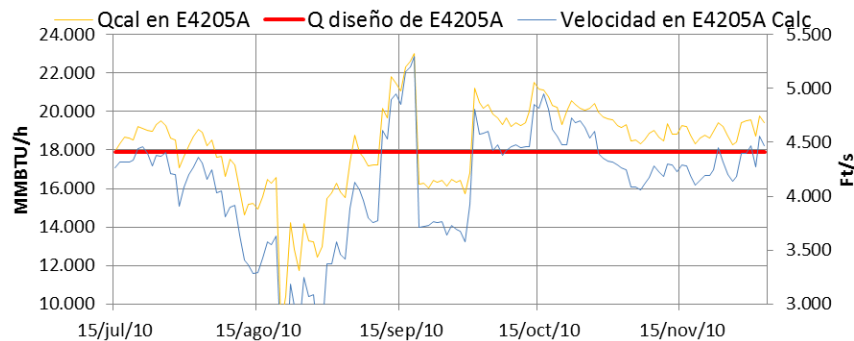


Figura 23. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y la velocidad de flujo por los tubos en el intercambiador de calor E4205A para el año 2010

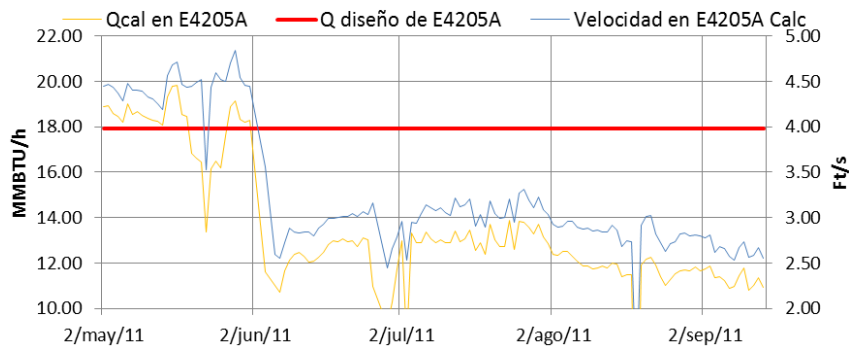


Figura 24. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y la velocidad de flujo por los tubos en el intercambiador de calor E4205A para el año 2011

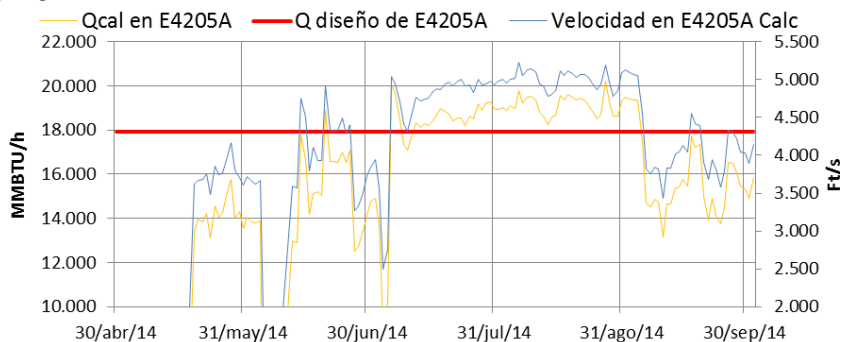


Figura 25. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y la velocidad de flujo por los tubos en el intercambiador de calor E4205A para el año 2014.

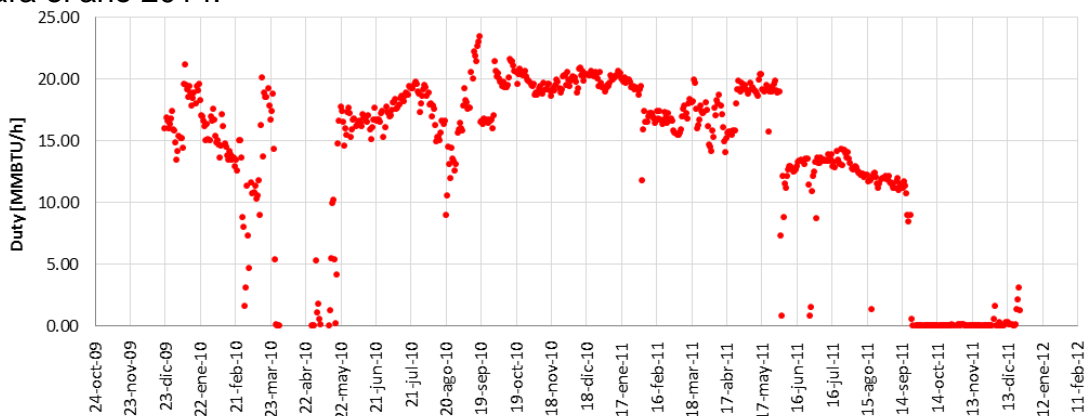


Figura 26. Evolución en el tiempo para la transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205A para el año 2010 y 2011

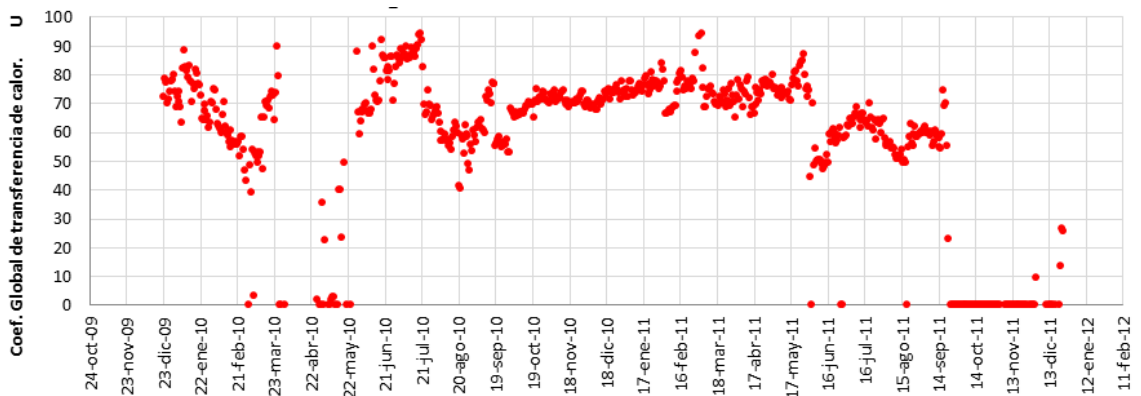


Figura 27. Evolución en el tiempo para el coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205A para el año 2010 y 2011

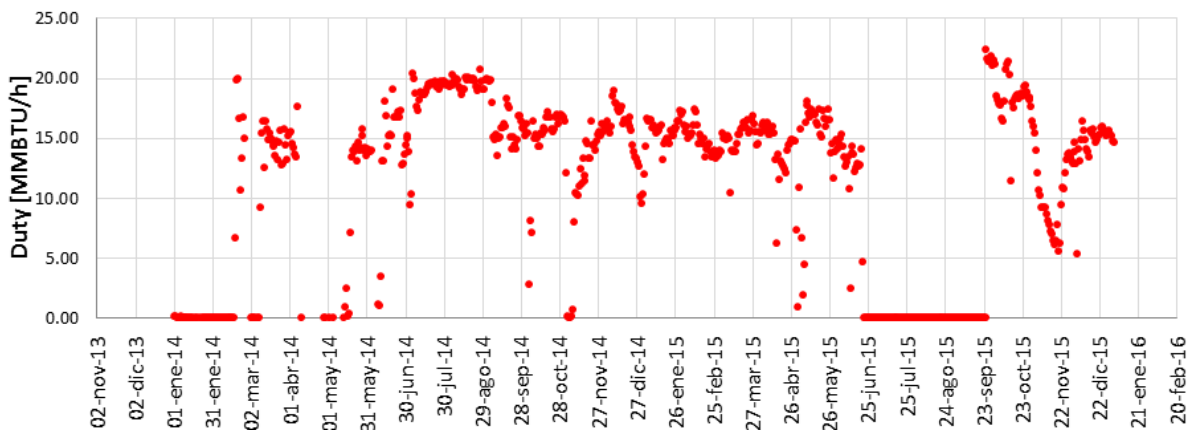


Figura 28. Evolución en el tiempo para la transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205A para el año 2014

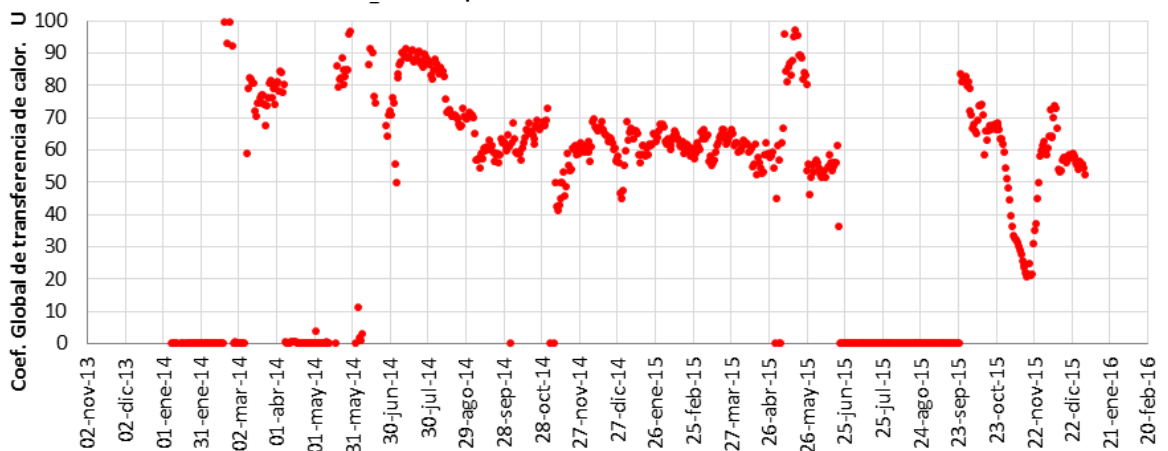


Figura 29. Evolución en el tiempo para el coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205A para el año 2014.

De la **Figura 30** a la **Figura 32** se muestra el comportamiento a lo largo del tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor en el intercambiador de calor y la velocidad de flujo por los tubos del intercambiador de calor E4205B.

Para el periodo 2010 se logra recuperar la velocidad de flujo a través del intercambiador de calor realizando soplado con vapor en contracorriente para remover partículas de catalizador que se depositan en la entrada de los tubos (ver **Figura 30**). Se obtuvo correlación de Pearson de 0,9979, entre la transferencia de calor y el cambio de velocidad de flujo por los tubos del intercambiador (ver Anexo K). Evidenciando dependencia de la transferencia de calor al cambio de velocidad de flujo por los tubos del intercambiador, lo que corresponde a la condición normal cuando los intercambiadores están limpios. En las **Figura 33** y **Figura 34** se observa buen desempeño del sistema para el periodo septiembre a noviembre donde se tiene coeficiente de transferencia estable.

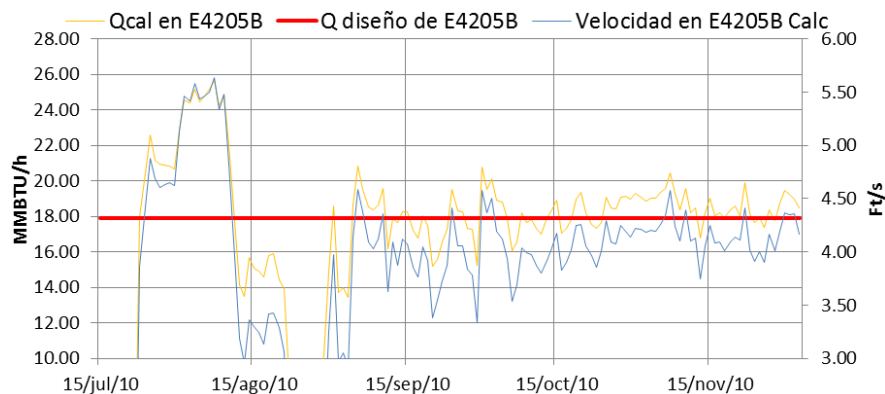


Figura 30. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y la velocidad de flujo por los tubos en el intercambiador de calor E4205B para el año 2010

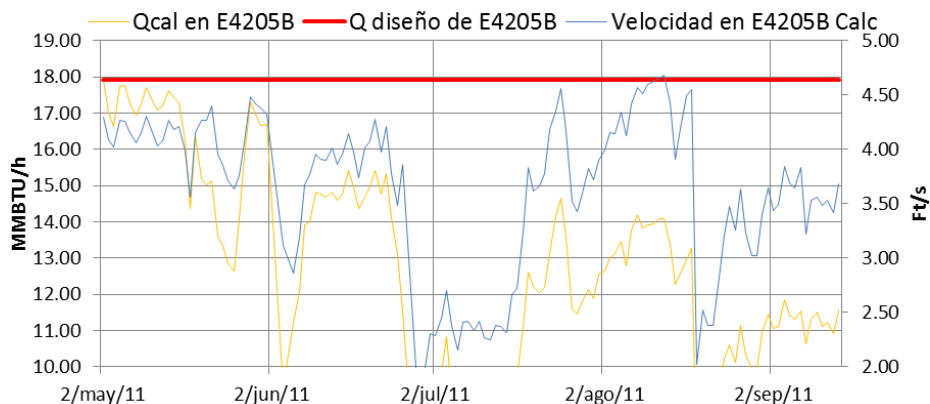


Figura 31. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y la velocidad de flujo por los tubos en el intercambiador de calor E4205B para el año 2011

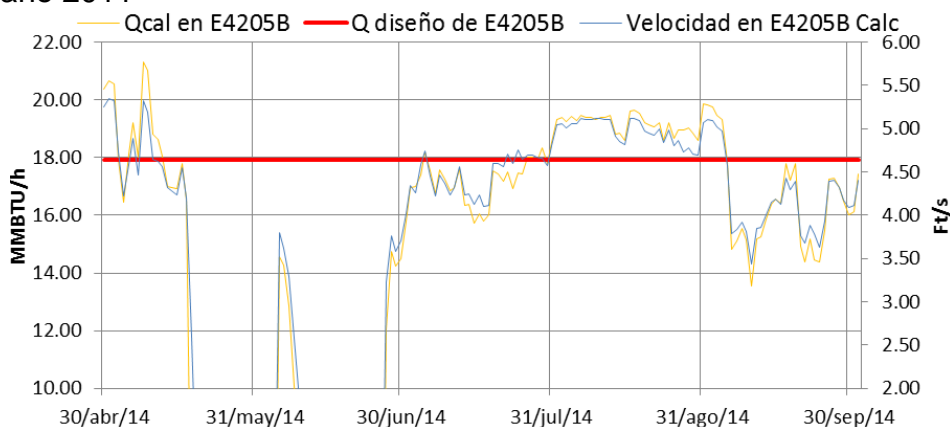


Figura 32. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y la velocidad de flujo por los tubos en el intercambiador de calor E4205B para el año 2014

Para el periodo 2011 en el E4205B se observa pérdida de velocidad de flujo por el intercambiador y en su defecto pérdida de transferencia de calor. Sin embargo, para el mes de agosto se recupera la velocidad de flujo, para este caso la transferencia de calor debió aumentar de acuerdo a la Ecuación 3-1 en función de la velocidad de flujo, pero la transferencia de calor disminuye, lo que refleja que el intercambiador de calor tiene ensuciamiento en sus tubos y ha perdido área de transferencia de calor (ver **Figura 31**). Se obtuvo correlación de Pearson de **0,8566**, entre la transferencia de calor y el cambio de velocidad de flujo por los tubos del intercambiador (ver **Anexo L**). Evidenciando que comparado con el periodo 2010, el equipo ha presentado pérdida de transferencia de calor asociado

a la disminución de la velocidad de flujo por los tubos del intercambiador; la pérdida de velocidad de flujo es consecuencia del ensuciamiento que presenta los tubos del intercambiador. El aumento de flujo y no aumento de transferencia de calor se observa con más detalle en las **Figura 32** y **Figura 33**, donde se evidencia la pérdida del coeficiente de transferencia de calor desde el mes de abril hasta septiembre cuando se sacó de servicio la planta para reparación general. En la **Figura 38** se evidencia que para este periodo de tiempo se tiene disminución en la °API del slurry lo que aumenta la resistencia a fluir del slurry y promueve ensuciamiento por baja velocidad por los tubos de los intercambiadores.

Para el periodo de tiempo de mayo y junio de 2014 se observa oscilaciones de velocidad de flujo y transferencia de calor, se logra estabilidad operacional del sistema similar a la **Figura 25**. Posteriormente se incrementa la °API en el Slurry circulante de valores de -2 a 1 logrando disminuir la resistencia a fluir del slurry y con ello aumentando la velocidad de flujo por los intercambiadores. (Ver **Figura 39**). Se obtuvo correlación de Pearson de 0,9948, entre la transferencia de calor y el cambio de velocidad de flujo por los tubos del intercambiador (ver Anexo M). Aumentando su correlación en comparado con los periodos 2010 y 2011. Se evidencia que para el mes de junio de 2014 se tiene disminución en el coeficiente de transferencia de calor, posteriormente estabiliza y se mantiene relativamente constante para el resto de periodo de 2014.

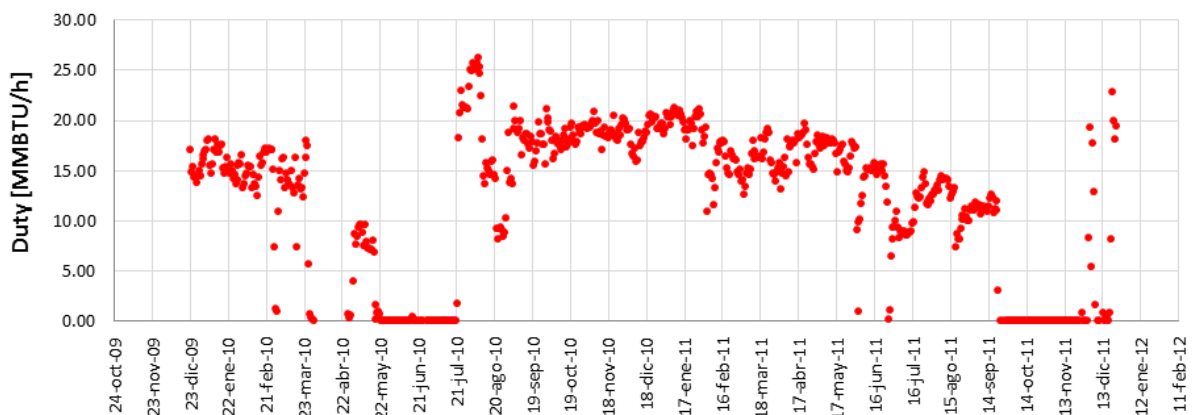


Figura 33. Evolución en el tiempo para la transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205B para el año 2010 y 2011.

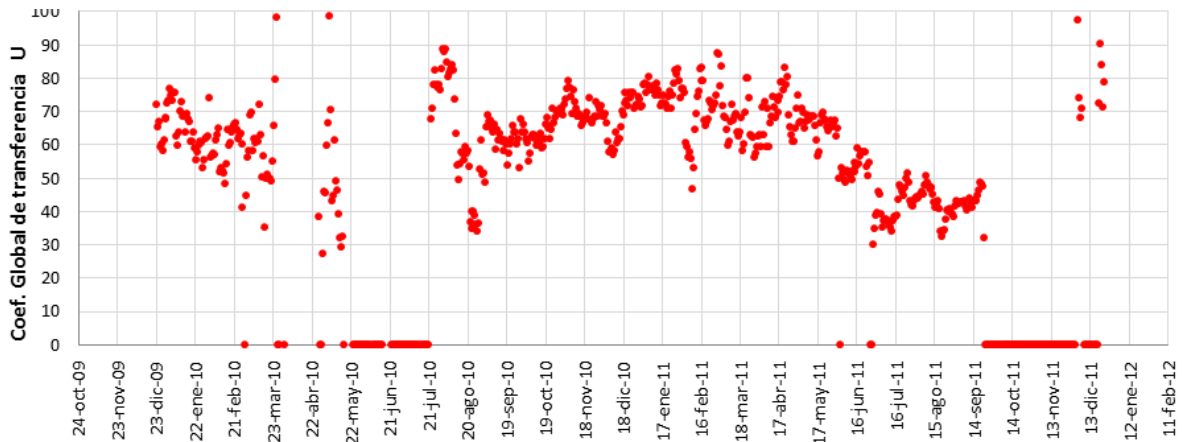


Figura 34. Evolución en el tiempo para el coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205B para el año 2010 y 2011.

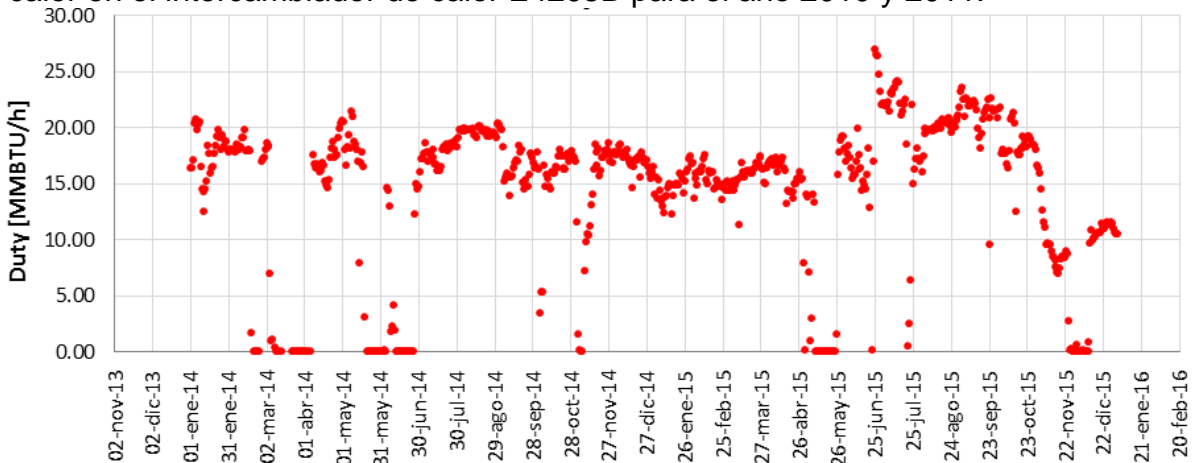


Figura 35. Evolución en el tiempo para la transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205B para el año 2014.

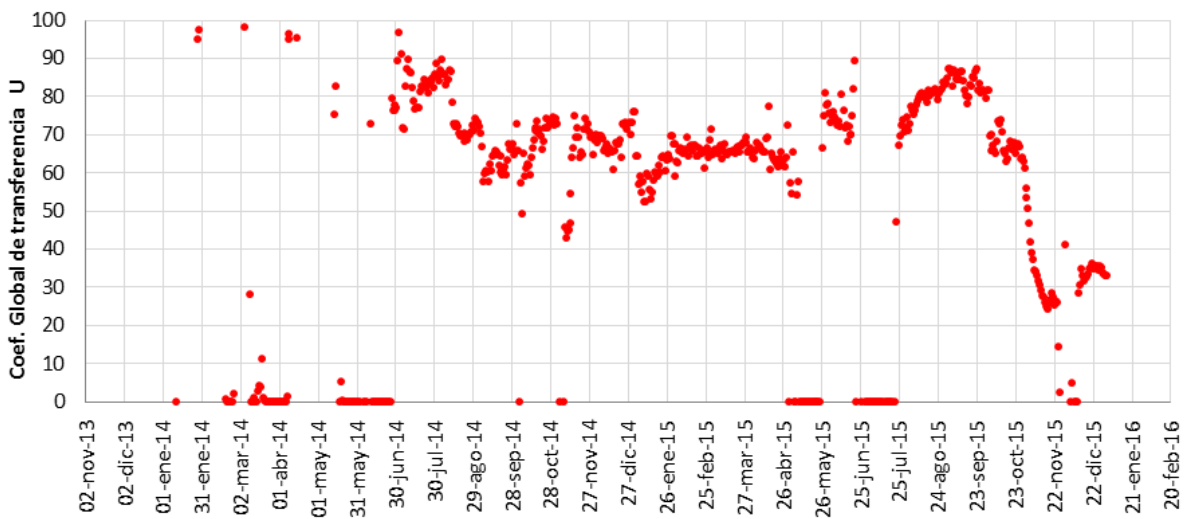


Figura 36. Evolución en el tiempo para el coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador de calor E4205B para el año 2014.

4.3.2 Correlación de variables de transferencia de calor y °API en el slurry.

Se realiza correlación de variables operacionales para tres periodos de tiempo diferentes, (2010, 2011 y 2014) donde se analiza el impacto que puede tener cada variable sobre la operación de los intercambiadores de calor. Las variables analizadas son: transferencia de calor y °API del slurry.

De la **Figura 37** a la **Figura 39** se muestra el comportamiento a lo largo del tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor en el intercambiador de calor y °API del intercambiador de calor E4205A.

Para el periodo de 2010 se relaciona el análisis de los intercambiadores, cuando la °API del slurry disminuye, por tanto se vuelve más viscoso y tiene mayor resistencia a fluir (ver **Figura 37**), aumenta la caída de presión por cada intercambiador, disminuyendo la velocidad de flujo y con ello la transferencia de calor. Se obtuvo correlación de Pearson de 0,1511, entre la °API y la transferencia de calor por los tubos del intercambiador (ver **Anexo N**). Evidenciando que se mantiene la transferencia de calor aunque aumente la resistencia a fluir, los efectos negativos de pérdida de transferencia se ven en tiempo posterior cuando el ensuciamiento sea mayor, el ensuciamiento es acumulativo en el tiempo.

Para el periodo 2011, mostrado en la **Figura 38** se observa que a medida que disminuye la °API del Slurry disminuye la transferencia de calor, menor velocidad de flujo por los intercambiadores. Se obtuvo correlación de Pearson de 0,2005, entre la °API y la transferencia de calor por los tubos del intercambiador (ver Anexo O). Evidenciando baja relación entre la °API del slurry y la transferencia de calor en el intercambiador, pero mayor a la observada en el periodo 2010. En este periodo de tiempo se tiene mayor ensuciamiento y los cambios en el °API del slurry se reflejan disminución en la transferencia de calor. El Coeficiente de transferencia de calor se ve afectado (ver **Figura 27**).

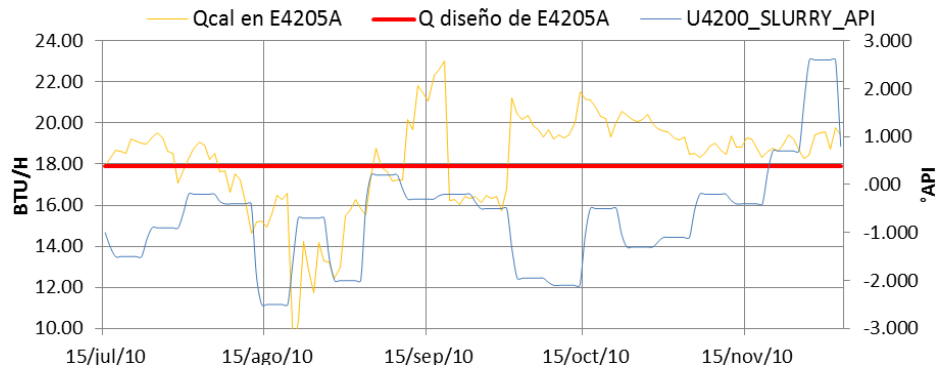


Figura 37. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y °API en el intercambiador de calor E4205A para el año 2010

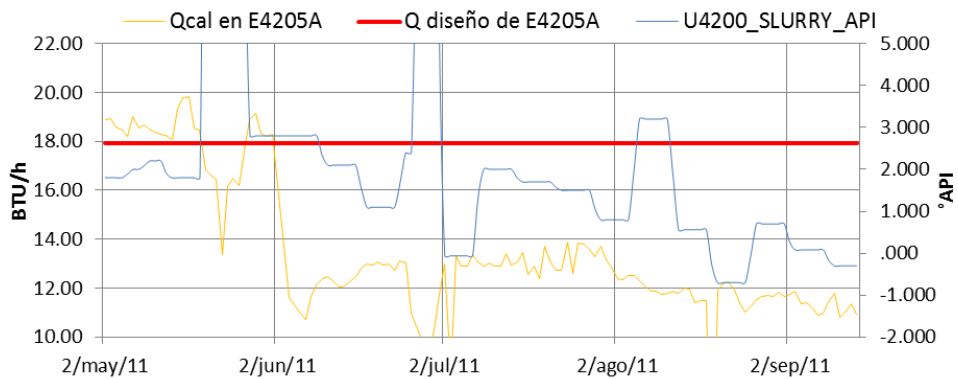


Figura 38. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y °API en el intercambiador de calor E4205A para el año 2011

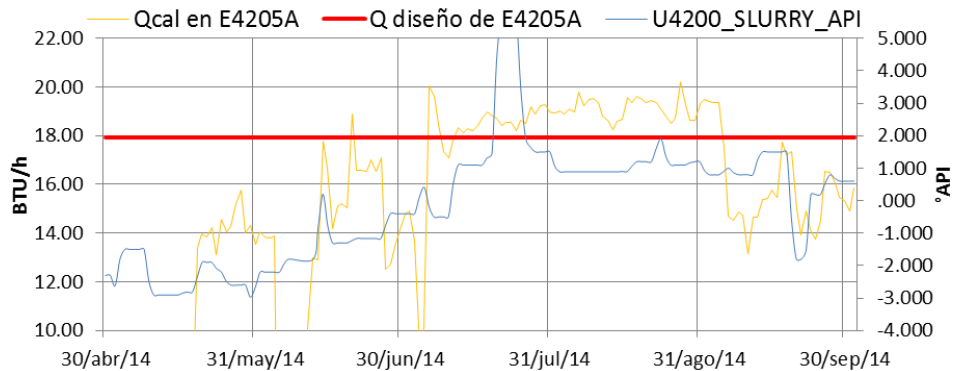


Figura 39. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales retiro de calor y °API en el intercambiador de calor E4205A para el año 2014

Para el año 2014 (ver **Figura 39**) se observa que la transferencia de calor se aumenta en la medida que aumenta la °API del slurry. Al aumentar la °API del Slurry disminuye la resistencia a fluir, aumenta la velocidad de flujo por los intercambiadores, al aumentar la velocidad de flujo aumenta la transferencia de

calor y disminuye el ensuciamiento por precipitación. Se obtuvo correlación de Pearson de 0,6289, entre la °API y la transferencia de calor por los tubos del intercambiador (ver **Anexo P**). Evidenciando relación moderada entre la °API del slurry y la transferencia de calor en el intercambiador. El coeficiente de calor se ve favorecido por el aumento de la °API el slurry (ver **Figura 29**) donde se observa estabilidad en el coeficiente, logrando mayor velocidad de flujo por los intercambiadores de calor (ver **Figura 25**) lo cual disminuye el ensuciamiento por sedimentación de material particulado.

4.3.3 Comportamiento entre nivel de la torre fraccionadora y la temperatura de fondo de la torre.

Se realiza análisis de variables operacionales para tres periodos de tiempo diferentes, (2010, 2011 y 2014) donde se analiza el impacto que puede tener cada variable sobre la operación del sistema. Las variables analizadas son: nivel de la torre y temperatura de fondo de la torre.

Para el periodo de tiempo de 2010 referenciado en la **Figura 40** se observó que el nivel en el fondo de la torre fraccionadora en promedio fue menor al 53% con temperatura promedio del fondo de la torre de 689°F. De acuerdo a los reportes operacionales se tuvo limitación en la circulación de slurry por los intercambiadores, información que corresponde a la **Figura 23** y **Figura 30** donde se relaciona la velocidad de flujo por los tubos de los intercambiadores y la transferencia de calor en los E4205A/B, evidenciando la causa de operar con temperatura mayor a 680°F y nivel mayor a 50%.

Para el periodo de tiempo de 2011 referenciado en la **Figura 41** se observó que el nivel en el fondo de la torre fraccionadora en promedio fue menor al 56% con temperatura promedio en el fondo de la torre de 684°F. De acuerdo a los reportes operacionales se tuvo en limitación en la circulación de slurry por los intercambiadores, información que corresponde en la **Figura 24** y **Figura 31**

correspondientes al comportamiento de velocidad de flujo por los tubos de los intercambiadores y transferencia de calor en los E4205A/B.

Para el periodo de tiempo de 2014 referenciado en la **Figura 42** se observó que el nivel en el fondo de la torre fraccionadora en promedio fue menor al 39% con temperatura promedio del fondo de la torre de 674°F. De acuerdo a los reportes operacionales se tuvo estabilidad en la circulación de slurry por los intercambiadores, información que corresponde en la **Figura 25** y **Figura 32** correspondientes al comportamiento de velocidad de flujo por los tubos de los intercambiadores y transferencia de calor E4205A/B.

La temperatura y el nivel del fondo de la torre fraccionadora son dos variables importantes que de tenerlas en rangos de control, disminuye la formación de coque en el fondo de la torre fraccionadora, la temperatura contribuye a la formación de coque por cracking térmico y el nivel de la torre a la formación de coque por mayor tiempo de residencia del slurry a alta temperatura antes de llegar a los intercambiadores. El valor de temperatura a controlar en el fondo de la torre fraccionadora es de máximo 680°F y el nivel de la torre a controlar es entre 30 y 45% para disminuir la contribución en la formación de coque.

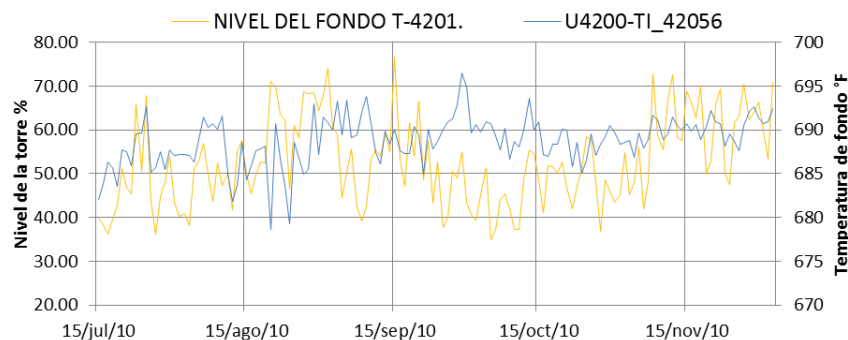


Figura 40. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales nivel de la torre fraccionadora y la temperatura de fondo de la torre para el año 2010

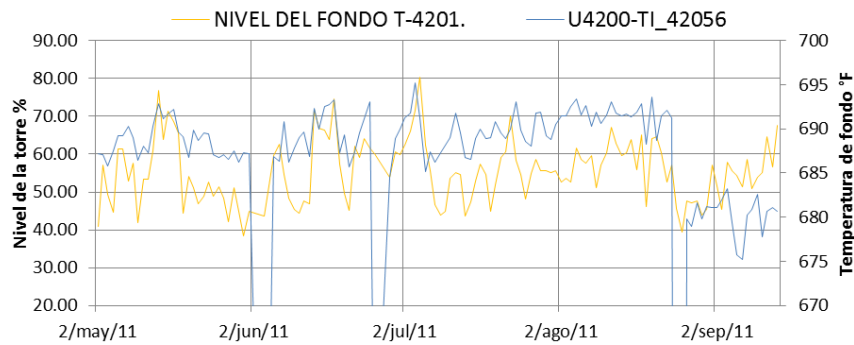


Figura 41. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales nivel de la torre fraccionadora y la temperatura de fondo de la torre para el año 2011

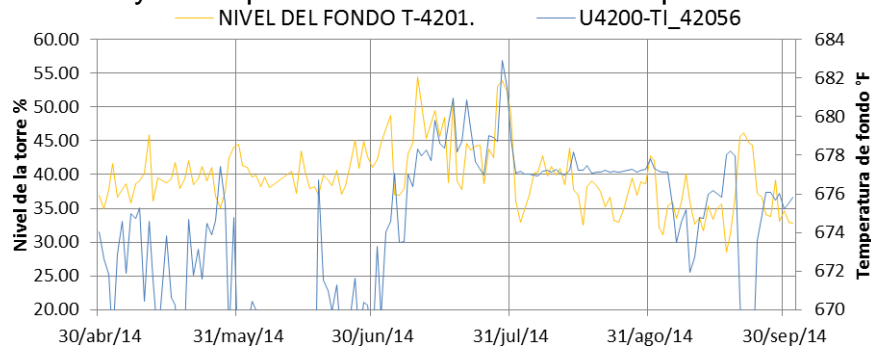


Figura 42. Evolución en el tiempo para las dos variables operacionales nivel de la torre fraccionadora y la temperatura de fondo de la torre para el año 2014

4.4 CONDICIONES OPERACIONALES PROPUESTAS PARA MEJORAR LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SISTEMA DE FONDOS DE LA FCC UOP II

4.4.1 Variables asociadas al sistema de fondos de la torre fraccionadora

VARIABLE	UNIDAD	VALOR MIN.	VALOR MÁX.
Temperatura en el fondo de la fraccionadora	°F	670	680
Nivel del fondo de la torre	%	30	50
Velocidad en intercambiadores	Ft/s	4,5	7
°API en el Slurry	°API	0,5	2
Cenizas en el slurry	%Wt	0	0,2
Índice de Inestabilidad Coloidal según análisis SARA	-	0,15	0,30

Temperatura del fondo de la torre fraccionadora:

Se recomendó operar el sistema del fondo de la torre fraccionadora de la FCC UOP II con temperatura entre los rangos de 670 a 680°F para disminuir la formación de compuestos que afectan la transferencia de calor en los intercambiadores. En el sistema de fondo de la fraccionadora se retira cerca del 30% del calor que viene en los gases desde el reactor (985 – 995°F). El retiro de calor se realiza con el precalentamiento de la carga a cracking, generación de vapor de agua, manteniendo relación de recirculación de slurry / carga entre 1.5 a 2 veces y manteniendo rebose de ALC al fondo de la torre para retiro de calor como calor latente por la evaporación del mismo.

Nivel de la torre fraccionadora:

Se recomendó operar la torre fraccionadora de la FCC UOP II con nivel entre los rangos de 30 a 45°F para disminuir el tiempo de residencia del slurry en el fondo de la torre, lo cual promueve la formación de coque por craqueo térmico y sedimentación, afectando la transferencia de calor en los intercambiadores. El flujo de slurry producto oscila de acuerdo a la composición y calidad de la carga a cracking (entre 10 y 13%). El nivel de la torre fraccionadora se controla con el flujo de slurry producto a tanque.

Velocidad en los tubos de los intercambiadores:

Se recomendó operar los intercambiadores de calor del fondo de la torre fraccionadora de la FCC UOP II con velocidad por los tubos entre los rangos de 4,5 a 7 ft/s, pero preferiblemente 5,7 ft/s, para disminuir el fenómeno de sedimentación de material particulado y precipitación de asfaltenos, lo cual promueve el ensuciamiento de los intercambiadores, afectando la transferencia de calor. La velocidad de flujo por los intercambiadores se controla con flujo de slurry por cada intercambiador.

Gravedad API (°API) del slurry:

Se recomendó operar el sistema de fondos de la torre fraccionadora de la FCC UOP II con °API entre los rangos de 0,5 a 2 grados para disminuir la resistencia a fluir del slurry por los tubos de los intercambiadores de calor, la baja °API en el sistema de fondos afecta directamente la velocidad de flujo por tubos de los intercambiadores, lo cual promueve el ensuciamiento de los intercambiadores, afectando la transferencia de calor en los intercambiadores. La °API del slurry se controla con el contenido de ALC que se adiciona al slurry. De acuerdo al valor de °API dado por el laboratorio se aumenta o disminuye el flujo de ALC a tanque para que la diferencia salga como producto o refluje al fondo de la torre.

Cenizas en el slurry:

Se recomendó operar el sistema de fondos de la torre fraccionadora de la FCC UOP II con valores menores de 0,2%wt para disminuir la contribución en el ensuciamiento de los intercambiadores de calor, el alto contenido de cenizas en el slurry tiene alto impacto en el ensuciamiento de los tubos de los intercambiadores, afectando la transferencia de calor. En promedio, el 90% de la composición de los sólidos encontrados en los intercambiadores de calor es catalizador. El contenido de cenizas en el slurry se controla con la eficiencia de los ciclones en el reactor, con el flujo de vapor de despojo al reactor y finos en el catalizador de equilibrio.

Índice de Inestabilidad Coloidal (I.I.C):

Se recomendó operar el sistema de fondos de la torre fraccionadora de la FCC UOP II entre los rangos de 0,15 a 0,3 de I.I.C para tener mayor estabilidad en los asfaltenos presentes en el slurry. La precipitación de asfaltenos forma coque a través del sistema que al encontrar cenizas de catalizador promueven la formación de moléculas de mayor tamaño. La alta inestabilidad de los asfaltenos afecta la transferencia de calor en los intercambiadores de calor por ensuciamiento. De acuerdo a los análisis de mezclas realizado se estima que controlando la °API del slurry entre 0,5 a 2,0 grados se tiene estabilidad de los asfaltenos. Sin embargo,

es necesario realizar análisis SARA a la corriente de slurry de forma periódica para ajustar el parámetro de control operacional. Al cambiar la carga, cambia el porcentaje de asfaltenos, resinas, aromáticos y saturados en el slurry.

4.5 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN PARA MEJORAR LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LOS INTERCAMBIADORES DEL SISTEMA DE FONDOS DE LA FCC UOP II.

4.5.1 Aumentar API en el slurry

Para disminuir la resistencia a fluir del slurry, disminuir su viscosidad, es necesario que el slurry circulante tenga la gravedad API en rango entre 0,5 y 2,0. De acuerdo al análisis de mezclas de slurry y ALC realizado por el ICP, el mantener el slurry con valores de °API en rango de 0,5 y 2,0 se logra estabilidad coloidal de los asfaltenos en el slurry, por mayor contenido aromático tiende a mantener los asfaltenos en solución. El aumento de la gravedad API, ocasiona disminución de la densidad y la viscosidad, permite que el diferencial de presión por los tubos de los intercambiadores sea menor y a su vez se logra tener mayor velocidad de flujo por los intercambiadores disminuyendo su ensuciamiento por efecto de precipitación y sedimentación de material particulado.

Propuesta: Controlar gravedad API en el slurry en rango de 0,5 a 2,0 grados.

Para incrementar la °API del slurry operacionalmente se disminuye la salida de ALC producto a tanque para que el excedente de ALC se convierta en reflujo interno de la torre y caiga al fondo de la torre. De acuerdo al resultado del análisis de laboratorio que se realiza dos veces por semana al slurry para verificar la °API se realiza ajuste a la producción de ALC para aumentar o disminuir la gravedad API del slurry, disminuyendo o aumentando producción de ALC respectivamente.

4.5.1.1 Impacto económico por disminución de carga para limpieza de los E4204A/B ó E4205A/B

Actualmente se realiza limpieza mecánica una vez al año a cada intercambiador de calor E4204A/B y E4205A/B para recuperar su transferencia de calor. Para lo cual se requiere disminuir carga en 10.000 BPD, se bajara carga de 35.000 a 25.000 BPD. Para la limpieza mecánica de cada intercambiador se requieren 5 días, incluyendo limpieza, pruebas y puesta en servicio.

En los 5 días se tiene impacto económico de U\$2'100.000, descriptos a continuación:

- ✓ Margen día por barril cargado a la FCC UOP II (U\$): 10.5
- ✓ Tiempo de parada (días): 5
- ✓ Carga a la FCC (BPD): 10.000
- ✓ Intercambiadores intervenidos: 4

$$\text{Costo de disminuir carga} = 10.000 * 10.5 * 5 * 4 = \text{U\$2'100.000/año}$$

$$\text{Costo de mantenimiento} = 8.000 * 4 = \text{U\$32.000/año}$$

$$\text{Costo por agregar ALC al slurry} = \text{U\$460.000/año}$$

Para incrementar en un grado el API del slurry se requiere agregar aproximadamente el 5% ALC, es decir, para subir un grado de API a 3150 BPD de slurry se requiere agregar 158 BPD de ALC, al cargarle el costo diferencial de precio de ALC y slurry (8 U\$/barril) se tiene un costo de U\$460.000/año.

4.5.1.2 Beneficio económico de la propuesta de aumentar °API al Slurry

Al implementar la propuesta de aumentar la °API se espera mantener la transferencia de calor en los intercambiadores y prolongar la frecuencia de intervención por mantenimiento de los intercambiadores de 1 a 2 años

Costo anual por disminuir carga para limpieza mecánica de los E4204A/B y los E4205A/B **U\$2'100.000** + Costo de mantenimiento **U\$32.000** - Costo por producción de ALC **U\$460.000 = U\$1'672.000**

Al aumentar la frecuencia de 1 a 2 años, tenemos:

Costo bianual por disminuir carga para limpieza mecánica de los E4204A/B y los E4205A/B: **U\$2'100.000** + Costos por mantenimiento **U\$32.000 = U\$2'132.000**

Beneficio económico por implementar la propuesta = Costo anual * 2 – Costo anual – Costo del ALC convertido en slurry = **U\$2'100.000** - Costo por menor producción de ALC **U\$460.000 = U\$1'672.000**

En resumen el ahorro corresponde a los costos de un año.

4.5.2 Aumentar velocidad de flujo por los tubos de los Intercambiadores de calor

El control de velocidad de flujo en los intercambiadores del sistema de fondo de las fraccionadoras en FCC requiere ser entre 1,83 a 3,05 m/s (6,0 a 10 ft/s) de acuerdo al análisis realizado por Hunt et al. [6]. Cuando las velocidades de flujo en los tubos de los intercambiadores son menores de 1,83 m/s (6 ft/s) aumenta la probabilidad de precipitación de catalizador y partículas de coque, facilitando la formación de moléculas de mayor tamaño.

Dentro del análisis realizado al cálculo de velocidad de flujo en los tubos de los intercambiadores E4203A/B/C/D, E4204A/B y E4205A/B se identificó que la velocidad que se muestra en el bloque de cálculo que tiene el operador de tablero como referencia es menor a la velocidad calculada de acuerdo al flujo de circulación y el número de tubos que tiene cada intercambiador. La velocidad de flujo por los tubos de los intercambiadores se deben controlar entre 4,5 y 7 ft/s para disminuir el fenómeno de precipitación y sedimentación de material particulado.

Propuesta: Se propone ajustar el bloque de cálculo de velocidad de flujo por los tubos en los intercambiadores E4203A/B/C/D, E4204 A/B y E4205 A/B del sistema de fondo de la torre fraccionadora de la Cracking II, de acuerdo a las ecuaciones relacionadas y controlar la velocidad de flujo por los tubos de los intercambiadores entre 4,5 y 7,0 ft/s.

Tomando como base la ecuación de caudal de dinámica de fluidos $Q = AV$, despejamos la velocidad y obtenemos que la velocidad es igual a caudal sobre el área $V = Q/A$.

$$Velocidad = \frac{Flujo}{Área\ por\ paso}$$

Que se puede expresar en unidades de [ft/s], fue necesario convertir el flujo volumétrico estándar que arroja el DCS a flujo volumétrico real y posteriormente a flujo másico, para esto se usó la densidad en función de la temperatura de operación del slurry (ver **Anexo Q**).

$$BPD_{real} = BPD_{estandar} * \frac{\rho_{60^{\circ}F}}{\rho_T}$$

4.5.2.1 Cálculo de la velocidad para el intercambiador E-4203A/B/C/D

$$Velocidad = \frac{BPD_{real}}{Área\ por\ paso\ [ft^2]} * \frac{5,614\ [ft^3]}{BPD} * \frac{Día}{24\ [h]} * \frac{hora}{60\ [min]} * \frac{minuto}{60\ [s]}$$

$$Velocidad = BPD_{real} * (1,067468175 * 10^{-3})$$

$$Velocidad = BPD_{estandar} * \frac{\rho_{60^{\circ}F}}{\rho_T} * (1,067468175 * 10^{-3})$$

$$Velocidad = BPD_{estandar} * \frac{-0,0229(60) + 69,487}{-0,0229(T) + 69,487} * (1,067468175 * 10^{-3})$$

$$Velocidad = FT_42071 * \frac{-0,0229(60) + 69,487}{-0,0229(TI_42095) + 69,487} * (1,067468175 * 10^{-3})$$

Velocidad [ft/s]

$$= FT_{42071} * \frac{68,113}{-0,0229(TI_{42095}) + 69,487} * (1,067468175 * 10^{-3})$$

4.5.2.2 Cálculo de la velocidad para el intercambiador E-4204A/B

$$Velocidad = \frac{BPD_{real}}{\text{Área por paso [ft}^2]} * \frac{5,614 [ft^3]}{BPD} * \frac{Día}{24 [h]} * \frac{hora}{60 [min]} * \frac{minuto}{60 [s]}$$

$$Velocidad = BPD_{real} * (1,432447984 * 10^{-4})$$

$$Velocidad = BPD_{estandar} * \frac{\rho_{60^{\circ}F}}{\rho_T} * (1,432447984 * 10^{-4})$$

$$Velocidad = BPD_{estandar} * \frac{-0,0229(60) + 69,487}{-0,0229(T) + 69,487} * (1,432447984 * 10^{-4})$$

$$Velocidad = (FT_{42008} + FT_{42071}) * \frac{-0,0229(60) + 69,487}{-0,0229(TI_{42007}) + 69,487} * (1,432447984 * 10^{-4})$$

Velocidad [ft/s]

$$= (FT_{42008} + FT_{42071}) * \frac{68,113}{-0,0229(TI_{42007}) + 69,487} * (1,432447984 * 10^{-4})$$

4.5.2.3 Cálculo de la velocidad para el intercambiador E-4205A

$$Velocidad = \frac{BPD_{real}}{\text{Área por paso [ft}^2]} * \frac{5,614 [ft^3]}{BPD} * \frac{Día}{24 [h]} * \frac{hora}{60 [min]} * \frac{minuto}{60 [s]}$$

$$Velocidad = BPD_{real} * (3,652742391 * 10^{-4})$$

$$Velocidad = BPD_{estandar} * \frac{\rho_{60^{\circ}F}}{\rho_T} * (3,652742391 * 10^{-4})$$

$$Velocidad = BPD_{estandar} * \frac{-0,0229(60) + 69,487}{-0,0229(T) + 69,487} * (3,652742391 * 10^{-4})$$

$$Velocidad = FT_{42036} * \frac{-0,0229(60) + 69,487}{-0,0229(TI_{42067}) + 69,487} * (3,652742391 * 10^{-4})$$

$Velocidad [ft/s]$ $= FT_{42036} * \frac{68,113}{-0,0229(TI_{42067}) + 69,487} * (3,652742391 * 10^{-4})$

4.5.2.4 Cálculo de la velocidad para el intercambiador E-4205B

$$Velocidad = \frac{BPD_{real}}{\text{Área por paso [ft}^2]} * \frac{5,614 [ft^3]}{BPD} * \frac{Día}{24 [h]} * \frac{hora}{60 [min]} * \frac{minuto}{60 [s]}$$

$$Velocidad = BPD_{real} * (3,652742391 * 10^{-4})$$

$$Velocidad = BPD_{estandar} * \frac{\rho_{60°F}}{\rho_T} * (3,652742391 * 10^{-4})$$

$$Velocidad = BPD_{estandar} * \frac{-0,0229(60) + 69,487}{-0,0229(T) + 69,487} * (3,652742391 * 10^{-4})$$

$$Velocidad = FT_{42040} * \frac{-0,0229(60) + 69,487}{-0,0229(TI_{42069}) + 69,487} * (3,652742391 * 10^{-4})$$

$Velocidad [ft/s]$ $= FT_{42040} * \frac{68,113}{-0,0229(TI_{42069}) + 69,487} * (3,652742391 * 10^{-4})$

4.5.2.5 Beneficio económico de la propuesta de aumentar la velocidad por los intercambiadores E4203A/B/C/D, E4204A/B y E4205A/B

Para aumentar la velocidad de flujo por los tubos de los intercambiadores de calor de forma sostenida, se requiere implementar la propuesta 4.5.1. El aumento de viscosidad en los intercambiadores de calor aumenta su resistencia a fluir y consecuentemente se disminuye el flujo por cada intercambiador. El beneficio económico de esta propuesta es compartido con la propuesta 4.5.1.

Beneficio de la propuesta 7.1 = **U\$1'672.000**

4.5.3 Independizar los intercambiadores E4203A/B y E4203C/D

En el diseño original los E4203A/B/C/D operan en serie para disminuir la temperatura de 500 a 350 °F al slurry que succiona las P4202A/B y luego con los E4202A/B/C se disminuye la temperatura a 250 °F para enviar a almacenamiento a tanque. Se realizó propuesta para independizar los 4 intercambiadores, para operar con solo 2 intercambiadores en serie a baja carga o para operar con los 4 intercambiadores en serie con alta carga, el objetivo es que se tenga la facilidad de sacar de servicio 2 equipos y trabajar con solo 2 intercambiadores.

Cuando la FCC opere con carga mayor a 30.000 BPD se colocan las 2 parejas en servicio, cuando la FCC tenga carga igual o inferior a 30.000 BPD se opere con solo 1 pareja, la otra pareja está disponible en caso de ser requerida. Adicionalmente se tendrá la facilidad para realizar mantenimiento a una pareja con planta en operación.

En el **Diagrama 7** se tiene la condición de diseño vs la condición propuesta para los intercambiadores E4203A/B/C/D.

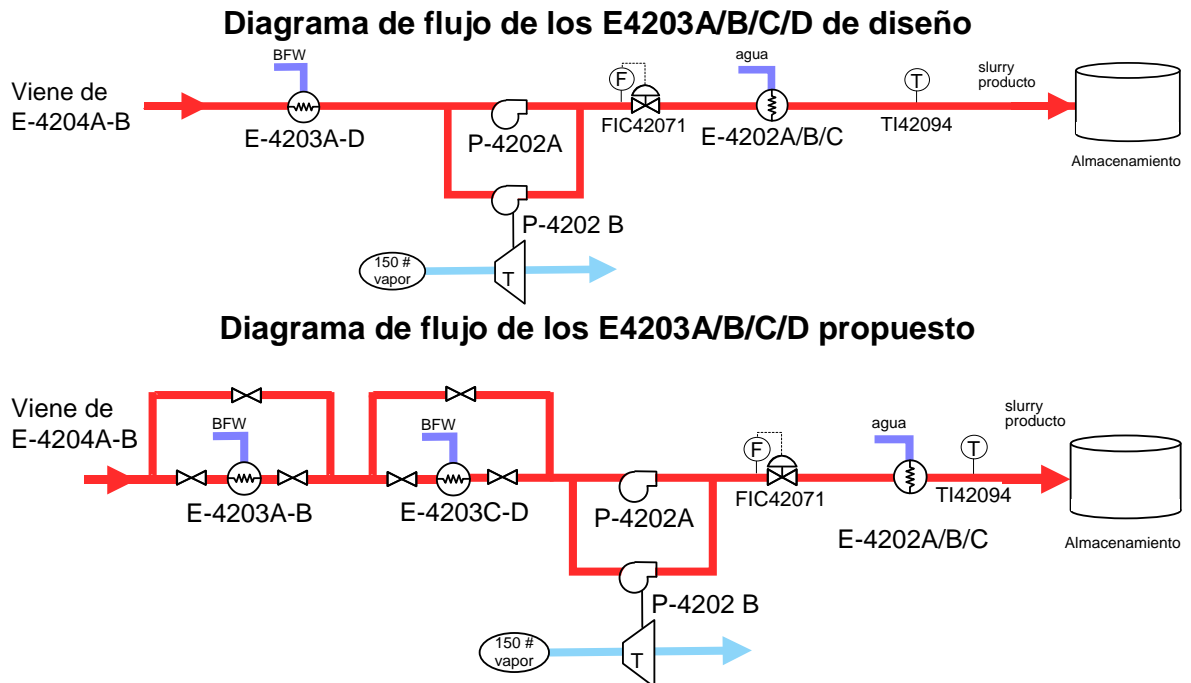


Diagrama 7. Esquema de los E4203 A/B/C/D de diseño vs propuesta de cambio.

4.5.3.1 Simulación en PRO II.

Para soportar la propuesta de cambio de esquema operacional de los E4203A/B/C/D se realizó simulación en PRO II. En las simulaciones realizadas se identificó que se puede operar la unidad de FCC UOP II de forma segura con carga hasta 30.000 BPD con solo dos intercambiadores E4203, con lo cual se obtiene temperatura menor a 350°F en la salida de estos intercambiadores. Cuando la carga a la FCC sea mayor a 30.000 BPD se opera con los 4 intercambiadores E4203. El límite alto de la temperatura a la salida de los E4203 es de 350°F.

En la **Tabla 17** se relaciona los datos de producto de la simulación con solo dos intercambiadores manejando 3690 BPD de slurry, lo que corresponde a 12,3% de producción de slurry para una carga de 30.000 BPD a la FCC. Teniendo en cuenta la temperatura a la salida de los intercambiadores disminuye de 500 a 337.6°F, la presión disminuye de 91.3 a 78.75 psig, teniendo una caída de presión de 12.5 psig vs 27 psig de diseño y el retiro de calor de 4.6 vs 5.6 MMBTU/h°F que se retira con los 4 intercambiadores, para mayor información (ver **Anexo R**).

Tabla 17. Simulación de los E4203 A/B con flujo de slurry de 3690 BPD

Stream Name		BFW_IN_1	BFW_IN_4	BFW_OUT	SLURRY UOPII	SLU10_IN_4	SLU10_OUT
Stream Description		AGUA PARA CALDERAS	AGUA PARA CALDERAS	AGUA PARA CALDERAS	SLURRY	SLURRY	SLURRY
Phase		Water	Water	Water	Liquid	Liquid	Liquid
					3690		
Rate	LB-MOL/HR	1774.08	1774.08	1774.08	216.40	216.40	216.40
	LB/HR	31960	31960	31960	58546	58546	58546
Std. Liq. Rate	FT3/HR	512.68	512.68	512.68	863.42	863.42	863.42
Temperature	F	313.90	250.00	391.57	500.00	412.73	337.63
Pressure	PSIA	590.09	591.70	588.45	91.30	85.29	78.75

HxRig Name		E-4203_1	E-4203_4			E4203A-D
HxRig Description		enfriador	enfriador			GLOBAL

Duty	MM BTU/HR	2.56	2.06			4.62
Area	FT2	376.00	376.00			752.00
Area (Required)	FT2	376.00	376.07			752.07
U-Value (Clean)	BTU/HR-FT2-F	116.48	95.61			
U-Value (Required)	BTU/HR-FT2-F	74.50	65.39			
U-Value (Fouling)	BTU/HR-FT2-F	74.51	65.38			
LMTD	F	103.56	93.11			
FT Factor		0.88	0.90			0.89
Hx Rig Tube velocity	ft/sec	4.52	4.38			

En la **Tabla 18** se relaciona los datos de producto de la simulación con los cuatro intercambiadores manejando 3690 BPD de slurry, lo que corresponde a 12,3% de producción de slurry para una carga de 30.000 BPD a la FCC. Teniendo en cuenta la temperatura a la salida de los intercambiadores disminuye de 500 a 296°F, la presión disminuye de 91.3 a 65.9 psig, teniendo una caída de presión de 25.3 psig vs 27 psig de diseño y el retiro de calor de 5.6 MMBTU/h°F que se retira con los 4 intercambiadores, para mayor información sobre la simulación (Ver **Anexo S**).

Tabla 18. Simulación de los E4203 A/B/C/D con flujo de slurry de 3690 BPD

Stream Name		BFW_I N_1_1	BFW_I N_2_1	BFW_I N_3_1	BFW_I N_4_1	BFW_O UT_1	S1LURRY UOPII	SLU10_I N_2_1	SLU10_I N_3_1	SLU10_I N_4_1	SLU10_I OUT_1
Stream Description		AGUA PARA CALDER AS	AGUA PARA CALDER AS	AGUA PARA CALDER AS	AGUA PARA CALDER AS	AGUA PARA CALDE RAS	SLURRY	SLURRY	SLURRY	SLURRY	SLURRY
Phase		Water	Water	Water	Water	Water	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid
Rate	BPD						3690				
Rate	LB- MOL/HR	1774	1774	1774	1774	1774	216	216	216	216	216
	LB/HR	3196 0	3196 0	3196 0	3196 0	3196 0	58546	58546	58546	58546	58546
Std. Liq. Rate	FT3/HR	512.6 8	512.6 8	512.6 8	512.6 8	512.6 8	863.1 1	863.1 1	863.1 1	863.1 1	863.1 1
Temperature	F	368.4 9	320.9 7	281.5 3	250.0 0	421.9 1	500.0 0	437.0 3	382.6 0	335.7 0	296.6 0
Pressure	PSIA	586.8 6	588.5 0	590.1 0	591.7 0	585.1 7	91.30	85.47	79.35	72.85	65.95

HxRig Name		E-4203_1_1	E-4203_2_1	E-4203_3_1	E-4203_4_1			E4203A-D
HxRig Description		enfriador	enfriador	enfriador	enfriador			GLOBAL
Duty	MM BTU/HR	1.85	1.53	1.27	1.02			5.68
		376.0	376.0	376.0	376.0			1504.00
Area	FT2	0	0	0	0			
Area (Required)	FT2	375.94	376.01	375.92	375.91			1503.79
U-Value (Clean)	BTU/HR -FT2-F	122.59	108.03	94.78	82.50			
U-Value (Required)	BTU/HR -FT2-F	76.95	70.96	64.98	58.96			
U-Value (Fouling)	BTU/HR -FT2-F	76.96	70.96	64.99	58.97			
LMTD	F	72.24	64.70	57.97	50.64			
FT Factor		0.89	0.89	0.90	0.91			0.90
Hx Rig Tube velocity	ft/sec	4.54	4.44	4.36	4.29			4.41

4.5.3.2 Impacto económico por parada de planta para limpieza de los E4203A/B/C/D

En la condición actual para realizar limpieza mecánica a los E4203A/B/C/D se debe sacar de servicio la FCC UOP II, lo cual representa días de parada no programada afectando la Disponibilidad Operacional de la refinería. El tiempo requerido para la limpieza mecánica de los E4203A/B/C/D incluyendo el tiempo de parada y puesta en servicio de la FCC UOP II es de 10 días. La limpieza mecánica de los E4203A/B/C/D se realiza cada dos años.

En los 10 días se tiene impacto económico de U\$3'675.000, descriptos a continuación:

- ✓ Margen día por barril cargado a la FCC UOP II (U\$): 10.5
- ✓ Tiempo de parada (días): 10
- ✓ Carga a la FCC (BPD): 35.000

$$\text{Costo de la parada de planta} = 35.000 * 10.5 * 10 = \text{U\$3'675.000}$$

4.5.3.3 Impacto económico por disminución de carga para limpieza de los E4203A/B ó E4203C/D

Para la condición propuesta se realiza limpieza mecánica a una pareja de E4203A/B o E4203B/C sin sacar de servicio la FCC UOP II. Solo requiere disminuir carga en 5.000 BPD, se bajará carga de 35.000 a 30.000 BPD. Para lo cual se requieren 5 días para realizar pruebas y limpieza a la pareja de E4203A/B o E4203B/C.

En los 5 días se tiene impacto económico de U\$525.000, descriptos a continuación:

- ✓ Margen día por barril cargado a la FCC UOP II (U\$): 10.5
- ✓ Tiempo de parada (días): 5
- ✓ Carga a la FCC (BPD): 5.000

$$\text{Costo de disminuir carga} = 5.000 * 10.5 * 5 = \text{U\$525.000}$$

Teniendo en cuenta que la limpieza se realiza cada dos años, entonces el costo por limpieza de las dos parejas en los dos años será de: **U\$1'050.000**

4.5.3.4 Beneficio económico de la propuesta de independizar los E4203A/B/C/D

Al implementar la propuesta de independizar los E4203A/B/C/D con la facilidad de operar con solo dos intercambiadores se tiene beneficio económico cercano a los 3 millones de dólares.

Costo por parada de planta por limpieza mecánica de los E4203A/B/C/D:

U\$3'675.000

Costo por disminución de carga para limpiar una pareja de E4203A/B o E4203C/D:

U\$1'050.000

Beneficio económico por implementar la propuesta = Costo por parada de la FCC
– Costo por disminuir carga a la FCC

Beneficio económico por implementar la propuesta = U\$3'675.000 - U\$1'050.000 =
U\$2'625.000

4.5.4 Tratamiento químico para el tren de slurry

La empresa Nalco de Colombia Ltda presenta propuesta control de ensuciamiento en el circuito de fondo de la torre fraccionadora de la FCC UOP II. Para ello realizó toma de muestras de slurry y carga a cracking para determinar el mecanismo del ensuciamiento. Los resultados de este estudio revelan que la FCC UOP II opera a bajas velocidades de conversión y alta producción de slurry parafínico que contiene núcleos aromáticos los cuales llevan cadenas alifáticas cortas. Esto puede suceder por que se deja incorporar el aceite liviano de ciclo en el slurry, o que la unidad tiene una baja eficiencia de craqueo. El entorno parafínico tiende a promover la deshidrogenación y posterior fusión de los compuestos aromáticos en la exposición a los vapores calientes que entran en la fraccionadora desde el riser.

De igual forma referencia que a continua fusión conduce a la formación de núcleos aromáticos condensados y coque en el fondo de la fraccionadora principal. Esto resulta en la disminución de la solubilidad de tales moléculas en la suspensión durante el enfriamiento que conduce a su precipitación y el ensuciamiento en los intercambiadores del sistema de slurry. Basados en una prueba de selección de dispersantes en las muestras de slurry, la recomendación es utilizar el producto EC3051 para inhibir la aglomeración y sedimentación de los aromáticos fusionados y el producto EC3045A como supresor de coque en el fondo de la torre fraccionadora principal. La dispersión de esas pequeñas partículas también va ayudar con los finos de catalizador para evitar su sedimentación y ensuciamiento de los intercambiadores de slurry.

4.5.4.1 Prueba de dispersión

La selección de productos químicos anti-incrustante se llevó a cabo con el ánimo de identificar un dispersante que impida eficazmente la aglomeración y la precipitación de los precursores de ensuciamiento aromáticos condensados en los intercambiadores del tren de slurry.

Los datos de los productos de selección de la prueba de dispersión se dan en la **Tabla 19** y se ilustran en la **Figura 43**.

Tabla 19. Resumen de la prueba de dispersión del slurry

RESUMEN DE LA PRUEBA DE DISPERSIÓN DEL SLURRY	
Químico	% de dispersante a 100 ppm
EC3019A	50
EC3036A	50
EC3047A	40
EC3051A	100
EC3500A	98

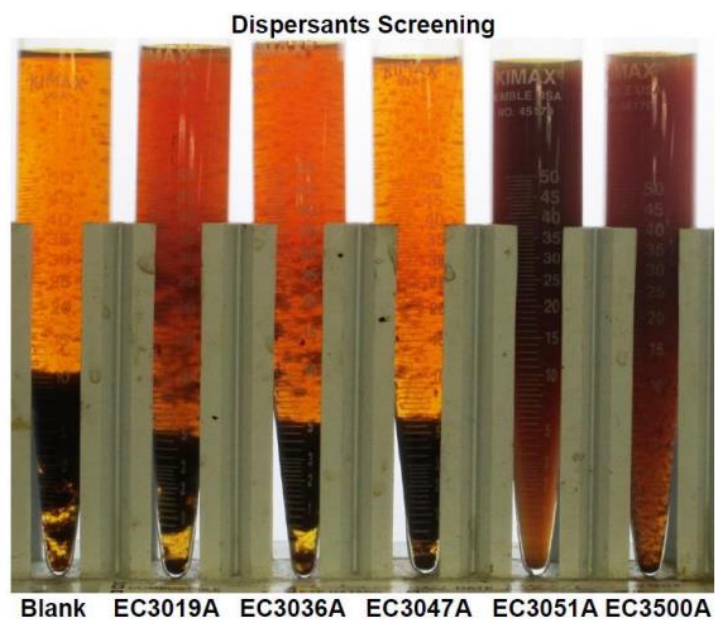


Figura 43. Pruebas de dispersión del slurry

4.5.4.2 Objetivos del Tratamiento

El objetivo principal de nuestro tratamiento es el de minimizar, de una forma económica, el ensuciamiento en el circuito de fondo de la torre fraccionadora de la FCC UOP II, incrementando el tiempo de corrida de los intercambiadores.

4.5.4.3 Tratamiento Químico Propuesto

El tratamiento químico que propone Nalco comprende la aplicación del producto químico antiensuciante Nalco EC3087A, el cual se aplicará en el flujo de recirculación de fondos a la salida de la torre fraccionadora. La aplicación en este punto nos asegurará la llegada del producto a los Intercambiadores E-4203 A- D, E-4204 A/B y E-4205 A/B.

Con el producto químico Nalco EC3045A, el cual se aplicará en el retorno de slurry al fondo de la torre T-4201, para controlar la formación de carbón en el fondo de la torre, de acuerdo al **Diagrama 8**.

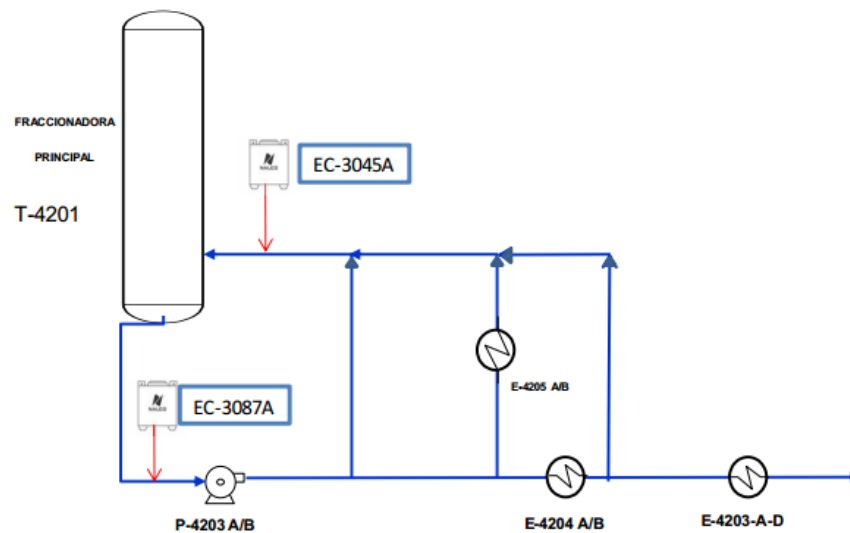


Diagrama 8. Puntos de inyección de dispersante en el sistema de fondos de la FCC UOP II

4.5.4.4 Beneficios del Tratamiento

- ✓ Los dispersantes convencionales pierden rápidamente su estabilidad con altas temperaturas, además de no inhibir la poli-condensación de hidrocarburos aromáticos. El **EC30 87A** y **EC3045A** tienen estabilidad con altas temperaturas e inhiben la poli -condensación de aromáticos.
- ✓ Mantener altos niveles de transferencia de calor en los intercambiadores involucrados en el circuito de fondo, incrementando la eficiencia económica de la unidad.
- ✓ Mantener más limpio el circuito de recirculación de fondos de la torre fraccionadora, alargando el tiempo de corrida de los intercambiadores E-4203 A- D, E-4204 A/B y las calderas E-4205 A/B.
- ✓ Disminuir la diferencial de presión del sistema.
- ✓ No se tendrá limitación de carga a la planta debido a problemas de ensuciamiento en el circuito de fondo.
- ✓ Optimización de la temperatura de fondo de la fraccionadora y optimización de la transferencia de calor hacia la carga fresca a cracking.
- ✓ Reducción de los riesgos en seguridad, costos y duración de los trabajos de mantenimiento programados para limpieza del sistema.

4.5.4.5 Beneficio económico

El retorno sobre la inversión (ROI) es mayor al 400%.

Costo anual del tratamiento U\$2'523.885. El análisis del Retorno de Inversión, indica que por cada dólar que ECOPETROL invierta en el tratamiento químico recibirá un beneficio de 4.21 dólares.

CONCLUSIONES

Los sólidos formados en el sistema de fondos de la fraccionadora de FCC tienen aproximadamente el 90% de material inorgánico y el 10% material orgánico. De acuerdo al análisis de su composición el material inorgánico corresponde a partículas de catalizador provenientes del reactor.

La pérdida de calor en el sistema de fondos de la FCC está relacionado con el ensuciamiento del sistema causado por la precipitación y sedimentación del material particulado que se presenta por la baja velocidad de flujo a través de los tubos de los intercambiadores.

La baja velocidad de flujo por los tubos de los intercambiadores se ve favorecida por la alta resistencia a fluir del slurry, baja gravedad API, lo cual ocasiona que los intercambiadores pierdan de forma continua su coeficiente de transferencia de calor.

Del análisis de mezclas de slurry y ALC se determinó que para mantener los asfaltenos en solución, disminuyendo su riesgo de precipitación por baja velocidad en los tubos de los intercambiadores, se debe mantener la °API del slurry en rango entre 0,5 y 2,0 para disminuir caída de presión en los tubos y facilitar la circulación del slurry con mayor velocidad de flujo.

La FCC UOP II tiene limitación para realizar mantenimiento a los intercambiadores E4203A/B/C/D sin sacar de servicio la FCC. Se plantea propuesta para independizar los intercambiadores E4203A/B/C/D en dos parejas de dos intercambiadores. E4203A/B y E4203C/D, para realizar mantenimiento sin requerir sacar de servicio la FCC.

De las alternativas propuestas las más viables desde el punto de vista económico y que perduran en el tiempo con menor inversión son:

- ✓ Independizar los intercambiadores E4203A/B/C/D en E4203A/B y E4203C/D.
- ✓ Aumentar la gravedad API del slurry
- ✓ Aumentar velocidad de flujo por los tubos de los intercambiadores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Gaona, J. A. S., Manrique, J. P. B., & Majé, Y. M. (2010). Predicción de la Estabilidad de los Asfaltenos Mediante la Utilización del Análisis SARA para Petróleos Puros. *Revista Ingeniería y Región*, 7, 103-110.

[2] Ecopetrol S.A. Lo que hacemos información. [En línea]. [Citado el 28 de julio de 2016]. Disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos/lo-que-hacemos-informacion/>

[3] Wiehe, I. A. (2008). *Process chemistry of petroleum macromolecules*. CRC press.

[4] UOP. (1998). *Fluid Catalytic Cracking Process – FCC*. Unit No.1.

_____. Sección I. Process variables. Unit No. 1. Barrancabermeja, 1998. 21 p.

_____. Sección VII. Process variables. Unit No. 1. Barrancabermeja, 1998. 9,13, 61 p.

[5] Ecopetrol S.A. (2007). *Manual de Descripción del Proceso de la Unidad GCB – Unidad de Cracking UOP 2 (URC/URU/UREE)*. RWD Technologies. Revisión 0. Barrancabermeja.

_____. Capítulo 2. Descripción General del Proceso. Revisión 0.

Barrancabermeja. 2007. 13,14, 18 p.

_____. Capítulo 3. Descripción Detallada de Proceso. Revisión 0.

Barrancabermeja. 2007. 1-53 p.

_____. Capítulo 5. Descripción de Relación de Parámetros y Diagramas (DRP&D). Revisión 0. Barrancabermeja. 2007. 11-18 p.

- [6]** Sadeghbeigi, R. (2012). Fluid catalytic cracking handbook: An expert guide to the practical operation, design, and optimization of FCC units. Elsevier.
- [7]** Kakaç, S. & Liu, H. (1995). Heat Exchangers, Selection, Rating and Thermal Design. Department of Mecanical Engineering, University of Miami. CRC Press.
- [8]** Kakaç, S. & LIU, H., (2002). "Heat Exchangers, Selection, Rating and Thermal Design". Department of Mecanical Engineering, University of Miami. Second edition. CRC Press. Pág. 166
- [9]** Hunt, D., Minyard, B., & Koebel, J. (2008). Minimising FCC slurry exchanger fouling. Petroleum technology quarterly. En: PTQ Q1. 1-7 p.
- [10]** Eaton, P., & Lux, R. (1984). Laboratory fouling test apparatus for hydrocarbon feedstocks. ASME HTD, 35(1), 33-42.
- [11]** Lott, R. K., Rangwala, H. A., Hsi, C., Cyr, T., Zhao, M., & Xu, Y. M. (1996). Mechanisms of Coke Formation and Fouling in Thermal Cracking. In Proc. Sixth UNITAR Conf. on Heavy Crude and Tar Sands (pp. 379-383).
- [12]** Galya, L. G., Cronauer, D. C., Painter, P. C., & Li, N. C. (1986). Thermal instability of coal-derived naphtha. Industrial & engineering chemistry fundamentals, 25(1), 129-135.
- [13]** Ungerer, P., Behar, F., Villalba, M., Heum, O. R., & Audibert, A. (1988). Kinetic modelling of oil cracking. Organic Geochemistry, 13(4-6), 857-868.
- [14]** Nandi, B. N., Belinko, K., Ciavaglia, L. A., & Pruden, B. B. (1978). Formation of coke during thermal hydrocracking of Athabasca bitumen. Fuel, 57(5), 265-268.
- [15]** Banerjee, D. K., Laidler, K. J., Nandi, B. N., & Patmore, D. J. (1986). Kinetic studies of coke formation in hydrocarbon fractions of heavy crudes. Fuel, 65(4), 480-484.
- [16]** Speight, J. G. (2014). Handbook of offshore oil and gas operations. Elsevier.

[17] Centeno, G., Trejo, F., Ancheyta, J., & Carlos, A. (2004). Precipitación de asfaltenos del crudo Maya en un sistema a presión. *Revista de la Sociedad Química de México*, 48(3), 179-188.

[18] Villalba Granda, R. X. (2014). Validación de métodos de ensayo: sedimento básico y agua. Carbón conradson, asfaltenos del crudo y derivados.

[19] Herrera Pérez, C. D. Modelo de estabilidad de asfáltenos como herramienta para predecir el daño de formación en pozos productores de petróleo con alto contenido de CH₄, CO₂ o N₂ (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín).

[20] Buenrostro-Gonzalez, E., Groenzin, H., Lira-Galeana, C., & Mullins, O. C. (2001). The overriding chemical principles that define asphaltenes. *Energy & fuels*, 15(4), 972-978.

[21] Alayon, M. (2004). Asfaltenos: Ocurrencia y floculación. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.

BIBLIOGRAFÍA

Coletti, F., Macchietto, S., & Polley, G. T. (2011). Effects of fouling on performance of retrofitted heat exchanger networks: A thermo-hydraulic based analysis. *Computers & Chemical Engineering*, 35(5), 907-917.

Dickakian, G., & Seay, S. (1988). Asphaltene precipitation primary crude exchanger fouling mechanism. *Oil Gas J.:(United States)*, 86(10).

Ecopetrol S.A. (2007). Manual de Descripción del Proceso de la Unidad GCB – Unidad de Cracking UOP 2 (URC/URU/UREE). RWD Technologies. Revisión 0. Barrancabermeja.

Ecopetrol S.A. (2011). Memorando: Efectos de la calidad de carga en las unidades de cracking Catalítico. Barrancabermeja, CPO-10000305-190

Filgueiras, P. R., Sad, C. M., Loureiro, A. R., Santos, M. F., Castro, E. V., Dias, J. C., & Poppi, R. J. (2014). Determination of API gravity, kinematic viscosity and water content in petroleum by ATR-FTIR spectroscopy and multivariate calibration. *Fuel*, 116, 123-130.

Garcia-Swofford, S. (2004). Chemical treatment to solve FCCU problems. *Petroleum technology quarterly*, 9(4), 57-61.,

Gonzales Núñez, E. R. (2007). Estudio Comparativo de los Intercambiadores de Calor de Coraza-tubos y los de Placas Planas.

Kvenvolden, K. A. (2006). Organic geochemistry—A retrospective of its first 70 years. *Organic geochemistry*, 37(1), 1-11.

O'Connor, P., Verlaan, J. P. J., & Yanik, S. J. (1998). Challenges, catalyst technology and catalytic solutions in resid FCC. *catalysis Today*, 43(3), 305-313.

PÉREZ, P.N. (2015). Curso de fraccionamiento, fraccionadora principal, unidad de recobro de vapores. Capítulo 3.3. Formación de coque. 56-70 p.

Picón-Núñez, M., López-Robles, J. L., & Miranda-Alvarez, C. (2003). Diseño termohidraulico de intercambiadores de calor de plato y marco en arreglo simple y multipaso thermo-hydraulic design of plate and frame heat exchangers in single and multi-pass arrangement. *Revista Mexicana de ingeniería química*, 2, 23-34.

Sadeghbeigi, R. (2000). *Fluid Catalytic Cracking Handbook Design. Operation and Troubleshooting of FCC facilities*, 2Ed, Gulf.

Sadeghbeigi, R. (2000). *Fluid catalytic cracking: Design, operation, and troubleshooting of FCC facilities*. Houston: Gulf Publishing Company.

Snyder, S. W., Brantner, P. C., & Zoetewey, H. L. (2011). U.S. Patent No. 8,062,708. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Spiecker, P. M., Gawrys, K. L., & Kilpatrick, P. K. (2003). Aggregation and solubility behavior of asphaltenes and their subfractions. *Journal of colloid and interface science*, 267(1), 178-193.

Strausz, O. P., Mojelsky, T. W., & Lown, E. M. (1992). The molecular structure of asphaltene: an unfolding story. *Fuel*, 71(12), 1355-1363.

ANEXOS

Anexo A. Principales licenciadores de unidades FCC en el mundo

Licenciadores a nivel mundial
ABB Lummus Global
Exxon Research and Engineering (ER&E)
Kellogg Brown & Root – KBR (formerly The M.W. Kellogg Company)
Shell Oil Company
Stone & Webster Engineering Corporation (SWEC)/IFP
UOP (Universal Oil Products)

Anexo B. Carga a la unidad Cracking UOP II

- Año 2013³



MÓDULO DE GESTIÓN
Comportamiento Mensual



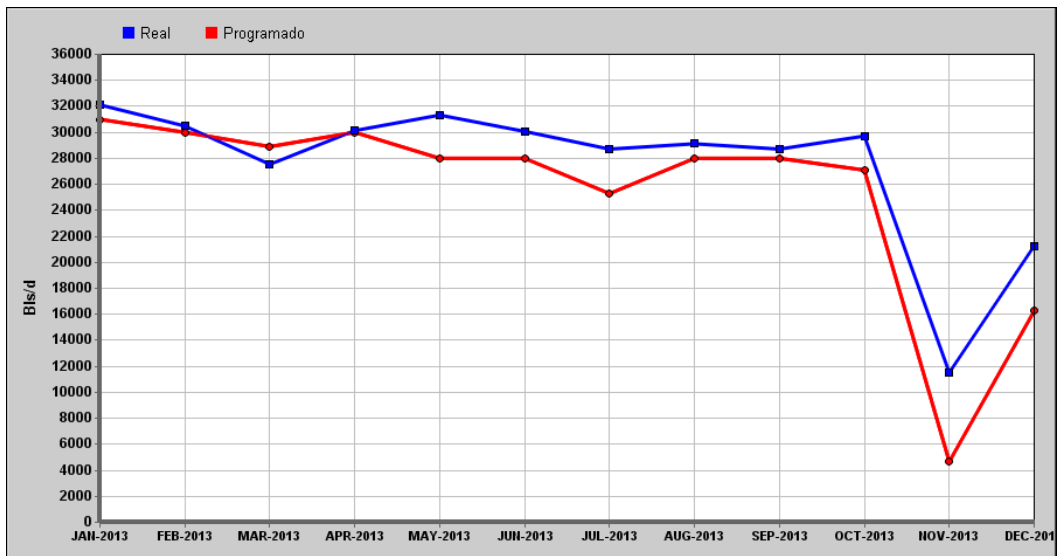
13/05/2016
11:17:02

Fecha: 2013

Indicador: Carga a URCs - DEPARTAMENTO DE CRACKING II

UOM: Bls/d

³ Nota: Tomado del modelo de gestión Ris de Ecopetrol



- Año 2014⁴



MODULO DE GESTION
Comportamiento Mensual



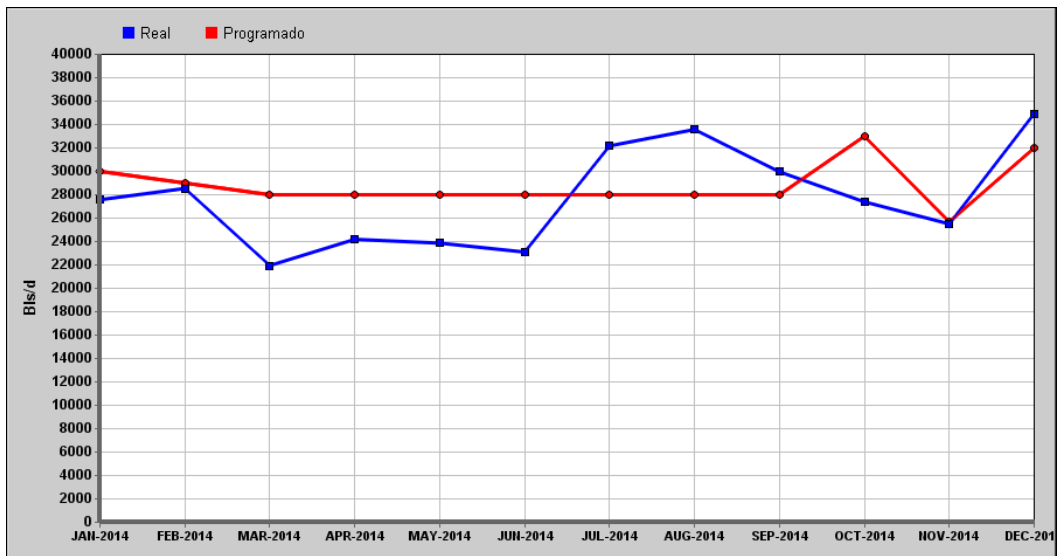
13/05/2016
11:20:00

Fecha: 2014

Indicador: Carga a URCs - DEPARTAMENTO DE CRACKING II

UOM: Bls/d

⁴ Nota: Tomado del modelo de gestión Ris de Ecopetrol



- Año 2015⁵



MODULO DE GESTION
Comportamiento Mensual



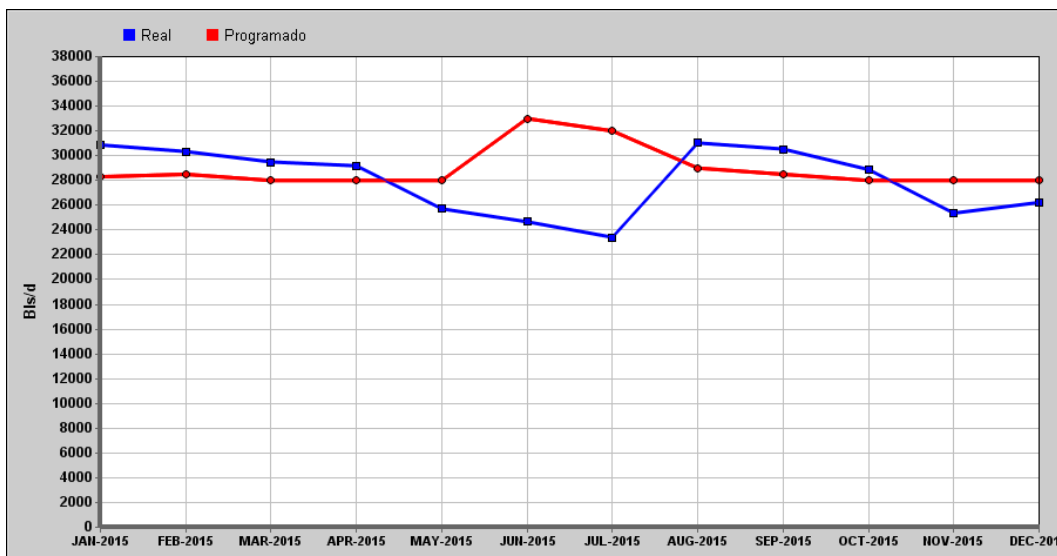
13/05/2016
 11:25:00

Fecha: 2015

Indicador: Carga a URCs - DEPARTAMENTO DE CRACKING II

UOM: Bls/d

⁵ Nota: Tomado del modelo de gestión Ris de Ecopetrol



Anexo C. Normas técnicas usadas en análisis número 200976969.

NOMBRE DEL ANÁLISIS	PROCEDIMIENTO TÉCNICO
PRETRATAMIENTO DE MUESTRAS SÓLIDAS POR EXTRACCIÓN SÖXHLET	CLR-LES-I-225
INSTRUCTIVO DE ENSAYO PARA ANÁLISIS SARA	CLR-LES-I-272
TOMA DE ESPECTRO FT-IR EN MUESTRA LÍQUIDA Y SÓLIDA	CLR-LES-I-220
INSTRUCTIVO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS SEMICUANTITATIVO POR ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X CON LONGITUD DE ONDAS DISPERSAS	CLR-LES-I-203

Anexo D. Descripción de la norma utilizada en la realización del espectro FT-IR

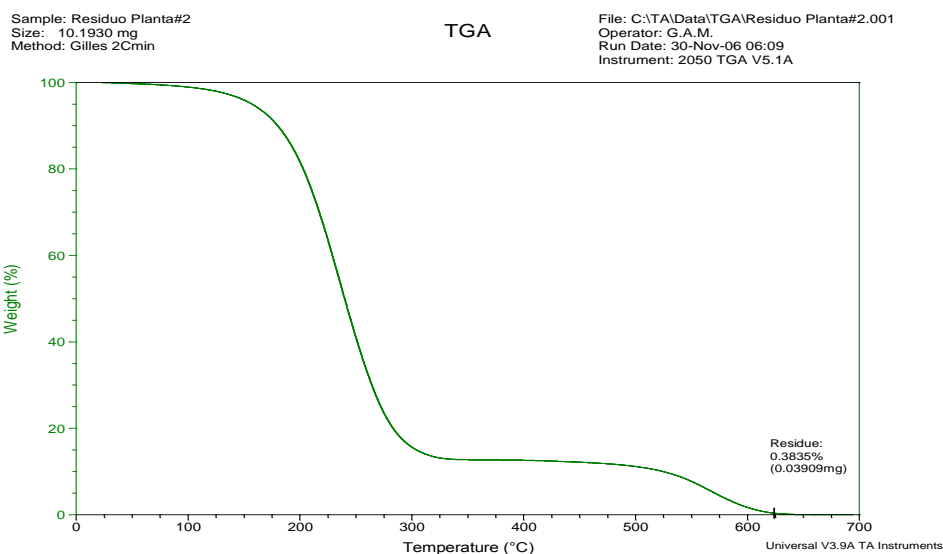
- Resolución: 8 cm⁻¹
- Número de scans: 32
- Rango espectral: 4000-650 cm⁻¹ (infrarrojo medio).
- Tipo de espectro: Reflectancia

- Tipo de Celda: ATR⁶

Esta técnica permite la obtención de espectros sin una preparación compleja de la muestra. Para un contacto íntimo de las muestras con el cristal de diamante se aplicó una pequeña presión con ayuda de una prensa manual. Posteriormente, la muestra fue sometida a extracción tipo Söhxlet con diclorometano para separar la fracción orgánica de la inorgánica. A la fracción orgánica obtenida se le realizó análisis composicional SARA y a la fracción inorgánica análisis semicuantitativo por fluorescencia de rayos X (FRX). Para el análisis por FRX, la muestra de la fracción inorgánica fue pulverizada y sometida a la emisión de rayos X, para obtener su composición elemental, posteriormente estos resultados fueron convertidos a óxidos.

Anexo E. Resultados análisis TGA del slurry de UOP II (ID 101224082)

- Atmósfera inerte (Eyección de Nitrógeno)



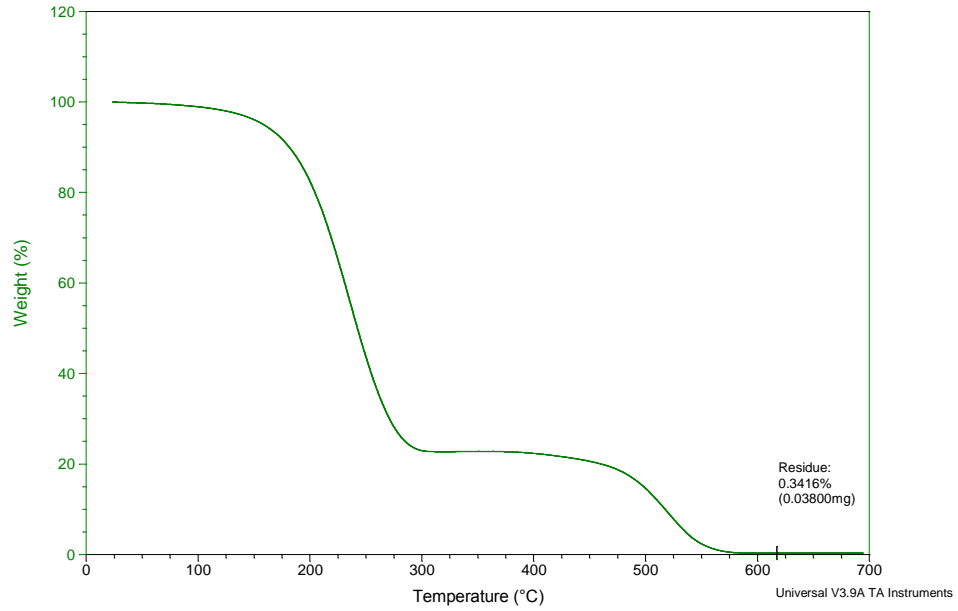
⁶ Nota: La celda ATR del equipo Vertex 70V, cuenta con una prensa manual para este propósito. Esta prensa tiene un bucle que se fija a la celda de forma manual. Una vez fijada la prensa, se esparce el sólido en el cristal y se le presiona contra él.

- Atmósfera normal (Aire)

Sample: Residuo Planta(Aire)#2
Size: 11.1240 mg
Method: Gilles 2Cmin

TGA

File: C:\...TGA\Residuo Planta(Aire)#2.001
Operator: G.A.M.
Run Date: 30-Nov-06 06:03
Instrument: 2050 TGA V5.1A



Anexo F. Normas técnicas usadas en análisis número 201094170.

NOMBRE DEL ANÁLISIS	PROCEDIMIENTO TÉCNICO
Instructivo Técnico General	GTN-I-275
Instructivos Técnico de Ensayo	GTN-I-270

Anexo G. Aspectos metodológicos bajo los cuales se realizó el análisis de la muestra 201094170.

Este estudio se realizó con el microscopio electrónico Leo 1450VP, equipado con sistema de rayos X por energía dispersa OXFORD INCA, operado en el modo de alto vacío. Se trabajó sobre la muestra molida recubierta con oro. Las imágenes observadas se obtuvieron usando detector de electrones secundarios (SE) y detector de electrones retro dispersos (BSE), los contrastes de intensidad que se observan en el modo SE dependen principalmente de la morfología de la muestra, su interpretación es similar a la del objeto visto por encima con iluminación lateral.

En el modo BSE los contrastes dependen principalmente del número atómico promedio, zonas más claras en BSE corresponden a número atómico promedio elevado, en tanto que las oscuras pertenecen a números atómicos bajos. Los rayos X característicos, por medio de los cuales se identifican los elementos presentes, son emitidos dentro de un rango de profundidades de la muestra que va desde su superficie hasta unas pocas micras. El tipo de detector EDX empleado permite detectar todos los elementos de $Z \geq 5$, que se encuentren en la zona analizada. Las alturas de los picos en los espectros pueden interpretarse de manera preliminar como reflejo de la abundancia relativa de estos elementos en la parte analizada, sin embargo su interpretación cuantitativa está sujeta a una serie de fenómenos que se presentan en la muestra por la interacción de los rayos X con ella y por la probabilidad de ocurrencia de la emisión característica de cada elemento.

Anexo H. Correlación entre la velocidad de flujo del intercambiador E4205A y la transferencia de calor para el periodo 2010.

x	y	Periodo 2010 Velocidad de flujo vs transferencia de calor en el E4205A								
		n	\bar{x}	\bar{y}	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$	r
4,26	17,94	142,00	4,11	18,17	0,15	-0,22	0,02	0,05	-0,03	0,9842
4,32	18,35				0,20	0,18	0,04	0,03	0,04	
4,32	18,66				0,21	0,49	0,04	0,24	0,10	
4,32	18,63				0,21	0,46	0,04	0,21	0,10	
4,33	18,53				0,22	0,37	0,05	0,13	0,08	
4,44	19,21				0,33	1,04	0,11	1,09	0,34	
4,46	19,14				0,35	0,98	0,12	0,95	0,34	
4,40	19,02				0,28	0,85	0,08	0,73	0,24	
4,28	18,98				0,17	0,81	0,03	0,66	0,14	
4,38	19,33				0,26	1,16	0,07	1,35	0,30	
4,37	19,50				0,25	1,34	0,06	1,79	0,34	
4,41	19,28				0,30	1,11	0,09	1,24	0,33	
4,21	18,62				0,09	0,46	0,01	0,21	0,04	
4,20	18,50				0,09	0,33	0,01	0,11	0,03	
3,91	17,05				-0,21	-1,12	0,04	1,24	0,23	
4,08	17,66				-0,03	-0,51	0,00	0,26	0,02	
4,20	18,22				0,08	0,05	0,01	0,00	0,00	
4,27	18,74				0,16	0,57	0,02	0,33	0,09	
4,36	19,08				0,25	0,91	0,06	0,83	0,23	
4,31	18,92				0,19	0,76	0,04	0,57	0,15	
4,15	18,20				0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	
4,25	18,53				0,13	0,37	0,02	0,14	0,05	
4,03	17,61				-0,08	-0,56	0,01	0,31	0,05	
4,05	17,69				-0,07	-0,47	0,00	0,22	0,03	
3,81	16,64				-0,31	-1,52	0,10	2,32	0,47	
3,90	17,51				-0,21	-0,66	0,05	0,43	0,14	
3,91	17,25				-0,20	-0,92	0,04	0,84	0,18	
3,64	15,93				-0,48	-2,24	0,23	5,01	1,06	
3,41	14,65				-0,71	-3,51	0,50	12,35	2,48	
3,37	15,16				-0,75	-3,01	0,56	9,05	2,25	
3,28	15,22				-0,83	-2,94	0,69	8,65	2,45	
3,29	14,93				-0,83	-3,23	0,68	10,45	2,67	

3,43	15,56
3,57	16,50
3,55	16,30
3,63	16,57
2,57	8,87
2,33	10,38
3,19	14,25
2,98	12,84
2,76	11,75
3,25	14,18
3,07	13,26
3,09	13,22
2,74	12,43
2,74	12,99
3,37	15,49
3,37	15,79
3,58	16,26
3,46	15,83
3,42	15,52
3,89	17,36
4,13	18,77
4,06	17,88
3,96	17,65
3,80	17,18
3,76	17,23
3,78	17,22
4,61	20,17
4,53	19,65
4,89	21,79
4,95	21,45
4,85	21,08
5,15	22,29
5,20	22,60
5,30	23,01
3,71	16,24
3,72	16,29
3,73	16,02
3,77	16,45
3,76	16,31
3,77	16,40

-0,69	-2,61	0,47	6,79	1,79
-0,54	-1,67	0,29	2,79	0,90
-0,57	-1,87	0,32	3,49	1,06
-0,49	-1,59	0,24	2,53	0,78
-1,55	-9,29	2,40	86,34	14,38
-1,78	-7,79	3,17	60,63	13,87
-0,92	-3,92	0,86	15,33	3,62
-1,14	-5,33	1,29	28,37	6,06
-1,36	-6,41	1,84	41,15	8,70
-0,87	-3,99	0,76	15,88	3,46
-1,04	-4,91	1,09	24,07	5,12
-1,03	-4,95	1,05	24,47	5,07
-1,38	-5,73	1,90	32,86	7,91
-1,37	-5,18	1,89	26,84	7,11
-0,74	-2,68	0,55	7,17	1,99
-0,74	-2,37	0,55	5,64	1,77
-0,54	-1,90	0,29	3,63	1,02
-0,65	-2,34	0,42	5,47	1,52
-0,70	-2,65	0,49	7,01	1,85
-0,23	-0,80	0,05	0,65	0,18
0,01	0,61	0,00	0,37	0,01
-0,06	-0,29	0,00	0,08	0,02
-0,15	-0,52	0,02	0,27	0,08
-0,31	-0,99	0,10	0,97	0,31
-0,36	-0,94	0,13	0,88	0,33
-0,34	-0,94	0,12	0,89	0,32
0,49	2,01	0,24	4,02	0,99
0,41	1,49	0,17	2,21	0,61
0,78	3,62	0,61	13,12	2,82
0,84	3,29	0,70	10,79	2,75
0,74	2,91	0,55	8,48	2,16
1,04	4,12	1,08	17,00	4,29
1,09	4,43	1,18	19,65	4,82
1,18	4,84	1,40	23,42	5,72
-0,40	-1,93	0,16	3,71	0,78
-0,39	-1,87	0,15	3,50	0,74
-0,38	-2,15	0,15	4,61	0,82
-0,35	-1,72	0,12	2,95	0,60
-0,36	-1,86	0,13	3,45	0,66
-0,35	-1,76	0,12	3,11	0,61

3,64	16,13
3,73	16,46
3,69	16,34
3,68	16,43
3,58	15,75
3,93	16,83
4,80	21,22
4,57	20,47
4,59	20,15
4,60	20,38
4,42	19,89
4,48	19,69
4,38	19,33
4,42	19,65
4,46	19,24
4,48	19,44
4,45	19,28
4,46	19,41
4,46	20,03
4,85	21,50
4,82	21,16
4,95	21,13
4,81	20,75
4,62	20,31
4,56	20,22
4,48	19,30
4,48	20,03
4,72	20,58
4,68	20,39
4,70	20,17
4,63	20,05
4,54	20,17
4,60	20,41
4,40	19,97
4,35	19,74
4,33	19,64
4,32	19,56
4,29	19,27
4,26	19,15
4,25	19,31

-0,47	-2,04	0,22	4,15	0,96
-0,39	-1,70	0,15	2,90	0,66
-0,42	-1,83	0,18	3,34	0,77
-0,44	-1,73	0,19	3,01	0,76
-0,53	-2,42	0,28	5,85	1,29
-0,19	-1,34	0,04	1,78	0,25
0,69	3,06	0,48	9,34	2,11
0,46	2,31	0,21	5,32	1,05
0,47	1,98	0,22	3,92	0,93
0,49	2,22	0,24	4,91	1,08
0,31	1,72	0,09	2,97	0,53
0,37	1,52	0,13	2,31	0,56
0,26	1,16	0,07	1,34	0,31
0,31	1,49	0,10	2,21	0,46
0,34	1,07	0,12	1,15	0,37
0,36	1,27	0,13	1,61	0,46
0,33	1,12	0,11	1,24	0,37
0,35	1,24	0,12	1,54	0,43
0,35	1,87	0,12	3,48	0,65
0,74	3,34	0,54	11,14	2,46
0,70	2,99	0,49	8,94	2,10
0,84	2,96	0,70	8,77	2,48
0,69	2,59	0,48	6,69	1,79
0,51	2,15	0,26	4,62	1,09
0,44	2,05	0,20	4,21	0,91
0,36	1,13	0,13	1,29	0,41
0,37	1,87	0,13	3,49	0,68
0,61	2,41	0,37	5,82	1,47
0,56	2,22	0,32	4,94	1,25
0,58	2,01	0,34	4,03	1,17
0,52	1,89	0,27	3,56	0,98
0,42	2,00	0,18	4,02	0,85
0,49	2,24	0,24	5,02	1,09
0,29	1,80	0,08	3,24	0,51
0,24	1,57	0,06	2,48	0,38
0,21	1,48	0,05	2,18	0,31
0,21	1,39	0,04	1,93	0,29
0,17	1,10	0,03	1,22	0,19
0,15	0,98	0,02	0,96	0,15
0,13	1,15	0,02	1,31	0,15

4,09	18,49
4,08	18,52
4,06	18,33
4,12	18,53
4,17	18,89
4,28	19,03
4,23	18,66
4,18	18,48
4,29	19,35
4,29	18,83
4,23	18,84
4,29	19,28
4,28	19,23
4,19	18,75
4,11	18,33
4,15	18,62
4,19	18,79
4,19	18,60
4,24	18,98
4,45	19,41
4,31	19,22
4,20	18,74
4,14	18,25
4,18	18,40
4,40	19,42
4,40	19,53
4,47	19,56
4,27	18,70
4,55	19,75
4,47	19,43
584,28	2579,56

-0,03	0,32	0,00	0,10	-0,01
-0,03	0,35	0,00	0,13	-0,01
-0,05	0,16	0,00	0,03	-0,01
0,00	0,37	0,00	0,14	0,00
0,06	0,73	0,00	0,53	0,04
0,17	0,87	0,03	0,75	0,14
0,11	0,49	0,01	0,24	0,06
0,07	0,31	0,00	0,10	0,02
0,18	1,19	0,03	1,41	0,21
0,18	0,66	0,03	0,44	0,12
0,11	0,67	0,01	0,45	0,08
0,18	1,12	0,03	1,25	0,20
0,17	1,06	0,03	1,13	0,18
0,07	0,58	0,01	0,34	0,04
-0,01	0,16	0,00	0,03	0,00
0,03	0,45	0,00	0,21	0,01
0,08	0,62	0,01	0,39	0,05
0,08	0,43	0,01	0,19	0,03
0,13	0,81	0,02	0,66	0,10
0,34	1,24	0,11	1,54	0,42
0,20	1,05	0,04	1,10	0,21
0,08	0,58	0,01	0,33	0,05
0,02	0,08	0,00	0,01	0,00
0,07	0,23	0,00	0,05	0,02
0,28	1,25	0,08	1,56	0,36
0,29	1,36	0,08	1,85	0,39
0,35	1,39	0,12	1,94	0,49
0,15	0,54	0,02	0,29	0,08
0,44	1,59	0,19	2,52	0,70
0,35	1,27	0,12	1,61	0,45
		40,02	759,95	171,65

Anexo I. Correlación entre la velocidad de flujo del intercambiador E4205A y la transferencia de calor para el periodo 2011.

X	y	Periodo 2011 Velocidad de flujo vs transferencia de calor en el E4205A								
		n	\bar{x}	\bar{y}	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$	r
4,44	18,89	131,00	3,25	13,49	1,19	5,40	1,41	29,12	6,41	0,9642
4,47	18,91				1,21	5,42	1,47	29,37	6,57	
4,43	18,58				1,18	5,09	1,39	25,90	6,00	
4,37	18,47				1,12	4,98	1,25	24,77	5,57	
4,29	18,20				1,03	4,71	1,07	22,21	4,87	
4,48	18,99				1,23	5,50	1,51	30,27	6,76	
4,40	18,55				1,15	5,06	1,32	25,59	5,82	
4,40	18,65				1,15	5,16	1,32	26,63	5,93	
4,39	18,51				1,14	5,02	1,30	25,19	5,71	
4,33	18,36				1,08	4,87	1,16	23,72	5,25	
4,31	18,27				1,05	4,78	1,11	22,85	5,03	
4,26	18,24				1,00	4,75	1,01	22,52	4,76	
4,19	18,08				0,93	4,59	0,87	21,05	4,28	
4,56	19,32				1,31	5,83	1,71	34,00	7,63	
4,68	19,77				1,42	6,28	2,03	39,45	8,95	
4,71	19,82				1,46	6,33	2,12	40,05	9,22	
4,47	18,55				1,22	5,05	1,49	25,55	6,16	
4,44	18,45				1,18	4,96	1,40	24,59	5,86	
4,45	16,82				1,20	3,33	1,43	11,10	3,99	
4,49	16,62				1,24	3,13	1,53	9,80	3,87	
4,52	16,46				1,26	2,97	1,59	8,83	3,75	
3,52	13,38				0,27	-0,11	0,07	0,01	-0,03	
4,43	16,17				1,18	2,68	1,39	7,18	3,15	
4,59	16,49				1,34	3,00	1,79	8,99	4,01	
4,52	16,19				1,27	2,70	1,60	7,30	3,42	
4,50	17,62				1,25	4,13	1,56	17,07	5,16	
4,70	18,89				1,45	5,40	2,11	29,15	7,84	
4,84	19,16				1,59	5,67	2,52	32,16	9,01	
4,54	18,33				1,29	4,84	1,65	23,46	6,22	
4,46	18,18				1,20	4,69	1,45	22,03	5,65	
4,44	18,27				1,19	4,78	1,42	22,82	5,68	
3,56	11,62				0,30	-1,87	0,09	3,51	-0,57	
2,60	11,00				-	0,66	-2,49	0,43	6,21	
2,55	10,73				-	0,70	-2,76	0,50	7,61	1,94
2,73	11,66				-	0,52	-1,83	0,27	3,34	0,96
2,89	12,11				-	0,37	-1,38	0,13	1,91	0,50

2,84	12,39
2,83	12,46
2,84	12,30
2,85	12,03
2,80	12,10
2,89	12,25
2,93	12,46
2,99	12,83
2,99	13,00
3,00	12,94
3,01	13,05
3,02	12,95
3,04	12,98
3,01	12,74
3,07	13,11
3,04	13,04
3,16	10,97
2,45	9,28
2,67	10,30
2,78	11,73
2,96	12,99
2,53	8,55
2,95	13,34
2,93	12,91

-	0,42	-1,10	0,17	1,22	0,46
-	0,42	-1,03	0,18	1,06	0,44
-	0,41	-1,19	0,17	1,42	0,49
-	0,41	-1,46	0,16	2,14	0,59
-	0,45	-1,39	0,20	1,93	0,63
-	0,36	-1,24	0,13	1,54	0,45
-	0,33	-1,03	0,11	1,06	0,33
-	0,26	-0,66	0,07	0,43	0,17
-	0,27	-0,49	0,07	0,24	0,13
-	0,25	-0,55	0,06	0,31	0,14
-	0,24	-0,44	0,06	0,19	0,11
-	0,23	-0,54	0,05	0,29	0,13
-	0,21	-0,51	0,04	0,26	0,11
-	0,24	-0,75	0,06	0,57	0,18
-	0,18	-0,38	0,03	0,15	0,07
-	0,21	-0,45	0,05	0,21	0,10
-	0,09	-2,52	0,01	6,34	0,22
-	0,80	-4,21	0,64	17,76	3,38
-	0,59	-3,19	0,35	10,16	1,87
-	0,47	-1,76	0,22	3,11	0,83
-	0,29	-0,51	0,08	0,26	0,15
-	0,72	-4,94	0,52	24,40	3,56
-	0,31	-0,15	0,09	0,02	0,05
-	0,32	-0,58	0,10	0,34	0,19

3,05	12,91
3,14	13,36
3,11	13,06
3,08	12,91
3,11	13,02
3,05	12,91
3,02	12,91
3,21	13,41
3,12	12,96
3,14	13,08
3,21	13,47
2,91	12,54
3,03	12,88
2,90	12,41
3,18	13,69
3,04	13,01
2,99	12,74
3,00	12,73
3,21	13,88
2,94	12,60
3,27	13,84
3,31	13,80
3,19	13,58
3,11	13,29
3,23	13,72

-	0,21	-0,58	0,04	0,33	0,12
-	0,11	-0,14	0,01	0,02	0,02
-	0,14	-0,43	0,02	0,19	0,06
-	0,17	-0,58	0,03	0,34	0,10
-	0,15	-0,47	0,02	0,22	0,07
-	0,20	-0,58	0,04	0,34	0,12
-	0,23	-0,59	0,05	0,34	0,14
-	0,04	-0,08	0,00	0,01	0,00
-	0,14	-0,53	0,02	0,28	0,07
-	0,12	-0,41	0,01	0,17	0,05
-	0,05	-0,02	0,00	0,00	0,00
-	0,34	-0,95	0,12	0,90	0,33
-	0,22	-0,61	0,05	0,37	0,13
-	0,35	-1,08	0,12	1,17	0,38
-	0,07	0,20	0,01	0,04	-0,01
-	0,21	-0,48	0,04	0,23	0,10
-	0,26	-0,75	0,07	0,56	0,19
-	0,25	-0,76	0,06	0,58	0,19
-	0,04	0,39	0,00	0,15	-0,02
-	0,31	-0,89	0,09	0,80	0,28
-	0,02	0,34	0,00	0,12	0,01
-	0,06	0,31	0,00	0,10	0,02
-	0,06	0,09	0,00	0,01	-0,01
-	0,15	-0,20	0,02	0,04	0,03
-	0,03	0,22	0,00	0,05	-0,01

3,09	13,16
3,04	12,84
2,93	12,41
2,89	12,33
2,91	12,50
2,96	12,50
2,96	12,32
2,89	12,09
2,88	11,87
2,88	11,89
2,86	11,75
2,86	11,79
2,85	11,89
2,84	11,77
2,91	11,99
2,87	11,98
2,69	11,41
2,75	11,51
2,74	11,47
1,17	1,30
2,92	11,92
3,01	12,19
3,02	12,24
2,82	11,91

-	0,16	-0,33	0,03	0,11	0,05
-	0,21	-0,65	0,05	0,43	0,14
-	0,32	-1,08	0,10	1,17	0,35
-	0,36	-1,16	0,13	1,34	0,42
-	0,34	-1,00	0,12	0,99	0,34
-	0,30	-0,99	0,09	0,98	0,29
-	0,29	-1,17	0,09	1,38	0,34
-	0,36	-1,40	0,13	1,96	0,50
-	0,38	-1,62	0,14	2,62	0,61
-	0,37	-1,60	0,14	2,56	0,59
-	0,40	-1,74	0,16	3,02	0,69
-	0,39	-1,70	0,15	2,91	0,66
-	0,41	-1,60	0,16	2,58	0,65
-	0,41	-1,72	0,17	2,97	0,71
-	0,34	-1,50	0,11	2,26	0,51
-	0,38	-1,51	0,15	2,29	0,58
-	0,57	-2,08	0,32	4,33	1,18
-	0,51	-1,98	0,26	3,94	1,01
-	0,52	-2,02	0,27	4,07	1,04
-	2,08	-12,19	4,34	148,61	25,40
-	0,34	-1,57	0,11	2,47	0,53
-	0,24	-1,31	0,06	1,70	0,32
-	0,23	-1,25	0,05	1,56	0,29
-	-	-1,58	0,18	2,50	0,68

2,73	11,41
2,63	11,03
2,71	11,26
2,73	11,55
2,82	11,67
2,83	11,68
2,80	11,67
2,81	11,84
2,80	11,64
2,78	11,73
2,81	11,89
2,62	11,35
2,68	11,39
2,66	11,23
2,58	10,91
2,54	10,96
2,67	11,46
2,74	11,79
2,56	10,80
2,58	11,03
2,67	11,35
2,56	10,95
426,10	1767,35

0,43				
-				
0,52	-2,08	0,27	4,35	1,09
-				
0,62	-2,47	0,39	6,08	1,53
-				
0,54	-2,23	0,29	4,97	1,20
-				
0,52	-1,94	0,27	3,76	1,01
-				
0,43	-1,82	0,19	3,30	0,79
-				
0,42	-1,81	0,18	3,27	0,76
-				
0,46	-1,83	0,21	3,33	0,83
-				
0,44	-1,65	0,19	2,73	0,73
-				
0,46	-1,85	0,21	3,41	0,84
-				
0,48	-1,76	0,23	3,11	0,84
-				
0,45	-1,60	0,20	2,55	0,71
-				
0,64	-2,14	0,41	4,58	1,36
-				
0,57	-2,10	0,33	4,43	1,21
-				
0,59	-2,27	0,35	5,13	1,34
-				
0,67	-2,58	0,45	6,68	1,74
-				
0,72	-2,53	0,51	6,41	1,81
-				
0,58	-2,03	0,34	4,13	1,18
-				
0,51	-1,70	0,26	2,88	0,87
-				
0,69	-2,70	0,48	7,27	1,86
-				
0,67	-2,46	0,45	6,07	1,65
-				
0,58	-2,14	0,33	4,56	1,24
-				
0,70	-2,55	0,49	6,48	1,78
		65,50	1096,29	258,38

Anexo J. Correlación entre la velocidad de flujo del intercambiador E4205A y la transferencia de calor para el periodo 2014.

x	y	Periodo 2014 Velocidad de flujo vs transferencia de calor en el E4205A								
		n	\bar{x}	\bar{y}	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$	r
0,00	0,00	151,00	3,81	14,45	-3,81	-14,45	14,54	208,68	55,08	0,9924
0,00	0,00				-	-	-	-	-	
0,00	0,00				3,81	-14,45	14,54	208,68	55,08	
0,00	0,00				-	-	-	-	-	
0,59	-1,52				3,81	-14,45	14,54	208,67	55,09	
0,00	0,00				-	-	-	-	-	
0,00	0,00				3,23	-15,97	10,40	254,97	51,50	
0,00	0,00				-	-	-	-	-	
0,00	0,00				3,81	-14,45	14,54	208,72	55,08	
0,00	0,00				-	-	-	-	-	
0,00	0,00				3,81	-14,45	14,54	208,67	55,09	
0,00	0,00				-	-	-	-	-	
0,00	0,00				3,81	-14,45	14,54	208,68	55,08	
0,00	-0,01				-	-	-	-	-	
0,00	0,00				3,81	-14,46	14,51	209,03	55,07	
0,00	0,00				-	-	-	-	-	
0,01	-0,02				3,81	-14,45	14,53	208,82	55,08	
0,01	-0,02				-	-	-	-	-	
0,01	-0,02				3,81	-14,46	14,49	209,17	55,06	
0,01	-0,02				-	-	-	-	-	
0,03	-0,09				3,81	-14,46	14,49	209,20	55,06	
0,00	0,00				-	-	-	-	-	
0,00	0,00				3,78	-14,54	14,29	211,36	54,95	
0,00	0,00				-	-	-	-	-	
0,00	0,00				3,81	-14,45	14,53	208,80	55,08	
0,00	0,00				-	-	-	-	-	
0,00	0,00				3,81	-14,45	14,54	208,67	55,09	
0,66	2,21				-	-	-	-	-	
0,03	0,09				3,16	-12,24	9,97	149,72	38,63	
0,09	0,25				-	-	-	-	-	
0,09	0,25				3,78	-14,35	14,29	205,98	54,26	
1,99	6,66				-	-	-	-	-	
3,62	13,42				3,72	-14,20	13,83	201,57	52,80	
3,67	13,96				-	-	-	-	-	
3,68	13,83				1,82	-7,79	3,33	60,67	14,21	
					-	-	-	-	-	
					0,19	-1,03	0,04	1,06	0,20	
					-	-	-	-	-	
					0,14	-0,48	0,02	0,23	0,07	
					-	-	-	-	-	
					-	-0,62	0,02	0,38	0,08	

3,76	14,23
3,49	13,11
3,85	14,58
3,74	14,04
3,77	14,25
3,98	15,20
4,17	15,76
3,81	14,01
3,70	14,31
3,60	13,55
3,72	14,05
3,65	13,86
3,62	13,81
3,67	13,88
1,30	-3,27
0,36	-0,72
0,17	-0,35
3,60	12,99
3,57	12,90
4,76	17,76
4,51	16,66
3,79	14,19
4,10	15,12
3,93	15,22
3,92	15,03
4,92	18,89
4,33	16,57
4,32	16,60
4,33	16,54
4,49	17,01

0,14				
-				
0,05	-0,21	0,00	0,05	0,01
-				
0,33	-1,34	0,11	1,80	0,44
0,04	0,13	0,00	0,02	0,01
-				
0,07	-0,40	0,00	0,16	0,03
-				
0,05	-0,19	0,00	0,04	0,01
0,17	0,75	0,03	0,56	0,13
0,36	1,31	0,13	1,72	0,47
0,00	-0,44	0,00	0,19	0,00
-				
0,11	-0,14	0,01	0,02	0,02
-				
0,21	-0,89	0,04	0,80	0,19
-				
0,10	-0,39	0,01	0,15	0,04
-				
0,16	-0,59	0,03	0,34	0,10
-				
0,20	-0,63	0,04	0,40	0,13
-				
0,14	-0,56	0,02	0,32	0,08
-				
2,51	-17,71	6,30	313,79	44,46
-				
3,45	-15,17	11,93	230,07	52,38
-				
3,64	-14,80	13,26	219,00	53,89
-				
0,22	-1,46	0,05	2,12	0,32
-				
0,24	-1,55	0,06	2,39	0,37
0,94	3,31	0,89	10,98	3,13
0,70	2,22	0,48	4,91	1,54
-				
0,03	-0,25	0,00	0,06	0,01
0,29	0,67	0,08	0,45	0,20
0,12	0,77	0,01	0,59	0,09
0,11	0,59	0,01	0,34	0,07
1,11	4,44	1,22	19,74	4,91
0,52	2,13	0,27	4,53	1,10
0,50	2,15	0,25	4,63	1,08
0,51	2,09	0,26	4,37	1,07
0,67	2,57	0,45	6,58	1,73

4,28	16,55
4,40	17,09
3,27	12,52
3,33	12,71
3,51	13,43
3,73	14,14
3,84	14,77
3,95	14,93
3,56	13,65
2,50	9,24
2,75	10,16
5,05	20,02
4,94	19,62
4,71	18,46
4,42	17,36
4,31	17,08
4,56	17,83
4,77	18,34
4,72	18,13
4,74	18,30
4,75	18,19
4,85	18,40
4,88	18,71
4,87	18,98
4,95	18,85
4,96	18,72
4,91	18,40
4,98	18,54
5,01	18,56
4,92	18,19
4,93	18,65
4,83	18,52
5,01	19,20
4,93	18,88
4,94	19,22
4,98	19,25
4,93	18,96
4,98	18,94
5,00	19,03
4,95	18,87

0,46	2,10	0,21	4,42	0,97
0,59	2,64	0,34	6,99	1,55
-				
0,54	-1,92	0,29	3,69	1,04
-				
0,48	-1,74	0,23	3,02	0,84
-				
0,31	-1,01	0,09	1,02	0,31
-				
0,09	-0,30	0,01	0,09	0,03
0,03	0,32	0,00	0,10	0,01
0,13	0,48	0,02	0,23	0,06
-				
0,26	-0,79	0,07	0,63	0,20
-				
1,31	-5,21	1,72	27,13	6,83
-				
1,06	-4,28	1,12	18,33	4,54
1,23	5,57	1,52	31,07	6,87
1,13	5,17	1,28	26,73	5,84
0,89	4,02	0,80	16,14	3,59
0,60	2,92	0,36	8,50	1,76
0,50	2,64	0,25	6,96	1,32
0,75	3,38	0,56	11,43	2,53
0,96	3,90	0,91	15,18	3,72
0,90	3,69	0,82	13,59	3,33
0,92	3,85	0,85	14,83	3,55
0,94	3,74	0,89	14,00	3,52
1,03	3,95	1,07	15,63	4,08
1,07	4,27	1,14	18,22	4,55
1,05	4,54	1,11	20,57	4,78
1,13	4,41	1,28	19,44	5,00
1,15	4,27	1,32	18,26	4,91
1,10	3,95	1,20	15,64	4,34
1,17	4,09	1,36	16,76	4,78
1,19	4,11	1,43	16,92	4,91
1,10	3,74	1,22	14,02	4,13
1,11	4,20	1,24	17,65	4,67
1,02	4,07	1,04	16,59	4,15
1,20	4,75	1,43	22,56	5,68
1,12	4,43	1,25	19,63	4,94
1,13	4,77	1,28	22,80	5,40
1,17	4,81	1,36	23,09	5,60
1,12	4,51	1,25	20,35	5,04
1,17	4,49	1,37	20,20	5,26
1,19	4,58	1,41	20,98	5,43
1,14	4,42	1,29	19,58	5,02

5,00	19,11
5,01	18,99
5,23	19,80
5,05	19,23
5,13	19,46
5,14	19,51
5,10	19,37
4,94	18,80
4,92	18,63
4,77	18,25
4,80	18,59
4,85	18,66
5,12	19,59
5,05	19,37
5,11	19,59
5,08	19,50
5,02	19,34
5,07	19,46
5,07	19,36
5,03	19,11
4,93	18,78
4,86	18,50
4,95	18,73
5,19	20,20
4,96	19,29
4,78	18,62
4,86	18,63
5,09	19,33
5,12	19,50
5,09	19,39
5,06	19,34
5,05	19,36
4,54	17,47
3,82	14,69
3,76	14,52
3,84	14,87
3,81	14,76
3,44	13,15
3,83	14,65
3,83	14,67
4,02	15,36
4,04	15,44
4,13	15,74
4,05	15,47
4,55	17,72

1,19	4,66	1,41	21,74	5,54
1,20	4,54	1,44	20,62	5,44
1,41	5,35	2,00	28,66	7,57
1,24	4,79	1,53	22,91	5,92
1,32	5,02	1,73	25,17	6,60
1,33	5,06	1,76	25,65	6,73
1,29	4,92	1,66	24,24	6,34
1,13	4,36	1,28	18,97	4,92
1,11	4,18	1,23	17,51	4,63
0,96	3,80	0,92	14,47	3,65
0,99	4,14	0,98	17,17	4,10
1,04	4,21	1,08	17,72	4,38
1,30	5,15	1,70	26,47	6,71
1,24	4,93	1,53	24,27	6,09
1,30	5,15	1,69	26,49	6,69
1,27	5,06	1,60	25,55	6,40
1,21	4,90	1,46	23,97	5,92
1,26	5,01	1,58	25,10	6,30
1,26	4,91	1,58	24,12	6,18
1,22	4,66	1,49	21,75	5,69
1,12	4,33	1,25	18,79	4,85
1,05	4,06	1,10	16,47	4,26
1,13	4,29	1,28	18,39	4,85
1,38	5,75	1,89	33,09	7,91
1,15	4,84	1,32	23,45	5,57
0,97	4,17	0,94	17,42	4,04
1,04	4,18	1,09	17,47	4,37
1,27	4,89	1,62	23,90	6,22
1,31	5,05	1,72	25,52	6,62
1,27	4,95	1,62	24,49	6,30
1,25	4,89	1,56	23,91	6,10
1,23	4,91	1,52	24,12	6,06
0,73	3,03	0,53	9,16	2,20
0,01	0,24	0,00	0,06	0,00
-				
0,06	0,07	0,00	0,01	0,00
0,03	0,43	0,00	0,18	0,01
0,00	0,31	0,00	0,10	0,00
-				
0,38	-1,29	0,14	1,68	0,49
0,01	0,20	0,00	0,04	0,00
0,02	0,22	0,00	0,05	0,00
0,21	0,91	0,04	0,84	0,19
0,23	0,99	0,05	0,98	0,23
0,32	1,30	0,10	1,69	0,42
0,23	1,02	0,05	1,05	0,24
0,74	3,28	0,54	10,74	2,41

4,42	17,21
4,39	17,34
3,90	15,02
3,68	13,94
3,94	14,93
3,82	14,15
3,58	13,76
3,80	14,52
4,34	16,54
4,31	16,47
4,22	16,07
4,05	15,47
4,03	15,35
3,90	14,90
4,14	15,84
575,81	2181,28

0,61	2,77	0,37	7,65	1,68
0,58	2,89	0,33	8,37	1,66
0,09	0,57	0,01	0,32	0,05
-				
0,13	-0,50	0,02	0,25	0,07
0,13	0,48	0,02	0,23	0,06
0,01	-0,30	0,00	0,09	0,00
-				
0,23	-0,69	0,05	0,48	0,16
-				
0,01	0,08	0,00	0,01	0,00
0,52	2,09	0,27	4,38	1,09
0,50	2,03	0,25	4,12	1,01
0,40	1,62	0,16	2,63	0,65
0,24	1,03	0,06	1,05	0,24
0,22	0,91	0,05	0,82	0,20
0,08	0,45	0,01	0,21	0,04
0,33	1,40	0,11	1,95	0,46
		362,60	5784,54	1437,25

Anexo K. Correlación entre la velocidad de flujo del intercambiador E4205B y la transferencia de calor para el periodo 2010.

x	y	Periodo 2010 Velocidad de flujo vs transferencia de calor en el E4205B								
		n	\bar{x}	\bar{y}	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$	r
0,00	0,00	142,00	3,77	16,97	-3,77	-16,97	14,22	287,88	63,98	0,9979
0,00	0,00				-3,77	-16,97	14,24	287,95	64,04	
0,00	0,00				-3,77	-16,97	14,24	287,95	64,04	
0,00	0,00				-3,77	-16,97	14,24	287,95	64,04	
0,00	0,00				-3,77	-16,97	14,24	287,95	64,04	
0,00	0,00				-3,77	-16,97	14,24	287,95	64,04	
0,00	0,00				-3,77	-16,97	14,24	287,95	64,04	
0,00	0,00				-3,77	-16,97	14,24	287,95	64,04	
0,99	1,57				2,79	-15,40	7,76	237,04	42,89	
3,86	17,98				0,09	1,01	0,01	1,02	0,09	
4,42	20,42				0,64	3,45	0,41	11,93	2,22	
4,88	22,60				1,10	5,63	1,21	31,72	6,21	
4,69	21,19				0,91	4,22	0,83	17,79	3,85	
4,60	20,93				0,83	3,96	0,68	15,67	3,27	
4,63	20,91				0,85	3,94	0,73	15,49	3,36	
4,65	20,85				0,87	3,88	0,76	15,07	3,39	
4,62	20,67				0,85	3,70	0,72	13,69	3,13	
5,13	22,86				1,36	5,89	1,85	34,65	8,01	
5,46	24,55				1,69	7,59	2,86	57,54	12,82	
5,42	24,40				1,64	7,43	2,70	55,19	12,21	
5,58	25,18				1,81	8,21	3,28	67,47	14,87	
5,44	24,47				1,66	7,50	2,77	56,24	12,48	
5,46	24,75				1,69	7,79	2,84	60,61	13,12	
5,50	25,14				1,73	8,17	2,98	66,72	14,11	
5,63	25,66				1,86	8,69	3,46	75,53	16,17	
5,34	24,24				1,56	7,27	2,45	52,91	11,38	
5,48	24,84				1,71	7,87	2,91	61,99	13,43	
4,82	22,05				1,05	5,08	1,09	25,79	5,31	
3,96	17,72				0,19	0,75	0,03	0,57	0,14	
3,19	14,17				-0,58	-2,79	0,34	7,81	1,62	
2,95	13,47				-0,83	-3,50	0,68	12,27	2,89	
3,36	15,66				-	-1,31	0,17	1,72	0,54	

3,30	15,09
3,25	14,91
3,14	14,56
3,42	15,81
3,42	15,93
3,29	14,42
3,06	13,93
2,00	9,02
1,86	7,97
2,13	9,06
2,09	9,18
2,06	8,91
1,93	8,28
1,95	8,78
2,16	10,18
3,25	14,86
3,97	18,56
2,97	13,72
3,05	14,01
2,92	13,43
4,14	18,65
4,58	20,83
4,38	19,49
4,10	18,53
4,03	18,37
4,12	18,66
4,35	19,56
3,63	16,20

0,41				
-				
0,48	-1,88	0,23	3,54	0,90
-				
0,53	-2,06	0,28	4,24	1,09
-				
0,64	-2,41	0,40	5,79	1,53
-				
0,36	-1,16	0,13	1,35	0,41
-				
0,35	-1,04	0,12	1,09	0,37
-				
0,48	-2,55	0,23	6,48	1,23
-				
0,71	-3,04	0,50	9,21	2,16
-				
1,77	-7,95	3,13	63,22	14,08
-				
1,92	-9,00	3,68	81,00	17,27
-				
1,65	-7,91	2,71	62,57	13,03
-				
1,68	-7,79	2,82	60,65	13,09
-				
1,71	-8,06	2,94	64,97	13,82
-				
1,85	-8,69	3,41	75,49	16,04
-				
1,82	-8,19	3,32	67,01	14,91
-				
1,62	-6,79	2,61	46,04	10,97
-				
0,52	-2,11	0,28	4,43	1,10
0,20	1,59	0,04	2,53	0,31
-				
0,80	-3,25	0,64	10,55	2,61
-				
0,72	-2,96	0,52	8,75	2,13
-				
0,86	-3,54	0,73	12,52	3,03
0,37	1,68	0,13	2,83	0,61
0,81	3,86	0,65	14,87	3,12
0,60	2,52	0,36	6,36	1,52
0,32	1,57	0,10	2,45	0,50
0,26	1,40	0,07	1,97	0,36
0,35	1,69	0,12	2,85	0,59
0,58	2,59	0,34	6,72	1,50
-	-0,77	0,02	0,60	0,11

4,09	17,88
3,88	17,64
4,12	18,28
4,07	18,27
3,86	17,22
3,76	16,80
4,05	18,01
3,92	17,48
3,38	15,22
3,54	15,58
3,73	16,58
3,88	17,30
4,41	19,51
4,06	18,32
4,05	18,24
3,84	17,32
3,79	17,25
3,34	15,26
4,58	20,79
4,36	19,53
4,50	20,13
4,19	18,93
4,13	18,82
3,94	17,85
3,54	16,05
3,69	16,58
4,04	18,22
3,99	17,68
3,97	17,81
3,87	17,30
3,80	17,01
3,92	17,93
4,04	18,36
4,18	18,90
3,83	17,04
3,90	17,31
4,02	17,80
4,25	18,98
4,25	19,34

0,14				
0,32	0,91	0,10	0,83	0,29
0,10	0,67	0,01	0,45	0,07
0,35	1,32	0,12	1,73	0,46
0,30	1,30	0,09	1,68	0,39
0,08	0,25	0,01	0,06	0,02
-				
0,01	-0,17	0,00	0,03	0,00
0,27	1,04	0,07	1,09	0,28
0,14	0,51	0,02	0,26	0,07
-				
0,39	-1,75	0,15	3,07	0,69
-				
0,23	-1,39	0,05	1,93	0,32
-				
0,05	-0,39	0,00	0,15	0,02
0,10	0,33	0,01	0,11	0,03
0,64	2,55	0,41	6,48	1,63
0,29	1,35	0,08	1,83	0,39
0,28	1,27	0,08	1,61	0,35
0,06	0,35	0,00	0,12	0,02
0,01	0,28	0,00	0,08	0,00
-				
0,44	-1,71	0,19	2,91	0,75
0,81	3,82	0,65	14,59	3,08
0,59	2,56	0,35	6,56	1,51
0,73	3,16	0,53	9,99	2,30
0,42	1,96	0,18	3,84	0,82
0,35	1,85	0,12	3,43	0,65
0,16	0,88	0,03	0,78	0,14
-				
0,24	-0,92	0,06	0,85	0,22
-				
0,08	-0,39	0,01	0,15	0,03
0,26	1,25	0,07	1,57	0,33
0,22	0,71	0,05	0,50	0,15
0,20	0,84	0,04	0,71	0,17
0,10	0,33	0,01	0,11	0,03
0,03	0,04	0,00	0,00	0,00
0,15	0,96	0,02	0,92	0,14
0,27	1,39	0,07	1,93	0,37
0,40	1,93	0,16	3,74	0,78
0,06	0,07	0,00	0,01	0,00
0,13	0,34	0,02	0,12	0,04
0,24	0,83	0,06	0,69	0,20
0,48	2,01	0,23	4,05	0,96
0,48	2,37	0,23	5,62	1,14

4,05	18,20
3,97	17,57
3,86	17,35
4,01	17,68
4,29	19,11
4,09	18,48
4,07	18,41
4,25	19,08
4,20	19,13
4,14	19,00
4,22	19,31
4,21	19,07
4,19	18,86
4,20	19,04
4,19	19,02
4,26	19,33
4,34	19,57
4,58	20,47
4,24	19,31
4,10	18,36
4,39	19,56
4,11	18,21
4,13	18,50
3,75	16,77
4,06	18,23
4,24	19,02
4,08	18,06
4,09	18,21
4,01	17,92
4,10	18,36
4,14	18,59
4,11	18,05
4,42	19,90
4,02	18,13
3,91	17,66
4,01	17,94
3,90	17,37
4,17	18,39
4,01	17,77
4,19	18,73
4,37	19,47
4,35	19,26
4,36	18,97
4,17	18,49
535,94	2409,6 1

0,28	1,23	0,08	1,51	0,34
0,19	0,60	0,04	0,36	0,12
0,09	0,38	0,01	0,14	0,03
0,24	0,71	0,06	0,50	0,17
0,52	2,14	0,27	4,56	1,11
0,32	1,51	0,10	2,27	0,48
0,30	1,44	0,09	2,07	0,43
0,47	2,11	0,22	4,45	1,00
0,42	2,17	0,18	4,69	0,92
0,37	2,03	0,13	4,11	0,74
0,45	2,35	0,20	5,50	1,05
0,43	2,11	0,19	4,43	0,92
0,41	1,89	0,17	3,58	0,78
0,43	2,07	0,18	4,28	0,88
0,42	2,05	0,17	4,21	0,86
0,48	2,36	0,23	5,55	1,14
0,57	2,60	0,32	6,76	1,48
0,80	3,50	0,65	12,23	2,82
0,47	2,35	0,22	5,50	1,09
0,33	1,39	0,11	1,93	0,46
0,62	2,60	0,38	6,73	1,60
0,33	1,24	0,11	1,54	0,41
0,35	1,53	0,12	2,35	0,54
-				
0,02	-0,20	0,00	0,04	0,00
0,29	1,26	0,08	1,59	0,36
0,47	2,05	0,22	4,21	0,97
0,31	1,09	0,09	1,18	0,33
0,31	1,24	0,10	1,53	0,39
0,24	0,96	0,06	0,91	0,23
0,32	1,40	0,10	1,95	0,45
0,36	1,62	0,13	2,62	0,58
0,34	1,08	0,11	1,17	0,36
0,64	2,93	0,41	8,59	1,88
0,25	1,16	0,06	1,35	0,29
0,13	0,69	0,02	0,47	0,09
0,23	0,97	0,05	0,94	0,23
0,13	0,40	0,02	0,16	0,05
0,39	1,42	0,15	2,01	0,56
0,24	0,80	0,06	0,64	0,19
0,42	1,76	0,17	3,09	0,73
0,59	2,50	0,35	6,24	1,48
0,57	2,29	0,33	5,23	1,31
0,59	2,00	0,34	4,01	1,17
0,40	1,52	0,16	2,30	0,60
		185,30	3866,19	844,62

Anexo L. Correlación entre la velocidad de flujo del intercambiador E4205B y la transferencia de calor para el periodo 2011.

x	y	Periodo 2011 Velocidad de flujo vs transferencia de calor en el E4205B								
		n	□	□	x - □	y - □	(x - □) ²	(y - □) ²	(x - □)(y - □)	r
4,29	17,93	131,0	3,6	12,7	0,66	5,16	0,44	26,65	3,42	0,8566
4,09	17,00				0,45	4,23	0,21	17,88	1,92	
4,02	16,62				0,39	3,86	0,15	14,87	1,51	
4,26	17,73				0,63	4,96	0,40	24,63	3,12	
4,26	17,76				0,63	4,99	0,39	24,88	3,12	
4,15	17,26				0,52	4,49	0,27	20,18	2,34	
4,05	16,94				0,42	4,17	0,18	17,37	1,76	
4,15	17,26				0,52	4,49	0,27	20,18	2,34	
4,30	17,70				0,67	4,93	0,45	24,30	3,29	
4,15	17,34				0,52	4,57	0,27	20,90	2,37	
4,03	17,07				0,40	4,30	0,16	18,51	1,71	
4,07	17,20				0,44	4,43	0,19	19,61	1,95	
4,26	17,63				0,63	4,86	0,40	23,66	3,06	
4,18	17,41				0,55	4,64	0,30	21,57	2,56	
4,21	17,27				0,58	4,50	0,33	20,28	2,60	
3,99	16,19				0,35	3,42	0,12	11,73	1,21	
3,56	14,37				0,08	1,60	0,01	2,56	-0,12	
4,15	16,38				0,52	3,61	0,27	13,04	1,87	
4,26	15,18				0,63	2,42	0,39	5,84	1,52	
4,27	15,00				0,63	2,24	0,40	5,00	1,42	
4,40	15,12				0,77	2,35	0,59	5,54	1,80	
3,96	13,60				0,32	0,83	0,11	0,69	0,27	
3,85	13,34				0,22	0,58	0,05	0,33	0,13	
3,71	12,83				0,08	0,07	0,01	0,00	0,01	
3,64	12,65				0,00	0,12	0,00	0,01	0,00	
3,76	14,08				0,12	1,31	0,02	1,72	0,16	
4,07	15,81				0,44	3,04	0,19	9,24	1,33	
4,49	17,31				0,85	4,54	0,73	20,62	3,88	
4,42	16,97				0,79	4,20	0,62	17,68	3,31	
4,38	16,65				0,75	3,88	0,56	15,08	2,90	
4,32	16,69				0,68	3,93	0,47	15,42	2,69	
3,12	9,42				0,51	3,35	0,26	11,24	1,72	
2,86	11,23				0,77	1,54	0,59	2,37	1,18	
3,19	12,06				0,45	0,71	0,20	0,50	0,31	
3,67	13,90				0,03	1,13	0,00	1,28	0,04	

3,77	13,99
3,96	14,81
3,91	14,75
3,90	14,67
4,01	14,81
3,86	14,58
3,96	14,76
4,15	15,40
3,97	14,97
3,74	14,36
4,01	14,68
4,07	14,97
4,28	15,42
3,98	14,75
4,21	15,33
3,78	14,11
3,48	13,10
3,86	11,53
1,56	5,48
2,00	7,01
2,31	8,84
2,28	9,20
2,45	9,83
2,70	10,84
2,38	9,23
2,15	8,22
2,41	8,91
2,42	8,81
2,33	8,52
2,42	8,75
2,26	8,39
2,24	8,37

0,14	1,22	0,02	1,50	0,17
0,32	2,04	0,10	4,17	0,66
0,27	1,98	0,07	3,92	0,54
0,26	1,90	0,07	3,61	0,50
0,38	2,04	0,15	4,18	0,78
0,23	1,81	0,05	3,29	0,42
0,32	1,99	0,10	3,97	0,64
0,51	2,63	0,26	6,93	1,35
0,34	2,20	0,12	4,86	0,75
0,11	1,59	0,01	2,53	0,17
0,37	1,91	0,14	3,64	0,72
0,44	2,20	0,19	4,86	0,97
0,65	2,65	0,42	7,01	1,71
0,34	1,98	0,12	3,94	0,68
0,57	2,56	0,33	6,56	1,47
0,15	1,35	0,02	1,81	0,20
-	-	-	-	-
0,15	0,33	0,02	0,11	-0,05
-	-	-	-	-
0,23	1,24	0,05	1,54	-0,29
-	-	-	-	-
2,07	7,29	4,31	53,15	15,13
-	-	-	-	-
1,64	5,76	2,67	33,13	9,41
-	-	-	-	-
1,32	3,93	1,75	15,46	5,21
-	-	-	-	-
1,35	3,57	1,82	12,73	4,81
-	-	-	-	-
1,19	2,94	1,41	8,65	3,49
-	-	-	-	-
0,94	1,93	0,88	3,72	1,80
-	-	-	-	-
1,26	3,53	1,58	12,48	4,44
-	-	-	-	-
1,48	4,55	2,19	20,73	6,74
-	-	-	-	-
1,22	3,86	1,50	14,92	4,73
-	-	-	-	-
1,21	3,96	1,47	15,67	4,80
-	-	-	-	-
1,30	4,25	1,69	18,05	5,52
-	-	-	-	-
1,22	4,02	1,48	16,15	4,90
-	-	-	-	-
1,37	4,38	1,87	19,16	5,99
-	-	-	-	-
-	-	1,93	19,35	6,11

2,38	8,61
2,37	8,59
2,32	8,68
2,67	9,53
2,72	9,69
3,24	11,07
3,83	12,62
3,62	12,20
3,66	12,06
3,77	12,19
4,19	13,12
4,35	14,18
4,56	14,65
4,18	13,57
3,52	11,59
3,42	11,46
3,60	11,81
3,83	12,12
3,72	11,89
3,90	12,55
3,99	12,64
4,15	13,01
4,14	13,13
4,35	13,45
4,12	12,78
4,42	13,76
4,57	14,20
4,52	13,82
4,60	13,91

1,39	4,40			
-	-			
1,26	4,16	1,58	17,31	5,22
-	-			
1,26	4,18	1,59	17,44	5,27
-	-			
1,32	4,09	1,73	16,69	5,38
-	-			
0,97	3,24	0,93	10,51	3,13
-	-			
0,91	3,08	0,83	9,49	2,80
-	-			
0,40	1,70	0,16	2,88	0,67
-	-			
0,20	0,14	0,04	0,02	-0,03
-	-			
0,01	0,56	0,00	0,32	0,01
-	-			
0,03	0,71	0,00	0,50	-0,02
-	-			
0,14	0,58	0,02	0,33	-0,08
0,55	0,35	0,31	0,12	0,19
0,72	1,41	0,52	1,99	1,02
0,93	1,89	0,86	3,56	1,75
0,54	0,80	0,29	0,64	0,43
-	-			
0,12	1,18	0,01	1,39	0,14
-	-			
0,21	1,31	0,04	1,70	0,27
-	-			
0,03	0,96	0,00	0,92	0,03
-	-			
0,19	0,65	0,04	0,42	-0,12
-	-			
0,09	0,88	0,01	0,77	-0,08
-	-			
0,26	0,22	0,07	0,05	-0,06
-	-			
0,36	0,13	0,13	0,02	-0,05
0,52	0,24	0,27	0,06	0,12
0,51	0,36	0,26	0,13	0,18
0,71	0,68	0,51	0,46	0,48
0,49	0,02	0,24	0,00	0,01
0,78	1,00	0,61	0,99	0,78
0,94	1,43	0,88	2,06	1,34
0,88	1,05	0,78	1,11	0,93
0,97	1,14	0,94	1,29	1,10

4,63	13,95
4,65	14,08
4,68	14,08
4,43	13,39
3,90	12,26
4,19	12,59
4,50	12,94
4,55	13,27
2,02	7,28
2,52	8,74
2,38	8,13
2,38	8,15
2,82	9,30
3,21	10,24
3,47	10,62
3,25	10,12
3,63	11,13
3,23	10,33
3,02	9,96
3,02	9,93
3,40	10,95
3,65	11,44
3,43	11,04
3,49	11,12
3,84	11,85
3,69	11,42
3,64	11,30

0,99	1,18	0,99	1,40	1,17
1,02	1,32	1,04	1,73	1,34
1,04	1,31	1,09	1,71	1,37
0,80	0,62	0,63	0,38	0,49
0,27	-	0,07	0,26	-0,14
0,55	0,18	0,31	0,03	-0,10
0,86	0,17	0,74	0,03	0,15
0,91	0,50	0,83	0,25	0,46
-	-	-	-	-
1,61	5,49	2,59	30,16	8,84
-	-	-	-	-
1,11	4,02	1,24	16,19	4,48
-	-	-	-	-
1,25	4,64	1,57	21,54	5,82
-	-	-	-	-
1,25	4,62	1,57	21,35	5,79
-	-	-	-	-
0,81	3,47	0,66	12,03	2,82
-	-	-	-	-
0,42	2,53	0,18	6,41	1,07
-	-	-	-	-
0,16	2,15	0,03	4,62	0,35
-	-	-	-	-
0,38	2,65	0,14	7,02	1,00
-	-	-	-	-
0,00	1,64	0,00	2,69	0,00
-	-	-	-	-
0,40	2,44	0,16	5,95	0,98
-	-	-	-	-
0,61	2,81	0,37	7,90	1,71
-	-	-	-	-
0,61	2,84	0,37	8,06	1,73
-	-	-	-	-
0,23	1,82	0,06	3,32	0,43
-	-	-	-	-
0,01	1,33	0,00	1,77	-0,02
-	-	-	-	-
0,20	1,73	0,04	2,98	0,35
-	-	-	-	-
0,14	1,64	0,02	2,70	0,24
-	-	-	-	-
0,20	0,92	0,04	0,84	-0,19
-	-	-	-	-
0,06	1,35	0,00	1,82	-0,08
-	-	-	-	-
0,01	1,47	0,00	2,16	-0,02

3,83	11,55
3,22	10,62
3,53	11,30
3,56	11,51
3,49	11,12
3,53	11,24
3,42	10,92
3,68	11,57
475,92	1672,58

0,20	-	0,04	1,48	-0,24
-	-	0,17	4,60	0,89
0,41	2,15	0,01	2,15	0,15
-	-	0,01	1,57	0,10
0,08	1,25	0,02	2,72	0,24
-	-	0,01	2,34	0,16
0,15	1,65	0,05	3,40	0,40
-	-	0,00	1,44	-0,05
0,10	1,53			
0,21	1,84			
0,05	1,20			
		67,48	1065,30	229,67

Anexo M. Correlación entre la velocidad de flujo del intercambiador E4205B y la transferencia de calor para el periodo 2014.

x	y	Periodo 2014 Velocidad de flujo vs transferencia de calor en el E4205B								
		n	\bar{x}	\bar{y}	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$	r
5,26	20,38	151,00	3,54	13,70	1,71	6,68	2,93	44,62	11,44	0,9948
5,35	20,65				1,80	6,95	3,26	48,30	12,54	
5,32	20,55				1,78	6,85	3,17	46,99	12,21	
4,73	17,96				1,19	4,26	1,41	18,16	5,05	
4,22	16,47				0,68	2,77	0,46	7,69	1,87	
4,59	18,12				1,05	4,42	1,10	19,56	4,63	
4,89	19,20				1,34	5,50	1,80	30,28	7,39	
4,47	18,02				0,92	4,32	0,85	18,68	3,99	
5,33	21,31				1,79	7,62	3,19	58,01	13,60	
5,19	21,01				1,65	7,32	2,71	53,55	12,05	
4,64	18,81				1,10	5,11	1,21	26,15	5,62	
4,62	18,62				1,08	4,93	1,17	24,27	5,33	
4,56	18,06				1,02	4,36	1,04	19,03	4,45	
4,33	17,00				0,78	3,30	0,61	10,92	2,59	
4,23	16,92				0,69	3,22	0,48	10,38	2,23	
4,55	17,80				1,01	4,10	1,02	16,84	4,14	
4,20	16,53				0,65	2,83	0,43	8,00	1,85	
2,59	2,97				-0,95	-10,72	0,90	115,01	10,18	
0,72	-1,84				-2,82	-15,54	7,96	241,40	43,84	
0,03	-0,07				-3,52	-13,76	12,36	189,42	48,39	
0,00	0,00				-3,54	-13,70	12,55	187,61	48,53	
0,00	0,00				-3,54	-13,70	12,55	187,61	48,53	
0,00	0,00				-3,54	-13,70	12,55	187,61	48,53	
0,00	0,00				-3,54	-13,70	12,55	187,61	48,53	

0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,26	0,19
0,01	0,01
3,80	14,57
3,62	14,26
3,29	12,85
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00

-	-			
3,54	13,70	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,70	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,70	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,70	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,70	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,70	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,70	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,28	13,51	10,75	182,42	44,28
-	-			
3,54	13,69	12,50	187,28	48,39
0,25	0,87	0,06	0,76	0,22
0,07	0,57	0,01	0,32	0,04
-	-			
0,26	-0,84	0,07	0,71	0,22
-	-			
3,54	13,70	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,70	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,70	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,70	12,55	187,61	48,53

0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
3,24	12,06
3,76	14,76
3,59	14,24
3,70	14,50
4,01	15,79
4,34	16,95
4,27	16,99
4,58	17,41
4,74	18,21
4,45	17,53
4,22	16,74
4,46	17,57
4,37	17,26

	0			
-	-			
3,54	13,7	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,7	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,7	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,7	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,7	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,7	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,7	12,55	187,61	48,53
-	-			
3,54	13,7	12,55	187,61	48,53
-	-			
0,31	-1,63	0,09	2,67	0,50
0,22	1,07	0,05	1,14	0,23
0,04	0,55	0,00	0,30	0,02
0,16	0,80	0,03	0,64	0,13
0,47	2,09	0,22	4,37	0,98
0,80	3,25	0,64	10,57	2,60
0,72	3,29	0,52	10,81	2,38
1,04	3,71	1,08	13,77	3,85
1,20	4,51	1,43	20,35	5,39
0,91	3,84	0,83	14,72	3,49
0,68	3,04	0,46	9,26	2,07
0,92	3,87	0,85	14,97	3,57
0,82	3,56	0,68	12,71	2,93

4,24	16,85
4,32	16,97
4,56	17,61
4,24	16,34
4,25	16,36
4,13	15,73
4,23	16,05
4,11	15,82
4,12	16,04
4,60	17,55
4,60	17,44
4,56	17,19
4,71	17,49
4,60	16,94
4,76	17,47
4,65	17,43
4,70	18,02
4,70	18,00
4,67	17,86
4,66	18,35
4,57	17,81
4,81	18,53
5,05	19,31
5,05	19,40
5,00	19,24
5,06	19,44
5,06	19,28
5,11	19,48
5,11	19,41
5,11	19,38
5,11	19,34
5,11	19,41
5,11	19,40
5,11	19,46
4,91	18,83
4,85	18,83
4,82	18,60
5,11	19,62
5,11	19,64
5,10	19,55
4,97	19,21
4,95	19,15
4,93	19,07
4,99	19,21
4,84	18,59
4,99	19,19
4,81	18,67

0,69	3,15	0,48	9,94	2,19
0,78	3,27	0,60	10,71	2,54
1,01	3,91	1,03	15,29	3,96
0,70	2,65	0,49	7,00	1,85
0,70	2,67	0,50	7,11	1,88
0,59	2,03	0,35	4,13	1,20
0,69	2,36	0,48	5,56	1,63
0,56	2,12	0,32	4,49	1,19
0,57	2,34	0,33	5,47	1,34
1,05	3,85	1,11	14,85	4,06
1,05	3,74	1,11	13,98	3,94
1,02	3,49	1,04	12,18	3,55
1,16	3,80	1,35	14,41	4,41
1,06	3,25	1,11	10,53	3,43
1,22	3,77	1,49	14,20	4,59
1,11	3,73	1,22	13,90	4,13
1,16	4,33	1,34	18,71	5,00
1,15	4,30	1,33	18,51	4,97
1,13	4,16	1,27	17,31	4,69
1,11	4,66	1,24	21,69	5,18
1,03	4,11	1,06	16,88	4,22
1,27	4,83	1,60	23,37	6,12
1,50	5,62	2,26	31,55	8,45
1,51	5,70	2,28	32,50	8,61
1,46	5,54	2,14	30,68	8,09
1,51	5,75	2,29	33,02	8,70
1,51	5,58	2,29	31,15	8,45
1,57	5,78	2,47	33,42	9,08
1,56	5,71	2,45	32,64	8,94
1,57	5,68	2,46	32,26	8,90
1,57	5,64	2,47	31,82	8,86
1,57	5,71	2,47	32,62	8,98
1,57	5,70	2,45	32,52	8,93
1,57	5,76	2,45	33,20	9,02
1,36	5,13	1,86	26,34	7,01
1,31	5,13	1,71	26,36	6,72
1,28	4,91	1,63	24,08	6,26
1,57	5,92	2,47	35,08	9,30
1,57	5,94	2,47	35,30	9,33
1,55	5,85	2,42	34,26	9,10
1,43	5,51	2,03	30,36	7,85
1,40	5,45	1,97	29,69	7,65
1,39	5,37	1,92	28,86	7,44
1,45	5,52	2,10	30,43	8,00
1,30	4,90	1,69	23,97	6,36
1,44	5,50	2,08	30,22	7,93
1,26	4,97	1,60	24,69	6,29

4,87	18,97
4,74	18,95
4,78	19,03
4,71	18,83
4,69	18,58
5,07	19,87
5,11	19,83
5,10	19,76
5,03	19,48
4,98	19,33
4,58	17,84
3,79	14,82
3,84	15,11
3,92	15,54
3,82	15,14
3,44	13,56
3,84	15,17
3,87	15,25
4,00	15,86
4,16	16,38
4,19	16,55
4,12	16,40
4,43	17,79
4,29	17,21
4,39	17,81
3,77	14,94
3,68	14,37
3,88	15,18
3,78	14,45
3,63	14,38
3,94	15,46
4,39	17,24
4,41	17,29
4,32	16,95
4,17	16,48
4,09	16,02
4,11	16,11
4,41	17,42
534,98	2068,28

1,32	5,27	1,75	27,82	6,98
1,19	5,26	1,43	27,62	6,27
1,24	5,33	1,53	28,45	6,59
1,17	5,13	1,37	26,36	6,00
1,15	4,89	1,33	23,87	5,63
1,52	6,17	2,32	38,07	9,40
1,56	6,13	2,45	37,55	9,59
1,56	6,06	2,42	36,70	9,42
1,48	5,78	2,20	33,42	8,57
1,43	5,64	2,06	31,77	8,08
1,03	4,15	1,07	17,19	4,29
0,25	1,12	0,06	1,26	0,28
0,30	1,41	0,09	2,00	0,42
0,38	1,84	0,14	3,39	0,70
0,27	1,44	0,08	2,07	0,40
-				
0,11	-0,14	0,01	0,02	0,01
0,30	1,47	0,09	2,15	0,44
0,32	1,55	0,10	2,41	0,50
0,46	2,17	0,21	4,69	1,00
0,61	2,69	0,38	7,22	1,65
0,65	2,85	0,42	8,13	1,85
0,58	2,71	0,34	7,32	1,57
0,89	4,09	0,79	16,77	3,64
0,75	3,51	0,56	12,32	2,63
0,85	4,11	0,72	16,89	3,48
0,22	1,25	0,05	1,56	0,28
0,14	0,67	0,02	0,45	0,09
0,34	1,48	0,12	2,20	0,51
0,24	0,75	0,06	0,56	0,18
0,09	0,68	0,01	0,46	0,06
0,39	1,77	0,15	3,12	0,69
0,85	3,55	0,72	12,59	3,00
0,87	3,59	0,75	12,89	3,11
0,77	3,25	0,60	10,59	2,52
0,63	2,78	0,39	7,72	1,74
0,55	2,32	0,30	5,39	1,27
0,57	2,41	0,32	5,83	1,37
0,87	3,73	0,75	13,88	3,23
		533,20	8288,13	2091,28

Anexo N. Correlación entre la °API del slurry y la transferencia de calor por el intercambiador E4205 para el periodo 2010.

X	y	Periodo 2010 °API en el slurry vs transferencia de calor en el E4205A								
		n	\bar{x}	\bar{y}	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$	r
-1,00	17,94	142,00	-0,67	18,17	-0,33	-0,22	0,11	0,05	0,07	0,1511
-1,30	18,35				-0,63	0,18	0,40	0,03	-0,11	
-1,50	18,66				-0,83	0,49	0,69	0,24	-0,41	
-1,50	18,63				-0,83	0,46	0,69	0,21	-0,38	
-1,50	18,53				-0,83	0,37	0,69	0,13	-0,31	
-1,50	19,21				-0,83	1,04	0,69	1,09	-0,87	
-1,50	19,14				-0,83	0,98	0,69	0,95	-0,81	
-1,50	19,02				-0,83	0,85	0,69	0,73	-0,71	
-1,14	18,98				-0,47	0,81	0,22	0,66	-0,38	
-0,90	19,33				-0,23	1,16	0,05	1,35	-0,27	
-0,90	19,50				-0,23	1,34	0,05	1,79	-0,31	
-0,90	19,28				-0,23	1,11	0,05	1,24	-0,26	
-0,90	18,62				-0,23	0,46	0,05	0,21	-0,11	
-0,90	18,50				-0,23	0,33	0,05	0,11	-0,08	
-0,90	17,05				-0,23	-1,12	0,05	1,24	0,26	
-0,59	17,66				0,08	-0,51	0,01	0,26	-0,04	
-0,20	18,22				0,47	0,05	0,22	0,00	0,03	
-0,20	18,74				0,47	0,57	0,22	0,33	0,27	
-0,20	19,08				0,47	0,91	0,22	0,83	0,43	
-0,20	18,92				0,47	0,76	0,22	0,57	0,35	
-0,20	18,20				0,47	0,04	0,22	0,00	0,02	
-0,20	18,53				0,47	0,37	0,22	0,14	0,17	
-0,35	17,61				0,32	-0,56	0,10	0,31	-0,18	
-0,40	17,69				0,27	-0,47	0,07	0,22	-0,13	
-0,40	16,64				0,27	-1,52	0,07	2,32	-0,41	
-0,40	17,51				0,27	-0,66	0,07	0,43	-0,18	
-0,40	17,25				0,27	-0,92	0,07	0,84	-0,25	
-0,40	15,93				0,27	-2,24	0,07	5,01	-0,60	
-0,40	14,65				0,27	-3,51	0,07	12,35	-0,94	
-1,89	15,16				-1,22	-3,01	1,49	9,05	3,68	
-2,50	15,22				-1,83	-2,94	3,36	8,65	5,39	
-2,50	14,93				-1,83	-3,23	3,36	10,45	5,93	
-2,50	15,56				-1,83	-2,61	3,36	6,79	4,77	
-2,50	16,50				-1,83	-1,67	3,36	2,79	3,06	
-2,50	16,30				-1,83	-1,87	3,36	3,49	3,42	
-2,50	16,57				-1,83	-1,59	3,36	2,53	2,92	
-1,60	8,87				-0,93	-9,29	0,87	86,34	8,67	
-0,70	10,38				-0,03	-7,79	0,00	60,63	0,25	
-0,70	14,25				-0,03	-3,92	0,00	15,33	0,13	
-0,70	12,84				-0,03	-5,33	0,00	28,37	0,17	
-0,70	11,75				-0,03	-6,41	0,00	41,15	0,21	

-0,70	14,18
-0,70	13,26
-1,56	13,22
-2,00	12,43
-2,00	12,99
-2,00	15,49
-2,00	15,79
-2,00	16,26
-2,00	15,83
-0,40	15,52
0,20	17,36
0,20	18,77
0,20	17,88
0,20	17,65
0,20	17,18
0,20	17,23
-0,08	17,22
-0,30	20,17
-0,30	19,65
-0,30	21,79
-0,30	21,45
-0,30	21,08
-0,30	22,29
-0,23	22,60
-0,20	23,01
-0,20	16,24
-0,20	16,29
-0,20	16,02
-0,20	16,45
-0,20	16,31
-0,37	16,40
-0,50	16,13
-0,50	16,46
-0,50	16,34
-0,50	16,43
-0,50	15,75
-0,50	16,83
-1,35	21,22
-1,95	20,47
-1,95	20,15
-1,95	20,38
-1,95	19,89
-1,95	19,69
-1,95	19,33
-2,04	19,65
-2,10	19,24
-2,10	19,44

-0,03	-3,99	0,00	15,88	0,13
-0,03	-4,91	0,00	24,07	0,16
-0,89	-4,95	0,80	24,47	4,42
-1,33	-5,73	1,78	32,86	7,64
-1,33	-5,18	1,78	26,84	6,90
-1,33	-2,68	1,78	7,17	3,57
-1,33	-2,37	1,78	5,64	3,16
-1,33	-1,90	1,78	3,63	2,54
-1,33	-2,34	1,78	5,47	3,12
0,27	-2,65	0,07	7,01	-0,71
0,87	-0,80	0,75	0,65	-0,70
0,87	0,61	0,75	0,37	0,53
0,87	-0,29	0,75	0,08	-0,25
0,87	-0,52	0,75	0,27	-0,45
0,87	-0,99	0,75	0,97	-0,86
0,87	-0,94	0,75	0,88	-0,81
0,59	-0,94	0,34	0,89	-0,55
0,37	2,01	0,13	4,02	0,74
0,37	1,49	0,13	2,21	0,55
0,37	3,62	0,13	13,12	1,33
0,37	3,29	0,13	10,79	1,21
0,37	2,91	0,13	8,48	1,07
0,37	4,12	0,13	17,00	1,51
0,44	4,43	0,19	19,65	1,94
0,47	4,84	0,22	23,42	2,26
0,47	-1,93	0,22	3,71	-0,90
0,47	-1,87	0,22	3,50	-0,87
0,47	-2,15	0,22	4,61	-1,00
0,47	-1,72	0,22	2,95	-0,80
0,47	-1,86	0,22	3,45	-0,87
0,30	-1,76	0,09	3,11	-0,52
0,17	-2,04	0,03	4,15	-0,34
0,17	-1,70	0,03	2,90	-0,28
0,17	-1,83	0,03	3,34	-0,31
0,17	-1,73	0,03	3,01	-0,29
0,17	-2,42	0,03	5,85	-0,40
0,17	-1,34	0,03	1,78	-0,22
-0,68	3,06	0,47	9,34	-2,09
-1,28	2,31	1,65	5,32	-2,96
-1,28	1,98	1,65	3,92	-2,54
-1,28	2,22	1,65	4,91	-2,84
-1,28	1,72	1,65	2,97	-2,21
-1,28	1,52	1,65	2,31	-1,95
-1,28	1,16	1,65	1,34	-1,49
-1,37	1,49	1,88	2,21	-2,04
-1,43	1,07	2,05	1,15	-1,54
-1,43	1,27	2,05	1,61	-1,82

-2,10	19,28
-2,10	19,41
-2,10	20,03
-2,10	21,50
-1,08	21,16
-0,50	21,13
-0,50	20,75
-0,50	20,31
-0,50	20,22
-0,50	19,30
-0,50	20,03
-1,03	20,58
-1,30	20,39
-1,30	20,17
-1,30	20,05
-1,30	20,17
-1,30	20,41
-1,30	19,97
-1,19	19,74
-1,10	19,64
-1,10	19,56
-1,10	19,27
-1,10	19,15
-1,10	19,31
-1,10	18,49
-0,53	18,52
-0,20	18,33
-0,20	18,53
-0,20	18,89
-0,20	19,03
-0,20	18,66
-0,20	18,48
-0,33	19,35
-0,40	18,83
-0,40	18,84
-0,40	19,28
-0,40	19,23
-0,40	18,75
-0,40	18,33
0,26	18,62
0,70	18,79
0,70	18,60
0,70	18,98
0,70	19,41
0,70	19,22
0,70	18,74
1,74	18,25

-1,43	1,12	2,05	1,24	-1,60
-1,43	1,24	2,05	1,54	-1,78
-1,43	1,87	2,05	3,48	-2,67
-1,43	3,34	2,05	11,14	-4,78
-0,41	2,99	0,17	8,94	-1,23
0,17	2,96	0,03	8,77	0,50
0,17	2,59	0,03	6,69	0,43
0,17	2,15	0,03	4,62	0,36
0,17	2,05	0,03	4,21	0,34
0,17	1,13	0,03	1,29	0,19
0,17	1,87	0,03	3,49	0,31
-0,36	2,41	0,13	5,82	-0,87
-0,63	2,22	0,40	4,94	-1,41
-0,63	2,01	0,40	4,03	-1,27
-0,63	1,89	0,40	3,56	-1,19
-0,63	2,00	0,40	4,02	-1,27
-0,63	2,24	0,40	5,02	-1,42
-0,63	1,80	0,40	3,24	-1,14
-0,52	1,57	0,27	2,48	-0,82
-0,43	1,48	0,19	2,18	-0,64
-0,43	1,39	0,19	1,93	-0,60
-0,43	1,10	0,19	1,22	-0,48
-0,43	0,98	0,19	0,96	-0,42
-0,43	1,15	0,19	1,31	-0,50
-0,43	0,32	0,19	0,10	-0,14
0,14	0,35	0,02	0,13	0,05
0,47	0,16	0,22	0,03	0,07
0,47	0,37	0,22	0,14	0,17
0,47	0,73	0,22	0,53	0,34
0,47	0,87	0,22	0,75	0,41
0,47	0,49	0,22	0,24	0,23
0,47	0,31	0,22	0,10	0,15
0,34	1,19	0,11	1,41	0,40
0,27	0,66	0,07	0,44	0,18
0,27	0,67	0,07	0,45	0,18
0,27	1,12	0,07	1,25	0,30
0,27	1,06	0,07	1,13	0,28
0,27	0,58	0,07	0,34	0,16
0,27	0,16	0,07	0,03	0,04
0,93	0,45	0,86	0,21	0,42
1,37	0,62	1,87	0,39	0,85
1,37	0,43	1,87	0,19	0,59
1,37	0,81	1,87	0,66	1,11
1,37	1,24	1,87	1,54	1,70
1,37	1,05	1,87	1,10	1,43
1,37	0,58	1,87	0,33	0,79
2,41	0,08	5,80	0,01	0,20

2,60	18,40
2,60	19,42
2,60	19,53
2,60	19,56
2,60	18,70
2,60	19,75
0,80	19,43
-	
94,76	2579,56

3,27	0,23	10,68	0,05	0,76
3,27	1,25	10,68	1,56	4,08
3,27	1,36	10,68	1,85	4,44
3,27	1,39	10,68	1,94	4,55
3,27	0,54	10,68	0,29	1,76
3,27	1,59	10,68	2,52	5,18
1,47	1,27	2,15	1,61	1,86
		163,29	759,95	53,22

Anexo O. Correlación entre la °API del slurry y la transferencia de calor por el intercambiador E4205 para el periodo 2011.

x	y	Periodo 2011 °API en el slurry vs transferencia de calor en el E4205A								
API slurry	Qcal en E4205A	n	\bar{x}	\bar{y}	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$	r
1,80	18,89	131,00	2,65	13,49	-0,85	5,40	0,72	29,12	-4,57	0,2005
1,80	18,91				-0,85	5,42	0,72	29,37	-4,59	
1,80	18,58				-0,85	5,09	0,72	25,90	-4,31	
1,80	18,47				-0,85	4,98	0,72	24,77	-4,21	
1,89	18,20				-0,76	4,71	0,57	22,21	-3,57	
2,00	18,99				-0,65	5,50	0,42	30,27	-3,56	
2,00	18,55				-0,65	5,06	0,42	25,59	-3,27	
2,09	18,65				-0,56	5,16	0,31	26,63	-2,87	
2,20	18,51				-0,45	5,02	0,20	25,19	-2,24	
2,20	18,36				-0,45	4,87	0,20	23,72	-2,17	
2,20	18,27				-0,45	4,78	0,20	22,85	-2,13	
1,90	18,24				-0,75	4,75	0,56	22,52	-3,54	
1,80	18,08				-0,85	4,59	0,72	21,05	-3,88	
1,80	19,32				-0,85	5,83	0,72	34,00	-4,94	
1,80	19,77				-0,85	6,28	0,72	39,45	-5,32	
1,80	19,82				-0,85	6,33	0,72	40,05	-5,36	
1,80	18,55				-0,85	5,05	0,72	25,55	-4,28	
1,80	18,45				-0,85	4,96	0,72	24,59	-4,20	
14,91	16,82				12,26	3,33	150,39	11,10	40,87	
20,00	16,62				17,35	3,13	301,14	9,80	54,33	
20,00	16,46				17,35	2,97	301,14	8,83	51,58	
20,00	13,38				17,35	-0,11	301,14	0,01	-1,90	
20,00	16,17				17,35	2,68	301,14	7,18	46,49	
20,00	16,49				17,35	3,00	301,14	8,99	52,02	
20,00	16,19				17,35	2,70	301,14	7,30	46,89	
8,81	17,62				6,16	4,13	37,99	17,07	25,46	
2,80	18,89				0,15	5,40	0,02	29,15	0,83	
2,80	19,16				0,15	5,67	0,02	32,16	0,87	

2,80	18,33
2,80	18,18
2,80	18,27
2,80	11,62
2,80	11,00
2,80	10,73
2,80	11,66
2,80	12,11
2,32	12,39
2,10	12,46
2,10	12,30
2,10	12,03
2,10	12,10
2,10	12,25
2,10	12,46
1,55	12,83
1,10	13,00
1,10	12,94
1,10	13,05
1,10	12,95
1,10	12,98
1,10	12,74
1,70	13,11
2,40	13,04
2,40	10,97
19,50	9,28
19,50	10,30
5,38	11,73
-0,06	12,99
-0,06	8,55
-0,06	13,34
-0,06	12,91
-0,06	12,91
-0,06	13,36
1,34	13,06
2,00	12,91
2,00	13,02
2,00	12,91

0,15	4,84	0,02	23,46	0,74
0,15	4,69	0,02	22,03	0,72
0,15	4,78	0,02	22,82	0,73
0,15	-1,87	0,02	3,51	-0,29
0,15	-2,49	0,02	6,21	-0,38
0,15	-2,76	0,02	7,61	-0,42
0,15	-1,83	0,02	3,34	-0,28
0,15	-1,38	0,02	1,91	-0,21
-0,33	-1,10	0,11	1,22	0,36
-0,55	-1,03	0,30	1,06	0,56
-0,55	-1,19	0,30	1,42	0,65
-0,55	-1,46	0,30	2,14	0,80
-0,55	-1,39	0,30	1,93	0,76
-0,55	-1,24	0,30	1,54	0,68
-0,55	-1,03	0,30	1,06	0,56
-1,10	-0,66	1,20	0,43	0,72
-1,55	-0,49	2,39	0,24	0,76
-1,55	-0,55	2,39	0,31	0,86
-1,55	-0,44	2,39	0,19	0,67
-1,55	-0,54	2,39	0,29	0,84
-1,55	-0,51	2,39	0,26	0,79
-1,55	-0,75	2,39	0,57	1,17
-0,95	-0,38	0,90	0,15	0,36
-0,25	-0,45	0,06	0,21	0,11
-0,25	-2,52	0,06	6,34	0,62
16,8				
5	-4,21	284,04	17,76	-71,03
16,8				
5	-3,19	284,04	10,16	-53,73
2,73	-1,76	7,47	3,11	-4,82
-2,71	-0,51	7,33	0,26	1,37
-2,71	-4,94	7,33	24,40	13,37
-2,71	-0,15	7,33	0,02	0,40
-2,71	-0,58	7,33	0,34	1,57
-2,71	-0,58	7,33	0,33	1,56
-2,71	-0,14	7,33	0,02	0,37
-1,31	-0,43	1,71	0,19	0,56
-0,65	-0,58	0,42	0,34	0,38
-0,65	-0,47	0,42	0,22	0,30
-0,65	-0,58	0,42	0,34	0,37

2,00	12,91
2,00	13,41
2,00	12,96
1,80	13,08
1,70	13,47
1,70	12,54
1,70	12,88
1,70	12,41
1,70	13,69
1,70	13,01
1,57	12,74
1,50	12,73
1,50	13,88
1,50	12,60
1,50	13,84
1,50	13,80
1,50	13,58
1,06	13,29
0,80	13,72
0,80	13,16
0,80	12,84
0,80	12,41
0,80	12,33
0,80	12,50
1,97	12,50
3,20	12,32
3,20	12,09
3,20	11,87
3,20	11,89
3,20	11,75
3,20	11,79
1,87	11,89
0,56	11,77
0,56	11,99
0,56	11,98
0,56	11,41
0,56	11,51
0,56	11,47
-0,29	1,30

-0,65	-0,59	0,42	0,34	0,38
-0,65	-0,08	0,42	0,01	0,05
-0,65	-0,53	0,42	0,28	0,34
-0,85	-0,41	0,72	0,17	0,35
-0,95	-0,02	0,90	0,00	0,02
-0,95	-0,95	0,90	0,90	0,90
-0,95	-0,61	0,90	0,37	0,58
-0,95	-1,08	0,90	1,17	1,03
-0,95	0,20	0,90	0,04	-0,19
-0,95	-0,48	0,90	0,23	0,46
-1,08	-0,75	1,16	0,56	0,80
-1,15	-0,76	1,31	0,58	0,87
-1,15	0,39	1,31	0,15	-0,45
-1,15	-0,89	1,31	0,80	1,02
-1,15	0,34	1,31	0,12	-0,39
-1,15	0,31	1,31	0,10	-0,36
-1,15	0,09	1,31	0,01	-0,11
-1,59	-0,20	2,52	0,04	0,31
-1,85	0,22	3,41	0,05	-0,41
-1,85	-0,33	3,41	0,11	0,62
-1,85	-0,65	3,41	0,43	1,21
-1,85	-1,08	3,41	1,17	2,00
-1,85	-1,16	3,41	1,34	2,14
-1,85	-1,00	3,41	0,99	1,84
-0,68	-0,99	0,46	0,98	0,67
0,55	-1,17	0,31	1,38	-0,65
0,55	-1,40	0,31	1,96	-0,77
0,55	-1,62	0,31	2,62	-0,90
0,55	-1,60	0,31	2,56	-0,89
0,55	-1,74	0,31	3,02	-0,96
0,55	-1,70	0,31	2,91	-0,94
-0,78	-1,60	0,60	2,58	1,25
-2,09	-1,72	4,35	2,97	3,60
-2,09	-1,50	4,35	2,26	3,14
-2,09	-1,51	4,35	2,29	3,16
-2,09	-2,08	4,35	4,33	4,34
-2,09	-1,98	4,35	3,94	4,14
-2,09	-2,02	4,35	4,07	4,21
-2,94	-			
-2,94	12,19	8,62	148,61	35,80

-0,70	11,92
-0,70	12,19
-0,70	12,24
-0,70	11,91
-0,70	11,41
-0,70	11,03
-0,04	11,26
0,70	11,55
0,70	11,67
0,70	11,68
0,70	11,67
0,70	11,84
0,70	11,64
0,26	11,73
0,08	11,89
0,08	11,35
0,08	11,39
0,08	11,23
0,08	10,91
0,08	10,96
-0,17	11,46
-0,30	11,79
-0,30	10,80
-0,30	11,03
-0,30	11,35
-0,30	10,95
346,7	1767,3
0	5

-3,35	-1,57	11,20	2,47	5,26
-3,35	-1,31	11,20	1,70	4,37
-3,35	-1,25	11,20	1,56	4,18
-3,35	-1,58	11,20	2,50	5,29
-3,35	-2,08	11,20	4,35	6,98
-3,35	-2,47	11,20	6,08	8,25
-2,69	-2,23	7,22	4,97	5,99
-1,95	-1,94	3,79	3,76	3,77
-1,95	-1,82	3,79	3,30	3,54
-1,95	-1,81	3,79	3,27	3,52
-1,95	-1,83	3,79	3,33	3,55
-1,95	-1,65	3,79	2,73	3,22
-1,95	-1,85	3,79	3,41	3,60
-2,39	-1,76	5,70	3,11	4,21
-2,57	-1,60	6,59	2,55	4,10
-2,57	-2,14	6,59	4,58	5,49
-2,57	-2,10	6,59	4,43	5,40
-2,57	-2,27	6,59	5,13	5,81
-2,57	-2,58	6,59	6,68	6,63
-2,57	-2,53	6,59	6,41	6,50
-2,82	-2,03	7,93	4,13	5,72
-2,95	-1,70	8,68	2,88	5,00
-2,95	-2,70	8,68	7,27	7,94
-2,95	-2,46	8,68	6,07	7,26
-2,95	-2,14	8,68	4,56	6,30
-2,95	-2,55	8,68	6,48	7,50
		2917,17	1096,2	358,58
			9	

Anexo P. Correlación entre la °API del slurry y la transferencia de calor por el intercambiador E4205 para el periodo 2014.

x	y	Periodo 2014 °API en el slurry vs transferencia de calor en el E4205A									
		API slurry	Qcal en E4205A	n	\bar{x}	\bar{y}	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
-2,30	0,00		151,00	-	14,45	-2,25	-	5,08	208,68	32,56	0,6289
-2,30	0,00			0,05		-2,25	14,45	5,08	208,68	32,56	
-2,62	0,00					-2,57	14,45	6,62	208,67	37,18	
-1,80	-1,52					-1,75	15,97	3,08	254,97	28,00	
-1,50	0,00					-1,45	14,45	2,11	208,72	21,00	
-1,50	0,00					-1,45	14,45	2,11	208,67	21,00	
-1,50	0,00					-1,45	14,45	2,11	208,68	21,00	
-1,50	-0,01					-1,45	14,46	2,11	209,03	21,02	
-1,50	0,00					-1,45	14,45	2,11	208,82	21,01	
-2,49	-0,02					-2,44	14,46	5,97	209,17	35,34	
-2,90	-0,02					-2,85	14,46	8,14	209,20	41,27	
-2,90	-0,09					-2,85	14,54	8,14	211,36	41,49	
-2,90	0,00					-2,85	14,45	8,14	208,80	41,24	
-2,90	0,00					-2,85	14,45	8,14	208,67	41,22	
-2,90	2,21					-2,85	12,24	8,14	149,72	34,92	
-2,84	0,09					-2,79	14,35	7,80	205,98	40,09	
-2,81	0,25					-2,76	14,20	7,64	201,57	39,24	
-2,81	6,66					-2,76	-7,79	7,64	60,67	21,53	
-2,35	13,42					-2,30	-1,03	5,31	1,06	2,37	
-1,90	13,96					-1,85	-0,48	3,44	0,23	0,89	
-1,90	13,83					-1,85	-0,62	3,44	0,38	1,15	
-1,90	14,23					-1,85	-0,21	3,44	0,05	0,40	
-2,09	13,11					-2,04	-1,34	4,18	1,80	2,74	
-2,20	14,58					-2,15	0,13	4,64	0,02	-0,29	
-2,48	14,04					-2,43	-0,40	5,92	0,16	0,99	

-2,60	14,25
-2,60	15,20
-2,60	15,76
-2,60	14,01
-2,97	14,31
-2,67	13,55
-2,20	14,05
-2,20	13,86
-2,20	13,81
-2,20	13,88
-2,20	-3,27
-1,94	-0,72
-1,80	-0,35
-1,80	12,99
-0,85	12,90
0,20	17,76
-0,78	16,66
-1,30	14,19
-1,30	15,12
-1,30	15,22
-1,30	15,03
-1,23	18,89
-1,16	16,57
-1,16	16,60
-1,16	16,54
-1,16	17,01
-1,16	16,55
-1,16	17,09
-0,75	12,52
-0,40	12,71
-0,40	13,43
-0,40	14,14
-0,40	14,77
-0,40	14,93
-0,40	13,65
0,12	9,24
0,41	10,16
-0,20	20,02
-0,50	19,62
-0,50	18,46
-0,50	17,36
-0,50	17,08
0,54	17,83
1,10	18,34

-2,55	-0,19	6,52	0,04	0,49
-2,55	0,75	6,52	0,56	-1,92
-2,55	1,31	6,52	1,72	-3,34
-2,55	-0,44	6,52	0,19	1,12
-2,92	-0,14	8,55	0,02	0,41
-2,62	-0,89	6,88	0,80	2,34
-2,15	-0,39	4,64	0,15	0,84
-2,15	-0,59	4,64	0,34	1,26
-2,15	-0,63	4,64	0,40	1,37
-2,15	-0,56	4,64	0,32	1,21
-2,15	-	4,64	313,79	38,15
-1,89	15,17	3,59	230,07	28,72
-1,75	14,80	3,08	219,00	25,95
-1,75	-1,46	3,08	2,12	2,55
-0,80	-1,55	0,65	2,39	1,24
0,25	3,31	0,06	10,98	0,82
-0,73	2,22	0,54	4,91	-1,63
-1,25	-0,25	1,57	0,06	0,32
-1,25	0,67	1,57	0,45	-0,84
-1,25	0,77	1,57	0,59	-0,97
-1,25	0,59	1,57	0,34	-0,74
-1,18	4,44	1,40	19,74	-5,26
-1,11	2,13	1,24	4,53	-2,37
-1,11	2,15	1,24	4,63	-2,40
-1,11	2,09	1,24	4,37	-2,33
-1,11	2,57	1,24	6,58	-2,86
-1,11	2,10	1,24	4,42	-2,34
-1,11	2,64	1,24	6,99	-2,95
-0,70	-1,92	0,50	3,69	1,35
-0,35	-1,74	0,13	3,02	0,61
-0,35	-1,01	0,13	1,02	0,36
-0,35	-0,30	0,13	0,09	0,11
-0,35	0,32	0,13	0,10	-0,11
-0,35	0,48	0,13	0,23	-0,17
-0,35	-0,79	0,13	0,63	0,28
0,17	-5,21	0,03	27,13	-0,87
0,46	-4,28	0,21	18,33	-1,95
-0,15	5,57	0,02	31,07	-0,86
-0,45	5,17	0,21	26,73	-2,35
-0,45	4,02	0,21	16,14	-1,82
-0,45	2,92	0,21	8,50	-1,32
-0,45	2,64	0,21	6,96	-1,20
0,59	3,38	0,34	11,43	1,98
1,15	3,90	1,31	15,18	4,47

1,10	18,13
1,10	18,30
1,10	18,19
1,10	18,40
1,10	18,71
1,32	18,98
1,44	18,85
4,43	18,72
5,70	18,40
5,70	18,54
5,70	18,56
5,70	18,19
3,36	18,65
1,90	18,52
1,64	19,20
1,50	18,88
1,50	19,22
1,50	19,25
1,50	18,96
1,06	18,94
0,89	19,03
0,89	18,87
0,89	19,11
0,89	18,99
0,89	19,80
0,89	19,23
0,89	19,46
0,89	19,51
0,89	19,37
0,89	18,80
0,89	18,63
0,89	18,25
0,89	18,59
0,90	18,66
0,90	19,59
1,07	19,37
1,20	19,59
1,20	19,50
1,20	19,34
1,20	19,46
1,61	19,36
1,90	19,11
1,36	18,78
1,10	18,50
1,10	18,73
1,10	20,20

1,15	3,69	1,31	13,59	4,23
1,15	3,85	1,31	14,83	4,42
1,15	3,74	1,31	14,00	4,29
1,15	3,95	1,31	15,63	4,53
1,15	4,27	1,31	18,22	4,89
1,37	4,54	1,87	20,57	6,20
1,49	4,41	2,21	19,44	6,55
4,48	4,27	20,04	18,26	19,13
5,75	3,95	33,02	15,64	22,73
5,75	4,09	33,02	16,76	23,53
5,75	4,11	33,02	16,92	23,64
5,75	3,74	33,02	14,02	21,52
3,41	4,20	11,60	17,65	14,31
1,95	4,07	3,79	16,59	7,93
1,69	4,75	2,84	22,56	8,01
1,55	4,43	2,39	19,63	6,85
1,55	4,77	2,39	22,80	7,38
1,55	4,81	2,39	23,09	7,43
1,55	4,51	2,39	20,35	6,98
1,11	4,49	1,22	20,20	4,97
0,94	4,58	0,88	20,98	4,29
0,94	4,42	0,88	19,58	4,14
0,94	4,66	0,88	21,74	4,37
0,94	4,54	0,88	20,62	4,25
0,94	5,35	0,88	28,66	5,01
0,94	4,79	0,88	22,91	4,48
0,94	5,02	0,88	25,17	4,70
0,94	5,06	0,88	25,65	4,74
0,94	4,92	0,88	24,24	4,61
0,94	4,36	0,88	18,97	4,08
0,94	4,18	0,88	17,51	3,92
0,94	3,80	0,88	14,47	3,56
0,94	4,14	0,88	17,17	3,88
0,95	4,21	0,90	17,72	3,98
0,95	5,15	0,90	26,47	4,87
1,12	4,93	1,25	24,27	5,50
1,25	5,15	1,55	26,49	6,42
1,25	5,06	1,55	25,55	6,30
1,25	4,90	1,55	23,97	6,10
1,25	5,01	1,55	25,10	6,24
1,66	4,91	2,74	24,12	8,13
1,95	4,66	3,79	21,75	9,08
1,41	4,33	1,98	18,79	6,10
1,15	4,06	1,31	16,47	4,65
1,15	4,29	1,31	18,39	4,92
1,15	5,75	1,31	33,09	6,59

1,10	19,29
1,17	18,62
1,20	18,63
1,20	19,33
0,92	19,50
0,80	19,39
0,80	19,34
0,80	19,36
0,91	17,47
1,00	14,69
0,86	14,52
0,80	14,87
0,80	14,76
0,80	13,15
0,80	14,65
1,27	14,67
1,50	15,36
1,50	15,44
1,50	15,74
1,50	15,47
1,50	17,72
1,50	17,21
-0,58	17,34
-1,80	15,02
-1,80	13,94
-1,54	14,93
0,19	14,15
0,19	13,76
0,19	14,52
0,55	16,54
0,80	16,47
0,68	16,07
0,60	15,47
0,60	15,35
0,60	14,90
0,60	15,84
-7,00	2181,28

1,15	4,84	1,31	23,45	5,55
1,22	4,17	1,48	17,42	5,08
1,25	4,18	1,55	17,47	5,21
1,25	4,89	1,55	23,90	6,09
0,97	5,05	0,93	25,52	4,88
0,85	4,95	0,72	24,49	4,19
0,85	4,89	0,72	23,91	4,14
0,85	4,91	0,72	24,12	4,16
0,96	3,03	0,91	9,16	2,90
1,05	0,24	1,09	0,06	0,26
0,91	0,07	0,82	0,01	0,06
0,85	0,43	0,72	0,18	0,36
0,85	0,31	0,72	0,10	0,26
0,85	-1,29	0,72	1,68	-1,10
0,85	0,20	0,72	0,04	0,17
1,32	0,22	1,73	0,05	0,29
1,55	0,91	2,39	0,84	1,41
1,55	0,99	2,39	0,98	1,53
1,55	1,30	2,39	1,69	2,01
1,55	1,02	2,39	1,05	1,58
1,55	3,28	2,39	10,74	5,07
1,55	2,77	2,39	7,65	4,28
-0,53	2,89	0,28	8,37	-1,54
-1,75	0,57	3,08	0,32	-1,00
-1,75	-0,50	3,08	0,25	0,88
-1,49	0,48	2,23	0,23	-0,72
0,24	-0,30	0,06	0,09	-0,07
0,24	-0,69	0,06	0,48	-0,16
0,24	0,08	0,06	0,01	0,02
0,60	2,09	0,36	4,38	1,25
0,85	2,03	0,72	4,12	1,72
0,73	1,62	0,53	2,63	1,18
0,65	1,03	0,42	1,05	0,66
0,65	0,91	0,42	0,82	0,59
0,65	0,45	0,42	0,21	0,29
0,65	1,40	0,42	1,95	0,90
		493,10	5784,54	1062,06

Anexo Q. Cálculo de la densidad en función de la temperatura en la corriente de slurry de la FCC UOP II

Temperatura [°F]	Densidad [lb/ft ³]
500	58,1941405
437,0254024	59,62090206
382,5981575	60,80869717
335,6981264	61,81027063
296,6008728	62,63664438
500	58,17331656
427,7048441	59,80624863
365,1103377	61,16377919
312,3006708	62,28572482
500	58,17331656
402,5621516	60,361613
323,0559826	62,06819462
402,5621516	60,361613
323,0559826	62,06819462
323,0559826	62,06819462
500	58,17331656
412,7292046	60,1358789
337,6328087	61,75142081
500	58,16842043
411,1238032	60,16518524
337,1164078	61,75566903
172,62	65,276
145,967	65,844
600	55,691
660	54,093
700	52,959

El cálculo de la densidad de la temperatura se obtuvo con la ayuda de simulación, utilizando PROII. Se utilizó rango de temperatura desde [145,97°F – 700°F]. Se graficó y se obtuvo la siguiente ecuación con un $R^2 = 0,997$, lo cual garantiza una muy buena precisión en el dato.

$$\rho_{(T)} = -0,0229(T) + 69,487$$

Anexo R. Simulación de los E4203 A/B con flujo de slurry de 3690 BPD

Stream Name		BFW_IN_1	BFW_IN_4	BFW_OUT	S1LURRY UOPII	SLU10_ IN_4	SLU10_ OUT
Stream Description		AGUA PARA CALDERAS	AGUA PARA CALDERAS	AGUA PARA CALDERAS	SLURRY	SLURRY	SLURRY
Phase		Water	Water	Water	Liquid	Liquid	Liquid
Total Stream					3690		
Rate	LB-MOL/HR	1774.08	1774.08	1774.08	216.40	216.40	216.40
	LB/HR	31960	31960	31960	58546	58546	58546
Std. Liq. Rate	FT3/HR	512.68	512.68	512.68	863.42	863.42	863.42
Temperature	F	313.90	250.00	391.57	500.00	412.73	337.63
Pressure	PSIA	590.09	591.70	588.45	91.30	85.29	78.75
Molecular Weight		18.01	18.01	18.01	270.55	270.55	270.55
Enthalpy	MM BTU/HR	9.08	7.02	11.64	11.19	8.62	6.56
	BTU/LB	284.05	219.61	364.28	191.06	147.27	112.08
Mole Fraction Liquid		1	1	1	1	1	1
Reduced Temperature		0.66	0.61	0.73	0.58	0.53	0.48
Reduced Pressure		0.18	0.18	0.18	0.26	0.24	0.22
Acentric Factor		0.35	0.35	0.35	0.67	0.67	0.67
UOP K factor		8.76	8.76	8.76	9.87	9.87	9.87
Std. Liquid Density	LB/FT3	62.34	62.34	62.34	67.81	67.81	67.81
Sp. Gravity		1.00	1.00	1.00	1.09	1.09	1.09
API Gravity		10.06	10.06	10.06	-1.35	-1.35	-1.35
Vapor							
Rate	LB-MOL/HR	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	LB/HR	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Actual Rate	FT3/HR	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Vapor Std Vol Flow	FT3/HR	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Molecular Weight		n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Z (from K)		n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Enthalpy	BTU/LB	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
CP	BTU/LB-F	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Actual Density	LB/FT3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Th. Conductivity	BTU/HR-FT-F	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Viscosity	CP	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

Liquid							
Rate	LB-MOL/HR	1774.08	1774.08	1774.08	216.40	216.40	216.40
	LB/HR	31960	31960	31960	58546	58546	58546
Liquid Std Vol Flow	FT3/HR	512.68	512.68	512.68	863.42	863.42	863.42
Molecular Weight		18.01	18.01	18.01	270.55	270.55	270.55
Z (from K)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Enthalpy	BTU/LB	284.05	219.61	364.28	191.06	147.27	112.08
CP	BTU/LB-F	1.01	1.01	1.10	0.52	0.48	0.45
Actual Density	LB/FT3	56.85	58.82	53.99	58.17	60.14	61.75
Surface Tension	DYNE/CM	47.48	55.07	37.66	23.84	27.52	30.75
Th. Conductivity	BTU/HR-FT-F	0.40	0.40	0.39	0.05	0.05	0.05
Viscosity	CP	0.17	0.23	0.13	0.63	1.00	1.65

HxRig Name		E-4203_1	E-4203_4			E4203A-D
HxRig Description		enfriador	enfriador			GLOBAL
Duty	MM BTU/HR	2.56	2.06			4.62
Area	FT2	376.00	376.00			752.00
Area (Required)	FT2	376.00	376.07			752.07
U-Value (Clean)	BTU/HR-FT2-F	116.48	95.61			
U-Value (Required)	BTU/HR-FT2-F	74.50	65.39			
U-Value (Fouling)	BTU/HR-FT2-F	74.51	65.38			
LMTD	F	103.56	93.11			
FT Factor		0.88	0.90			0.89
Hx Rig Tube velocity	ft/sec	4.52	4.38			

Anexo S. Simulación de los E4203 A/B/C/D con flujo de slurry de 3690 BPD

Stream Name		BFW_I N_1_1	BFW_I N_2_1	BFW_I N_3_1	BFW_I N_4_1	BFW_O UT_1	S1LURR YUOPII	SLU10_I N_2_1	SLU10_I N_3_1	SLU10_I N_4_1	SLU10_ OUT_1
Stream Description		AGUA PARA CALDE RAS	AGUA PARA CALDE RAS	AGUA PARA CALDE RAS	AGUA PARA CALDE RAS	AGUA PARA CALDE RAS	SLURRY	SLURRY	SLURRY	SLURRY	SLURRY
Phase		Water	Water	Water	Water	Water	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid
Total Stream											
Rate	BPD						3690				
Rate	LB- MOL/H R	1774	1774	1774	1774	1774	216	216	216	216	216
	LB/HR	3196 0	3196 0	3196 0	3196 0	3196 0	58546	58546	58546	58546	58546
Std. Liq. Rate	FT3/HR	512.6 8	512.6 8	512.6 8	512.6 8	512.6 8	863.1 1	863.1 1	863.1 1	863.1 1	863.1 1
Temperature	F	368.4 9	320.9 7	281.5 3	250.0 0	421.9 1	500.0 0	437.0 3	382.6 0	335.7 0	296.6 0
Pressure	PSIA	586.8 6	588.5 0	590.1 0	591.7 0	585.1 7	91.30	85.47	79.35	72.85	65.95
Molecular Weight		18.01	18.01	18.01	18.01	18.01	270.2 9	270.2 9	270.2 9	270.2 9	270.2 9
Enthalpy	MM BTU/HR	10.85	9.31	8.04	7.02	12.73	11.18	9.31	7.77	6.51	5.49
	BTU/LB	339.4 7	291.1 8	251.4 1	219.6 1	398.2 8	190.9 5	159.0 4	132.8 0	111.1 4	93.77
Mole Fraction Liquid		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Reduced Temperature		0.71	0.67	0.64	0.61	0.76	0.58	0.54	0.51	0.48	0.46
Reduced Pressure		0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.26	0.24	0.23	0.21	0.19
Acentric Factor		0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
UOP K factor		8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	9.86	9.86	9.86	9.86	9.86
Std. Liquid Density	LB/FT3	62.34	62.34	62.34	62.34	62.34	67.83	67.83	67.83	67.83	67.83
Sp. Gravity		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
API Gravity		10.06	10.06	10.06	10.06	10.06	-1.40	-1.40	-1.40	-1.40	-1.40
							3757. 43	3757. 43	3757. 43	3757. 43	3757. 43

Vapor											
Rate	LB-MOL/HR	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	LB/HR	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Actual Rate	FT3/HR	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Vapor Std Vol Flow	FT3/HR	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Molecular Weight		n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Z (from K)		n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Enthalpy	BTU/LB	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
CP	BTU/LB-F	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Actual Density	LB/FT3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Th. Conductivity	BTU/HR-FT-F	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Viscosity	CP	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Liquid											
Rate	LB-MOL/HR	1774.08	1774.08	1774.08	1774.08	1774.08	216.61	216.61	216.61	216.61	216.61
	LB/HR	3196.00	3196.00	3196.00	3196.00	3196.00	58546.00	58546.00	58546.00	58546.00	58546.00
Liquid Std Vol Flow	FT3/HR	512.68	512.68	512.68	512.68	512.68	863.11	863.11	863.11	863.11	863.11
Molecular Weight		18.01	18.01	18.01	18.01	18.01	270.29	270.29	270.29	270.29	270.29
Z (from K)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Enthalpy	BTU/LB	339.47	291.18	251.41	219.61	398.28	190.95	159.04	132.80	111.14	93.77
CP	BTU/LB-F	1.05	1.01	1.01	1.01	1.16	0.52	0.49	0.47	0.45	0.44
Actual Density	LB/FT3	54.90	56.61	57.89	58.82	52.73	58.19	59.62	60.81	61.81	62.64
Surface Tension	DYNE/CM	40.62	46.60	51.39	55.07	33.73	23.85	26.50	28.82	30.85	32.56
Th. Conductivity	BTU/HR-FT-F	0.39	0.40	0.40	0.40	0.38	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Viscosity	CP	0.14	0.17	0.20	0.23	0.12	0.63	0.87	1.20	1.67	2.33

HxRig Name		E-4203_1_1	E-4203_2_1	E-4203_3_1	E-4203_4_1		E4203A-D
HxRig Description		enfriador	enfriador	enfriador	enfriador		GLOBAL
Duty	MM BTU/HR	1.85	1.53	1.27	1.02		5.68
Area	FT2	376.00	376.00	376.00	376.00		1504.00
Area (Required)	FT2	375.94	376.01	375.92	375.91		1503.79
U-Value (Clean)	BTU/HR -FT2-F	122.59	108.03	94.78	82.50		
U-Value (Required)	BTU/HR -FT2-F	76.95	70.96	64.98	58.96		
U-Value (Fouling)	BTU/HR -FT2-F	76.96	70.96	64.99	58.97		
LMTD	F	72.24	64.70	57.97	50.64		
FT Factor		0.89	0.89	0.90	0.91		0.90
Hx Rig Tube velocity	ft/sec	4.54	4.44	4.36	4.29		4.41