

**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA DETERMINACIÓN DE OPCIONES DE MEJORA
DEL DESEMPEÑO OPERACIONAL DEL SISTEMA DE FONDOS DE LA
FRACCIONADORA PRINCIPAL DE LA PLANTA FCC UOP II DE LA REFINERÍA
DE BARRANCABERMEJA DE ECOPETROL S.A.**

LUIS FERNANDO CARVAJAL GUALDRÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2015

**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA DETERMINACIÓN DE OPCIONES DE MEJORA
DEL DESEMPEÑO OPERACIONAL DEL SISTEMA DE FONDOS DE LA
FRACCIONADORA PRINCIPAL DE LA PLANTA FCC UOP II DE LA REFINERÍA
DE BARRANCABERMEJA DE ECOPETROL S.A.**

LUIS FERNANDO CARVAJAL GUALDRÓN

**Trabajo de grado en modalidad práctica empresarial, para optar el título de
Ingeniero Químico**

Director

MARIA PAOLA MARADEI GARCIA

Ingeniera Química, Ph.D

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2015

Dedicatoria

A Dios,

*Por brindarme la oportunidad de cumplir mis sueños
y guiarme por el camino del éxito y del bien.*

A mis padres,

*Luis Carlos y Gloria Esperanza, por ser mi motivación.
Este triunfo se lo debo a sus constantes esfuerzos,
a su confianza y su amor.*

A mis hermanos,

*Yoyí, Calo y Tico, por su apoyo incondicional.
Por el ejemplo de perseverancia
y superación.*

A mis amigos,

*Porque siempre estuvieron ahí
y creyeron en mí.*

AGRADECIMIENTOS

A **ECOPETROL S.A.**, por brindarme la oportunidad de crecer como persona y profesional.

A la **Coordinación de Ingeniería de Proceso** de la Gerencia Técnica de la GRB, por acogerme como uno más de su equipo.

A la profesora **Maria Paola Maradei García**, por sus valiosas observaciones y paciencia en el desarrollo del proyecto.

A la **Universidad Industrial de Santander**, por permitir forjar mi futuro y hacer de la universidad una de las mejores etapas de mi vida.

A mis profesores de la **Escuela de Ingeniería Química**, por su dedicación y conocimientos impartidos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	21
1 METODOLOGÍA	27
1.1 Estudio del proceso de la unidad de craqueo catalítico UOP II	27
1.2 Recopilación de información técnica y datos históricos de UOP II	27
1.3 Benchmarking.....	28
1.4 Identificación del problema cuello de botella en el sistema de fondos.....	28
1.5 Identificación de focos que afectan el desempeño del sistema de fondos	28
1.6 Recopilación de información técnica y estudio del proceso de las unidades FCC cracking UOP I, Orthoflow y Modelo IV	29
1.7 Análisis de variables claves que afectan el desempeño del sistema de fondos 29	
1.8 Brainstorming de soluciones.....	29
1.9 Recopilación de recomendaciones	30
2 PRESENTACIÓN DE ACTIVIDADES REALIZADAS.....	31

2.1	Identificación de focos que afectan el desempeño del sistema de fondos	31
2.2	Análisis de variables clave que afectan el desempeño del sistema de fondos 33	
2.2.1	Análisis fisicoquímico de la carga a la unidad	33
2.2.2	Análisis fisicoquímico del slurry de la unidad.....	37
2.2.3	Análisis operacional.....	46
2.2.4	Diseño de la unidad.....	51
2.3	Recopilación de recomendaciones	55
3	CONCLUSIONES	58
4	RECOMENDACIONES	59
	CITAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	BIBLIOGRAFÍA	65
	ANEXOS.....	68

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema unidad 4200 (UOP II)	23
Figura 2. Sección de fraccionamiento: Torre fraccionadora principal T-4201	24
Figura 3. Esquema de la metodología desarrollada.....	27
Figura 4. Focos que afectan el desempeño del sistema de fondos	31
Figura 5. Gravedad API vs tiempo de la carga combinada (Unidad UOP II).....	34
Figura 6. Concentración de Carbón vs °API de la carga combinada (unidad UOP II)	35
Figura 7. Composición másica de la carga combinada, SARA vs tiempo (unidad UOP II).....	36
Figura 8. Composición másica de la carga combinada, SARA promedio unidades FCC	37
Figura 9. Gravedad API vs tiempo del slurry (unidad UOP II).....	38
Figura 10. Composición másica del slurry, SARA vs tiempo (unidad UOP II).....	39
Figura 11. Composición másica del slurry, SARA promedio unidades FCC	40
Figura 12. CII del slurry vs tiempo (unidad UOP II).....	42
Figura 13. CII del slurry vs gravedad API (unidad UOP II).....	43

Figura 14. Coque en filtros de las P-4203 A/B - ID 200976969 (unidad UOP II)...	44
Figura 15. Contenido de cenizas del slurry vs tiempo (unidad UOP II)	45
Figura 16. Temperatura en el fondo de la T-4201 vs tiempo (unidad UOP II).....	47
Figura 17. Relación de slurry quench/carga en el fondo de la T-4201 vs tiempo (unidad UOP II)	47
Figura 18. Velocidad del slurry por tubos del E-4203 A-D vs tiempo (unidad UOP II)	48
Figura 19. Velocidad del slurry por tubos del E-4204 A/B vs tiempo (unidad UOP II)	49
Figura 20. Velocidad del slurry por tubos del E-4205 A vs tiempo (unidad UOP II)	49
Figura 21. Velocidad del slurry por tubos del E-4205 B vs tiempo (unidad UOP II)	49
Figura 22. Conversión vs tiempo (unidad UOP II)	50
Figura 23. CII del slurry vs conversión (unidad UOP II)	51
Figura 24. Sistema de fondos de la unidad UOP II	52
Figura 25. Nivel en el fondo de la T-4201 vs tiempo (unidad UOP II)	54
Figura 26. Tiempo de residencia vs nivel de fondo de la torre de las unidades UOP I, UOP II y Modelo IV	55

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Recomendaciones para mitigar el ensuciamiento del sistema de fondos de la unidad UOP II.....	56
--	----

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Diagrama general de las líneas de producción de la Refinería General Gerencia Barrancabermeja (GRB).....	68
Anexo B. Principales licenciadores de unidades FCC en el mundo.....	69
Anexo C. Capacidad de carga total de diseño de las plantas URC de la GRB.....	70
Anexo D. Sección catalítica - reactor (R-4201) y regenerador (R-4202).....	71
Anexo E. Fragmentos de coque en los filtros de las bombas P-4203 A/B de la de la unidad UOP II (U-4200)	72
Anexo F. Carga a la unidad UOP II (U-4200).....	73
Anexo G. Diagrama de árbol de posibles causas que pueden afectar el desempeño operacional del sistema de fondos.....	74
Anexo H. Gravedad API vs tiempo de la carga combinada a las unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV.....	77
Anexo I. Carbón ConRadson vs °API de la carga combinada a las unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV.....	78
Anexo J. Composición másica de la carga combinada, SARA vs tiempo (unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV).....	79
Anexo K. Gravedad API vs tiempo del slurry de las unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV.....	80

Anexo L. Concentración másica del corte ALC y APC de la unidad UOP II	81
Anexo M. Composición másica del slurry, SARA vs tiempo (unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV)	82
Anexo N. CII vs tiempo del slurry de las unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV	83
Anexo O. Resultados fragmentos coque análisis muestra coque UOP II (ID 200976969).....	84
Anexo P. Resultados análisis TGA del slurry unidad UOP II (ID 101224082).....	85
Anexo Q. Contenido de cenizas vs tiempo del slurry de las unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV.....	86
Anexo R. Temperatura del fondo de la torre fraccionadora principal vs tiempo de las unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV	87
Anexo S. Configuración del sistema de fondos de las unidades FCC UOP II, UOP I, Orthoflow y Modelo IV.....	88

GLOSARIO

Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC): es un proceso que convierte las fracciones del crudo pesado en fracciones ligeras, más valiosas a alta temperatura 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.

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

Benchmarking: es un proceso sistemático y continuo mediante el cual se recopila información y por medio de la comparación, se evalúan los productos, servicios y procesos de trabajo de las organizaciones que son reconocidas como representantes de las mejores prácticas, con el propósito de realizar mejoras.

Brainstorming: es una herramienta de trabajo grupal que facilita el surgimiento de nuevas ideas sobre un problema determinado.

Guía de control (GC): 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).

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).

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.

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.

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.

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.

Datasheet: 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.

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.

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 maltenos; estos últimos que a su vez, pueden separarse en saturados, aromáticos y resinas sobre una columna empacada con adsorbentes de sílice/alúmina/arcilla.

Saturados: son moléculas no polares de color claro, constituidos por hidrocarburos alifáticos lineales o con cadenas alifáticas y aromáticas, de peso molecular comprendido entre 300 y 2000 Da.

Aromáticos: son hidrocarburos no polares cíclicos de color marrón anaranjado que contienen un doble enlace resonante que los hace muy estables en el hidrocarburo. Tienen alta capacidad de disolver hidrocarburos de alto peso molecular.

Resinas: son moléculas muy polares con alto carácter aromático de color negro brillante que contienen una elevada proporción de hidrógeno y carbono y pequeñas cantidades de oxígeno, azufre y nitrógeno. Se encargan de mantener los asfaltenos separados manteniendo la estabilidad en el aceite. Sus pesos moleculares están comprendidos entre 500 y 50000.

Asfaltenos: son sólidos amorfos de alto peso molecular, de color marrón oscuro o negro, insolubles en n-heptano y solubles en tolueno. Son hidrocarburos aromáticos policíclicos condensados con elevada polaridad, inestabilizados fácilmente bajo condiciones especiales de presión y temperatura, lo que favorece la formación de coque.

Índice de Inestabilidad Coloidal (CII): permite comprender la interacción entre los componentes SARA y la formación de coque por inestabilidad de un hidrocarburo. Se define como:

$$CII = \frac{\text{Saturados, \%p} + \text{Asfaltenos, \%p}}{\text{Aromáticos, \%p} + \text{Resinas, \%p}}$$

Un aumento en la concentración de los componentes saturados y una disminución en la concentración de los componentes aromáticos y de las resinas, aumenta la inestabilidad de los asfaltenos en la solución, siendo estos últimos los que mantienen los asfaltenos en solución.

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 del cracking de las fracciones pesadas de hidrocarburos y su formulación depende del objetivo de producción (mayor rendimiento a productos livianos o productos pesados).

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO TÉCNICO PARA LA DETERMINACIÓN DE OPCIONES DE MEJORA DEL DESEMPEÑO OPERACIONAL DEL SISTEMA DE FONDOS DE LA FRACCIONADORA PRINCIPAL DE LA PLANTA FCC UOP II DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA DE ECOPETROL S.A.*

AUTOR: LUIS FERNANDO CARVAJAL GUALDRÓN**

PALABRAS CLAVE: Sistema de fondos, slurry, proceso FCC, ensuciamiento, precipitación de asfaltenos, arrastre de catalizador.

DESCRIPCIÓN:

La Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC), UOP II, de la Gerencia General Refinería de Barrancabermeja (GRB), presenta constantes eventos de ensuciamiento y obstrucción en el sistema de fondos por formación de coque orgánico e inorgánico. Dichos problemas incurren en paradas de planta no programadas, disminución de carga a la unidad y aumento en el gasto operacional y de mantenimiento de los equipos. Todas estas razones llevaron a la realización de un análisis del desempeño operacional del sistema.

En este documento se presentan los resultados de un estudio técnico que 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 y creación de medios para su desarrollo e implementación en la refinería.

El estudio se dividió en 3 focos fundamentales: análisis de la composición química de la carga y el slurry, análisis de las variables operacionales y evaluación del diseño del sistema de fondos de la unidad; permitiendo identificar puntos de no conformidad según Guías de Control, Ventanas Operativas y parámetros de calidad de las variables más influyentes en el desempeño del sistema. Así mismo, se realizó una comparación de la unidad UOP II, con las otras unidades FCC de la GRB como UOP I, Orthoflow y Modelo IV. Esta comparación permitió concluir que las unidades de diseño UOP, son más susceptibles a problemas de ensuciamiento.

El análisis finaliza con una recopilación de recomendaciones y opciones de mejora del sistema de fondos que pueden mitigar el impacto del ensuciamiento y de esta forma, maximizar su desempeño operacional.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Maria Paola Maradei García, Ingeniera Química, Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL STUDY TO DETERMINE IMPROVEMENT OPTIONS FOR THE OPERATIONAL PERFORMANCE OF THE BOTTOMS SYSTEM IN THE MAIN COLUMN OF THE FCC UOP II UNIT OF ECOPETROL S.A. REFINERY IN BARRANCABERMEJA.*

AUTHOR: LUIS FERNANDO CARVAJAL GUALDRÓN**

KEYWORDS: Bottoms system, slurry, FCC process, fouling, asphaltenes precipitation, catalyst entrainment.

DESCRIPTION:

Fluid Catalytic Cracking (FCC) Unit, UOP II, in Barrancabermeja Refinery (GRB) presents commonly fouling events and obstruction in the bottoms system due to formation of organic and inorganic cokes. Those problems cause nonscheduled stop of the unit, the reduction of its feed and the increments in operational costs and equipment maintenances. All those reasons led to the realization of an analysis study of the system operational performance.

This document present the results of a technical study that allowed to identify possible causes of the fouling in the bottoms system. Taken into account those causes, this study also propose different suggestions oriented to the problem solutions and the creation of ways in the refinery management to their development and implementation.

The study is divided in 3 fundamental areas: analysis of the chemical composition of the feed and the slurry, analysis of the operational variables and evaluation of the bottoms system's design in the unit. The study allows to identify nonconformity points according to Control Guides, Operating Windows and quality parameters of the most influence variables on the system performance. In addition, the study includes a comparison of UOP II unit with other FCC units of GRB as UOP I, Orthoflow and Modelo IV. This comparison allowed to conclude that UOP designed units are more susceptible to fouling problems.

The analysis exposes a compilation of recommendations and options to improvements the bottoms system, mitigating the impact of fouling and leading to maximize its operational performance.

* Degree work

** Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director: Maria Paola Maradei García, Chemical Engineer, Ph.D.

INTRODUCCIÓN

La Gerencia General Refinería de Barrancabermeja (GRB) de ECOPETROL S.A., establecido como el complejo industrial más grande de Colombia con una capacidad instalada de 250.000 barriles por día (BPD), refina 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, entre otros. Actualmente es una de las cuatro principales petroleras más grandes de Latinoamérica y pertenece al grupo de las 39 más importantes en el mundo [1].

Muchos son los procesos que se llevan a cabo en el complejo industrial, el cual cuenta con una serie de unidades encargadas desde recibimiento del crudo virgen hasta su refinación para la obtención de productos con valor agregado. El proceso inicia en el Departamento de Materias Primas donde se almacena y realiza un *blending* de crudos. Posteriormente es cargado al Departamento de Refinación de Crudos, sometiéndolo a destilación atmosférica y al vacío por medio de las *topping*. De allí se obtiene entre otros productos valiosos, gasóleo (que va directamente a las Unidades de Craqueo Catalítico, URC's) y fondos de vacío que van al Departamento de Refinación de Fondos, en donde se produce Aceite Demetalizado (DMO) y Aceite Demetalizado Hidrogenado (DMOH). El gasóleo, el DMO y el DMOH se cargan a las unidades URC UOP I (U-2700), UOP II (U-4200) y Orthoflow (U-500), de los Departamentos de Cracking I, II y III respectivamente y gasóleo se carga a la unidad URC Modelo IV (U-300) del Departamento de Cracking III (**Anexo A**) [2].

Las Unidades de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC), son las encargadas de procesar cargas pesadas para obtener naftas y gases livianos (Gasolina), además de ser la fuente principal de carga de olefinas livianas a la unidad de alquilación, las unidades petroquímicas y como fuente de GLP para el uso doméstico [3], [4], [5].

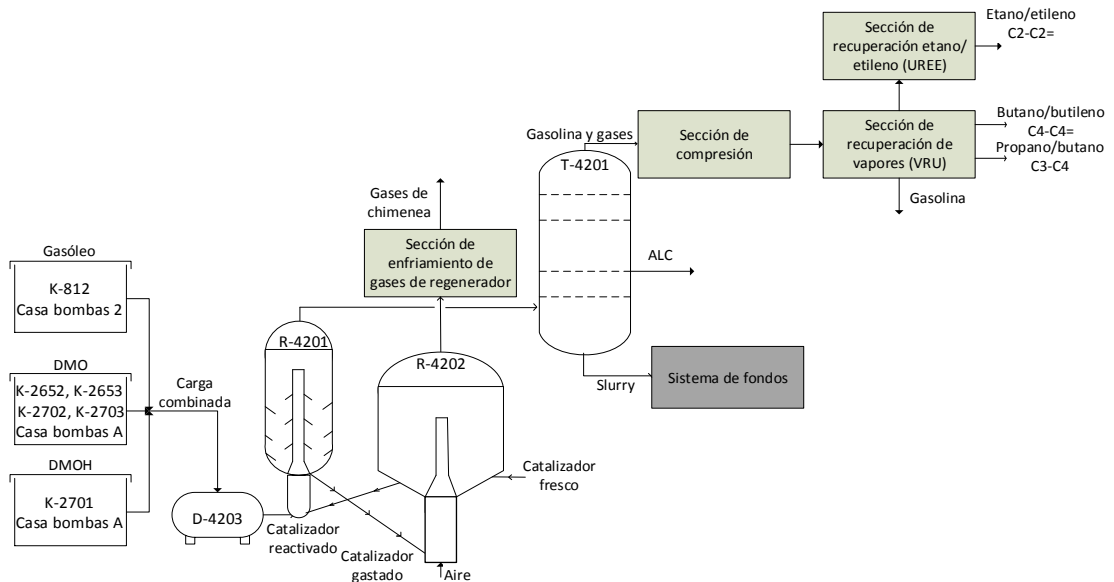
El Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC, por sus siglas en inglés), es un proceso de ruptura catalítica (Catalytic Cracking) que convierte fracciones de hidrocarburos pesados en productos más livianos y de mayor valor. Se emplea un catalizador en forma de partículas esféricas a base de sílice/alúmina (zeolita). 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. Aunque la eficiencia del proceso es alta, existen reacciones parásitas productoras de coque; éste se deposita mayoritariamente en la superficie del catalizador afectando su actividad. Por lo tanto, el proceso FCC contempla el transporte continuo y cíclico del catalizador entre el reactor y una zona de regeneración. Esta última trabaja en condiciones de combustión permitiendo por un lado, el aporte de energía térmica al proceso y por otro lado, la reactivación del catalizador por eliminación del coque formado [6], [7].

Existen diversas empresas que comercializan licencias para uso autorizado de unidades FCC en el mundo (**Anexo B**), 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 materias primas, gasóleo, DMO y DMOH; 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. Tiene una capacidad de

carga total de diseño de 35.000 BPD siendo la planta FCC con mayor capacidad de carga de la GRB (**Anexo C**) [2].

El proceso comienza con la homogenización del gasóleo, DMO y DMOH en el tambor de carga D-4203 y precaliente a 450 °F con dos intercambiadores de calor (E-4204 A/B). Posteriormente la carga combinada pasa al elevador del reactor de craqueo catalítico (R-4201), donde es atomizada por medio de cuatro boquillas permitiendo un buen contacto carga-catalizador caliente reactivado, proveniente del regenerador de catalizador (R-4202) (Ver **Figura 1**).

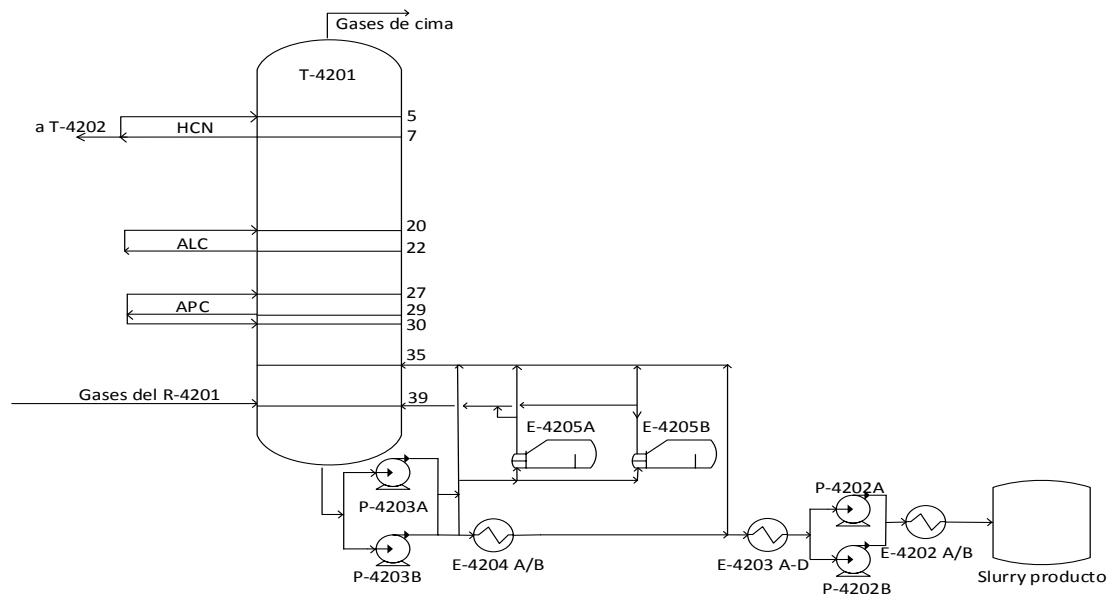
Figura 1. Esquema unidad 4200 (UOP II)



La carga se vaporiza a una temperatura entre 900-1000 °F y sube por el elevador del reactor donde se encuentran cinco ciclones (X-4206) que separan el catalizador de los gases de reacción. Los gases de reacción fluyen hacia la cámara plena y de allí, hacia el fondo de la fraccionadora principal (T-4201) a través de la línea de

transferencia. El catalizador gastado es transportado hacia el regenerador, donde es reactivado al quemar el coque depositado en su superficie mediante una reacción con oxígeno del aire. Los gases de combustión (CO, CO₂, NO_x, H₂S) son llevados a la sección de enfriamiento de gases, mientras que el catalizador, que logra una temperatura de 1300°F debido al calor de combustión en el regenerador (R-4202), es transferido a la zona de inyección en el reactor para entrar en contacto con nueva carga combinada. (**Anexo D**).

Figura 2. Sección de fraccionamiento: Torre fraccionadora principal T-4201



Posteriormente, la carga vaporizada llega a la torre fraccionadora principal (T-4201), donde los gases son enfriados hasta una temperatura aproximada de 690 °F por medio de un reciclo de slurry fresco (quench) en el fondo de la torre. A medida que ocurre la separación en la torre, se obtiene Aceite Pesado de Ciclo (APC) del plato No. 29 (que se recicla por el plato No. 27 para mantener el perfil de temperatura de la torre), ALC del plato No. 22 (que se recicla a la torre por el plato No. 20), Nafta

Pesada (HCN) del plato No. 7 (que se recicla por el plato No. 5 para mantener la temperatura en la cima de la torre) y gases de cima que se dirigen a la sección de compresión para posteriormente obtener gasolina, etano/etileno, butano/butileno, propano/butano, entre otros (**Figura 2**).

La corriente tipo slurry sale por el fondo de la fraccionadora principal como residuo de la operación y es impulsada por bombeo (P-4203 A/B) a un sistema de fondos para aprovechar su alta temperatura y por un lado, producir vapor de 400 psig con dos generadores de vapor (E-4205 A/B) y por otro lado, el precalentamiento de la carga que va al reactor usando dos intercambiadores de calor de tubos y carcasa (E-4204 A/B).

Finalmente, la corriente slurry se divide en dos más, una primera que es recirculada al fondo de la torre T-4201, con el fin de mantener la temperatura menor de 680 °F y una segunda que es usada en cuatro intercambiadores de calor de tubos y carcasa en serie (E-4203 A-D) y dos intercambiadores de calor aletados (E-4202 A/B), antes de ser enviado por medio de dos bombas (P-4202 A/B) a la zona de almacenamiento (**Figura 2**).

Debido a que el slurry es un fluido con partículas sólidas en suspensión, compuesto por moléculas grandes como asfaltenos y partículas de catalizador que provienen desde la zona de reacción, es muy probable que a diversas condiciones de operación, y debido al diseño de la unidad, se presenten obstrucciones frecuentes por formación de coque duro (fragmentos sólidos) y blando (recubrimientos en las superficies de las tuberías) en el sistema de fondos [8], afectando los filtros de las bombas y los intercambiadores de calor (**Anexo E**).

Dicho problema recurrente genera problemas de gran magnitud en la unidad y por consiguiente a la GRB, tales como:

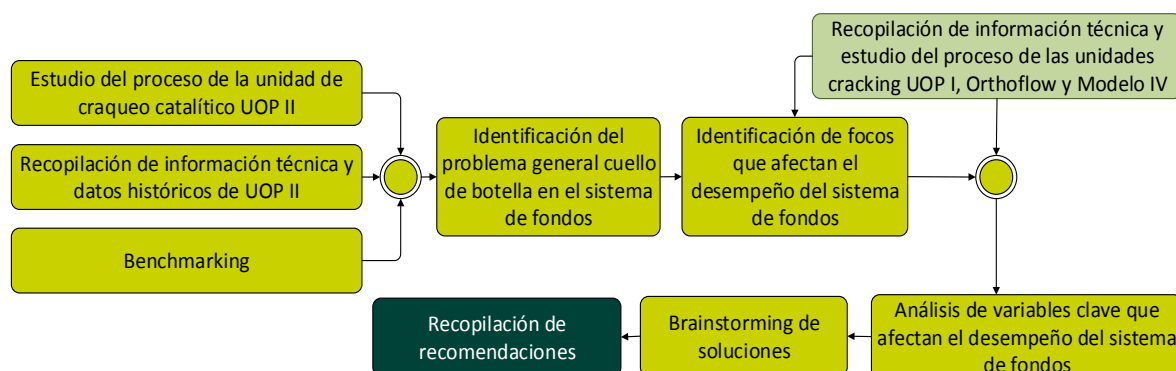
- Disminución en el flujo volumétrico de carga a la unidad de 8 KBPD respecto a la de diseño; incumpliendo en el programa de cargas (**Anexo F**).
- Aumento en el gasto operacional y de mantenimiento por limpieza mecánica de los intercambiadores de calor y filtros de las bombas cerca de 0,5 MUS/Año; afectando el margen de refinación.
- Ciclo de corrida de 2 años generando paradas de planta no programadas y fallas recurrentes en los sistemas de bombeo con una tasa media entre falla (TMEF) de 6 meses; disminuyendo la confiabilidad del sistema.

Por lo tanto, el presente documento expone un estudio técnico realizado para identificar las posibles causas del problema en la unidad en el marco de una práctica industrial y con base en ello, generar diferentes tipos de recomendaciones de solución, que logren crear medios para su desarrollo e implementación, generando un impacto positivo en la GRB.

1 METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto se presenta en la **Figura 3**.

Figura 3. Esquema de la metodología desarrollada



1.1 Estudio del proceso de la unidad de craqueo catalítico UOP II

Se realizó un estudio del proceso de la unidad UOP II, identificando los equipos, las operaciones unitarias y las variables críticas del proceso especialmente de la sección catalítica y de fraccionamiento. Se estudiaron diferentes tipos de conceptos básicos sobre unidades FCC, así como las características fundamentales del sistema de fondos para el manejo de corrientes tipo slurry.

1.2 Recopilación de información técnica y datos históricos de UOP II

Se recopilaron los análisis fisicoquímicos, *Database*, realizados por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) de la carga y productos de la unidad. Además, se

recopilaron los libros de diseño UOP, el manual del proceso de la unidad, Guías de Control (GC) y Ventanas Operativas (VO) de las variables críticas de la unidad, diagramas P&ID, diagramas isométricos de tuberías, diagramas PFD, reportes de supervisores de patio y las tendencias de variables operativas a través del sistema PI (Plant Information) y el portal corporativo IRIS.

1.3 Benchmarking

Se realizó una investigación sobre la situación del sistema de fondos de las unidades FCC de otras refinerías en el mundo. Se revisaron los reportes del National Petrochemical and Refiners Association (NPRA) y recomendaciones del ingeniero Pedro Nel Pérez; experto en unidades FCC.

1.4 Identificación del problema cuello de botella en el sistema de fondos

A partir del estudio realizado y de talleres de trabajo con los ingenieros de proceso y operarios de la unidad UOP II, se logró identificar un constante ensuciamiento del sistema de fondos por formación de coque, basado en los impactos generados en el margen de refinación y operación de la unidad.

1.5 Identificación de focos que afectan el desempeño del sistema de fondos

Se dividió el problema en 3 focos generales a partir de los posibles factores que generan el ensuciamiento en el sistema de fondos: la calidad de la carga y el slurry, el desempeño operacional y el diseño de la unidad.

1.6 Recopilación de información técnica y estudio del proceso de las unidades FCC cracking UOP I, Orthoflow y Modelo IV

Esta etapa se realizó como proceso fundamental, debido a que la GRB cuenta con otras tres unidades FCC (UOP I, Orthoflow y Modelo IV) que presentan problemas por obstrucción en el sistema de fondos en menor proporción que la unidad UOP II. Se analizó la composición química de las cargas y el slurry, la operación y el diseño de cada sistema de fondos. Este paso permitió identificar las variables más influyentes que propician o mitigan el ensuciamiento.

1.7 Análisis de variables claves que afectan el desempeño del sistema de fondos

A partir de las variables claves seleccionadas, se realizó una serie de tendencias comprendidas entre el año 2006 y 2014 para comparar el comportamiento real de la variable y su comportamiento recomendado según la literatura y la heurística. Este procedimiento requirió la revisión y actualización de los planos PI&D, PFD e isométricos, así como los 'datasheets' de los intercambiadores de calor del sistema de fondos a través de simulaciones en PRO II, con el fin de trabajar con datos reales y actualizados. Se realizaron análisis de los residuos de coque en el ICP y análisis del slurry en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander.

1.8 Brainstorming de soluciones

Se realizaron reuniones en cooperación con ingenieros del ICP y GRB para generar un brainstorming de proyectos para la solución de la problemática del sistema de fondos. Este paso permitió generar una propuesta ICP-GRB para analizar la calidad de las cargas del Departamento de Craqueo Catalítico, llamada: "Estudio calidad de

carga, unidad de balance e impacto Unibón-GRB”. Así mismo, se realizó una solicitud de revisión del diseño del sistema de fondos de la unidad UOP II mediante un contrato con licenciador UOP.

1.9 Recopilación de recomendaciones

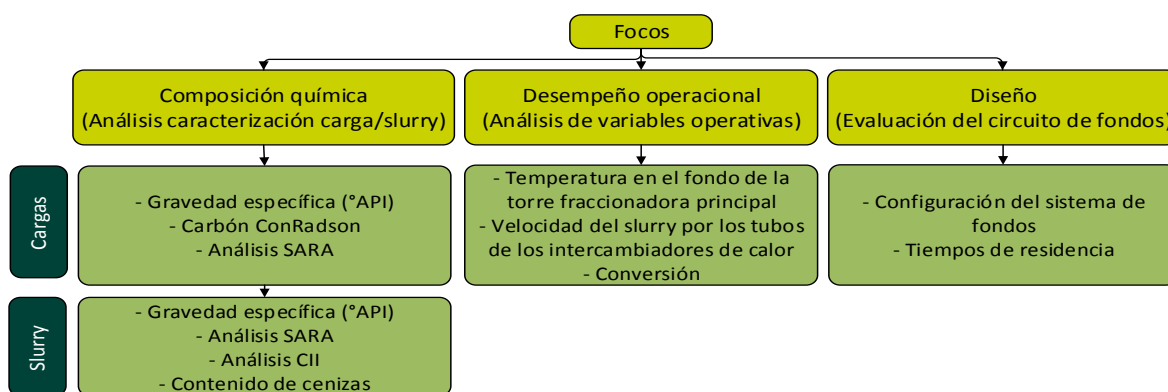
Realizado el análisis de las etapas previas, se generó una serie de actividades a implementar con visión de corto, mediano y largo plazo por la Coordinación de Ingeniería de Proceso de la Gerencia Técnica de la GRB.

2 PRESENTACIÓN DE ACTIVIDADES REALIZADAS

2.1 Identificación de focos que afectan el desempeño del sistema de fondos

El estudio realizado de la unidad y la identificación del problema en el sistema de fondos por formación de coque, permitió dividir la problemática en 3 ejes fundamentales mostrados en la **Figura 4**.

Figura 4. Focos que afectan el desempeño del sistema de fondos



Dichos focos se establecieron a partir de los factores más influyentes que pueden generar ensuciamiento en el sistema de fondos, los cuales son:

- 1) Precipitación de asfaltenos del slurry.** Esto evidencia un ensuciamiento de tipo orgánico.
- 2) Arrastre de catalizador desde el reactor hasta la fraccionadora principal.** Esto evidencia un ensuciamiento de tipo inorgánico

Los factores 1) y 2), crean la necesidad de analizar la *composición química de la carga y el slurry*, estableciéndolo como el primer foco de estudio para abordar el problema. Los parámetros fisicoquímicos analizados para la carga fueron: gravedad específica (°API), carbón ConRadson y análisis SARA; y para el slurry fueron: gravedad específica (°API), análisis SARA, análisis CII y contenido de cenizas.

3) Alta temperatura en el fondo de la torre fraccionadora principal. Esta condición favorece la precipitación de los asfaltenos del slurry, aumentando la probabilidad de ensuciamiento de tipo orgánico. Además, altas temperaturas favorecen las reacciones de polimerización, generando fragmentos de coque cada vez más grandes que obstruyen los filtros de las bombas.

4) Baja velocidad del slurry por los tubos de los intercambiadores de calor. Este factor genera ensuciamiento en la superficie de las tuberías del sistema de fondos, por sedimentación de partículas en suspensión.

A partir de los factores 3) y 4), se generó la necesidad de estudiar el *Desempeño operacional* del sistema de fondos, estableciéndolo como el segundo foco del estudio.

5) Alto tiempo de residencia del slurry en el sistema de fondos. Esto genera la precipitación de los asfaltenos del slurry al estar sometido durante un tiempo prolongado a altas temperaturas.

El factor 5) y configuraciones complejas del sistema de fondos, aumentan la probabilidad de ensuciamiento; situación que estableció como tercer foco de estudio el *Diseño de la unidad*.

Adicionalmente, se realizó un diagrama de árbol, que relaciona las distintas situaciones que pueden afectar el desempeño operacional del sistema de fondos de las unidades FCC (**Anexo G**).

2.2 Análisis de variables clave que afectan el desempeño del sistema de fondos

Se analizaron las variables claves que pueden mitigar o maximizar el ensuciamiento del sistema de fondos y de esta forma encontrar puntos de no conformidad según Guías de Control, Ventanas Operativas y parámetros recomendados en la literatura para las unidades FCC.

2.2.1 Análisis fisicoquímico de la carga a la unidad. Variaciones en las propiedades fisicoquímicas de la carga, pueden aumentar la probabilidad de ensuciamiento en el sistema de fondos [5], [9].

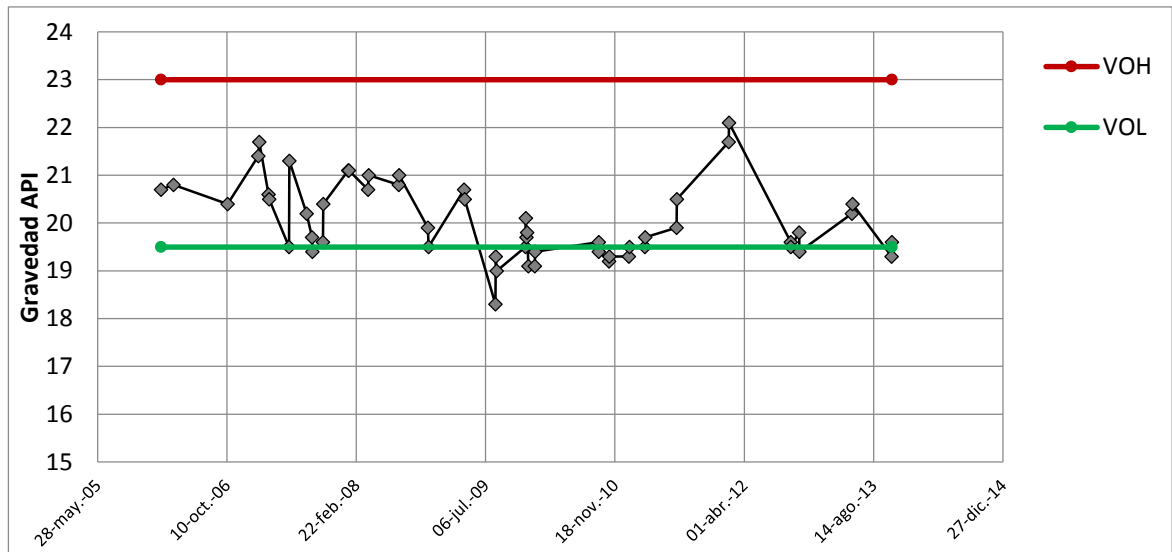
Gravedad específica (°API).

El comportamiento de la gravedad API de la carga en la unidad UOP II evidencia puntos de no conformidad debido a que se debe mantener entre 19,5 y 23 grados [10] inclinándose hacia la ventana operativa baja (VOL); es decir, presenta una leve tendencia a procesamiento de cargas más pesadas (Ver **Figura 5**).

El procesamiento de cargas más pesadas en la unidad UOP II, genera una disminución en su craqueabilidad a la misma temperatura en el reactor, una menor conversión a gasolina y un aumento en el rendimiento hacia slurry.

El slurry obtenido, presentará una alta concentración de componentes como asfaltenos y saturados [6], [11]; situación indeseable porque aumenta la probabilidad de ensuciamiento de tipo orgánico, ya que los asfaltenos se pueden precipitar más fácilmente.

Figura 5. Gravedad API vs tiempo de la carga combinada (Unidad UOP II).



Las unidades FCC UOP I, Orthoflow y Modelo IV, también presentan tendencia hacia el procesamiento de cargas más pesadas (**Anexo H**). Aunque la carga de la unidad Modelo IV cuenta con ventanas operativas de 21-24 °API (carga más liviana) debido a que su carga es únicamente gasóleo, se evidencia que los grados API también han disminuido en los últimos años.

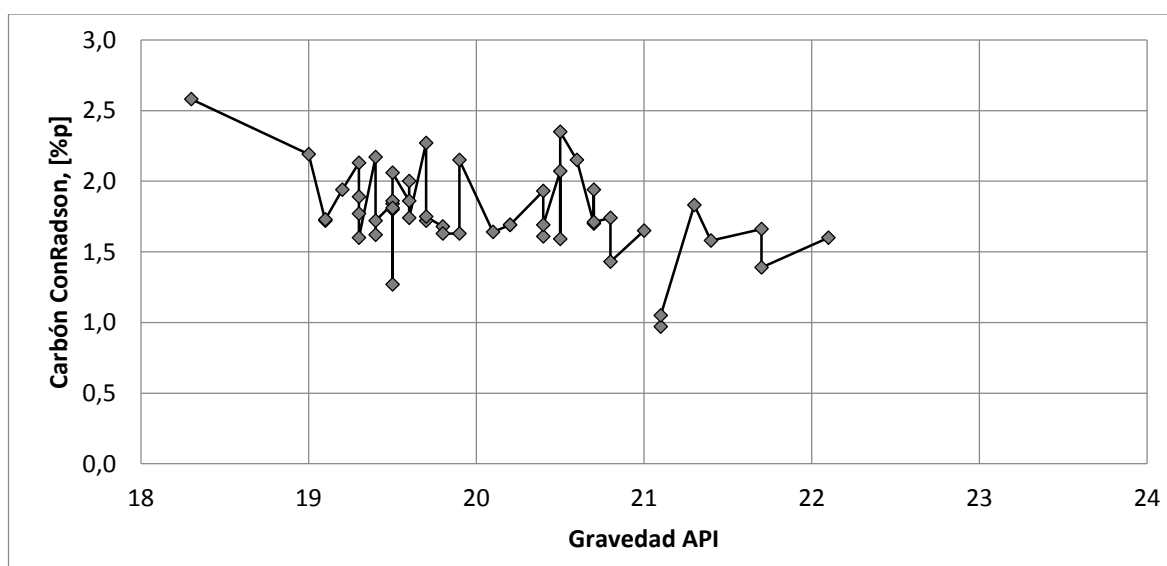
Contenido de carbón.

El carbón en la alimentación es una medida indirecta de producción de coque, ya que generalmente da como resultado el aumento en la temperatura del regenerador por acumulación de coque en la superficie del catalizador [6]. Esto a su vez aumenta la temperatura en la zona de reacción y por consiguiente la conversión, sin embargo, a pesar de aumentar la conversión, genera alta temperatura de los gases de reacción en el fondo de la fraccionadora principal [2], inestabilizando los asfaltenos

del slurry por efecto térmico. Esto propicia ensuciamiento y obstrucción de tipo orgánico.

Según la **Figura 6**, la cantidad de carbón en la carga a la unidad UOP II, aumenta al disminuir la gravedad API.

Figura 6. Concentración de Carbón vs °API de la carga combinada (unidad UOP II)



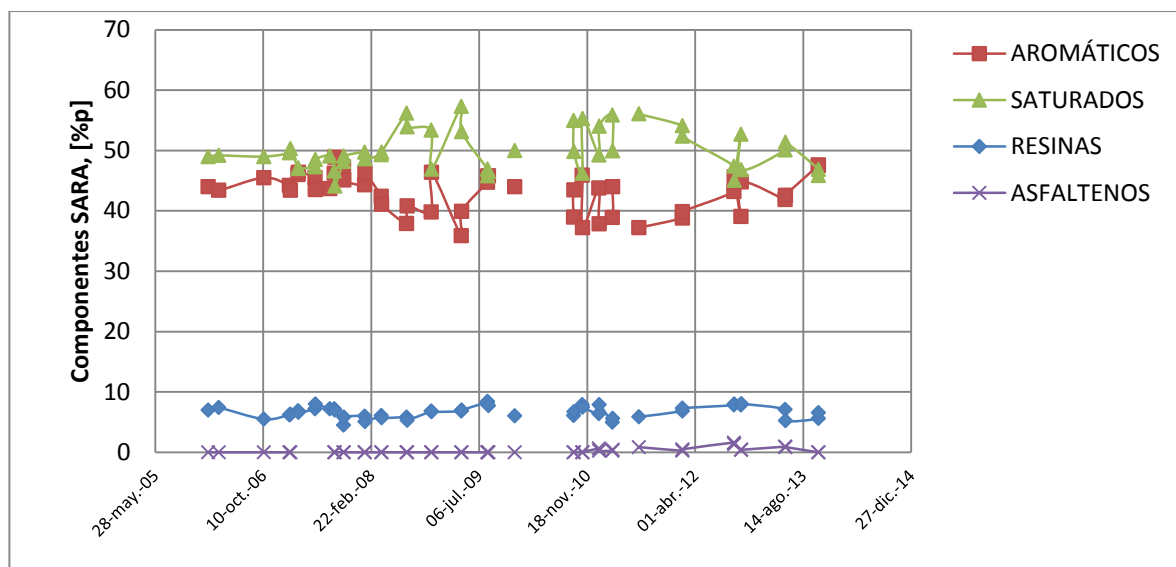
El mismo comportamiento de la unidad UOP II, se presenta en las demás unidades FCC (**Anexo I**), especialmente en UOP I y Orthoflow, mientras que Modelo IV al procesar cargas con °API alto, maneja concentraciones de carbón bajas.

Análisis SARA.

La carga de la unidad UOP II presenta generalmente la siguiente distribución: %p Saturados > %p Aromáticos > %p Resinas > %p Asfaltenos (Ver **Figura 7**);

predominando la concentración de componentes saturados. La distribución de los componentes SARA presentada de la unidad UOP II, se observa también en las otras unidades FCC (**Anexo J**).

Figura 7. Composición másica de la carga combinada, SARA vs tiempo (unidad UOP II)

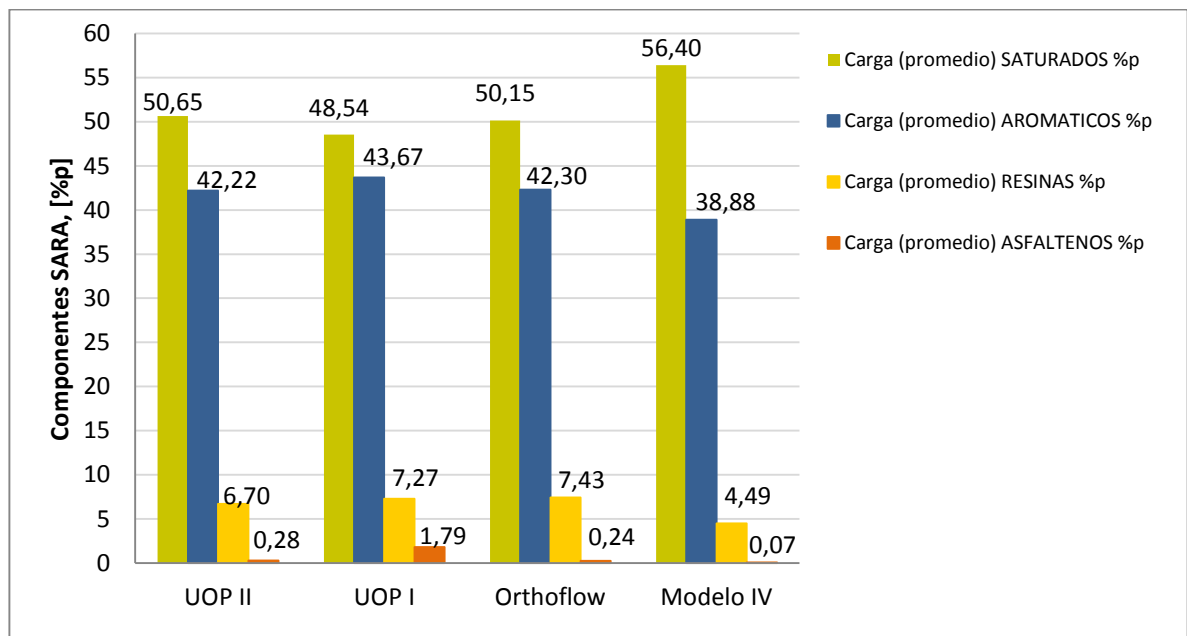


Además, se puede observar en la **Figura 7** que la concentración de asfaltenos ha aumentado en los últimos años; factor indeseable porque propicia la producción de slurry con alta concentración de hidrocarburos pesados. Este factor se considera el principal causante del ensuciamiento en el sistema de fondos, ya que a condiciones especiales de presión, temperatura y composición química, estos precipitan [12], [13].

La distribución de los componentes SARA de la carga combinada a todas las unidades FCC, muestra que Modelo IV presenta una menor concentración de aromáticos, resinas y asfaltenos y una mayor concentración de saturados respecto

a las otras unidades FCC (**Figura 8**); esto debido a que la carga a esta unidad es únicamente gasóleo. Sin embargo, la unidad UOP I (que tiene como carga gasóleo, DMO y DMOH) presenta la mayor concentración de asfaltenos respecto las demás unidades FCC; lo cual hace que se produzca un slurry más inestable con alta concentración de asfaltenos.

Figura 8. Composición másica de la carga combinada, SARA promedio unidades FCC



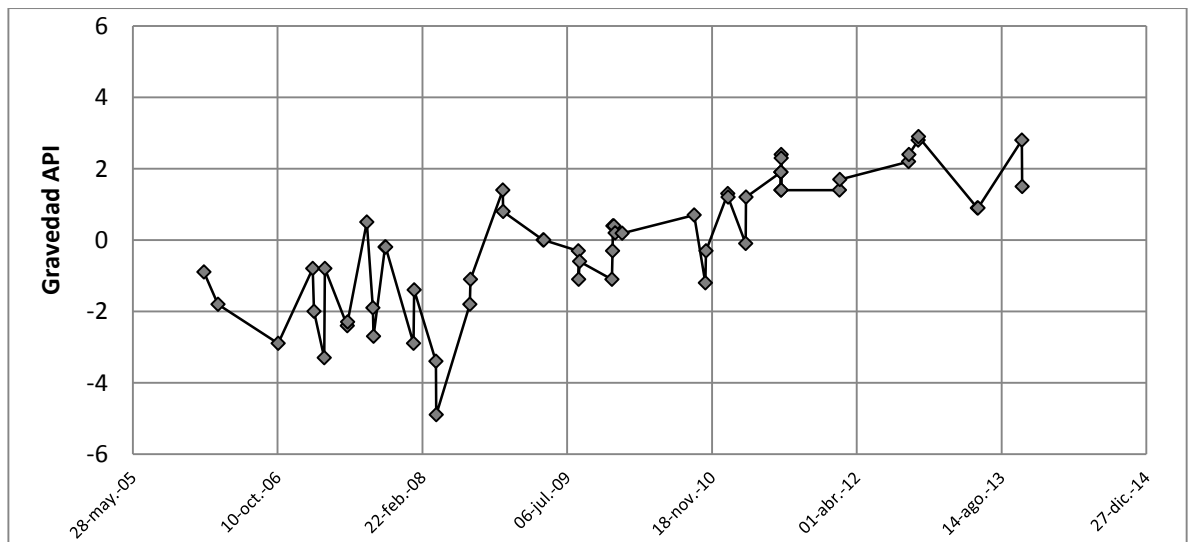
2.2.2 Análisis fisicoquímico del slurry de la unidad. La calidad del slurry de las unidades FCC, tiene una alta incidencia en el aumento de eventos de ensuciamiento del sistema de fondos. Por lo tanto, se analizaron los siguientes aspectos:

Gravedad específica (°API).

La tendencia al procesamiento de cargas más pesadas en todas las unidades FCC de la GRB, suponen una disminución de los grados API del slurry, sin embargo, la tendencia muestra lo contrario (**Figura 9**). La gravedad API del slurry ha aumentado en los últimos años para todas las unidades FCC (**Anexo K**).

El aumento en la gravedad API, puede ocurrir por reboces de Aceite Liviano de Ciclo (ALC) y Aceite Pesado de Ciclo (APC) hacia el slurry, generando a su vez, un efecto diluyente sobre los sedimentos, resinas y asfaltenos en el slurry del sistema de fondos [14]. Esta práctica es favorable debido a que ayuda a mantener los asfaltenos en solución coloidal [8], que resulta del alto carácter aromático del ALC y APC; compuestos principalmente de di-aromáticos y tri-aromáticos respectivamente (**Anexo L**). Además, dichos reboces ayudan a controlar la temperatura del slurry en el fondo de la torre fraccionadora principal (T-4201), minimizando la precipitación de los asfaltenos por efecto térmico.

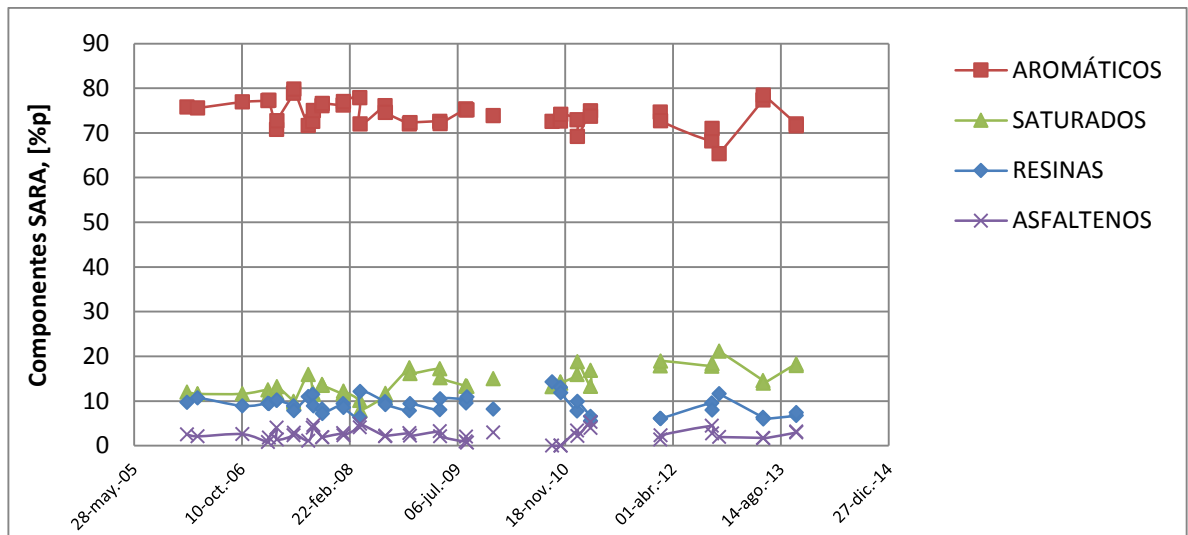
Figura 9. Gravedad API vs tiempo del slurry (unidad UOP II)



Análisis SARA.

El slurry de todas las unidades FCC presenta la siguiente distribución: %p aromáticos > %p saturados > %p resinas > %p asfaltenos (Ver **Figura 10** y **Anexo M**). Este comportamiento es esperado, ya que el craqueo catalítico en el reactor, produce un slurry con una concentración alta en compuestos aromáticos; moléculas grandes con una menor concentración en componentes saturados [16]. Así mismo, se puede identificar que la concentración de los asfaltenos del slurry es considerable frente a la concentración de los asfaltenos en la carga.

Figura 10. Composición másica del slurry, SARA vs tiempo (unidad UOP II)

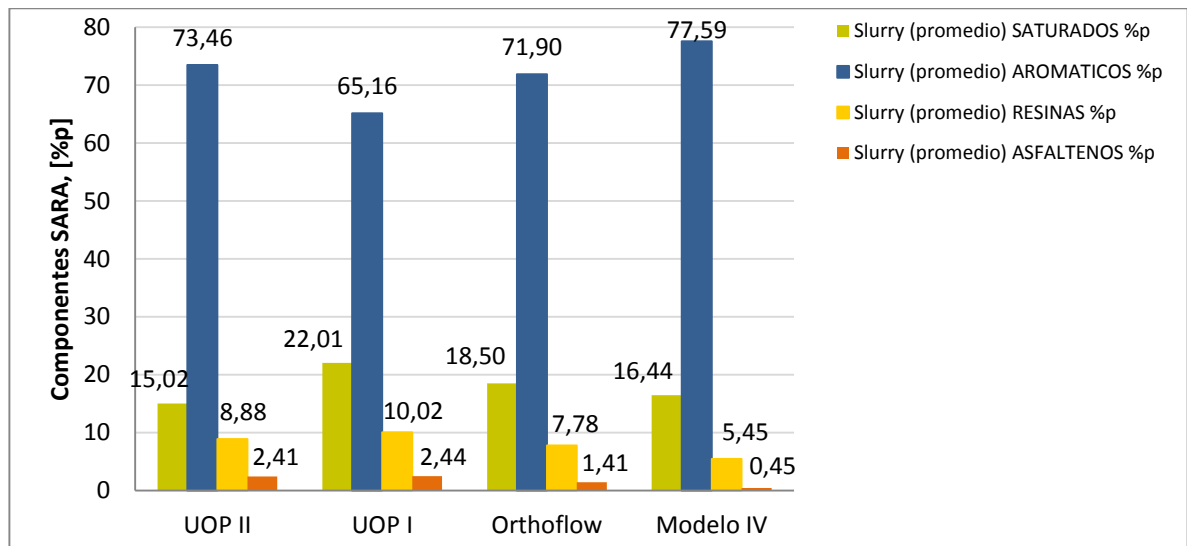


Cabe anotar, que los asfaltenos son a menudo la principal causa del ensuciamiento orgánico en el sistema de fondos, debido a que son inestabilizados por diversos factores, como calidad del slurry, condiciones operativas de la planta y diseño de la unidad; haciendo el problema un sistema matricial [8], [12], [16]. Por lo tanto, estudiar la proporción de los componentes SARA, permite tener una idea de la

insolubilidad de los asfaltenos en el slurry, la cual puede ser causada por un incremento de saturados y una disminución de aromáticos y resinas, siendo estos últimos los que mantienen los asfaltenos en solución [7], [17].

A partir de la **Figura 11**, se puede identificar que la unidad de Modelo IV, produce un slurry con la concentración de asfaltenos más baja y la concentración de aromáticos más alta de las demás unidades FCC; situación ventajosa frente a las otras unidades, ya que los aromáticos pueden estar solubilizando la pequeña concentración de asfaltenos presentes en el slurry. Esto reduce la probabilidad de ensuciamiento en el sistema de fondos [8]. La experiencia indica que Modelo IV presenta la menor frecuencia de eventos por ensuciamiento en el circuito de slurry frente a las otras unidades.

Figura 11. Composición másica del slurry, SARA promedio unidades FCC



Por otra parte, el slurry de la unidad UOP II presenta alta concentración de asfaltenos y la unidad UOP I presenta alta concentración de asfaltenos y baja de

aromáticos (**Figura 11**); haciéndolas más susceptibles a ensuciamiento por asfaltenos precipitados. Esto es coherente con los eventos de ensuciamiento ocurridos principalmente en este tipo de unidades. Además, se debe tener en cuenta que una alta concentración de asfaltenos por un lado, aumenta la viscosidad del slurry y por el otro, disminuye su velocidad; esto hace que su transporte por tuberías y tubos de intercambiadores de calor se dificulte propiciando ensuciamiento por sedimentación de partículas en suspensión [16].

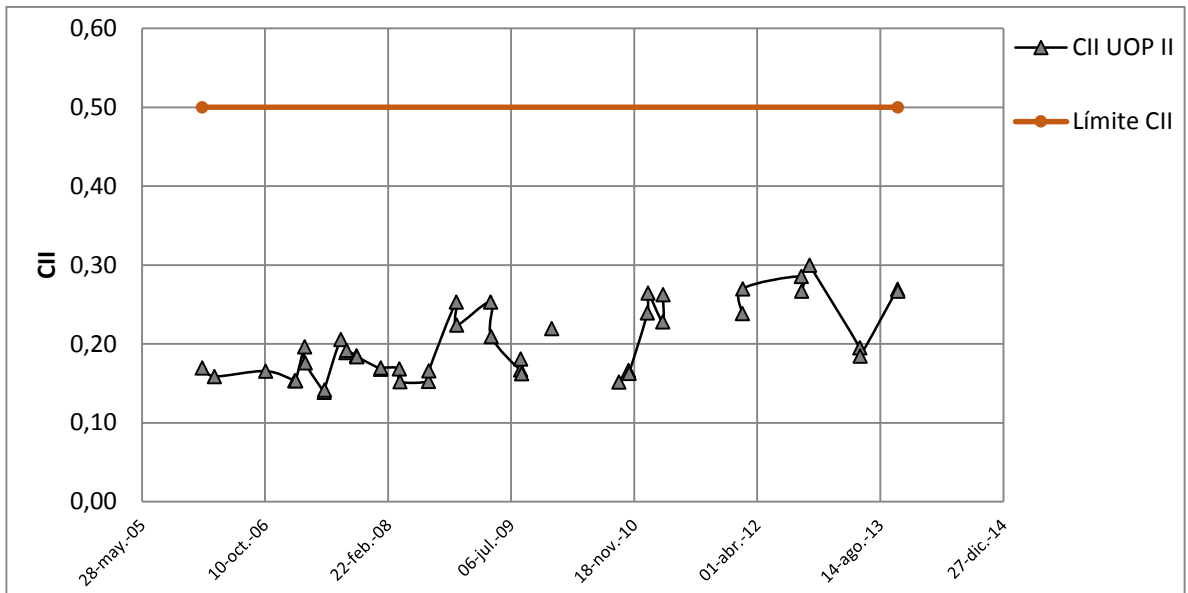
Cabe resaltar que el slurry de la unidad Orthoflow, a pesar de presentar una concentración relativamente alta de componentes saturados y asfaltenos, presenta una menor frecuencia de eventos de ensuciamiento frente a las unidades UOP. Esto puede deberse, por un lado a que la concentración de aromáticos y resinas es relativamente alta permitiendo que los asfaltenos permanezcan solubilizados en el slurry y por otro lado, a que la temperatura del fondo de la torre no supera los 680 °F (**Anexo R**), lo que hace menos inestables los asfaltenos del slurry por efecto térmico.

Índice de Inestabilidad Coloidal (CII).

El CII indica cuán estable coloidalmente es un aceite basándose en la proporción de los componentes SARA. Si la concentración de aromáticos y resinas es alta y la concentración de asfaltenos es baja, los asfaltenos se mantienen estables en la solución; proporción que disminuye la probabilidad de precipitación.

En cuanto a las corrientes de tipo slurry, si el CII $\ll 0,5$, indica que es más estable y menos propenso a formar coque por precipitación de asfaltenos y si el CII $> 0,5$ se considera un slurry inestable, con alta tasa de ensuciamiento y formación de coque [16].

Figura 12. CII del slurry vs tiempo (unidad UOP II)

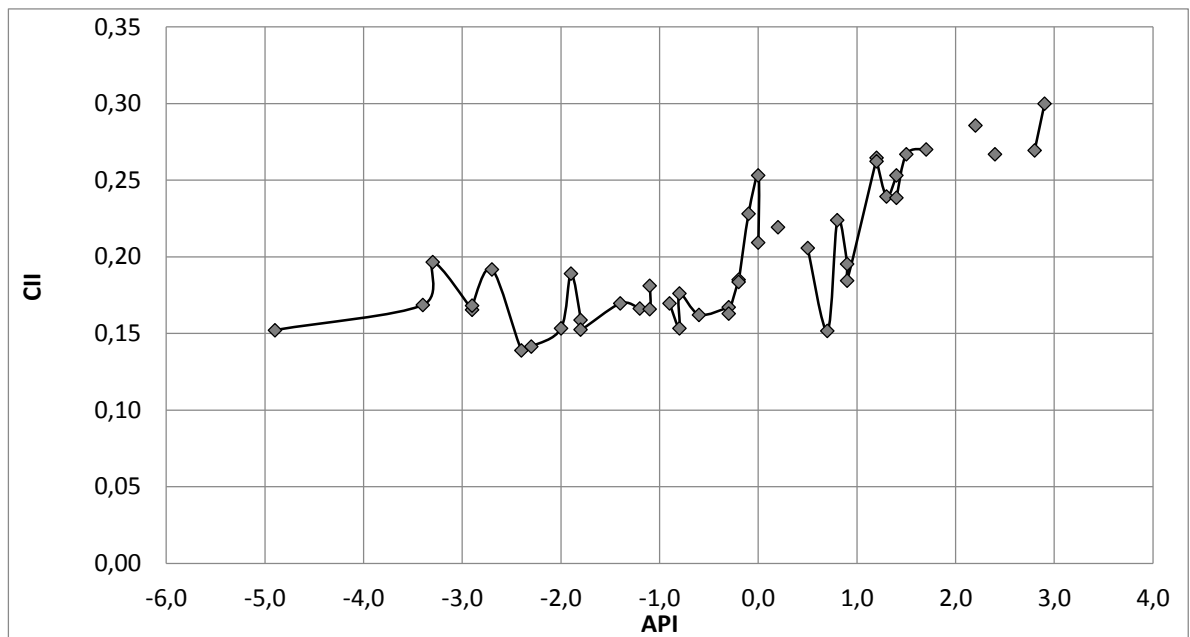


El CII del slurry para la unidad UOP II, presenta una leve tendencia de aumento en el tiempo (**Figura 12**), lo cual indica que se ha estado inestabilizando a medida que pasan los años.

El comportamiento del CII del slurry de la unidad UOP II se presenta también en las demás unidades FCC (UOP I y Modelo IV). Sin embargo, la unidad Orthoflow presenta una tendencia más estable (**Anexo N**).

Además, se relacionó la gravedad API y el Índice de inestabilidad Coloidal del slurry, encontrándose que al aumentar la gravedad API del slurry, se incrementa el CII haciéndolo más inestable (**Figura 13**). Por lo tanto, es deseable obtener un slurry con una baja gravedad API para garantizar estabilidad del slurry ($CII \ll 0,5$); situación que podría minimizar el ensuciamiento de tipo orgánico (por precipitación de asfaltenos).

Figura 13. CII del slurry vs gravedad API (unidad UOP II)



Contenido de cenizas.

Un aumento en la concentración de cenizas en el slurry, indica generalmente arrastre de catalizador desde el reactor hasta la torre fraccionadora principal [15], [8]. El arrastre de catalizador es la principal causa del ensuciamiento de tipo inorgánico, caracterizado por presencia de componentes de catalizador (zeolita) como sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) en el slurry. Concentraciones que superen el 0,2 %p de cenizas, indican un exceso de arrastre de catalizador [16]; partículas que pueden comportarse como núcleos iniciales para la aglomeración de asfaltenos y formación de grandes fragmentos de coque que van creciendo poco a poco favorecidos por reacciones de polimerización [4].

Se han encontrado diferentes fragmentos de coque generalmente en los filtros de las bombas (P-4203 A/B) a la salida del slurry por el fondo de la fraccionadora principal (Ver **Figura 14**).

Figura 14. Coque en filtros de las P-4203 A/B - ID 200976969 (unidad UOP II)



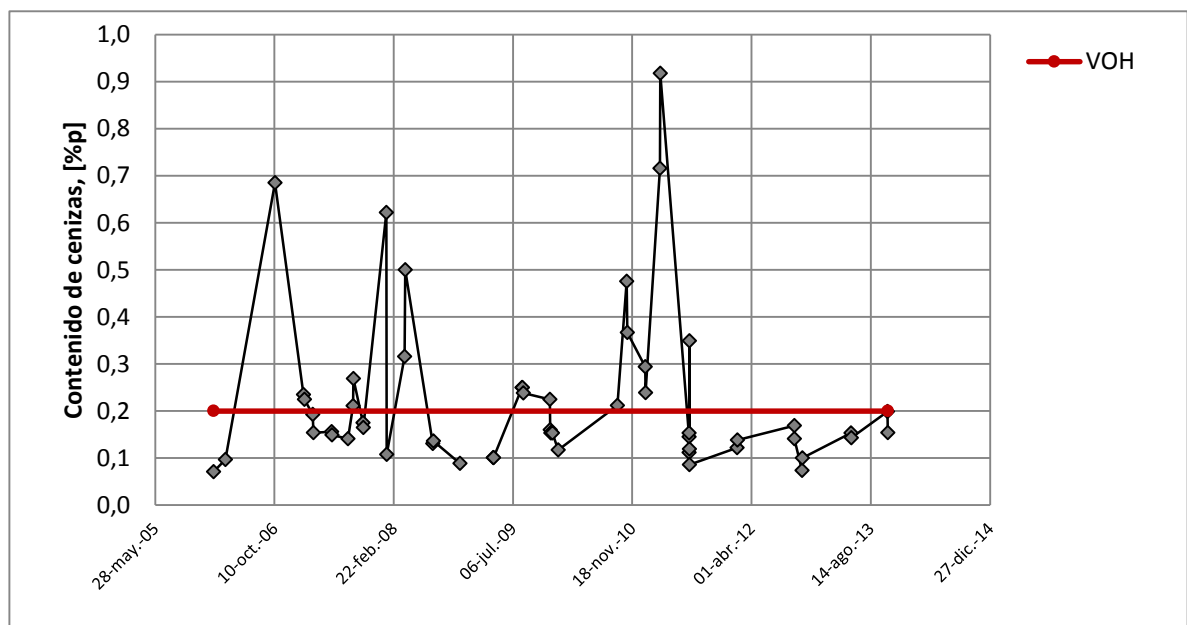
En la **Figura 14**, se puede identificar dos tipos de fragmentos de coque:

- El fragmento No. 1 tiene apariencia maciza y esférica, formado posiblemente por reacciones de polimerización favorecidas por las altas temperaturas de operación en el fondo de la fraccionadora principal. Dichos fragmentos se pueden formar a causa de los núcleos de asfaltenos precipitados en el fondo de la torre [16] y/o por partículas finas de catalizador suspendido [8].
- El fragmento No. 2 es más quebradizo, poroso y laminar, característico de formaciones de coque por vaporización parcial de la carga en el reactor o por condensación de gases de reacción en “puntos fríos” en la línea de transferencia, que se coquizará en el tiempo por altas temperaturas [16].

Se realizó una extracción sohxlet a la muestra de coque ID 200976969 en el ICP, obteniendo como resultado un 91,26 %p de fracción inorgánica y un 8,730 %p de fracción orgánica. Esto indica que predominó el ensuciamiento de tipo inorgánico por arrastre de catalizador, donde la fracción inorgánica está compuesta principalmente por un 46,80 %p de SiO₂ y un 35,06 %p de Al₂O₃ característicos de la zeolita (**Anexo O**).

Dicha hipótesis, se comprobó por medio de un análisis termogravimétrico (TGA) que se realizó al slurry, confirmando arrastre de catalizador al obtener una concentración de cenizas del 0,38 %p en atmósfera inerte y 0,34 %p en aire (**Anexo P**), respecto al límite máximo de cenizas permitidas en las unidades FCC de 0,2 %p.

Figura 15. Contenido de cenizas del slurry vs tiempo (unidad UOP II)



Además es importante observar que la **Figura 15** evidencia puntos de no conformidad en la unidad UOP II por alto contenido de cenizas en el tiempo (> 0,2

%p). Cabe destacar que las otras unidades FCC (UOP I, Orthoflow y Modelo IV) han presentado valores más bajos de contenido de cenizas frente a la unidad UOP II (**Anexo Q**), haciendo esta unidad más susceptible a presentar ensuciamiento por arrastre de catalizador (de tipo inorgánico).

2.2.3 Análisis operacional. Se realizó el seguimiento de las variables operativas influyentes en el sistema de fondos, con el fin de anticipar o corregir puntos de no conformidad respecto a las VO y GC establecidas; creando a su vez disciplina operativa en la unidad [16].

Temperatura en el fondo de la torre fraccionadora principal.

La temperatura del fondo está relacionada con la velocidad de formación de coque, ya que aumenta rápidamente si se sobrepasa los 680 °F [16], [6], [17]. Sin embargo, hay estudios que recomiendan no sobrepasar los 650-655°F [18], [21].

Altas temperaturas inestabilizan los asfaltenos del slurry, lo que aumenta la probabilidad de ensuciamiento en el sistema por cantidad de asfaltenos precipitados [19].

La temperatura del fondo de la T-4201 (unidad UOP II) en enero del 2014 sobrepasó los 680 °F (**Figura 16**) y concuerda con eventos de ensuciamiento presentados en la unidad. En los siguientes meses, adoptando disciplina operativa, se aumentó el flujo de slurry quench en la unidad, logrando mantener la temperatura por debajo del límite de coque hasta el mes de julio (Ver **Figura 16** y **Figura 17**); meses en los cuales disminuyeron los eventos de ensuciamiento en la unidad. Se recomienda una relación de slurry quench/carga entre 1,4 - 1,8 %vol slurry/carga, preferiblemente 1,5 %vol [16].

Figura 16. Temperatura en el fondo de la T-4201 vs tiempo (unidad UOP II)

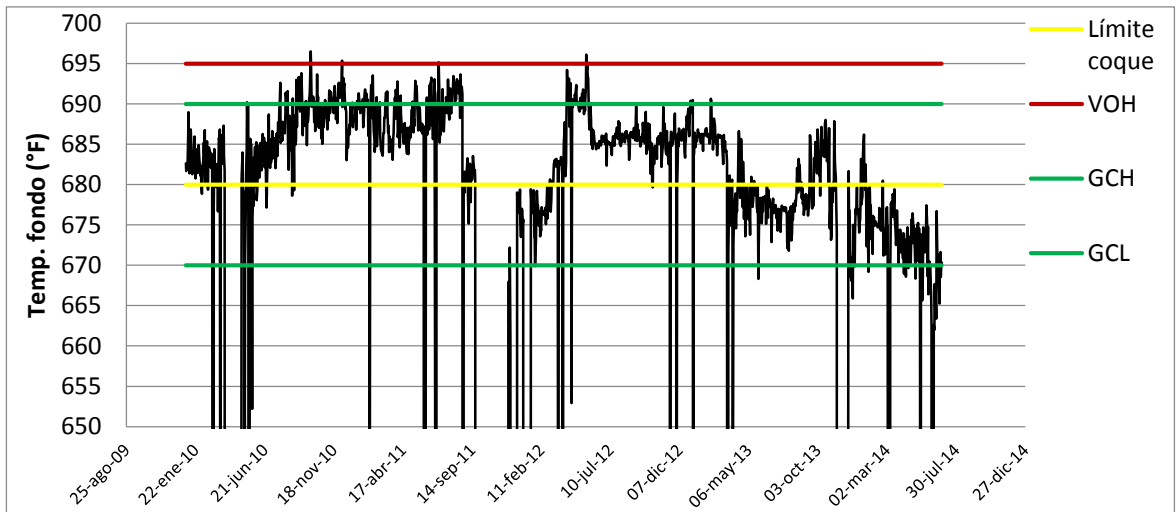
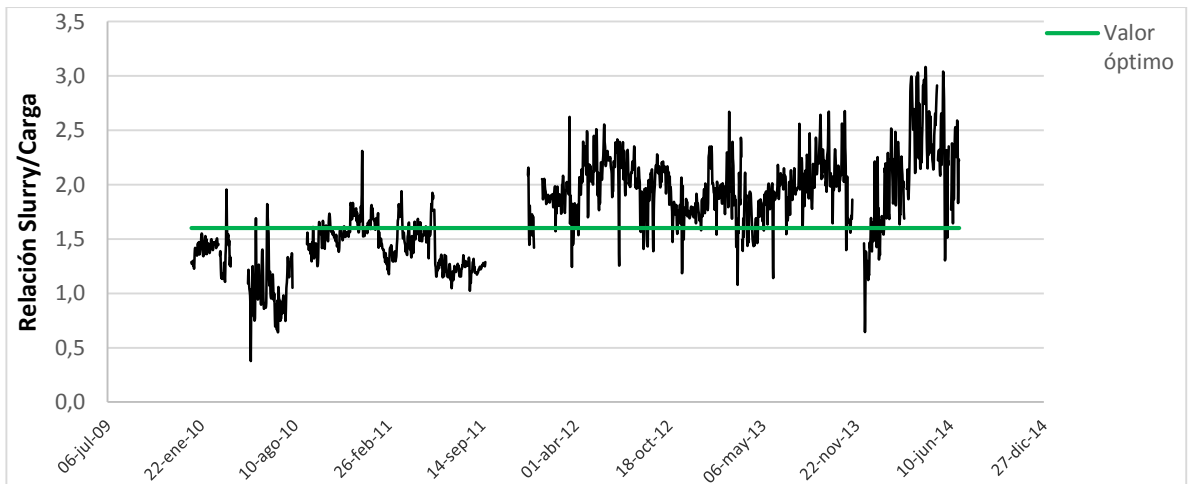


Figura 17. Relación de slurry quench/carga en el fondo de la T-4201 vs tiempo (unidad UOP II)



Cabe destacar que UOP I y II operan a temperaturas más altas respecto a Modelo IV y Orthoflow (**Anexo R**), lo que las hace más susceptibles a ensuciamiento en el sistema de fondos por inestabilización de asfaltenos.

Velocidad del slurry por los tubos de los intercambiadores de calor.

La velocidad del slurry por los tubos en los intercambiadores de calor del sistema de fondos, tiene un efecto importante en el ensuciamiento.

Se recomienda operar a velocidades entre 6-10 ft/s, ya que velocidades menores de 6 ft/s pueden provocar la formación de depósitos de finos de catalizador, coque u otras partículas suspendidas en la superficie del tubo y velocidades mayores a 10 ft/s, pueden generar erosión de los tubos por las partículas en suspensión [8], [21].

El slurry en la unidad UOP II, presenta velocidades menores a 6 ft/s por los tubos de los intercambiadores de calor del sistema de fondos: E-4203 A-D (de tubo y carcasa), E-4204 A/B (de tubo y carcasa) y E-4205 A/B (generadores de vapor).

Esta situación debe ser corregida, debido a que aumenta la probabilidad de ensuciamiento por sedimentación de partículas en suspensión del slurry sobre las superficies internas de los tubos de los intercambiadores de calor y las tuberías del sistema en general (Ver **Figura 18**, **Figura 19**, **Figura 20**, **Figura 21**).

Figura 18. Velocidad del slurry por tubos del E-4203 A-D vs tiempo (unidad UOP II)

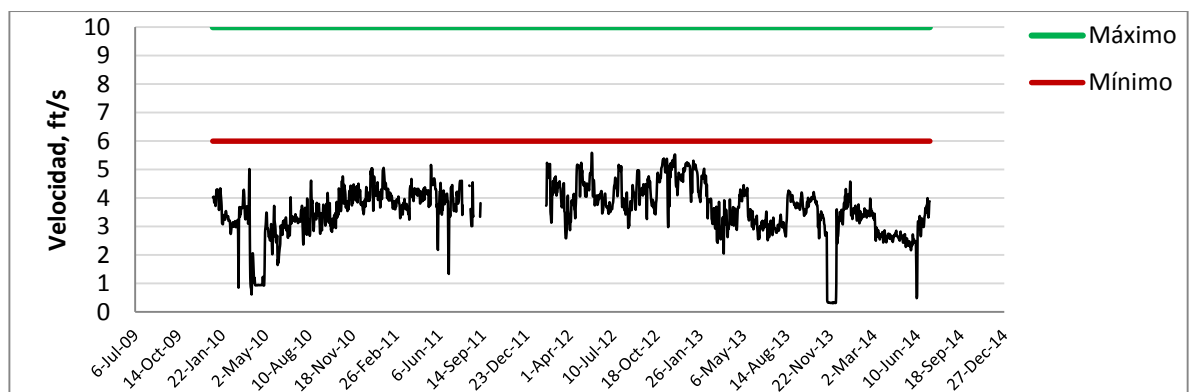


Figura 19. Velocidad del slurry por tubos del E-4204 A/B vs tiempo (unidad UOP II)

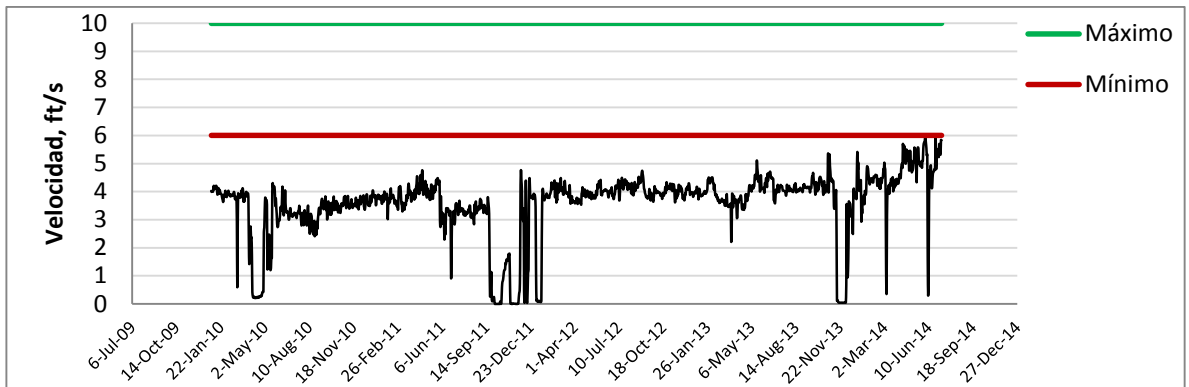


Figura 20. Velocidad del slurry por tubos del E-4205 A vs tiempo (unidad UOP II)

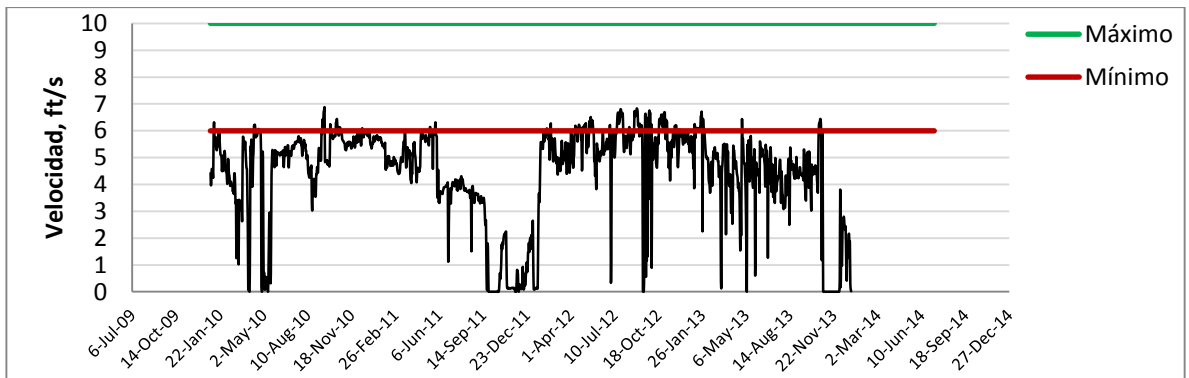
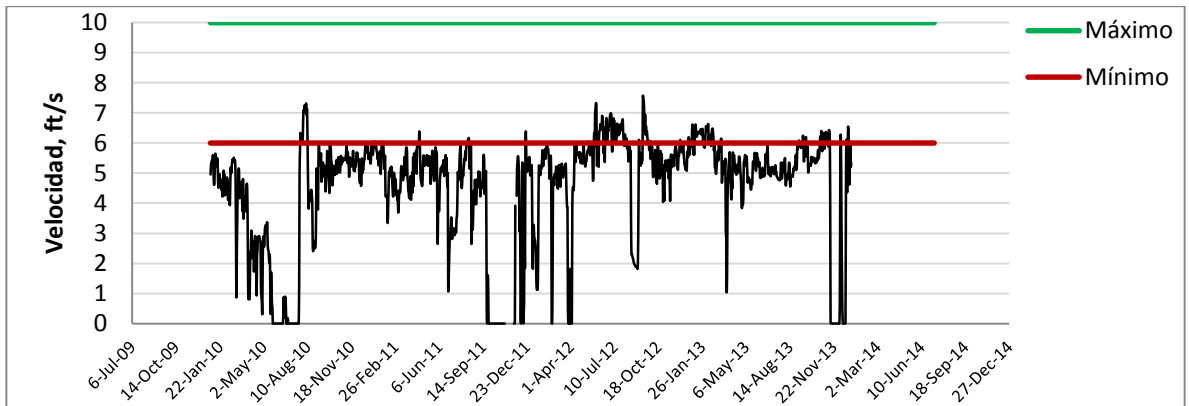


Figura 21. Velocidad del slurry por tubos del E-4205 B vs tiempo (unidad UOP II)



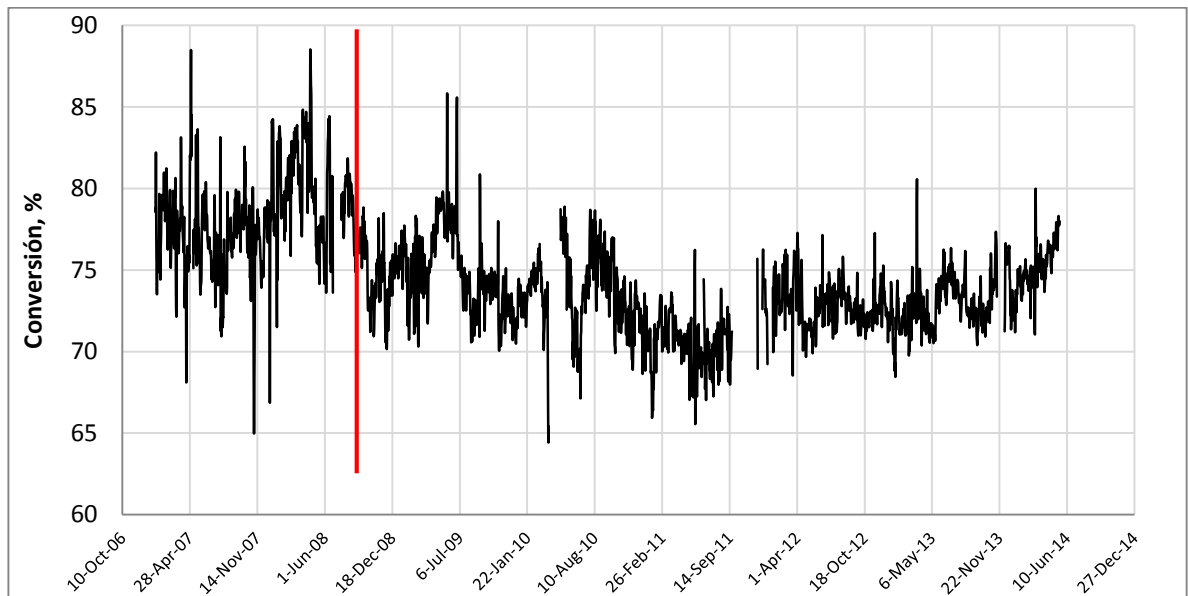
Conversión.

En las unidades FCC, la conversión permite evaluar el desempeño operacional teniendo en cuenta la producción de productos pesados y de bajo valor como el slurry [20].

En la **Figura 22**, se puede observar que la unidad UOP II disminuyó progresivamente su conversión a partir del año 2008, lo que puede resultar en un slurry con más componentes saturados; reduciendo la solubilidad de los asfaltenos por interacción de los componentes SARA [8].

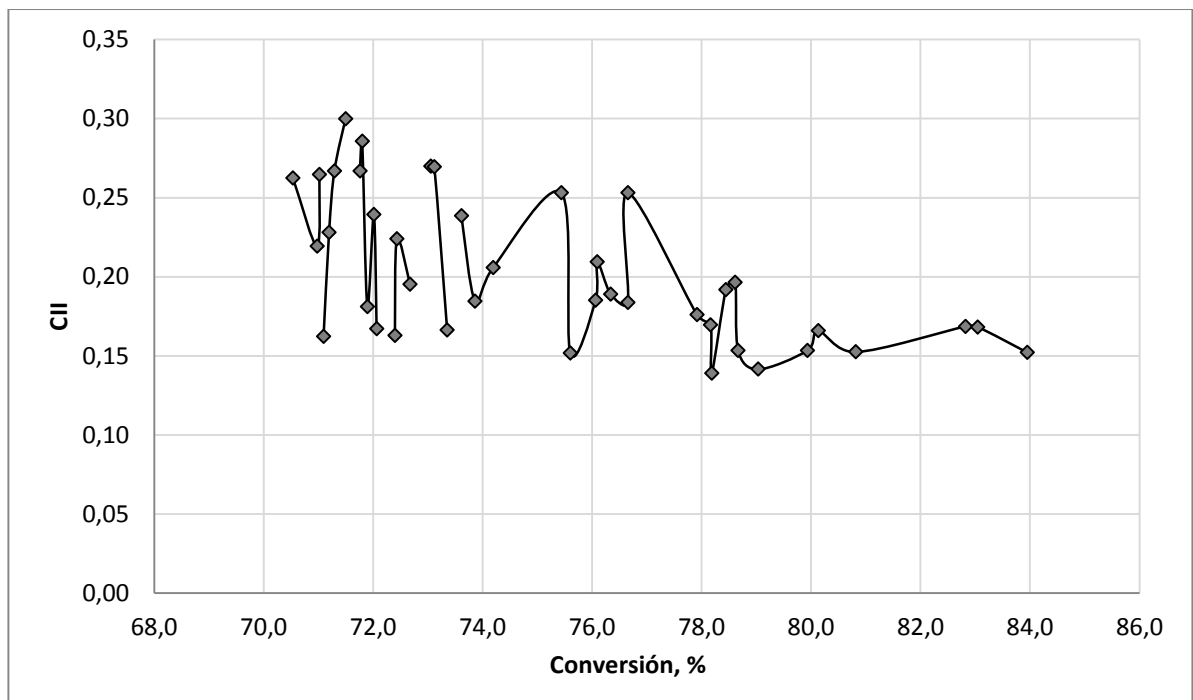
Es importante resaltar que la conversión se ve afectada por diversos factores como la calidad de la carga, severidad (temperatura de reacción), matriz del catalizador, área activa del catalizador, tipo de formulación del catalizador, entre otros. Sin embargo, según los registros dicho comportamiento ocurrió posiblemente por un cambio en la formulación del catalizador realizado en ese año.

Figura 22. Conversión vs tiempo (unidad UOP II)



A su vez, se encontró que al aumentar la conversión, disminuye el Índice de Inestabilidad Coloidal (CII) (**Figura 23**), por lo tanto, es deseable mantener valores de conversión altos para conseguir más estabilidad del slurry, es decir con un CII $\ll 0,5$.

Figura 23. CII del slurry vs conversión (unidad UOP II)



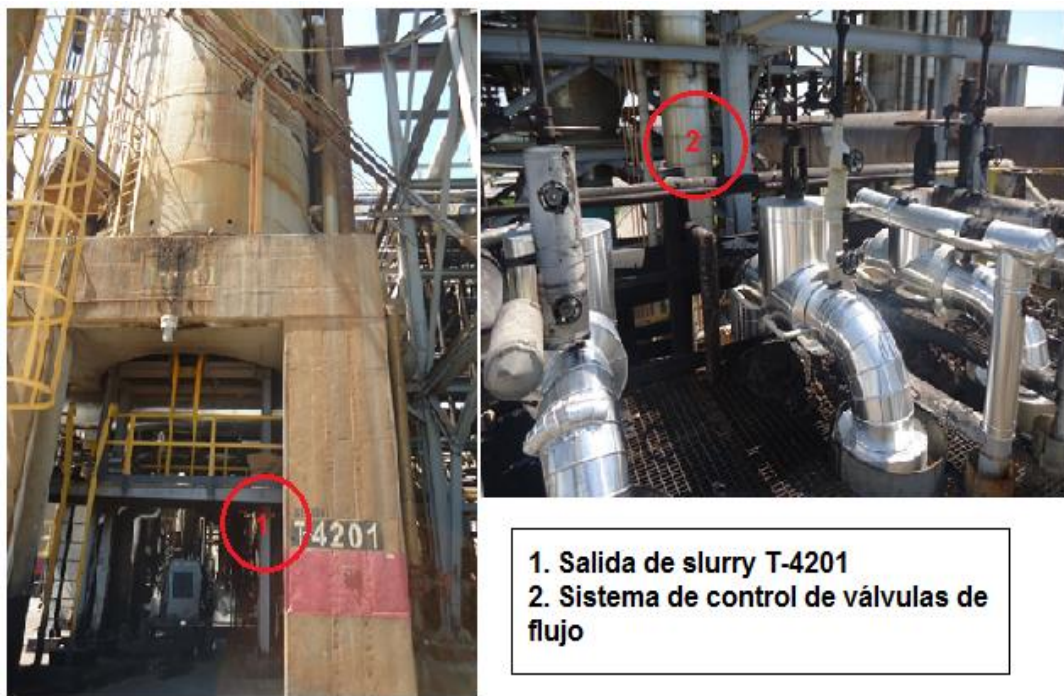
2.2.4 Diseño de la unidad. Permitió identificar circuitos de fondos complejos de las unidades FCC, que generalmente producen alta caída de presión, baja velocidad y alto tiempo de residencia del slurry por las tuberías del circuito de fondos. Este tipo de consecuencias generan problemas de ensuciamiento en el sistema.

Configuración del sistema de fondos.

Se analizaron los circuitos del sistema de slurry de las cuatro unidades FCC bajo una misma base de configuración y se identificó que las unidades UOP I y UOP II, presentan un diseño más complejo frente a Orthoflow y Modelo IV (**Anexo S**).

Además, por inspección en campo se identificó que el slurry de la unidad UOP II sale por el fondo de la T-4201 y es transportado hasta el sistema de control de flujo aproximadamente a cuatro pisos sobre el nivel del suelo en tubería vertical (Ver **Figura 24**). Esto evidencia un circuito de slurry complejo.

Figura 24. Sistema de fondos de la unidad UOP II



Esta configuración propicia alta caída de presión y por consiguiente baja velocidad del slurry que puede generar depósitos de asfaltenos o catalizador en suspensión

sobre las paredes de las tuberías y tubos de los intercambiadores de calor. Las demás unidades tienen el sistema de fondos entre el suelo y un piso de altura; haciendo que la unidad UOP II sea más propensa a ensuciamiento por sedimentación de partículas en suspensión.

Tiempo de residencia.

Se refiere al tiempo que gasta el slurry en el fondo de la torre fraccionadora hasta el primer intercambiador de calor. Este tramo es crítico debido a que se encuentra a altas temperaturas; sin embargo, al pasar los primeros intercambiadores de calor las condiciones de formación de coque desaparecen. Según experiencias comerciales, se recomienda manejar bajos tiempos de residencia del slurry, preferiblemente por debajo de 4 h [8], [16].

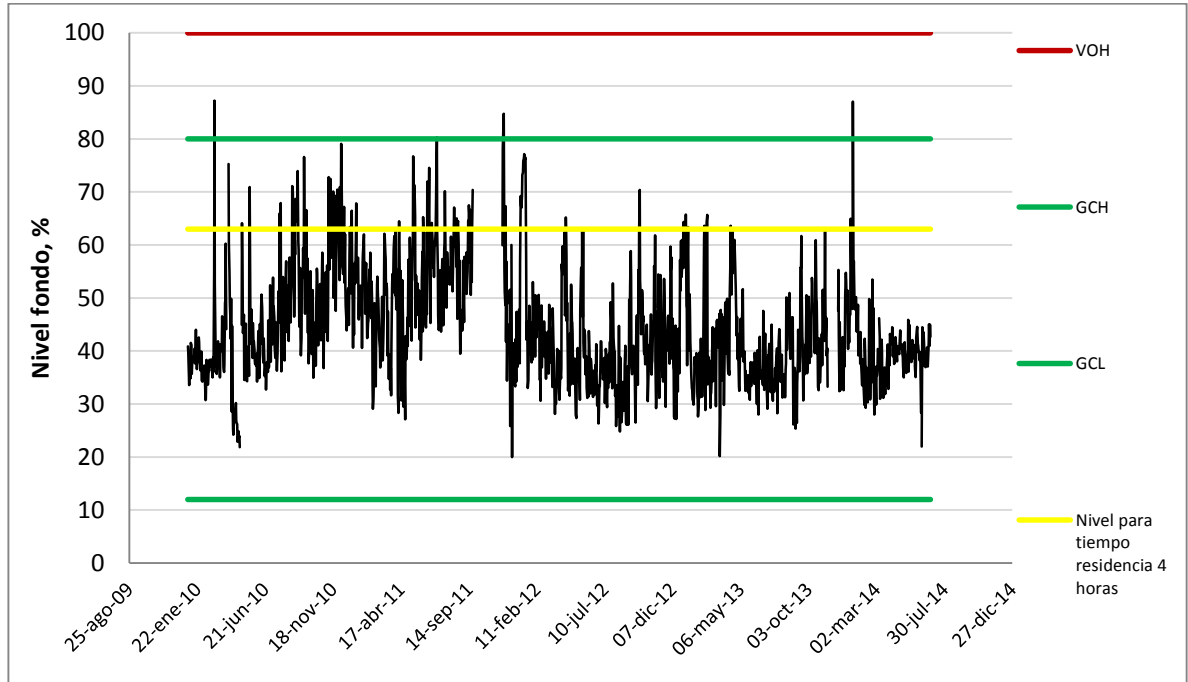
El tiempo de residencia está en función del diseño del circuito y del nivel del fondo de la torre, por lo que reducir el nivel a un valor adecuado reduce el tiempo de residencia, pero un nivel muy bajo puede coquizar el slurry por efecto de altas temperaturas [16].

Según los cálculos realizados, un tiempo de residencia de 4 horas en la unidad UOP II, corresponde a un 63 % del nivel del fondo de la torre (línea de color amarillo en la **Figura 25**). Dicho valor ha sido superado en varias ocasiones por falta de control; indicando que el slurry en el fondo de la fraccionadora principal ha operado con tiempos de residencia mayores a 4 horas.

Esta unidad en promedio ha manejado un tiempo de residencia de 3,5 h en condiciones de un flujo de slurry de 2.648 BPD (sin incluir slurry quench) y un 44,2 % de nivel del fondo de la torre. Sin embargo, en ocasiones ha operado con un tiempo de residencia alto de 4,7 horas correspondiente a un 87,2 % del nivel del fondo de la fraccionadora principal (**Figura 26**); esta situación es desfavorable ya

que en este tramo el slurry se encuentra en condiciones aptas para la precipitación de los asfaltenos y reacciones de polimerización para formar coque.

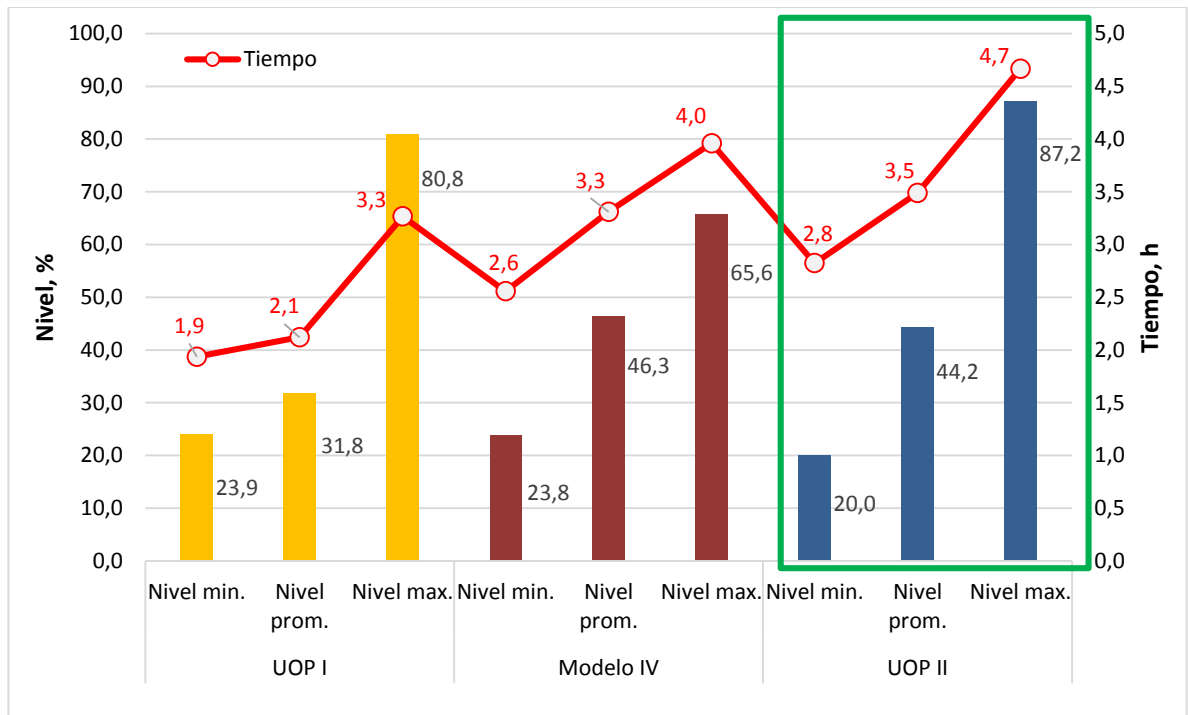
Figura 25. Nivel en el fondo de la T-4201 vs tiempo (unidad UOP II)



Además, en la **Figura 26** se puede observar que el tiempo de residencia se incrementa al aumentar el nivel del fondo de la torre, en donde se destaca, que la unidad UOP II maneja tiempos de residencia mayores para los diferentes niveles del fondo de la fraccionadora principal frente a las unidades FCC como UOP I y Modelo IV. Por lo tanto, la unidad UOP II es la planta FCC que mayor probabilidad de ensuciamiento presenta por altos tiempos de residencia del slurry en su circuito de fondos.

Este análisis permitió solicitar una revisión del diseño del sistema de fondos de la unidad UOP II mediante un contrato con licenciador UOP, ya que por diseño dicha unidad presenta un circuito de slurry complejo.

Figura 26. Tiempo de residencia vs nivel de fondo de la torre de las unidades UOP I, UOP II y Modelo IV



2.3 Recopilación de recomendaciones

De acuerdo al estudio realizado, se identificaron diferentes tipos de recomendaciones y de opciones de mejoras para el desempeño operacional del sistema de fondos, las cuáles pueden mitigar el ensuciamiento. La **Tabla 1** hace un resumen de esto.

Tabla 1. Recomendaciones para mitigar el ensuciamiento del sistema de fondos de la unidad UOP II

Actividad	Pasos
Mejorar contacto carga/catalizador	Garantizar la atomización de catalizador en función del volumen de carga a la unidad.
	Evaluar el desempeño de la matriz de catalizador para maximizar la superficie de contacto
	Evaluar el desempeño de las boquillas de atomización de carga.
Controlar condiciones en línea de transferencia	Asegurar el aislamiento total de la línea de transferencia.
	Controlar velocidades de los gases de reacción entre 100-120 ft/s.
Controlar variables de intercambiadores de calor de slurry	Mantener velocidades de slurry por los tubos mayor a 6 ft/s y menor a 10 ft/s.
	Realizar instalación de medidores de presión en el circuito de slurry.
	Evaluar periódicamente el grado de ensuciamiento en función del coeficiente de transferencia de calor de cada intercambiador.
Minimizar arrastre de catalizador	Evaluar el desempeño de los ciclones de reactor (velocidades, delta de presión, eficiencia).
Mantener los asfaltenos en solución del slurry	Revisión periódica del análisis SARA, propiciando mayor concentración de aromáticos y menor concentración de saturados y asfaltenos en el slurry
	Favorecer el corte de slurry con ALC y APC para solubilizar asfaltenos en el slurry con concentraciones altas.
	Agregar ALC caliente en intercambiador de calor como efecto diluyente de asfaltenos

Continuación Tabla 1.

Actividad	Pasos
<p>Controlar variables en la fraccionadora principal para minimizar la formación de coque</p>	Mantener temperatura de fondo < 680 °F
	Calibrar periódicamente las termocuplas del circuito de fondos.
	Mantener el tiempo de residencia menor a 4 h controlando nivel en el fondo de la torre fraccionadora principal.
	Evaluar instalación de un filtro en paralelo para la retención de coque/catalizador en la succión de bombas de fondos (P-4203 A/B).
	Mantener el reflujo de slurry quench de 1,4 a 1,8 veces el de la carga.
	Evaluar opción de implementar suministro de vapor en el fondo de la fraccionadora.
	Evaluar la opción de instalación de un rompe vórtice en el fondo de la fraccionadora para evitar puntos localizados de mayor temperatura.
	Estudiar posibilidad de instalación de un distribuidor para la corriente de slurry quench

3 CONCLUSIONES

- ✓ El óptimo desempeño del sistema de fondos de las unidades FCC, depende de diferentes factores tales como la calidad de la carga y el slurry, las variables operativas y el diseño de la unidad.
- ✓ El análisis fisicoquímico de la carga y el slurry, permitió identificar que las unidades de diseño UOP, especialmente UOP II, presentan características que aumentan la probabilidad de ensuciamiento por precipitación de asfaltenos. Adicionalmente, se identificó el fenómeno de ensuciamiento por arrastre de catalizador.
- ✓ La temperatura del fondo de la torre fraccionadora principal (T-4201) se controló por medio de la recirculación del slurry quench. Dicha práctica ayuda a mejorar el desempeño operacional del sistema de fondos, lo que demuestra los efectos positivos de adquirir disciplina operativa en la unidad por medio del seguimiento y control de las variables operacionales.
- ✓ Se identificó que la unidad UOP II, maneja los valores más altos de tiempo de residencia de las unidades FCC, evidenciando un circuito de slurry complejo. Situación que dio la oportunidad, de solicitar la revisión del diseño del sistema de fondos de la unidad, mediante un contrato con licenciador UOP.
- ✓ Se realizó una identificación de las posibles causas que propician el ensuciamiento del sistema de fondos mediante un diagrama de árbol, así como también una serie de actividades que podrían mitigar el problema en la unidad UOP II y demás FCC de la GRB.

4 RECOMENDACIONES

- ✓ Evaluar el desempeño del catalizador en la unidad UOP II e identificar el efecto de la concentración de metales como Vanadio, Sodio y Níquel en la pérdida de actividad por envenenamiento de sitios activos y disminución de la conversión. Siendo una de las causas que propicia la vaporización parcial de la carga en el reactor (R-4201), generando coque por adherencia en la línea de transferencia que puede ser arrastrado al sistema de fondos.
- ✓ Evaluar el desempeño de los ciclones (X-4206) para descartar arrastre de catalizador por falla mecánica, así como de las boquillas de atomización de la carga en el elevador del reactor (R-4201), teniendo en cuenta que se debe mantener la concentración de cenizas máximo en 0,2 %p.
- ✓ Disminuir el tiempo de residencia del slurry en el sistema de fondos de la unidad UOP II menor a 4 h, por medio del control del nivel del fondo de la T-4201, tomando como límite máximo un 63% de nivel.
- ✓ Evaluar la factibilidad de aplicación de un diluyente como medida de mitigación de ensuciamiento a causa de precipitación de asfaltenos y arrastre de catalizador.
- ✓ Mantener un seguimiento de los parámetros fisicoquímicos de la carga y el slurry y las variables operativas de la unidad, para evitar puntos de no conformidad según las Ventanas Operativas, Guías de Control y recomendaciones señaladas en el estudio presentado.
- ✓ Desarrollar procedimiento para agregar ALC o APC caliente en intercambiadores del sistema de fondos, para diluir los sedimentos, resinas y asfaltenos en el slurry.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ECOPETROL S.A. Lo que hacemos información. [En línea]. [Citado el 12 de Diciembre de 2014]. Disponible en: <<http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos/lo-que-hacemos-informacion/>>

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

_____. 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.

[3] MEZA MILANO, M.J. Procesamiento de naftas en el reactor del complejo de desintegración catalítica (CCU) del CRP-Cardón. Caracas, 2001, 6 p. Trabajo

de grado de Ingeniero Químico. Universidad Metropolitana. Facultad de ingeniería.

[4] GENERAL ELECTRIC, Water & Process Technologies. FCCU Fouling can be Reduced – Even in the Slurry Loop. (Ago. 2007). 1-9 p.

[5] MARTINEZ CRUZ, F.; NAVAS GUZMÁN, G.; OSORIO SUÁREZ, J.P. Prediction of the FCC feedstocks crackability. En: Ciencia, Tecnología y Futuro. Vol. 3, No. 5. (Dic. 2009). 125-127 p.

[6] UOP. Fluid Catalytic Cracking Process – FCC. Unit No.1. 1998.

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

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

[7] WIEHE, I.A. Process Chemistry of Petroleum Macromolecules. 1ra edición. Gladstone, New Jersey: CRC Editorial, Taylor and Francis Group, 2008. 16, 281 p.

- [8] HUNT, D.; MINYARD, B; KOEBEL, J. Minimising FCC slurry exchanger fouling. En: PTQ Q1, (Ene, 2008). 1-7 p.
- [9] GANJI, H.; ZAHEDI, M.; AHMADI MARVAST, M.; KANANPAPANAH, S.; SADI M.; SHOKRI, S. Determination of Suitable Feedstock for Refineries Utilizing LP and NLP Models. En: International Journal of Chemical Engineering and Applications. Vol. 1, No. 3. (Oct, 2010). 226 p.
- [10] ECOPETROL S.A. Memorando: Efectos de la calidad de carga en las unidades de cracking Catalítico. Barrancabermeja, 2011. CPO-10000305-190
- [11] NAVARRO URIBE, U. Aplicación del 1H NMR en el estudio de los componentes SARA de fondos de vacío y en las corrientes principales del esquema del fondo de barril. Barrancabermeja, 2004. 3-4 p.
- [12] INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEAT EXCHANGER FOULING AND CLEANING – CHALLENGES AND OPORTUNITIES. (3: 5-10, Junio, 2005: Kloster Irsee, Alemania). Memorias Blending effects on fouling of four crude oils. Alemania: Engineering Conferences International (ECI Symposium), Vol. RP2, 2005. 37 p.
- [13] SEPÚLVEDA GAONA, J. A.; BONILLA MANRIQUE, J. P.; MEDINA MAJÉ, Y. Predicción de la Estabilidad de los Asfaltenos Mediante la utilización del Análisis

SARA para petróleos Puros. En: Revista Energía y Región, No. 7. (2010). 104 p.

[14] INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO. Evaluación del punto de corte slurry, impacto en el potencial de ensuciamiento, circuito de fondos FCC-UOP II. Barrancabermeja. (2014).

[15] SADEGHBEIGI, R. Fluid Catalytic Cracking Handbook, Design, Operation and Troubleshooting of FCC Facilities. 2da edición. Houston, Texas, Estados Unidos: Butterworth-Heinemann, 2000. 52-54, 244-248 p.

[16] PÉREZ, P.N. Curso de fraccionamiento, fraccionadora principal, unidad de recobro de vapores de Pedro Nel Pérez. Capítulo 3.3. Formación de coque. 56-70 p.

[17] ANNUAL NATIONAL PETROCHEMICAL & REFINERS ASSOCIATION (NPRA) MEETING. (52: 1999: Washington D.C., Estados Unidos). Memorias Question and Answer Session on Refining and Petrochemical Technology. 1999. 86-99 p.

[18] SHELL INTERNATIONAL OIL PRODUCTS B.V. OGRC Process Guide. The Hague, Netherlands. 1997. Capítulo 12. 18-19 p.

- [19] CENTENO, G.; TREJO, F.; ANCHEYTA, J.; CARLOS, A. Precipitación de asfaltenos del crudo Maya en un sistema a presión. En: Revista Sociedad Química de México, Vol. 48. No. 3. (2004). 182 p.
- [20] ECOPETROL S.A. Hoja de vida del indicador, Conversión de fondos en unidades de craqueo catalítico. Versión 4. Barrancabermeja, 2010. ECP-VEC-F-017
- [21] ANNUAL NATIONAL PETROCHEMICAL & REFINERS ASSOCIATION (NPRA) MEETING. (AM-03-63: 23-25, Marzo, 2003: San Antonio-Texas, Estados Unidos). Memorias A Case Study in Slurry Fouling: Marathon Ashland Petroleum LLC y RMS Engineering, Inc, 2003. 1-15 p.

BIBLIOGRAFÍA

ANNUAL NATIONAL PETROCHEMICAL & REFINERS ASSOCIATION (NPRA) MEETING. (52: 1999: Washington D.C., Estados Unidos). Memorias Question and Answer Session on Refining and Petrochemical Technology. 1999. 86-99 p.

ANNUAL NATIONAL PETROCHEMICAL & REFINERS ASSOCIATION (NPRA) MEETING. (AM-03-63: 23-25, Marzo, 2003: San Antonio-Texas, Estados Unidos). Memorias A Case Study in Slurry Fouling: Marathon Ashland Petroleum LLC y RMS Engineering, Inc, 2003. 1-15 p.

ANNUAL NATIONAL PETROCHEMICAL & REFINERS ASSOCIATION (NPRA) MEETING. (Washington, Estados Unidos). Memorias Question & Answer Session – 1990-1999 Transcripts, 1899.

ANNUAL NATIONAL PETROCHEMICAL & REFINERS ASSOCIATION (NPRA) MEETING. (56: 15-18, Octubre, 2002: Philadelphia, Pennsylvania, Estados Unidos). Memorias Technology Q&A Transcripts, 2002.

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

ECOPETROL S.A. Manual de Descripción del Proceso de la Unidad GCB – Unidad de craqueo catalítico Modelo IV. RWD Technologies. Versión 0. Barrancabermeja. 2008.

ECOPETROL S.A. Manual de Descripción del Proceso de la Unidad GCB – Unidad de Cracking UOP 1. RWD Technologies. Revisión 1. Barrancabermeja. 2007.

ECOPETROL S.A. Manual de Descripción del Proceso de la Unidad GCB – Unidad FCCU Orthoflow. RWD Technologies. Versión B. Barrancabermeja. 2014.

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

GARCIA SWOFFORD, S. Chemical treatment to solve FCCU problems. En: PTQ, (Jul, 2004). 57-61 p.

HUNT, D.; MINYARD, B; KOEBEL, J. Minimising FCC slurry exchanger fouling. En: PTQ Q1, (Ene, 2008). 1-7 p.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEAT EXCHANGER FOULING AND CLEANING – CHALLENGES AND OPORTUNITIES. (3: 5-10, Junio, 2005: Kloster Irsee, Alemania). Memorias Blending effects on fouling of four crude oils. Alemania: Engineering Conferences International (ECI Symposium), Vol. RP2, 2005. 37 p.

PÉREZ, P.N. Curso de fraccionamiento, fraccionadora principal, unidad de recobro de vapores de Pedro Nel Pérez. Capítulo 3.3. Formación de coque. 56-70 p.

SADEGHBEIGI, R. Fluid Catalytic Cracking Handbook, Design, Operation and Troubleshooting of FCC Facilities. 2da edición. Houston, Texas, Estados Unidos: Butterworth-Heinemann, 2000. 52-54, 244-248 p.

SHELL INTERNATIONAL OIL PRODUCTS B.V. OGRC Process Guide. The Hague, Netherlands. 1997.

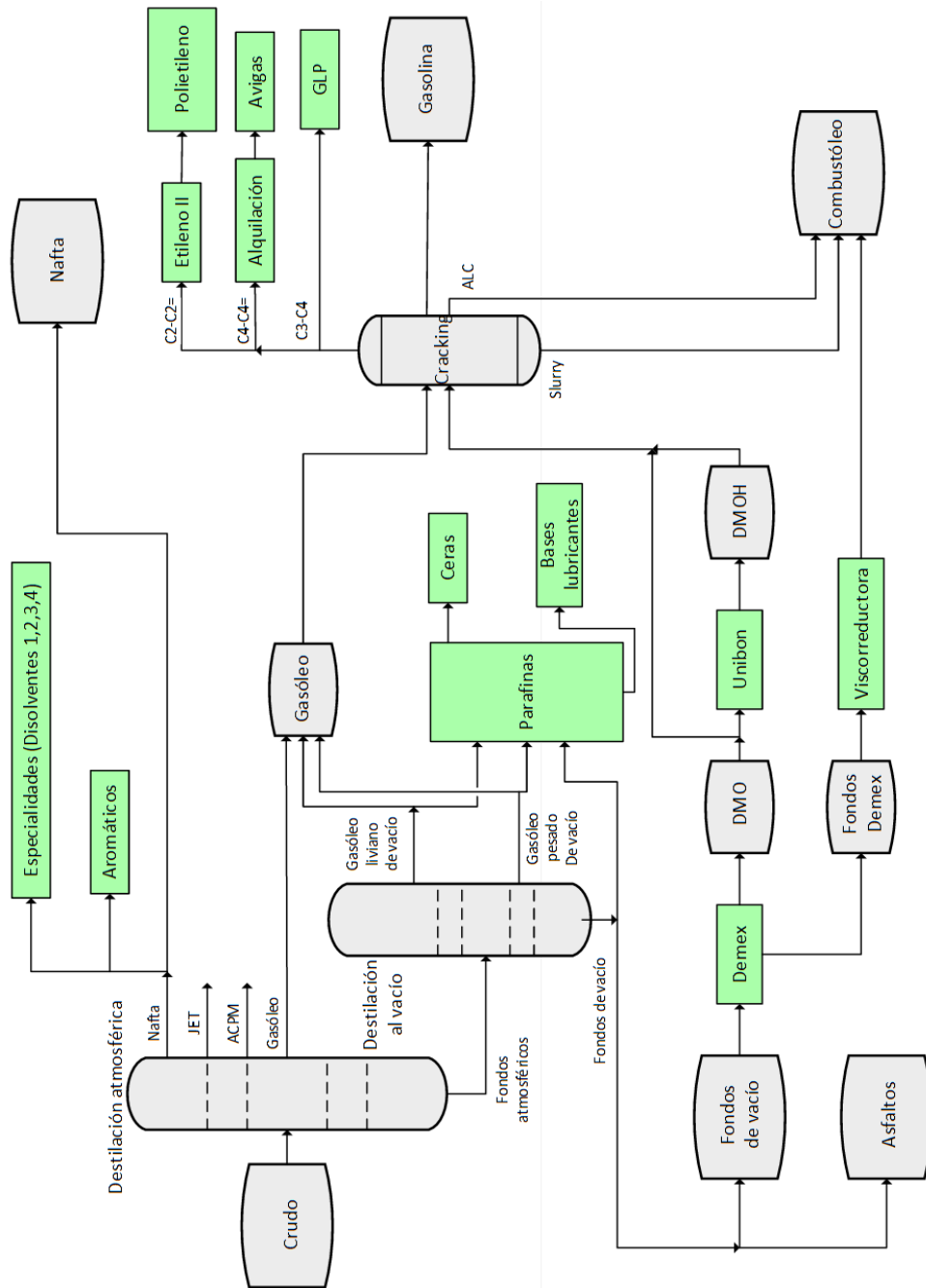
SPIECKER, P.M. GAWRYS, K.L. KILPATRICK, P.K. Aggregation and solubility behavior of asphaltenes and their subfractions. En: Journal of Colloid and Interface Science. Vol. 267. (2003). 178-193 p.

UOP. Fluid Catalytic Cracking Process – FCC. Unit No.1. 1998.

WIEHE, I.A. Process Chemistry of Petroleum Macromolecules. 1ra edición. Gladstone, New Jersey: CRC Editorial, Taylor and Francis Group, 2008. 16, 281 p.

ANEXOS

Anexo A. Diagrama general de las líneas de producción de la Refinería General Gerencia Barrancabermeja (GRB)



Anexo B. 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)***

* La unidad de Modelo IV fue diseñada por Exxon Research and Engineering y construida por Foster Wheeler Corporation. La construcción empezó en junio de 1953 y fue concluida en septiembre de 1954. Inició producción el 13 de septiembre de 1954.

** La unidad Orthoflow es una marca registrada por KBR.

*** Las unidades UOP I y II fueron diseñadas por Universal Oil Products. La unidad UOP I, fue diseñada e inició su construcción en el año 1974 y puesta en funcionamiento en el año 1979. La UOP II fue diseñada en el año 1990 e inició su construcción el año de 1991 y puesta en marcha en 1995.

Anexo C. Capacidad de carga total de diseño de las plantas URC de la GRB

Capacidad de carga máxima (Unidades URC de la GRB)	Barriles por día (BPD)
Modelo IV	17.000*
Orthoflow	27.000**
UOP I	27.000***
UOP II	35.000****

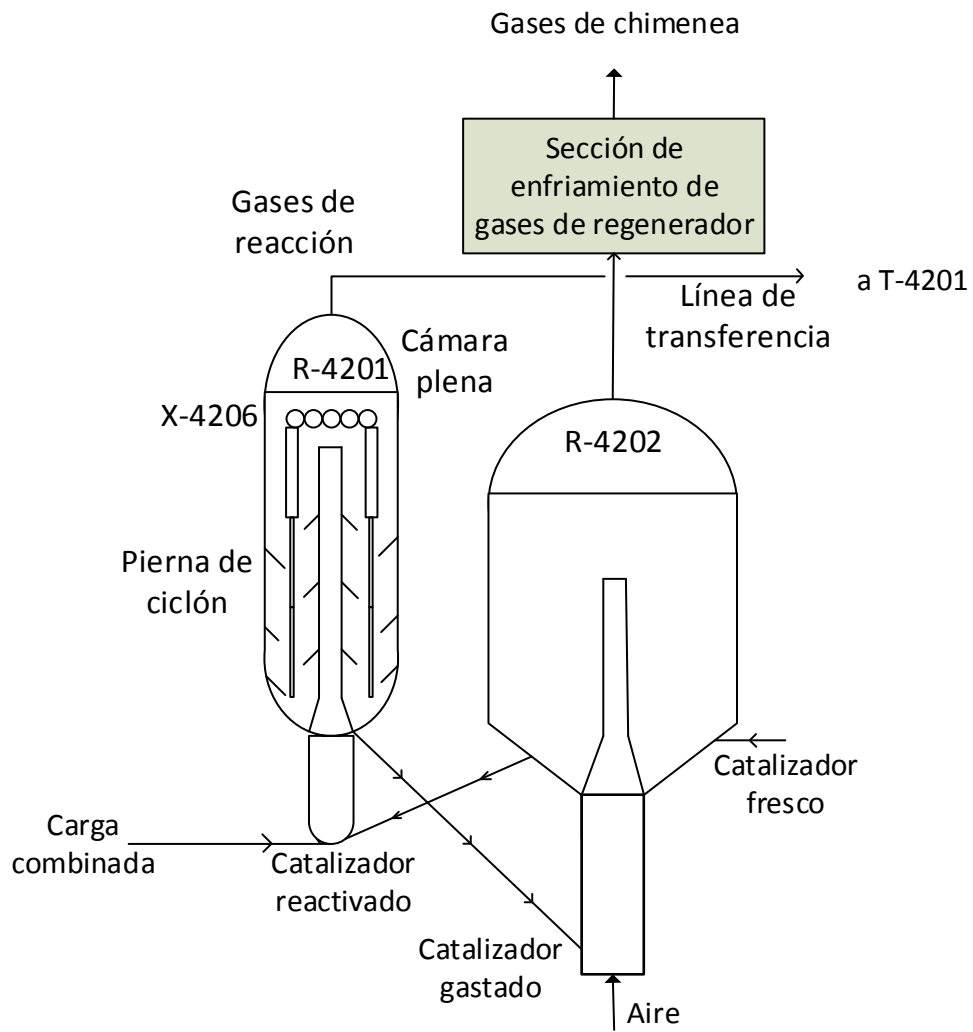
* La unidad Modelo IV carga generalmente gasóleo de las topping y Crudo Reducido Cusiana (CRC), además de otros gases externos proveniente de las demás unidades.

** La unidad de Orthoflow carga generalmente gasóleo, DMO, DMOH, CRC. Además, recibe 300 Kscfh de gases externos, 3.000 BPD de butanos externos y 500 BPD de slop.

*** La unidad de UOP I carga generalmente gasóleo, DMO, DMOH, CRC.

**** La unidad de UOP II carga generalmente gasóleo, DMO, DMOH y CRC. Además, recibe 500 Kscfh de gases externos, 5.000 BPD de butanos externos y 1.500 BPD de slop.

Anexo D. Sección catalítica - reactor (R-4201) y regenerador (R-4202)



Anexo E. Fragmentos de coque en los filtros de las bombas P-4203 A/B de la de la unidad UOP II (U-4200)



Anexo F. Carga a la unidad UOP II (U-4200)



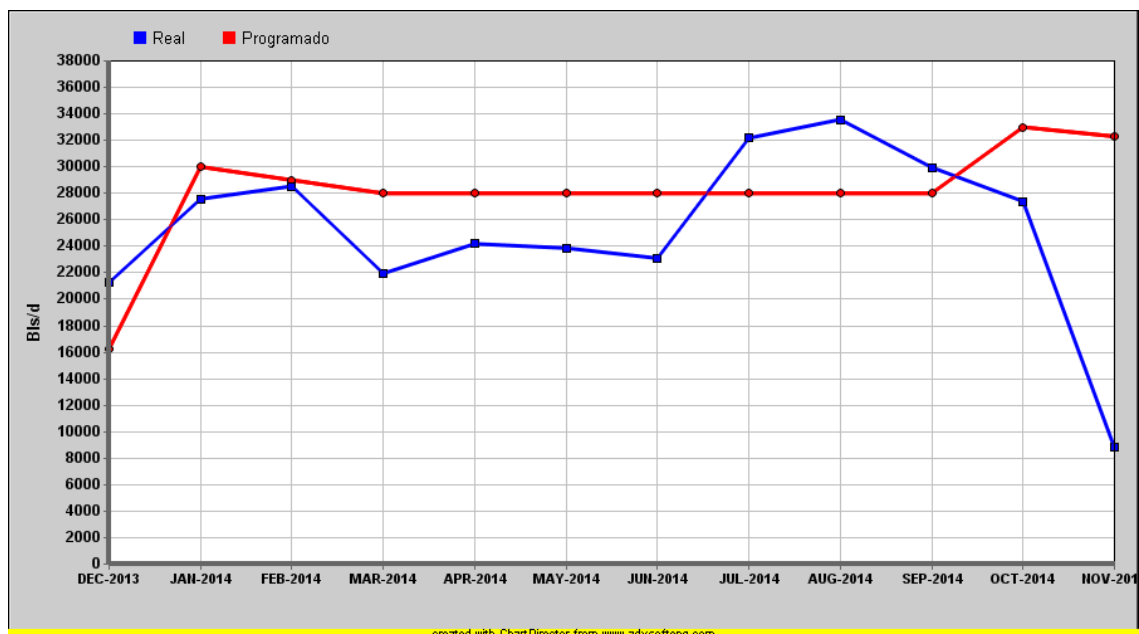
MODULO DE GESTION Comportamiento Mensual



07/11/2014
13:07:53

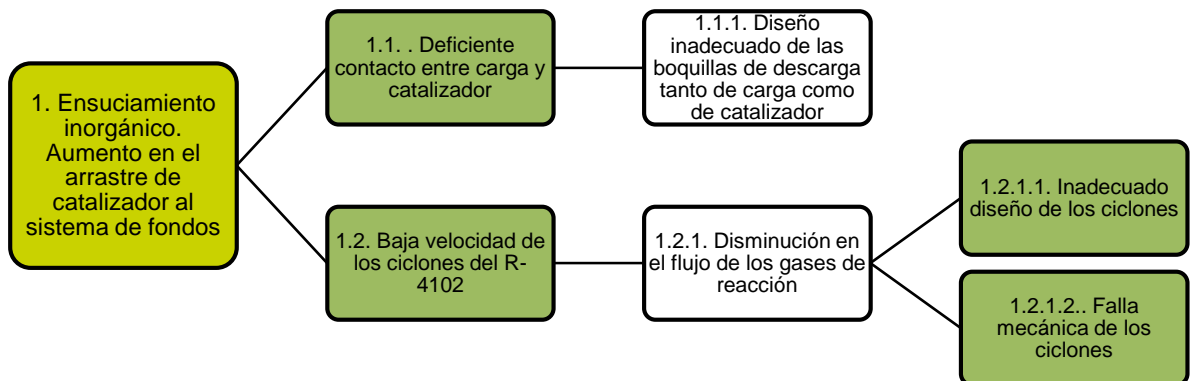
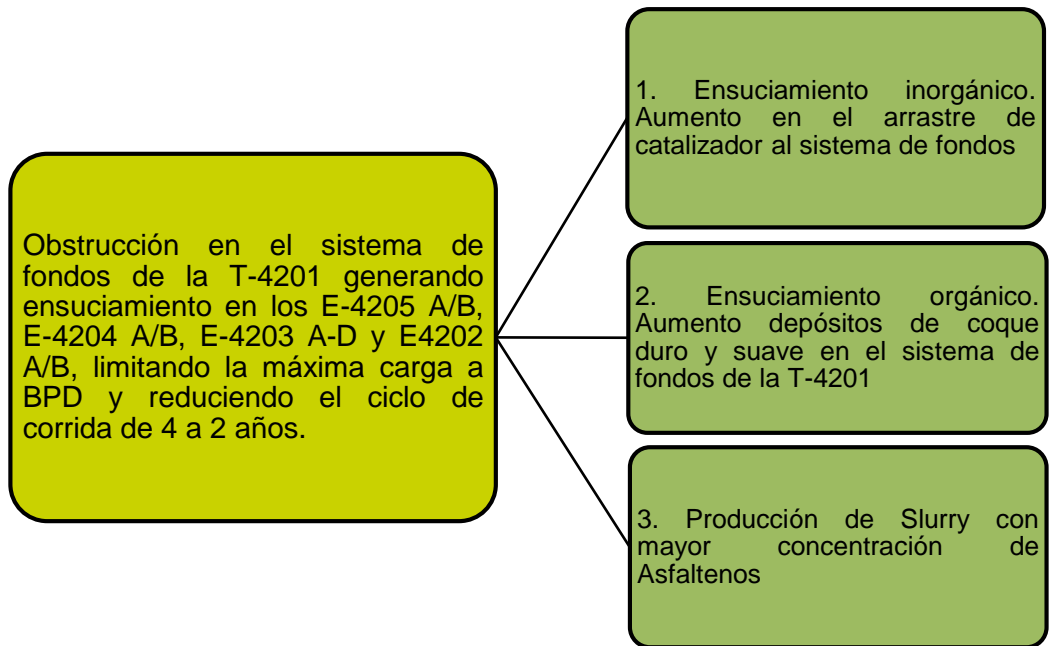
Fecha : 2014

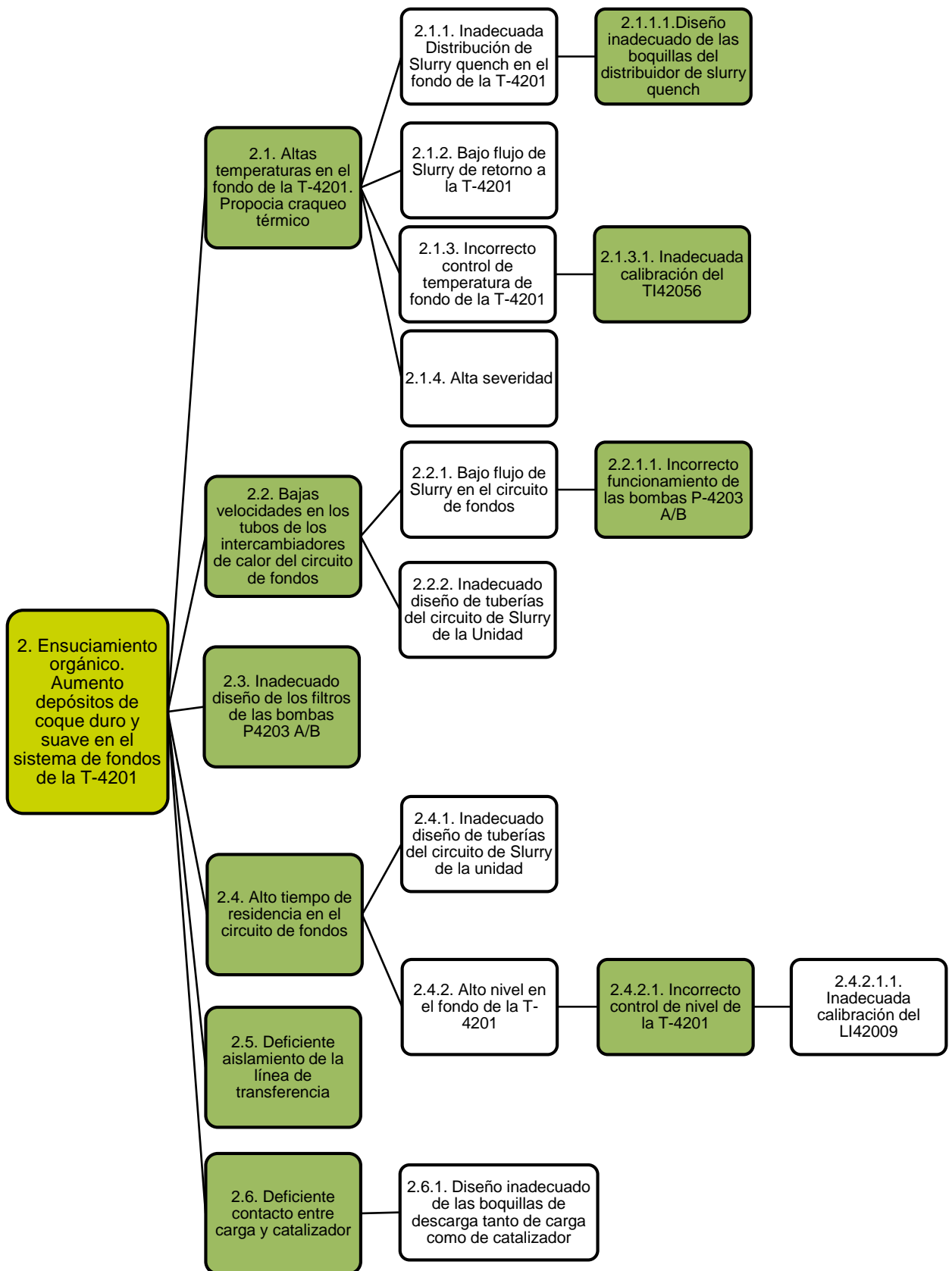
Indicador Carga a URCs - DEPARTAMENTO DE CRACKING II*

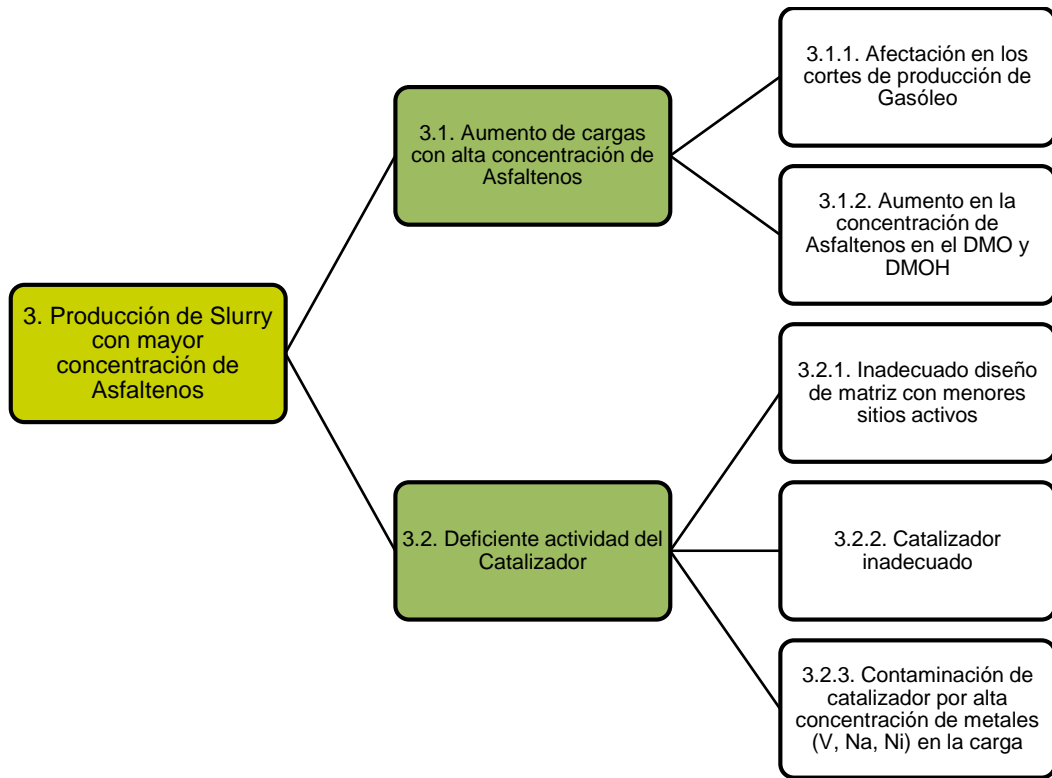


* Tomado de Comportamiento mensual – Modelo de gestión (RIS)

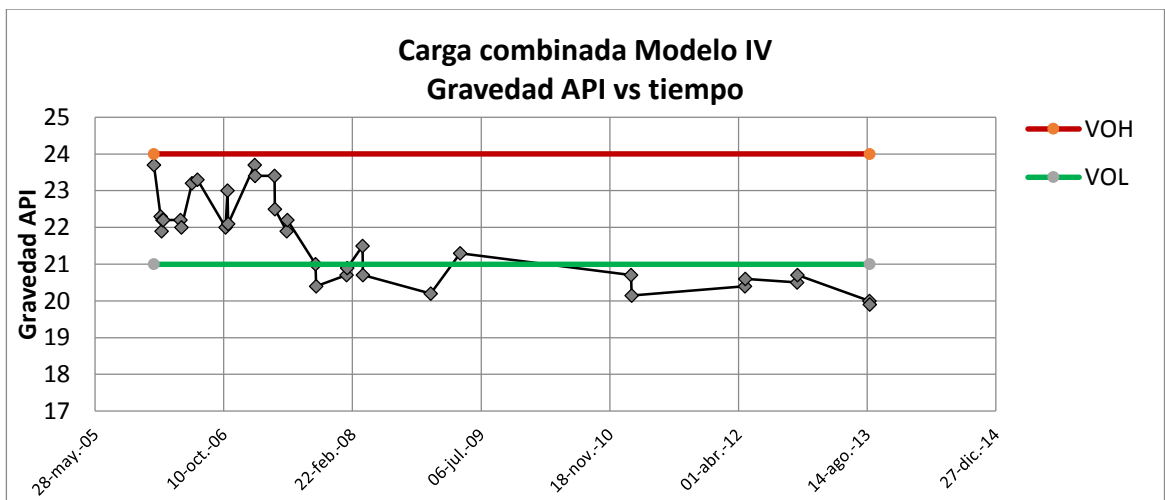
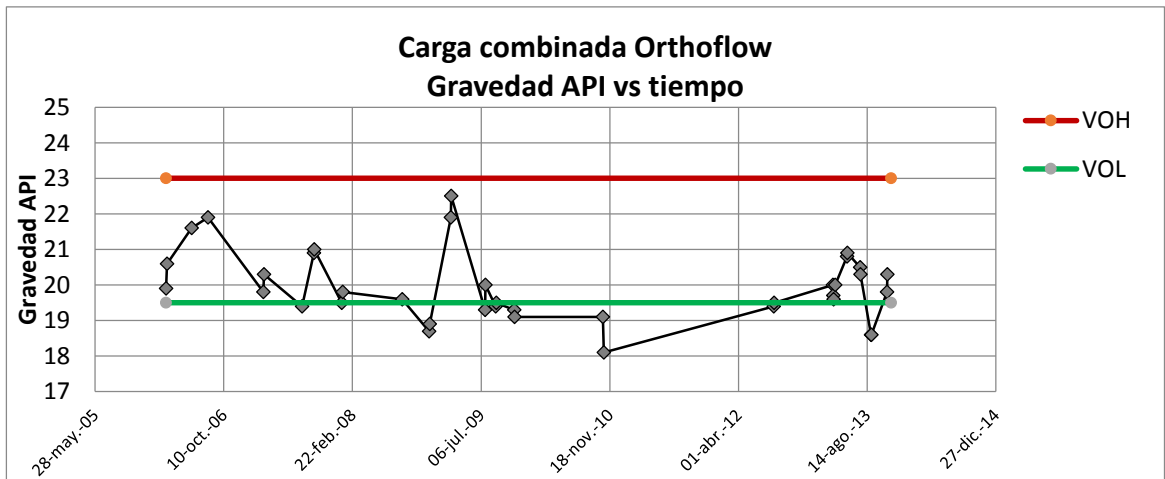
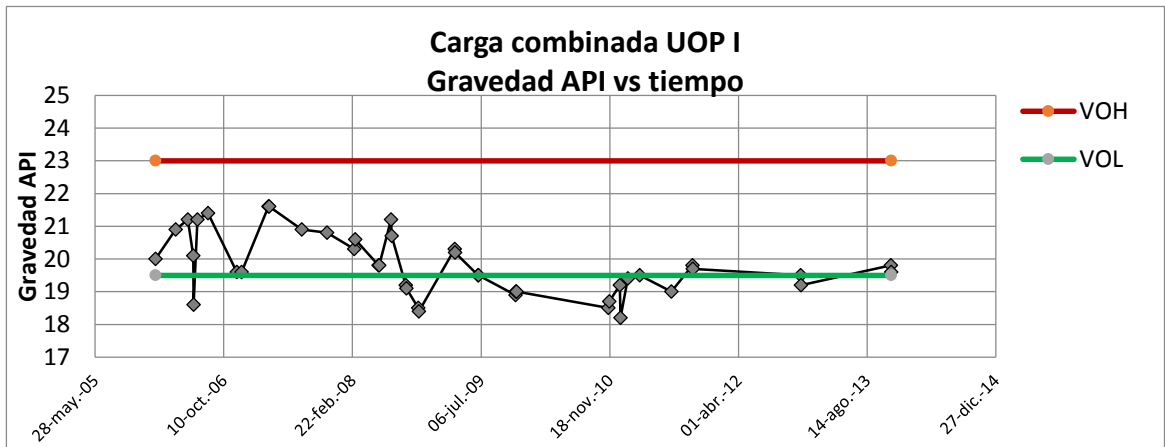
Anexo G. Diagrama de árbol de posibles causas que pueden afectar el desempeño operacional del sistema de fondos



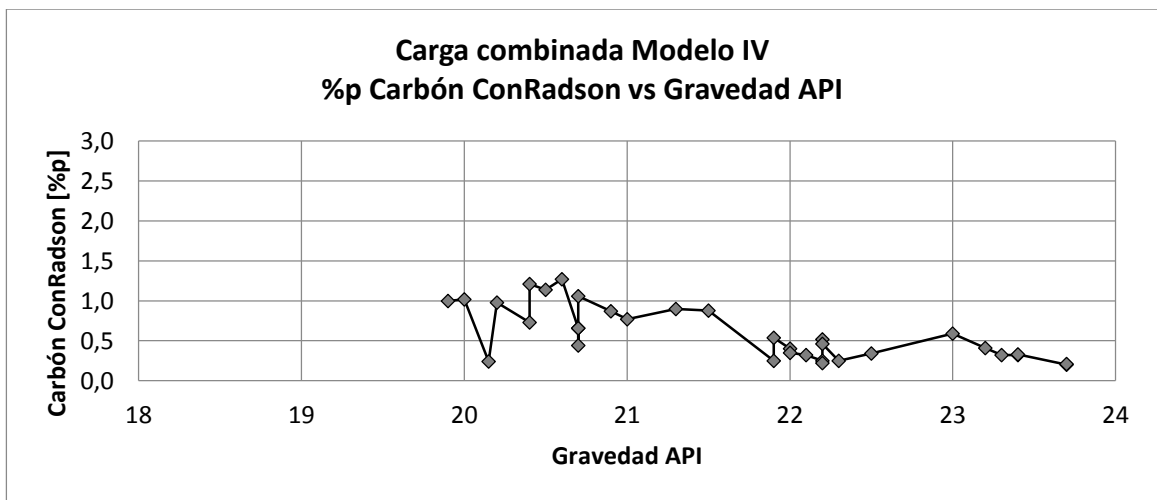
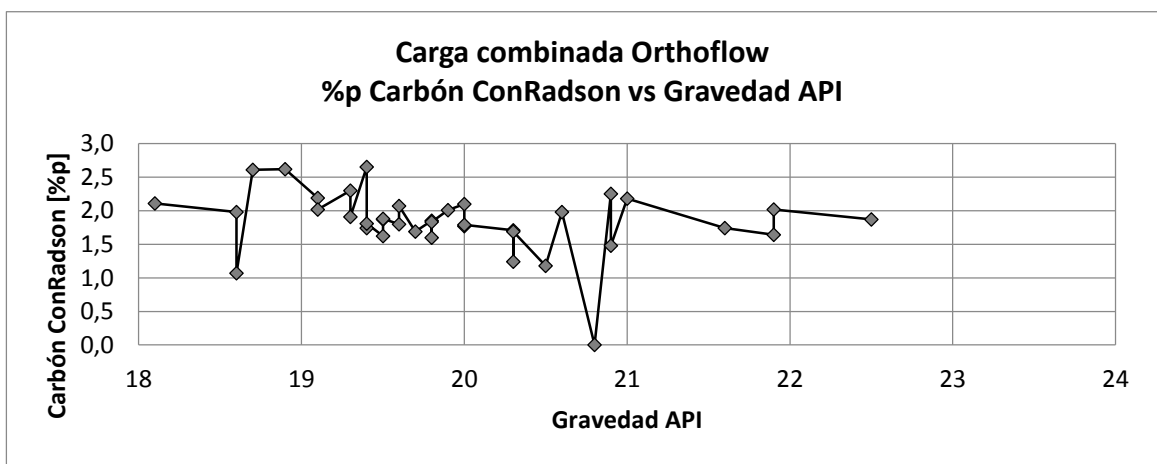
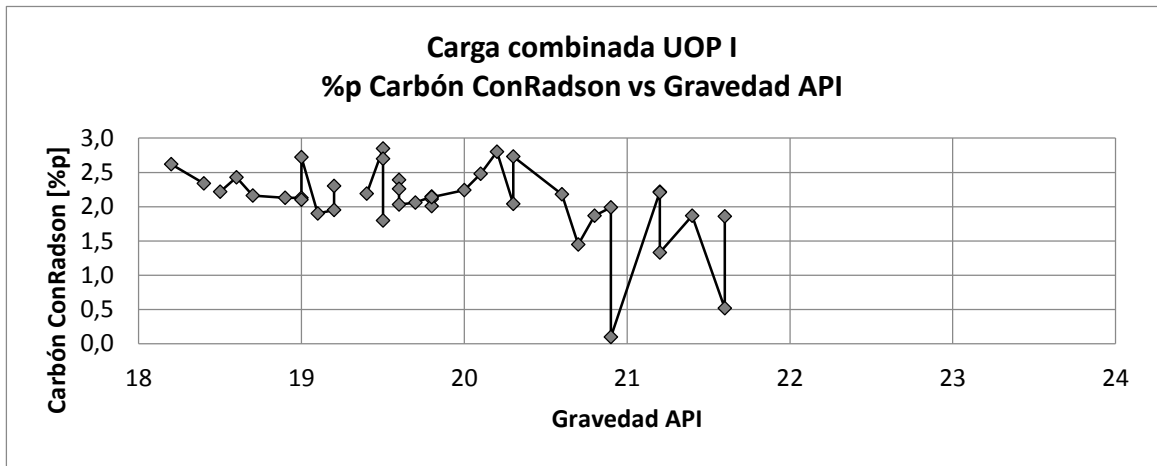




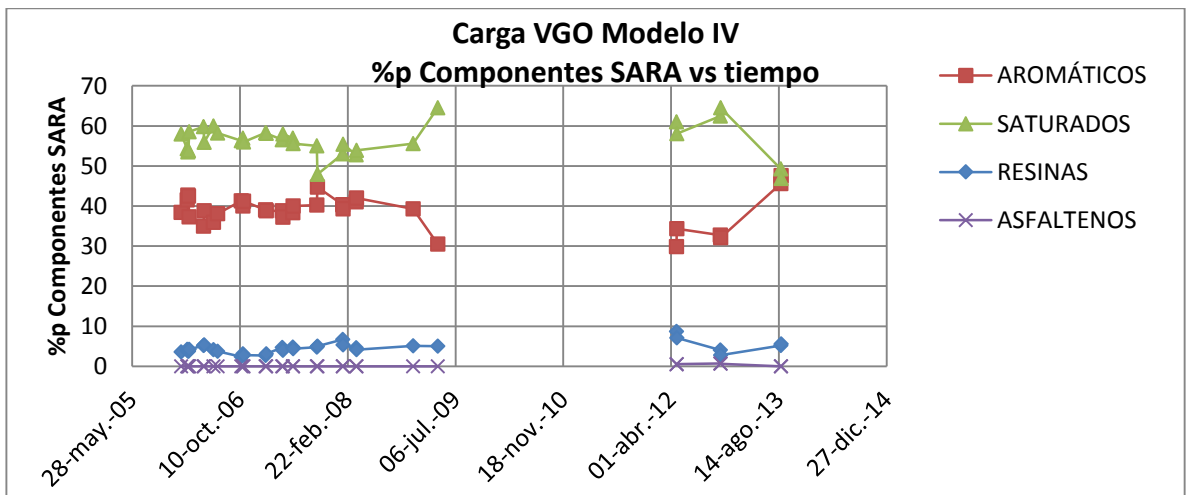
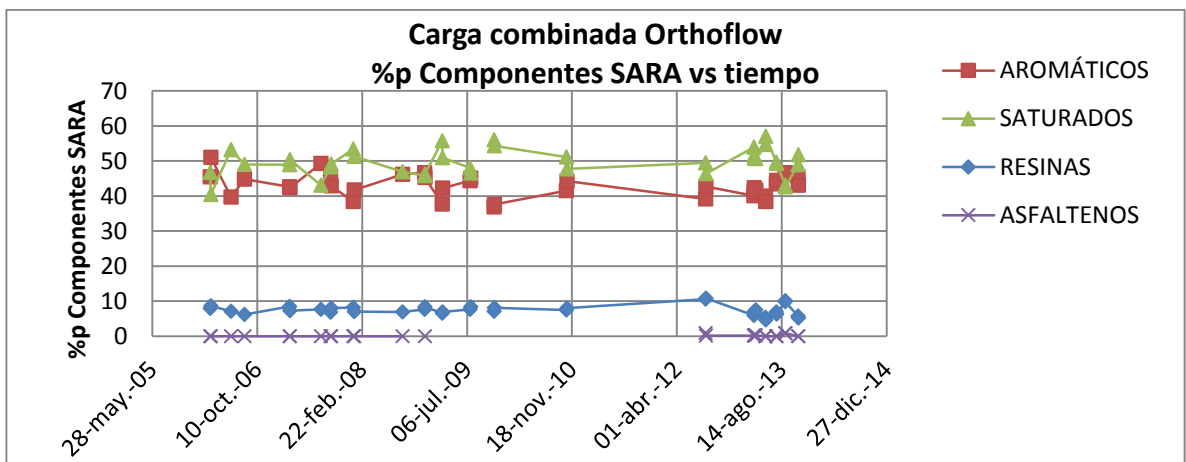
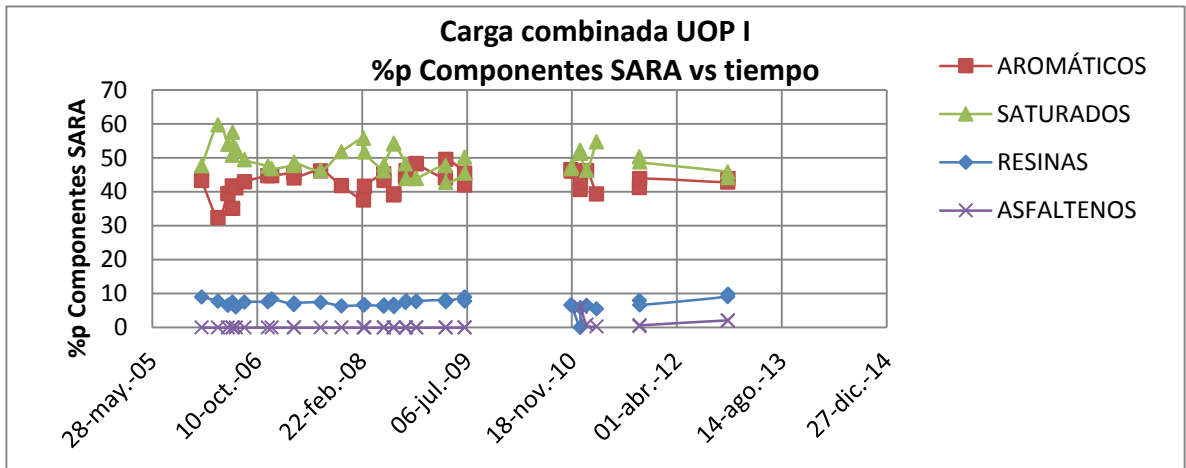
Anexo H. Gravedad API vs tiempo de la carga combinada a las unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV



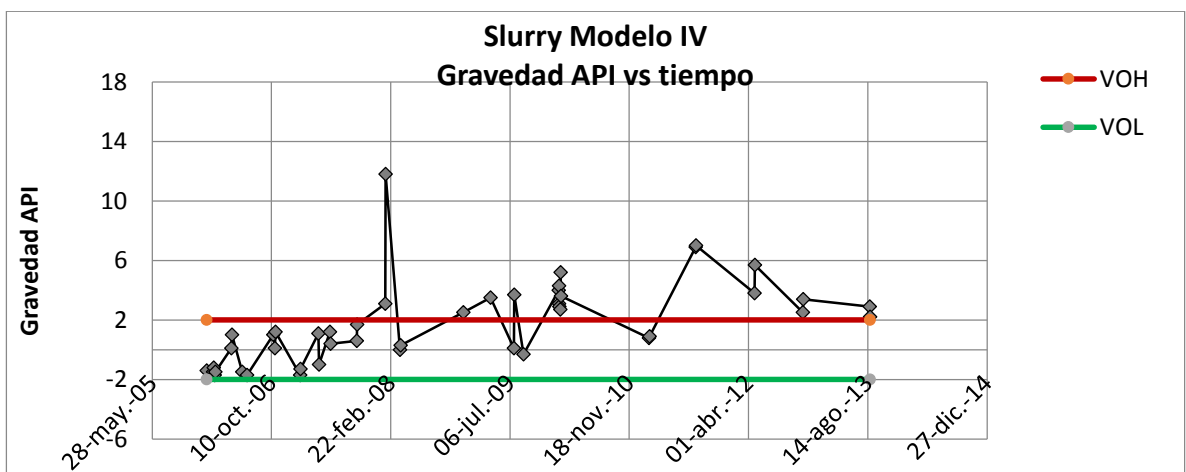
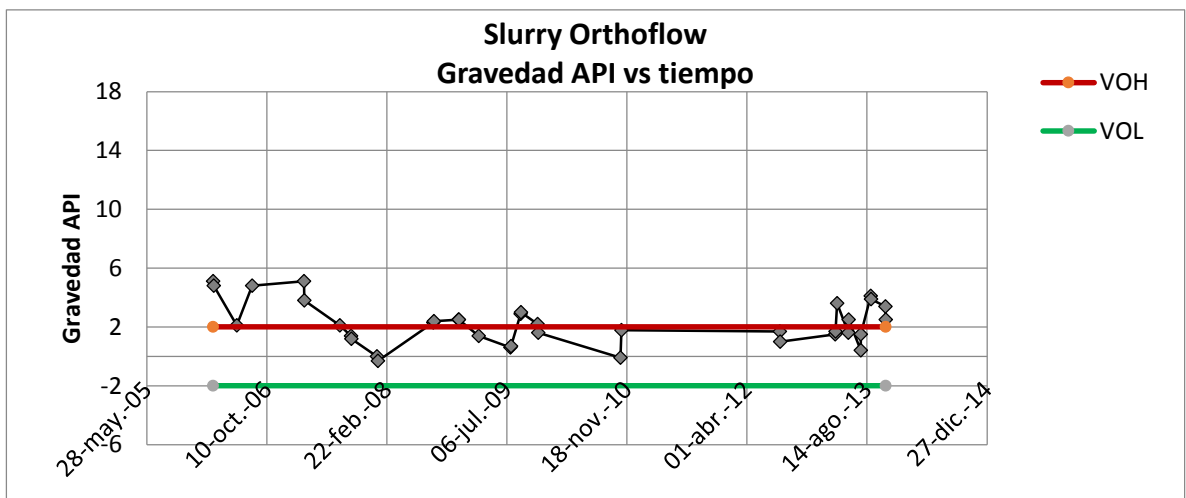
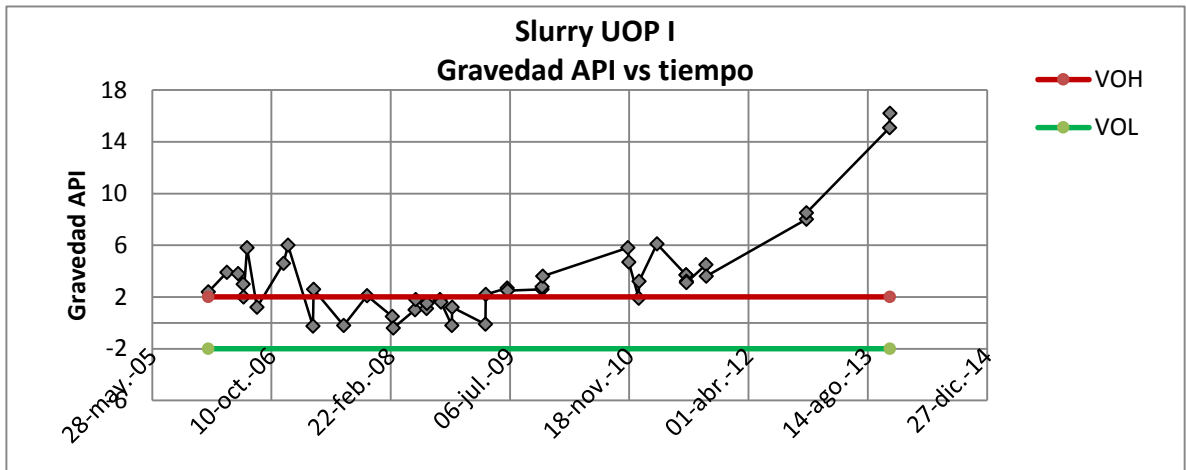
Anexo I. Carbón ConRadson vs °API de la carga combinada a las unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV



Anexo J. Composición másica de la carga combinada, SARA vs tiempo (unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV)

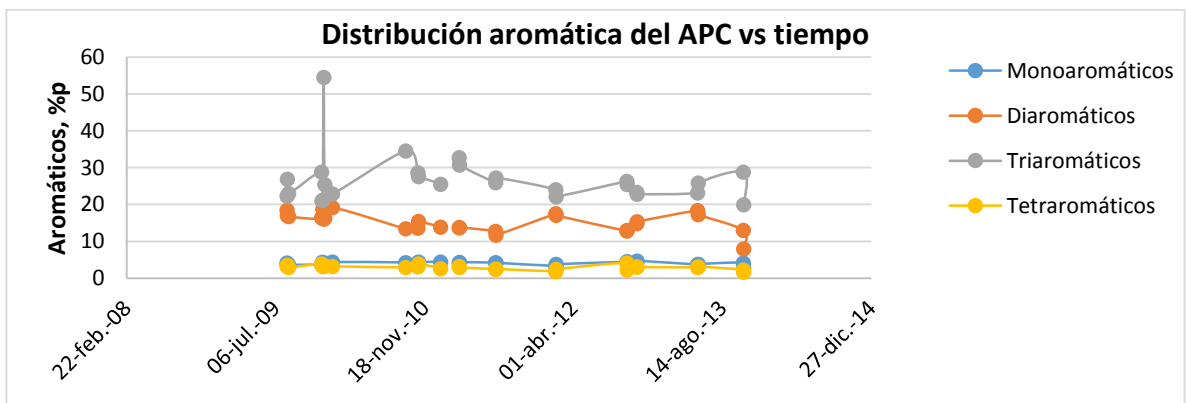
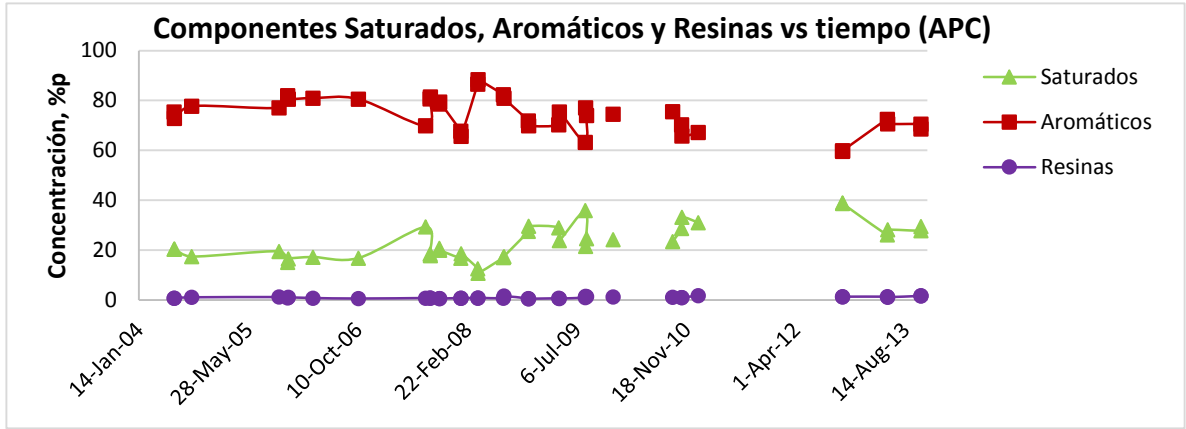


Anexo K. Gravedad API vs tiempo del slurry de las unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV

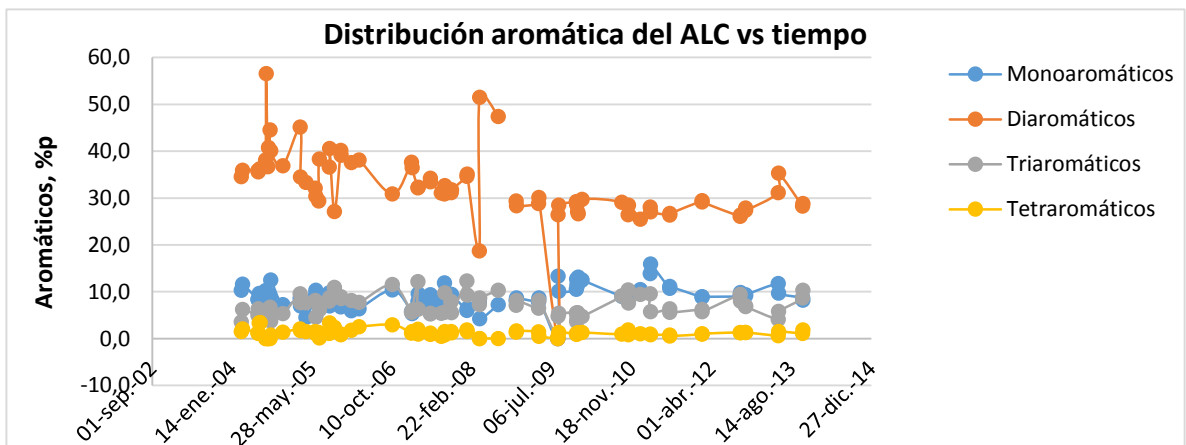


Anexo L. Concentración máscica del corte ALC y APC de la unidad UOP II

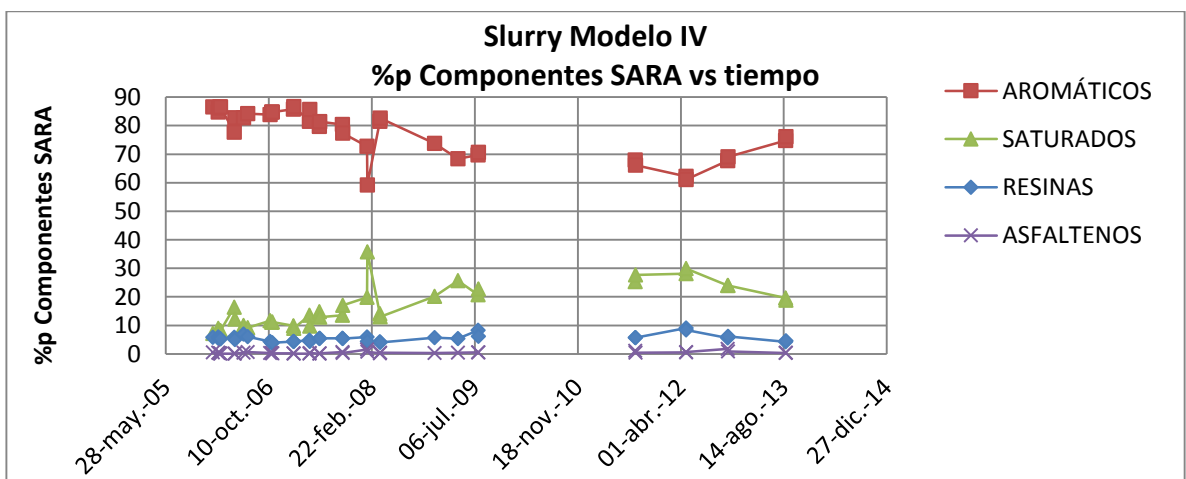
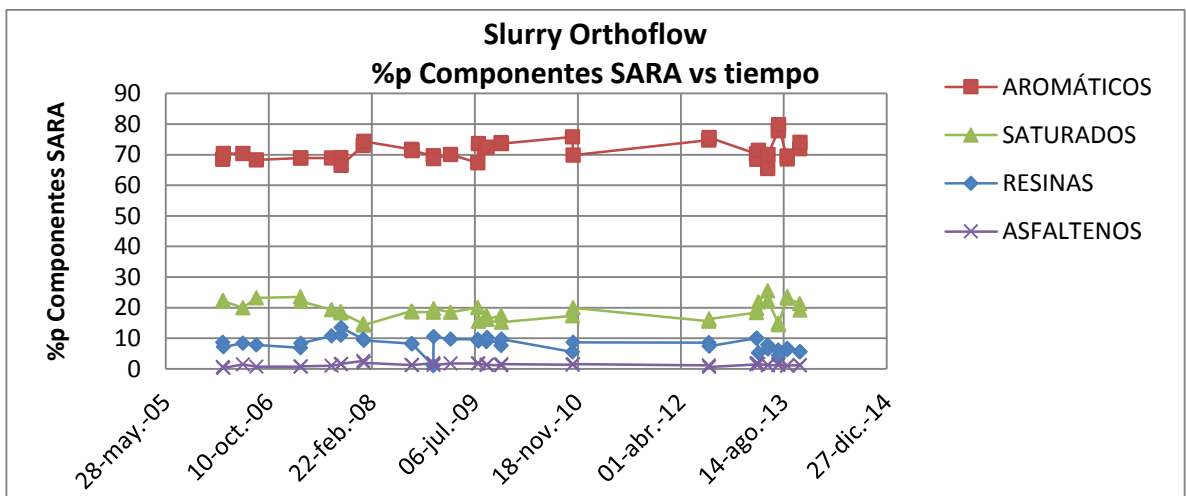
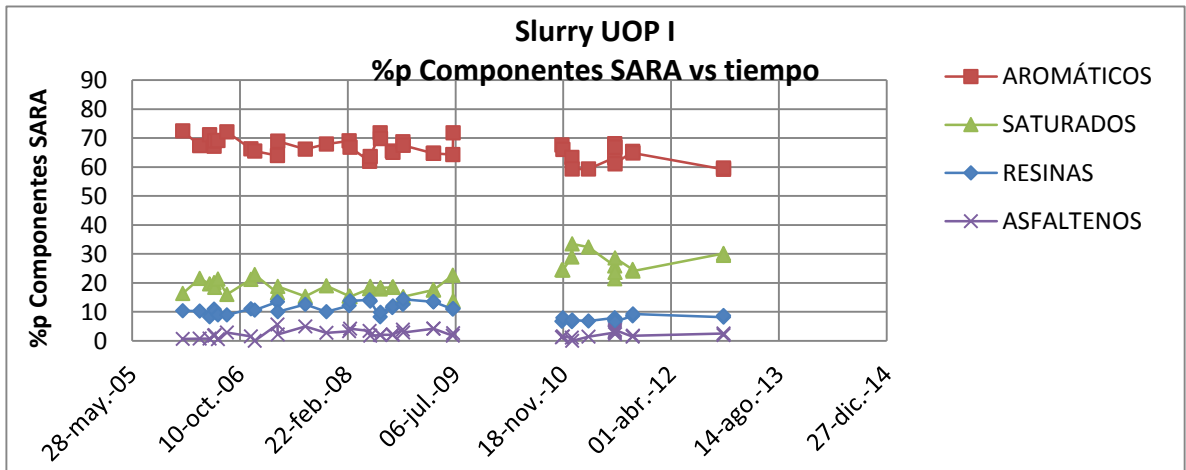
- Aceite Pesado de Ciclo (APC):



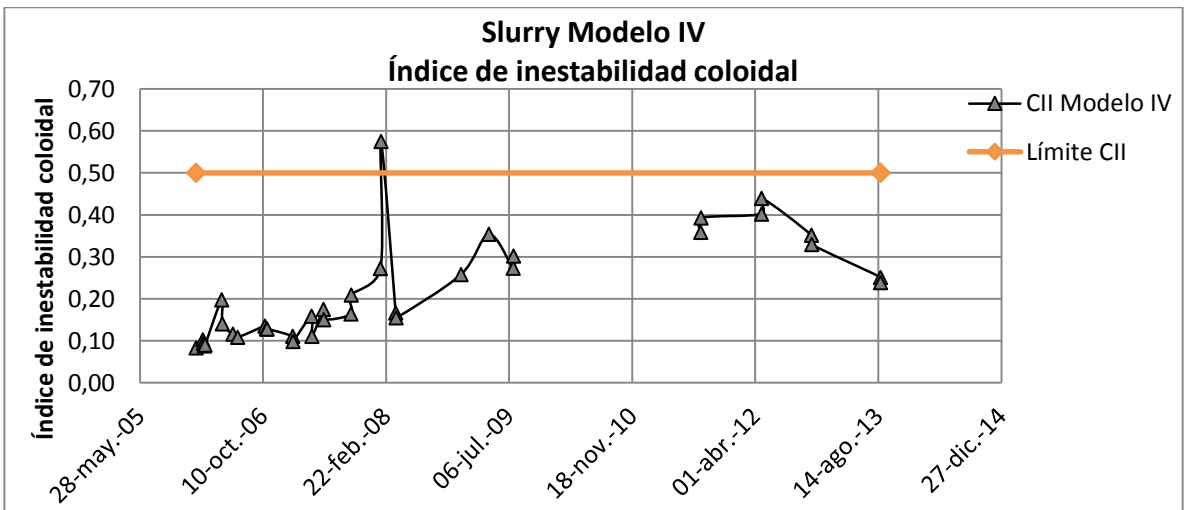
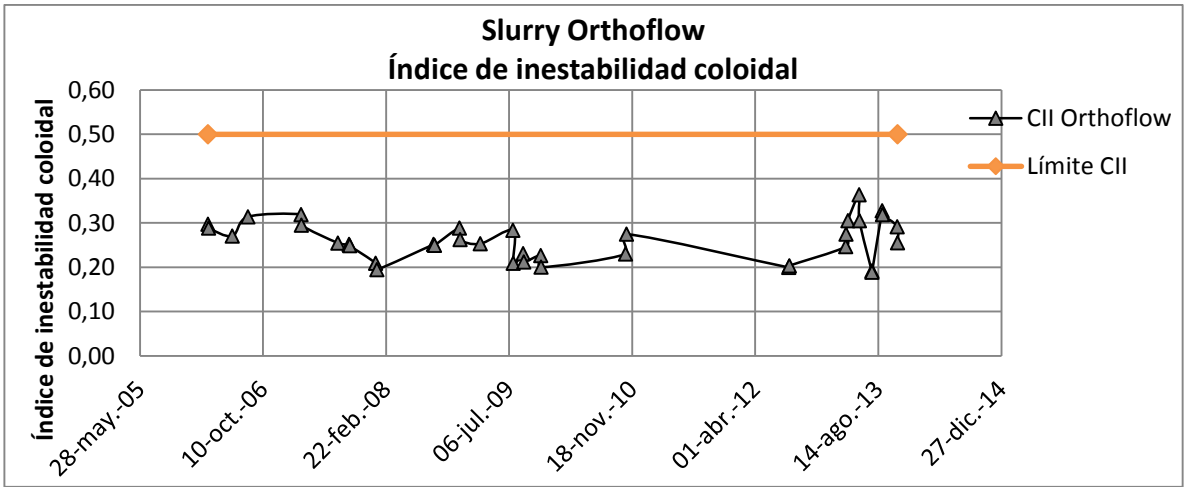
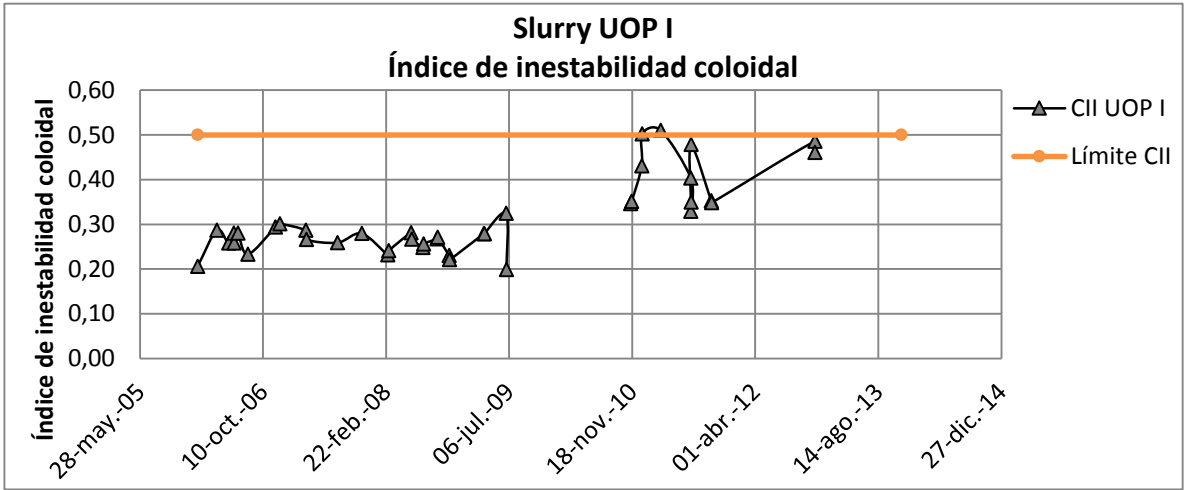
- Aceite Liviano de Ciclo (ALC):



Anexo M. Composición másica del slurry, SARA vs tiempo (unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV)



Anexo N. CII vs tiempo del slurry de las unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV



Anexo O. Resultados fragmentos coque análisis muestra coque UOP II (ID 200976969)

- Resultados Extracción Soxhlet muestra original SID 200976969:

MUESTRA SÓLIDA	IDENTIFICAC. MUESTRA	COQUE FONDOS UOPII
SUBMISSION ID 100161160	FECHA DE MUESTREO	03-abr-14
Sample ID	Unidad	200976969
<i>Análisis de Laboratorio</i>		
PREPARACIÓN DE MUESTRA SOLIDAD (EXTRACCION)		
FRACCIÓN ORGANICA	% Peso	8,730
FRACCIÓN INORGANICA	% Peso	91,26

- Resultados Análisis SARA fracción orgánica SID 200979066:

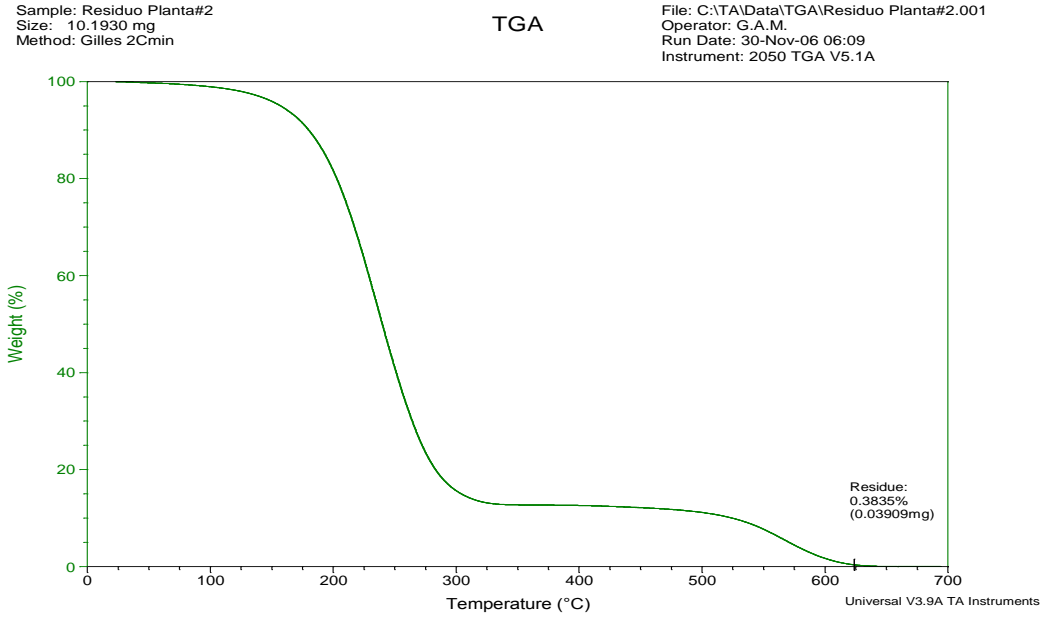
MUESTRA SÓLIDA	IDENTIFICAC. MUESTRA	COQUE FONDOS UOPII
SUBMISSION ID 100161160	FECHA DE MUESTREO	11-abr-14
Sample ID	Unidad	200979066
<i>Análisis de Laboratorio</i>		
ANALISIS SARA		
SATURADOS	% Peso	19,06
AROMATICOS	% Peso	68,89
RESINAS	% Peso	7,010
ASFALTENOS	% Peso	2,870
RETENCION EN COLUMNA	% Peso	0
INSOLUBLES EN TOLUENO	% Peso	0
PORCENTAJE RECUPERADO	% Peso	97,83
PORCENTAJE PERDIDAS LIVIANOS	% Peso	2,160
PORCENTAJE TOTAL (RECUP+PERDIDAS)	% Peso	99,99

- Resultados Análisis semi-cuantitativo por FRX fracción inorgánica SID 200979067:

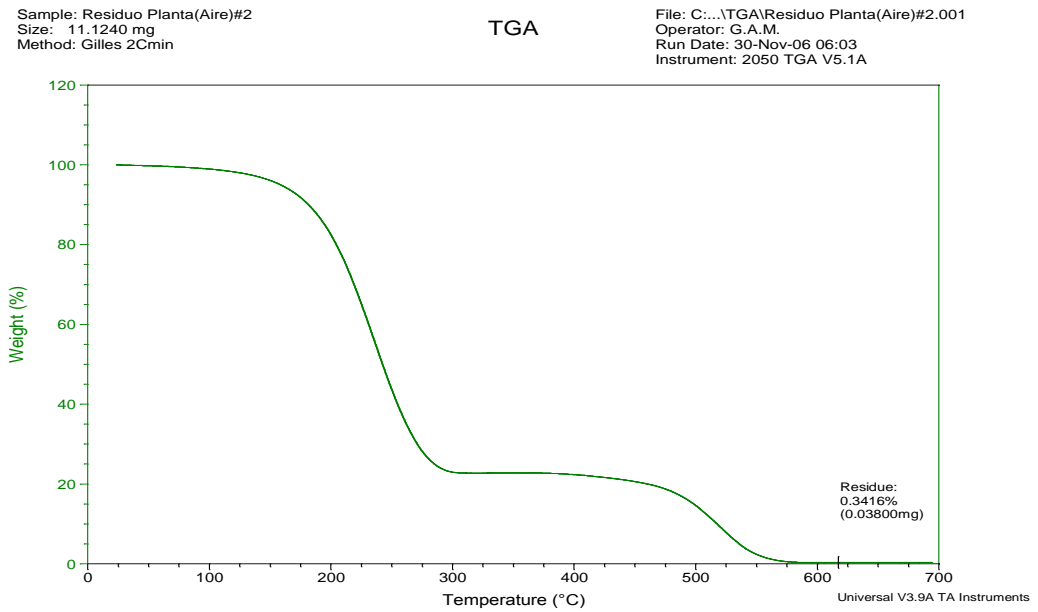
200979067	
Fracción Inorgánica Muestra :Coque Fondo UOP II	
Oxidos	Concentración(% peso)
SiO2	46,80%
Al2O3	35,06%
La2O3	3,99%
SO3	3,94%
V2O5	2,04%
Fe2O3	1,59%
Cl	1,49%
P2O5	1,46%
NiO	1,14%
CaO	0,96%
TiO2	0,47%
K2O	0,16%
ZrO2	0,02%
SrO	0,01%

Anexo P. Resultados análisis TGA del slurry unidad UOP II (ID 101224082)

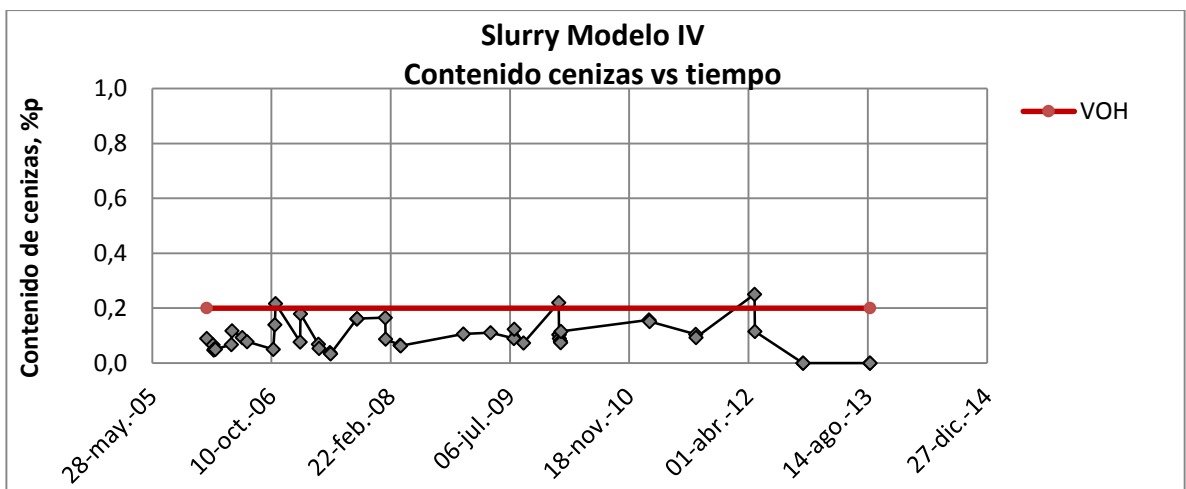
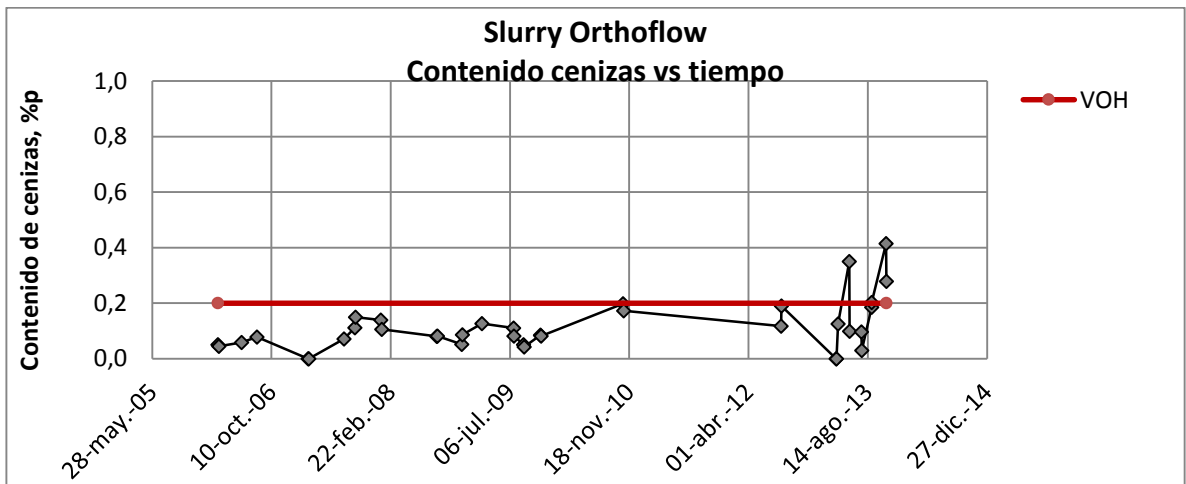
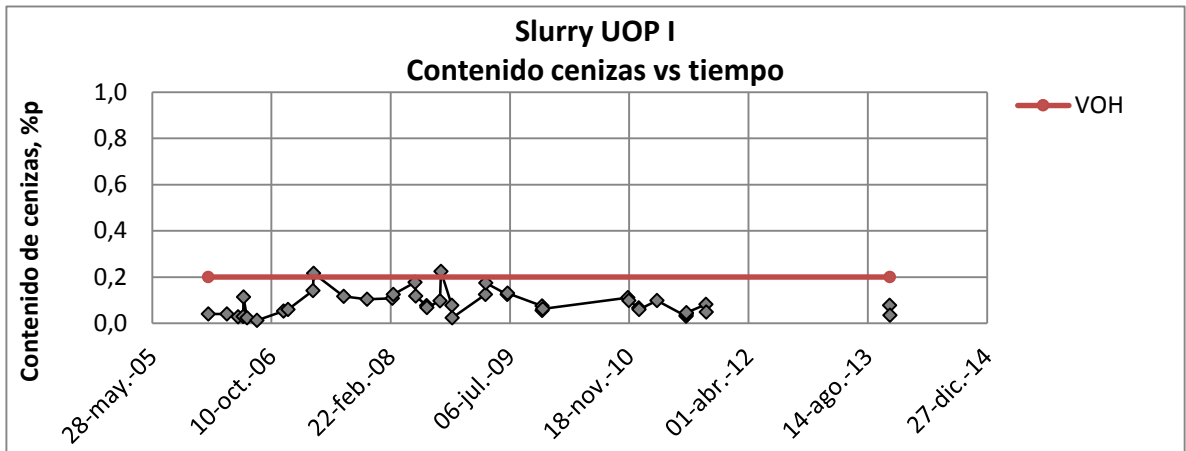
- Atmósfera inerte (Eyección de Nitrógeno)



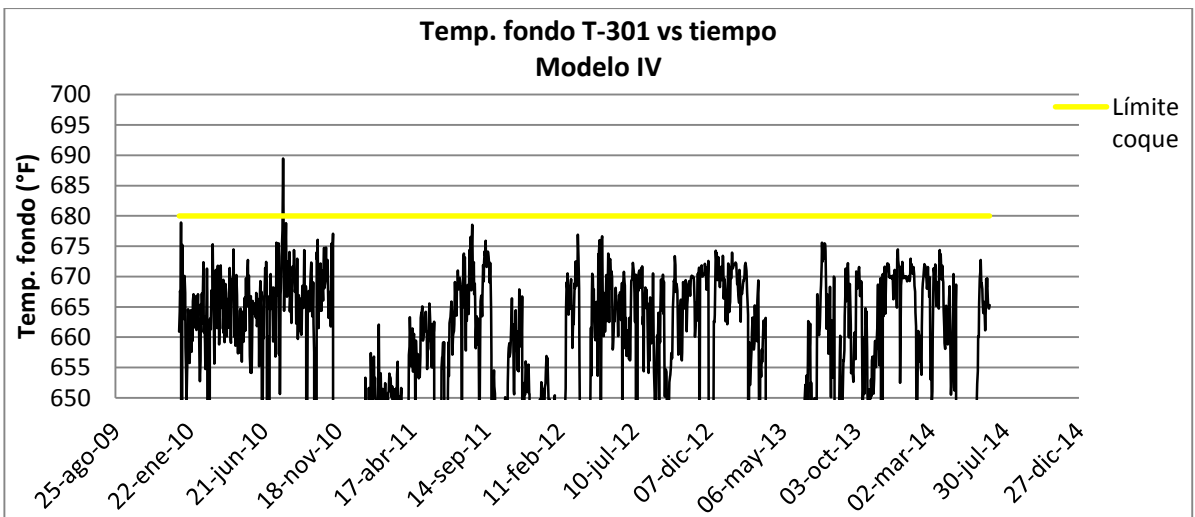
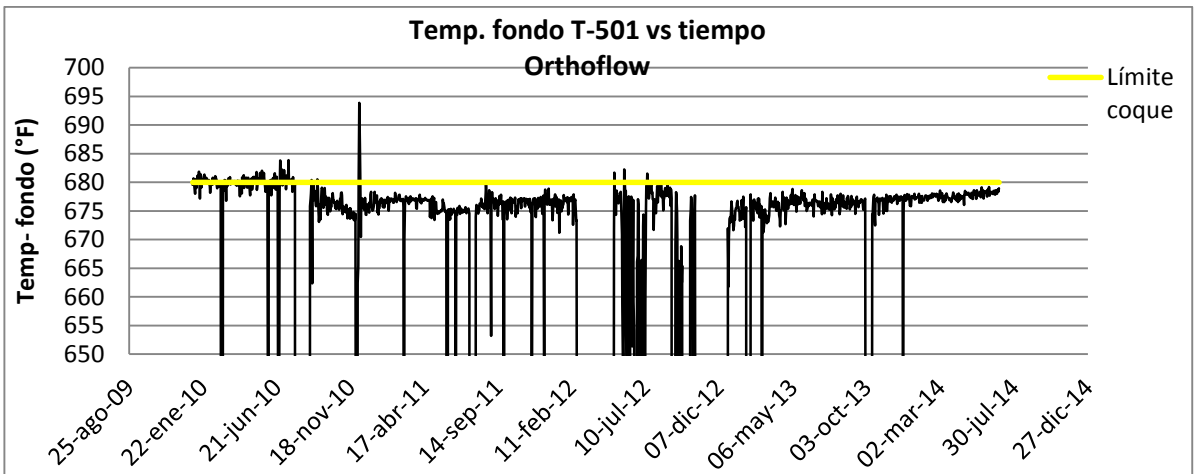
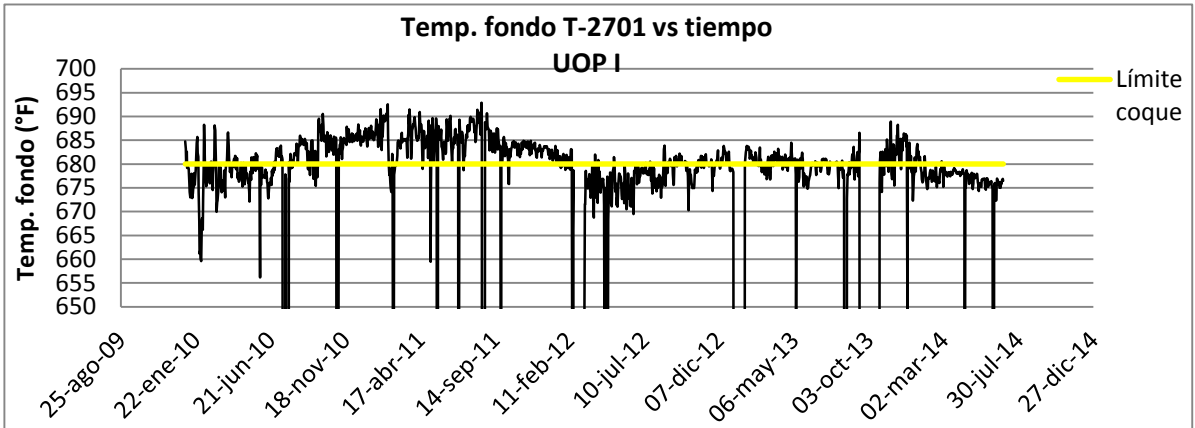
- Atmósfera normal (Aire)



Anexo Q. Contenido de cenizas vs tiempo del slurry de las unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV

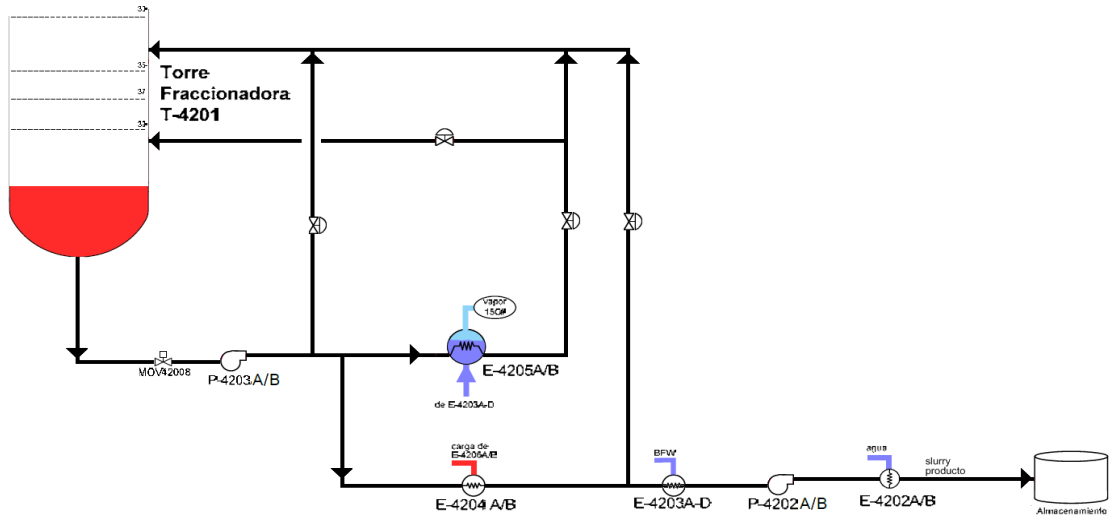


Anexo R. Temperatura del fondo de la torre fraccionadora principal vs tiempo de las unidades UOP I, Orthoflow y Modelo IV

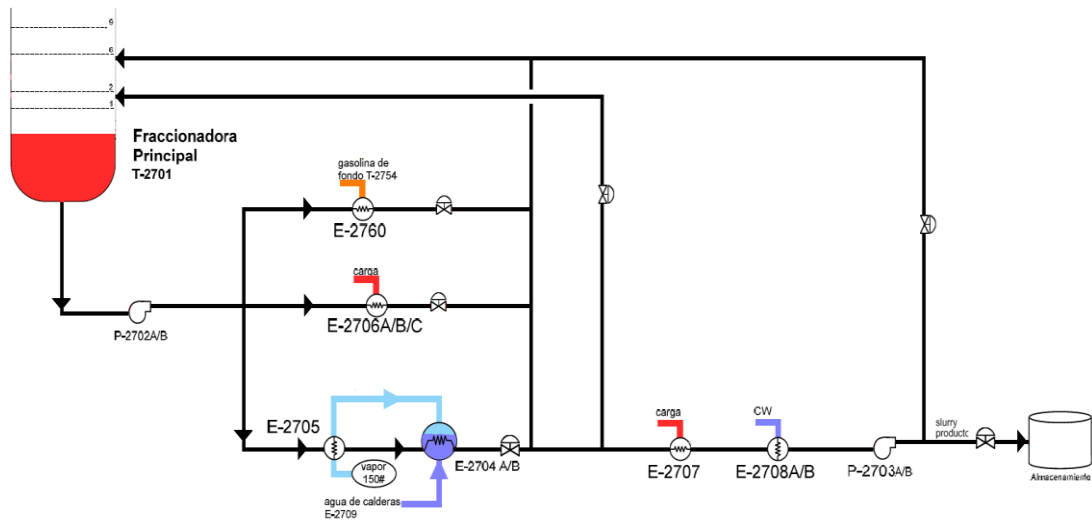


Anexo S. Configuración del sistema de fondos de las unidades FCC UOP II, UOP I, Orthoflow y Modelo IV

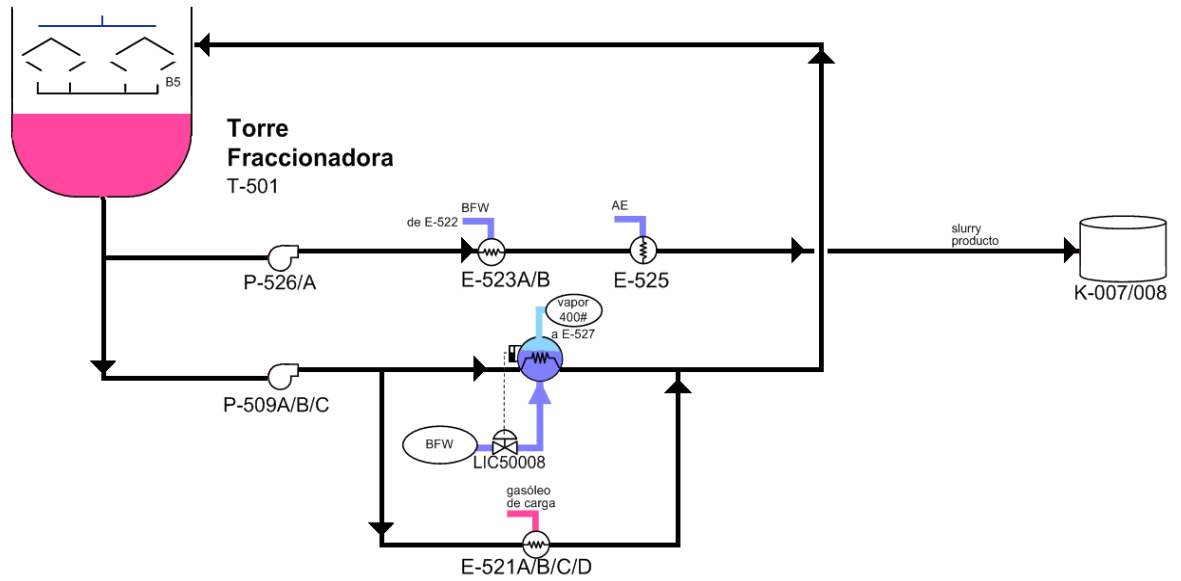
- Sistema de fondos UOP II



- Sistema de fondos UOP I



- Sistema de fondos Orthoflow



- Sistema de fondos Modelo IV

