

**EVALUACIÓN DE ESCENARIOS OPERATIVOS CON CARGA PESADA PARA
MAXIMIZAR EL MARGEN ECONÓMICO EN LA CRACKING ORTHOFLOW DE
LA REFINERÍA BARRANCABERMEJA**

EDGAR JOAQUÍN MARTÍNEZ HERNÁNDEZ



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

2016

**EVALUACIÓN DE ESCENARIOS OPERATIVOS CON CARGA PESADA PARA
MAXIMIZAR EL MARGEN ECONÓMICO EN LA CRACKING ORTHOFLOW DE
LA REFINERÍA BARRANCABERMEJA**

EDGAR JOAQUÍN MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

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

Director:

**Hernando Guerrero Amaya
Ingeniero Químico, Ph.D.**

Co-directora

**Tania Mireya Chanagá Quiroz
Ms. Sc Ingeniero Químico**

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

2016

AGRADECIMIENTO

Quiero dar las gracias a Dios, por iluminar mi camino y permitirme terminar con gran éxito otra etapa más en mi vida.

A ECOPETROL S.A, mi más profundo agradecimiento a por darme la oportunidad de participar en este programa de maestría, en especial a los Ingenieros Orlando Díaz, Ernesto Gomez y Angela Corrales por apalancar estos programas de formación, que nos permiten crecer profesionalmente.

Gracias a la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, a cada uno de los profesores y compañeros de estudio por su apoyo durante las jornadas académicas y fuera de ellas.

A la Ing. Tania Chanaga por su aporte incondicional, dedicación y orientación para guiarme en la realización de este trabajo.

Al Ing. Hernando Guerrero Amaya por la dirección en este proyecto, su constante apoyo profesional y académico para la culminación de este trabajo.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto de grado a mi Esposa Luz Marina, por brindarme una voz de aliento cuando necesité, mis hijas Laura Yamile, Valeria Juliana y Sara Sofia por su apoyo incondicional, paciencia, comprensión, por los momentos de ausencia en aquellas jornadas extensas de trabajo y estudio que no me permitieron compartir con ellas.

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN..... | 16 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 18 |
| 2. OBJETIVOS..... | 19 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL..... | 19 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 19 |
| 3. MARCO CONCEPTUAL | 20 |
| 3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CRAQUEO CATALÍTICO..... | 20 |
| 3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA | 22 |
| 3.3. REACCIONES QUÍMICAS..... | 25 |
| 3.4. PRODUCTOS..... | 26 |
| 3.5. SIMULACIÓN DE LA FCC | 28 |
| 3.6. VARIABLES INDEPENDIENTES..... | 28 |
| 3.7. VARIABLES DEPENDIENTES | 31 |
| 3.8. BALANCE DE MASA | 32 |
| 3.9. BALANCES DE ENERGÍA..... | 33 |
| 4. ESTADO DEL ARTE..... | 37 |

| | |
|---|-----------|
| 5. METODOLOGÍA..... | 39 |
| 5.1. RECOPIACIÓN DE DATOS DE OPERACIÓN..... | 39 |
| 5.2. IDENTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LAS VARIABLES SIGNIFICATIVAS DEL PROCESO A ESTUDIAR..... | 39 |
| 5.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS..... | 40 |
| 5.4. IDENTIFICACIÓN CASO BASE | 41 |
| 5.5. SIMULACIÓN DE LA SECCIÓN DE REACCIÓN - REGENERACIÓN | 43 |
| | |
| 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 45 |
| 6.1. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE REACCIÓN..... | 46 |
| 6.2. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE PRECALIENTE EN LA CARGA | 49 |
| 6.3. RELACIÓN CATALIZADOR ACEITE | 51 |
| 6.4. CALIDAD DE LA CARGA | 51 |
| 6.5. ESCENARIOS OPERACIONALES | 52 |
| 6.5.1 Escenario para mayor conversión, máxima producción de Gasolina | 54 |
| 6.5.2 Escenario para mayor producción de ALC: | 58 |
| 6.6. RECICLO DE APC | 61 |
| | |
| 7. CONCLUSIONES..... | 64 |
| | |
| 8. RECOMENDACIONES..... | 65 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 66 |

BIBLIOGRAFIA.....68

ANEXOS71

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Composición carga combinada FCC Orthoflow..... | 30 |
| Tabla 2. Caso base..... | 42 |
| Tabla 3. Parámetros y rango de simulación..... | 43 |
| Tabla 4. Escenario para máxima producción de Gasolina | 57 |
| Tabla 5. Escenario para máxima producción de ALC. | 60 |
| Tabla 6. Precio de productos y carga..... | 61 |
| Tabla 7. Destilación APC Orthoflow | 62 |
| Tabla 8. Flujo de reciclaje de APC promedio año | 63 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Delimitación área de estudio..... | 17 |
| Figura 2. Precalentamiento de la carga | 20 |
| Figura 3. Gravedad API en el gasóleo, año 2002 al 2015..... | 22 |
| Figura 4. Contenido de azufre en el gasóleo..... | 22 |
| Figura 5. Consumo de DMO..... | 23 |
| Figura 6. Características de la carga combinada en el tiempo para: (a) Gravedad API; (b) contenido de azufre en ppm; (c) Contenido de metales en ppm | 24 |
| Figura 7. Corrientes de flujo sistema reactor – regenerador. | 32 |
| Figura 8. Energía del sistema | 36 |
| Figura 9 Hipercubo latino (N=3, p=2) | 41 |
| Figura 10. Conversión y rendimientos FCC Orthoflow. | 45 |
| Figura 11 Comportamiento de los rendimientos de GLP, Gasolina, ALC y Slurry con respecto a la temperatura de reacción. | 46 |
| Figura 12. Comportamiento de la relación catalizador aceite con la temperatura de reacción..... | 48 |
| Figura 13. Efecto de la temperatura de precaliente en la producción de gasolina. | 49 |
| Figura 14. Efecto de la temperatura de precaliente en la producción de ALC..... | 50 |
| Figura 15. Efecto temperatura de precaliente en la producción de slurry..... | 50 |
| Figura 18 Matriz de correlación..... | 53 |
| Figura 19. Análisis estadístico máxima producción de gasolina..... | 55 |

| | |
|---|----|
| Figura 20. Análisis estadístico máxima producción de ALC | 58 |
| Figura 21. Relación de la severidad Vs carácter aromático del APC. | 62 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Anexo A. Diagrama de flujo sistema de reacción..... | 71 |
| Anexo B. Propiedades cargas individuales | 72 |
| Anexo C. Simulación con y sin reciclo de APC | 73 |
| Anexo D. Balances de la planta, rendimientos salida reactor..... | 74 |
| Anexo E. Data diseño de experimento..... | 75 |
| Anexo F. Correlaciones resultados del análisis de varianza de la data utilizada. .. | 77 |

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE ESCENARIOS OPERATIVOS CON CARGA PESADA PARA MAXIMIZAR EL MARGEN ECONÓMICO EN LA CRACKING ORTHOFLOW DE LA REFINERÍA BARRANCABERMEJA*

AUTOR: EDGAR JOAQUÍN MARTÍNEZ HERNÁNDEZ**

PALABRAS CLAVES: FCC, ALC, APC, Riser, Simulación, Planta Industrial

DESCRIPCIÓN:

Las plantas de FCC (*fluid catalytic cracking*) en la refinación de petróleo están diseñadas para el procesamiento de cargas pesadas y su proceso genera un alto impacto económico en la refinería. De acuerdo a lo anterior se planteó la necesidad de definir los escenarios de operación en el sistema de reacción de la FCC Orthoflow para obtener mayor producción de gasolina o Aceite Liviano de Ciclo (ALC) con el propósito de mejorar los beneficios económicos de la unidad de proceso.

En el desarrollo de este trabajo se definió una metodología que facilitó encontrar las variables independientes más influyentes en el sistema de reacción para cada uno de los escenarios operacionales propuestos.

En los escenarios evaluados, se observó que orientar la FCC a trabajar a una baja conversión de productos livianos, disminuye la gravedad específica de los productos de fondo: Slurry, APC y ALC., y aumenta la producción de Slurry.

Como resultado, se halló en la planta una facilidad para inyectar a la carga un reciclo de Aceite pesado de Ciclo (APC) antes de ingresar al elevador de carga (Riser), el cual no es utilizado. Este reciclo, a pesar de no ser una variable común en la operación, se observó en el simulador y en planta industrial que su utilización disminuye la producción de Slurry e incrementa la producción de gasolina y ALC.

*Proyecto de Grado

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

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF OPERATIONAL SCENARIOS WITH HEAVY LOAD TO MAXIMIZE THE ECONOMIC MARGIN IN CRACKING ORTHOFLOW REFINERY IN BARRANCABERMEJA*

AUTHOR: EDGAR JOAQUÍN MARTÍNEZ HERNÁNDEZ**

KEYWORDS: FCC, LCO, HCO, Riser, Simulation, Pilot plant.

DESCRIPTION:

Plants FCC (fluid catalytic cracking) in oil refining are designed for processing heavy loads and the process generates a high economic impact into the refinery.

According to the above, a need arises to define the operating scenarios in the reaction system FCC Orthoflow for increasing production of gasoline or light cycle oil (LCO) with the aim of improving the economic benefits of the process unit.

In developing this work, a methodology to facilitate the finding of the most influential independent variables in the reaction system for each of the proposed operational scenarios is shown.

In the scenarios evaluated, it was observed that direct the FCC to work at a low conversion of light products, decreases the specific gravity of fund products: Slurry, APC and ALC, and increases the production of Slurry.

As a result, it was found on the ground a facility to inject into the recycle loads heavy cycle oil (HCO) before entering the freight elevator (Riser) which is not used. Such recycle, despite not being a common variable in the operation, was observed in the simulator and the industrial plant use Slurry production decreases and increases gasoline production and ALC production.

* Thesis

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

INTRODUCCIÓN

El proceso de Craqueo catalítico es uno de los más importantes en la refinación. Ecopetrol dispone de unidades FCC (*fluid catalytic cracking*) modelo UOP, *Orthoflow* y *Modelo IV* distribuidas en sus dos Refinerías. Este proceso es utilizado para convertir fracciones pesadas de hidrocarburos en otras más livianas de mayor valor comercial. La carga fresca a estas unidades está constituida por una mezcla de gasóleo proveniente de las unidades de destilación atmosférica, Aceite Desmetalizado (DMO) generado en la unidad de DEMEX o Aceite Desmetalizado Hidrogenado (DMOH) producido en la unidad de Unibón.

Las cargas a estas unidades han cambiado considerablemente en los últimos años. Los yacimientos de crudos livianos han declinado considerablemente su producción y los esfuerzos de exploración se han concentrado en la extracción de crudos pesados o no convencionales.

Los crudos pesados por sus características fisicoquímicas elevan los costos de producción y refinación. Estas características han afectado la calidad de la carga a la Refinería de Barrancabermeja y en especial a las FCC. El níquel, vanadio, sodio y azufre son contaminantes presentes en la carga que desactivan el catalizador, debido a lo anterior, para poder mantener la actividad se debe aumentar el consumo diario de catalizador. La integridad mecánica de los equipos y la disminución en los rendimientos a productos valiosos también es afectada por el incremento de estos contaminantes.

Para contrarrestar los problemas generados por la carga en las FCC, Ecopetrol ha planteado estrategias de mejora en la parte operacional como tecnológica, con el objeto de procesar este tipo de cargas y cumplir con la demanda de combustibles a nivel nacional y mantener el margen operacional. La FCC *Orthoflow* fue

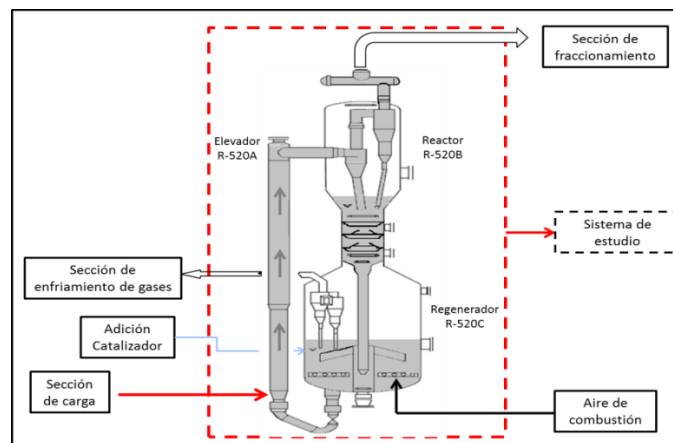
modernizada en 1997 y su capacidad de carga total aumentó de 22.000 bl/d a 26.000 bl/d de carga compuesta por 63% de gasóleo y 37 % de DMO con un carbón residual menor a 2.5 % en peso (wt).

La demanda de combustibles, especialmente el consumo de diésel se ha incrementado en el país. Esta situación ha generado la necesidad de importar permanentemente grandes volúmenes de este producto, la flexibilidad operacional de las FCC ha permitido suplir parte de estas importaciones, un porcentaje en peso del aceite liviano de ciclo (ALC) producido en las unidades de Cracking es mezclado con el diésel generado en las unidades de destilación atmosférica.

Este trabajo se desarrolló con el propósito de definir los escenarios apropiados de operación en la FCC Orthoflow hacia la producción de ALC o Gasolina, teniendo en cuenta las cargas disponibles actualmente, los requerimientos de la refinería, las restricciones operacionales y precios de los productos.

Se establece como área de interés el sistema comprendido por Reactor y Regenerador de la FCC y se delimita de forma simplificada en la **figura 1**.

Figura 1. Delimitación área de estudio¹



¹ Fuente: Tomado del Diagrama grande de control DGC - Orthoflow RWD Technologies.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, la demanda de destilados medios en el país, en especial de combustible diésel, ha registrado un crecimiento elevado en las ventas haciendo necesaria la importación de grandes volúmenes de estos destilados para suplir la demanda del país. Esta situación, ha impulsado a Ecopetrol a través de la Refinería de Barrancabermeja a buscar alternativas para incrementar la producción de Diésel y así generar un mayor margen para la economía de refinación. En este sentido, se ha planteado como una opción agregar Aceite Liviano de Ciclo (ALC) proveniente de las unidades de craqueo catalítico (FCC, “*Fluid Catalytic Cracking*”) hasta en un 5% en peso al Diésel.

No obstante, esta alternativa trae un nuevo reto que es incrementar la producción de ALC sin disminuir los rendimientos de gasolina requerida para suplir la demanda, la flexibilidad operacional de las FCC permiten realizar ajustes en su operación para direccionar sus rendimientos en la producción de GLP, Gasolina o ALC. Estos direccionamientos obedecen a una planeación realizada con el objetivo de cumplir el programa de producción de la Refinería. Adicionalmente, los crudos disponibles en el país agregan retos adicionales durante el procesamiento debido a su alto contenido de contaminantes metálicos, de azufre, compuestos básicos como sodio y calcio, alta tendencia a la formación de coque durante la refinación y baja gravedad API.

Debido a lo anteriormente expuesto, en este trabajo se evaluaron diferentes esquemas operativos de la unidad FCC Orthoflow teniendo en cuenta las características fisicoquímicas de las cargas alimentadas a la unidad, el efecto de los metales en el catalizador de equilibrio, el diseño y funcionamiento de equipos con el objetivo de mejorar los rendimientos de productos valiosos como gasolina y ALC, para maximizar el margen económico.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la conversión de la carga hacia producción de gasolina y ALC en la FCC Orthoflow de la Refinería de Barrancabermeja en diferentes escenarios operacionales buscando mejorar la rentabilidad económica del proceso.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer escenarios operativos para la FCC Orthoflow de la Refinería de Barrancabermeja teniendo en cuenta el diseño, cargas disponibles, catalizador y restricciones de la unidad.
- Evaluar cuál de los escenarios propuestos generará un incremento en la producción de ALC de la unidad FCC Orthoflow bajo condiciones seguras de operación.
- Evaluar los beneficios económicos de los parámetros operativos que maximicen la producción de ALC.

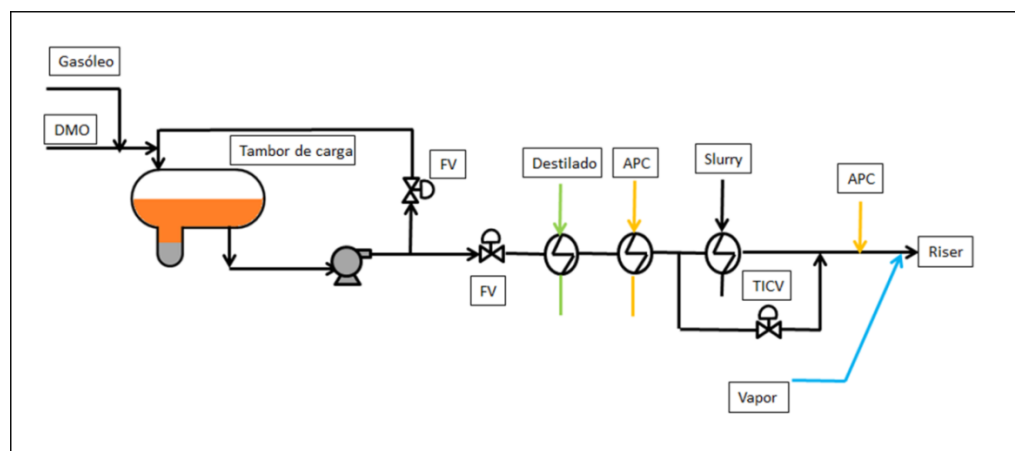
3. MARCO CONCEPTUAL

3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CRAQUEO CATALÍTICO

La FCC Orthoflow está diseñada para procesar un volumen de carga de 26.000 BPD compuesta por 63%vol de Gasóleo proveniente de las unidades de refinación y 37 % vol de Aceite Desmetalizado (DMO) o Aceite Desmetalizado Hidrogenado (DMOH) proveniente de las unidades de DEMEX o Unibón respectivamente, los productos principales son gasolina, gas licuado del petróleo (GLP), Aceite Liviano de Ciclo utilizado como diluyente de combustóleo o mezcla en la producción de Diesel, y los fondos de la torre fraccionadora (Slurry) usado en la preparación de combustóleo.

La carga combinada es precalentada incrementando su temperatura en un rango entre 390 °F y 410°F usando la corriente de fondo de la torre fraccionadora mediante una serie de intercambiadores de calor tipo tubo-carcasa antes de ingresar al Riser o elevador de carga del reactor (ver **figura 2**).

Figura 2. Precalentamiento de la carga²



² Fuente: Modificación Diagrama grande de control DGC - Orthoflow RWD Technologies.

Después del precalentamiento de la carga, esta entra en contacto con el catalizador caliente (1320 °F – 1350°F) proveniente del regenerador, para promover que la carga llegue hasta los sitios activos del catalizador es atomizada con una corriente de vapor de agua. La reacción catalítica es endotérmica, el catalizador regenerado satisface el calor necesario para realizar el proceso de reacción el cual se lleva a cabo en el Riser antes de ingresar al reactor [1].

En el reactor se da la separación del catalizador y los vapores producto de la reacción mediante el uso de ciclones ubicados en la parte superior. Los vapores de hidrocarburo fluyen hacia la torre fraccionadora, mientras que el catalizador impregnado de hidrocarburo desciende hacia la zona de despojo, vapor es inyectado en esta zona para remover el hidrocarburo. El catalizador gastado pasa hacia el regenerador, donde se inyecta el aire requerido para completar la reacción de combustión y eliminar el coque presente en la superficie del catalizador, alcanzando temperaturas superiores a 1320°F.

La torre fraccionadora recibe los vapores de hidrocarburo efluente del reactor, en esta sección se separan de acuerdo a sus puntos de ebullición las corrientes de aceite decantado, APC, ALC, gasolina y Gases.

El aceite decantado (Slurry) es enviado a tanques de almacenamiento al igual que el ALC, la gasolina y los gases de la cima de la torre fraccionadora pasan al tambor de cima donde se separa el hidrocarburo líquido y el hidrocarburo gaseoso, el gas efluente del tambor de cima es succionado por un compresor donde se comprime a 160 psi y es enviado al tambor de alta presión. El hidrocarburo almacenado en este tambor se envía a la sección de recuperación de gases para separar la gasolina, el propano, el propileno, butanos y H₂S mediante los procesos de absorción física, despojo con vapor, fraccionamiento y remoción de H₂S por medio de absorción con una solución de amina. Posteriormente el H₂S es despojado con temperatura y enviado como carga a la planta de ácido sulfúrico.

3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA

El incremento en el procesamiento de crudos pesados en la Refinería de Barrancabermeja afecta de manera significativa la calidad de las cargas a las Unidades de FCC de acuerdo a las condiciones máximas de diseño, En las Figuras 3 y 4 se observa una disminución significativa de la gravedad API del gasóleo e incremento en el contenido de azufre del gasóleo.

Figura 3. Gravedad API en el gasóleo, año 2002 al 2015.³

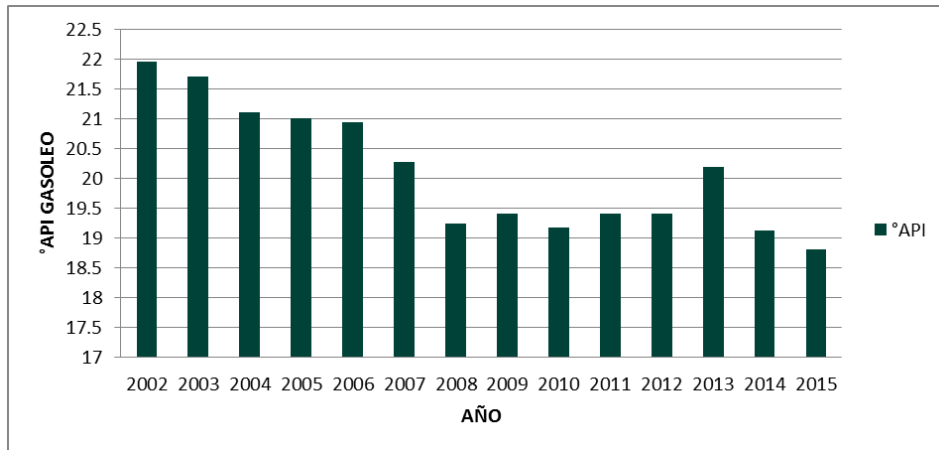
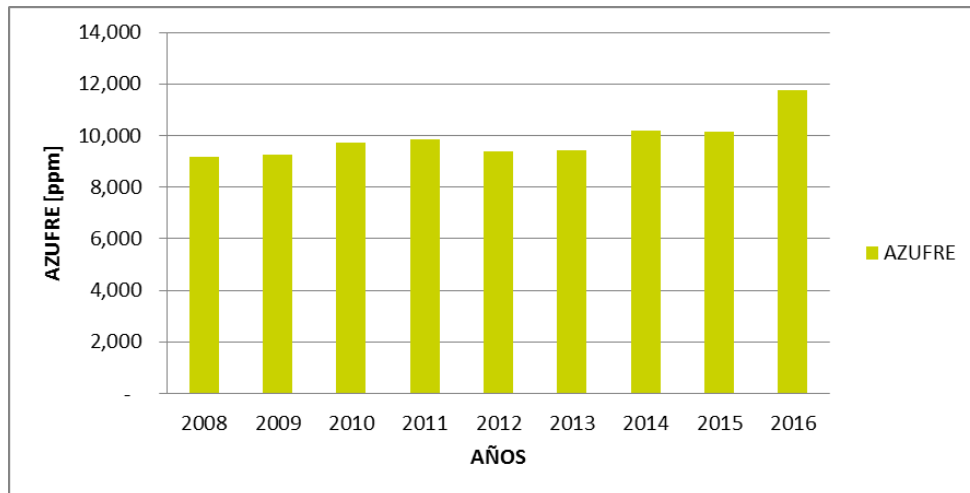


Figura 4. Contenido de azufre en el gasóleo.⁴



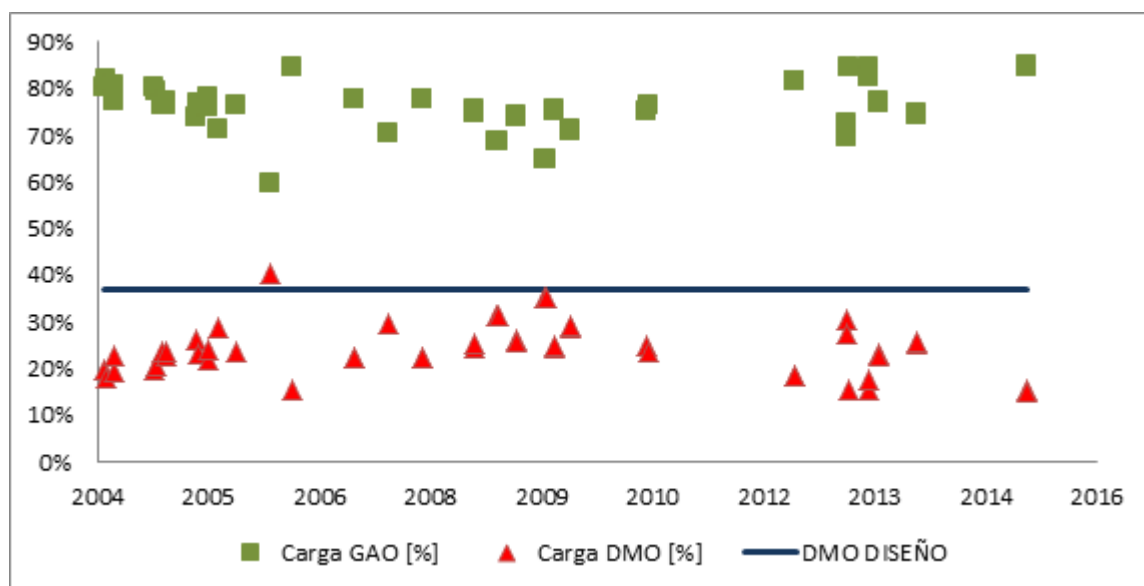
³ Fuente: Autor. Información operacional FCC Orthoflow.

⁴ Fuente: Autor. Información operacional FCC Orthoflow.

El incremento de estas cargas residuales ha generado una carga combinada a las FCC con características más aromáticas, de menor craqueabilidad que disminuye la producción de gasolina y GLP.

La planta está diseñada para cargar DMO en 37% y GAO 63%, en la figura 5 se muestra cómo es la relación de consumo real de DMO con respecto al diseño de la FCC Orthoflow.

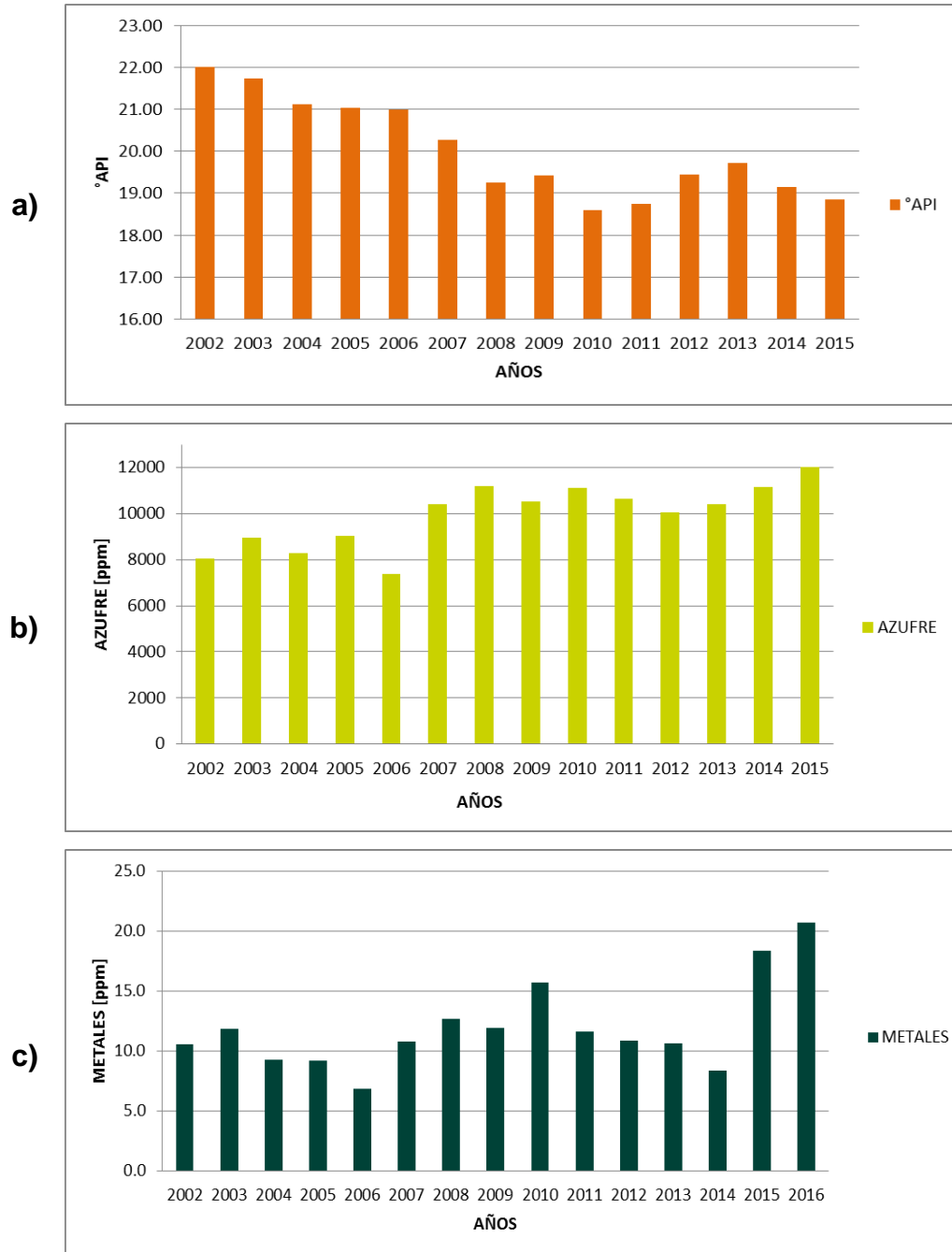
Figura 5. Consumo de DMO.⁵



En la Figura 6 se observan cambios en la calidad de la carga combinada entre el periodo 2002-2014 para la FCC Orthoflow, identificando una disminución de la gravedad API, incremento en el contenido de azufre, mayor contenido de metales Ni+V.

⁵ Fuente: Autor. Información operacional FCC Orthoflow.

Figura 6. Características de la carga combinada en el tiempo para: (a) Gravedad API; (b) contenido de azufre en ppm; (c) Contenido de metales en ppm .⁶



⁶ Fuente: Autor. Información operacional FFC Orthoflow.

El incremento en contenido de metales (níquel, vanadio y sodio) en la carga a la FCC se encargan de desactivar el catalizador y por lo tanto disminuyen los rendimientos de productos valiosos, incrementan la producción de coque y metano, catalizan las reacciones de deshidrogenación, disminuyendo la conversión por menor circulación de catalizador y menor relación catalizador a aceite. El azufre se distribuye en los productos de las FCC; a medida que se incrementa la temperatura de reacción para mayor conversión, también aumenta el contenido de compuestos de azufre en los productos más livianos, propanos, butanos y etano etileno, lo cual limita el sistema de tratamiento de GLP y de los gases de carga a la sección de recuperación de Etano - Etileno de las FCC. Es necesario invertir en tratamientos para disminuir el contenido de azufre y cumplir con las normas ambientales, esto hace más costoso el proceso.

3.3. REACCIONES QUÍMICAS

En el proceso de FCC se da un conjunto de reacciones químicas muy complejas de forma paralela y consecutiva [2].

Las reacciones químicas más importantes que se desencadenan al entrar en contacto la carga combinada con el catalizador regenerado son:

Cracking:

- Parafinas craqueadas a olefinas y parafinas más pequeñas



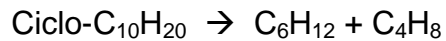
- Olefinas craqueadas a olefinas más pequeñas.



- Escisión de cadenas aromáticas laterales



- Cicloparafinas a olefinas y anillos pequeños.



Isomerización:

- *Olefin bond shift*
 $1\text{-C}_4\text{H}_8 \rightarrow \text{Trans-2-C}_4\text{H}_8$
- Normal olefinas a iso-olefinas
 $n\text{-C}_5\text{H}_{10} \rightarrow \text{iso-C}_5\text{H}_{10}$
- Normal parafinas a iso-parafinas
 $n\text{-C}_4\text{H}_{10} \rightarrow \text{iso-C}_4\text{H}_{10}$

Reacciones de Transferencia de Hidrógeno:

- Naftenos + Olefinas \rightarrow Aromáticos + Parafinas

Trans-alkilación / Transferencia del grupo alquilo.

- $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2 + \text{C}_6\text{H}_6 \rightarrow 2\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$

Ciclización de Olefinas a Naftenos

- $\text{C}_7\text{H}_{14} \rightarrow \text{CH}_3\text{-ciclo-C}_6\text{H}_{11}$

Deshidrogenación.

- $n\text{-C}_8\text{H}_{18} \rightarrow \text{C}_8\text{H}_{16} + \text{H}_2$

De-alkilación.

- $\text{Iso-C}_3\text{H}_7\text{-C}_6\text{H}_5 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_6$

Condensación.

- $\text{Ar-CH=CH}_2 + \text{R}_1\text{CH=CHR}_2 \rightarrow \text{Ar-Ar} + 2\text{H}$

3.4. PRODUCTOS

El objetivo principal de las unidades FCC es maximizar la conversión de fracciones pesadas en hidrocarburos más livianos, estables y de mayor valor comercial [3].

- **Gas seco:** se obtiene en la cima de la torre absorbidora secundaria y está compuesto por una mezcla de Hidrógeno, metano, etano, etileno y sulfuro de

hidrogeno. Esta corriente es enviada a la FCC UOP II para recuperar las moléculas de etano, etileno, existe una facilidad para enviar a la red de gas combustible para consumo en otros procesos internos en la refinería.

- **GLP:** corriente compuesta por butanos y propanos utilizada para consumo interno de la refinería y el excedente es vendido a clientes externos.
- **PGR:** mezcla de hidrocarburos livianos de proporciones variables compuesta principalmente por propileno y propano que a condiciones normales está en fase gaseosa, actualmente Ecopetrol le vende a su filial propilco el propileno producto.
- **Gasolina (C5 <430 °F):** Es uno de los productos más importantes y valioso en el proceso de FCC. A nivel mundial es el combustible más usado en los medios de transporte, las unidades de Cracking están orientadas a maximizar la producción de gasolina.

Algunos parámetros que se pueden tener en cuenta para obtener una mayor producción de gasolina son:

- Incremento de la relación catalizador / carga.
- Aumento del punto final de ebullición de la gasolina en la torre de fraccionamiento principal.
- Aumento en la actividad del catalizador.
- Aumento en la temperatura de reacción.
- **ALC (430°F - 650°F):** Esta corriente se obtiene de la parte intermedia de la torre fraccionadora, es usado como absorbente en la torre absorbidora secundaria, como fuente de calor en el tren de precalentamiento, diluyente en el combustóleo para facilitar su transporte o mezcla en el diésel. Las FCC pueden ser orientadas para maximizar la producción de ALC con el objeto de aprovecharlo como componente Diesel.
- **APC:** Es uno de los cortes de la fraccionadora principal, su rango de ebullición esta entre el ALC y el Slurry.

- **SLURRY (> 650°F):** este producto está compuesto por un hidrocarburo pesado conocido como alquitrán aromático y se obtiene en el fondo de la torre fraccionadora, se usa en la producción de fuel oil.

3.5. SIMULACIÓN DE LA FCC

Existen numerosos programas de simulación que son utilizados para predecir el desempeño de las unidades de proceso, algunos más rigurosos que otros, estos pueden incluir herramientas de optimización en rendimientos, beneficios económicos y optimización de mezclas. La refinería posee simuladores comerciales para realizar análisis operacional más profundo sobre el desempeño de la FCC cuando se requiere realizar cambios en las variables del proceso como: variaciones en, la composición de la carga, temperaturas de reacción y regeneración, adición de catalizador y cambios mecánicos en equipos, etc.

Las respuestas obtenidas en el simulador dependen en gran parte de la complejidad del modelo utilizado. Las variables que se utilizan para la construcción de los modelos en el reactor y regenerador se dividen en: variables independientes (VI), variables dependientes (VD) y parámetros de simulación (PS).

3.6. VARIABLES INDEPENDIENTES

Son aquellas variables de las que se tiene control y pueden ser manipuladas por el operador, su valor es conocido antes de realizar la simulación. A continuación se describen las variables que más influyen en la sección de reacción y regeneración del proceso de craqueo catalítico.

- **Temperatura de reacción:** es la temperatura de la mezcla catalizador y productos en estado gaseoso al instante que salen del Riser o elevador, las reacciones inician en el momento en que entra en contacto el catalizador regenerado con la carga, en la base del Riser y finalizan a la salida de este. Las reacciones en el proceso de FCC son endotérmicas, la energía requerida para estas, es aportada por el catalizador regenerado. La temperatura de reacción es manipulada fácilmente, el aumento o disminución en esta variable se ve reflejada directamente en la conversión o rendimiento de productos.
- **Temperatura de precaliente:** es la temperatura a la cual la carga es calentada antes de entrar en contacto con el catalizador regenerado en el Riser. La carga adquiere la temperatura deseada pasando por una serie de intercambiadores de calor tipo tubo carcasa. Las variaciones en la temperatura de precaliente se ven reflejadas en la relación catalizador - aceite, producción de coque y conversión.
- **Relación de reciclo:** es la cantidad de producto, resultado del craqueo catalítico que es retornado al reactor, este se mezcla con la carga antes de ingresar al Riser.

$$\text{Relación reciclo} = \frac{\text{Volumen de reciclo}}{\text{Volumen carga fresca}}$$

- **Actividad del catalizador:** La actividad de los catalizadores permiten maximizar la producción de gasolina y GLP. Esta variable se tiene en cuenta al momento de fabricar los catalizadores con el propósito de cumplir con la orientación de la FCC.
- **Calidad de la carga:** el tipo de carga que se procesa en la FCC es de gran importancia, de acuerdo a su composición se obtendrán los productos, también afecta las condiciones de operación de la unidad.

La carga a la FCC Orthoflow es identificada como carga combinada, es un mezcla de hidrocarburos pesados de alto peso molecular, conocidas como Gasóleo, DMO

/ DMOH. Actualmente se tiene gran dificultad en las plantas que producen la carga, se observa que la composición no es constante, afectando enormemente la operación de las unidades FCC.

Por ser una de las variables más importantes en el proceso, el resultado del análisis de laboratorio es tenido en cuenta para realizar la planeación y programación de carga a las unidades de FCC, en la **Tabla 1** se observa los rangos en los parámetros más representativos en la composición de la carga en un número de muestras analizadas en el laboratorio en los últimos 10 años.

Tabla 1. Composición carga combinada FCC Orthoflow

| CARGA COMBINADA | | | |
|------------------|--------|--------|--------|
| Propiedad | Unidad | Menor | Mayor |
| Densidad a 15°C | g/ml | 0,9154 | 0,9453 |
| Densidad API | °API | 18,1 | 22,5 |
| Carbon Conradson | % wt | 1,18 | 2,65 |
| Azufre | ppm | 5450 | 13180 |
| Nitrogeno Basico | ppm | 436 | 850 |
| Nitrogeno Total | ppm | 1175 | 2874 |
| Niquel | ppm | 2.50 | 8,93 |
| Vanadio | ppm | 3,115 | 13,4 |

| Destilacion D-7169 | Unidad | Menor | Mayor |
|--------------------|--------|-------|---------|
| Gasolina < 450°F | % wt | 0,71 | 5,59 |
| 450 a 650°F | % wt | 7,58 | 18,01 |
| > 750°F | % wt | 67,64 | 84,69 |
| > 1000°F | % wt | 16,44 | 69,91 |
| PFE | °F | 1000 | 1327,46 |

| Aromaticos | Unidad | Menor | Mayor |
|--------------------|--------|-------|-------|
| Monoaromáticos | % wt | 4,34 | 4,84 |
| Diaromáticos | % wt | 3,01 | 4,24 |
| Triaromáticos | % wt | 3,05 | 4,03 |
| Tetra-aromáticos | % wt | 2,27 | 8,55 |
| Aromáticos Totales | % wt | 13,52 | 20,67 |

Fuente: Autor Proyecto

3.7. VARIABLES DEPENDIENTES

Son aquellas variables que su resultado obedece a un cambio en una variable independiente y por lo tanto no son manipuladas, algunas de ellas se describen a continuación.

- **Temperatura fase densa del regenerador:** en esta fase del regenerador ocurre la combustión del coque que se ha impregnado en la superficie del catalizador durante el proceso de reacción. Un flujo de aire es suministrado para que se realice la combustión. La energía generada es transportada por el catalizador que retorna al reactor para aportar la temperatura requerida en las reacciones endotérmicas del craqueo catalítico.
- **Temperatura fase diluida del regenerador:** esta fase se encuentra en la parte superior de la fase densa y muy cercana a los ciclones del regenerador. Hacen parte de esta zona los gases de combustión y una pequeña parte de catalizador que es arrastrado por los gases.
- **Aire al regenerador:** el aire es tomado de la atmosfera por un compresor que lo envía al regenerador. El flujo de aire aporta el oxígeno necesario para la combustión en el proceso de regeneración del catalizador.
- **Relación catalizador aceite (C/O):** es la relación másica entre el catalizador circulante y la carga total que entra en contacto con el catalizador en el Riser. Esta variable está relacionada con la severidad de la reacción. Una mayor conversión de la carga es producto de una alta severidad.

$$C/O = \frac{\text{Masa catalizador circulante, g.}}{\text{Masa de carga total, g.}}$$

- **Coque en el catalizador:** es el coque que continúa en la superficie del catalizador después del proceso de regeneración obstruyendo sus centros activos.

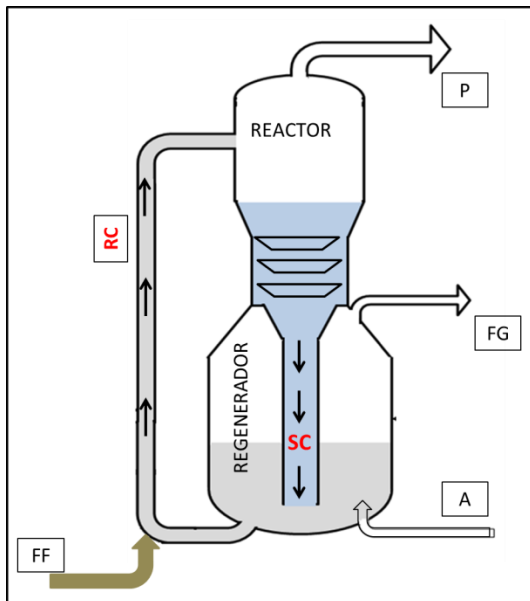
- **Conversión:** es el porcentaje de volumen de carga craqueada que se convierte a gasolina y componentes más livianos.

$$\text{Conversión} = \frac{\text{Carga total} - (\text{ALC} + \text{Slurry})}{\text{Carga total}} \times 100$$

3.8. BALANCE DE MASA

Los balances de masa se deben realizar en un sistema plenamente identificado, teniendo en cuenta todas las entradas y salidas. La figura 7 representa el sistema seleccionado para realizar los balances [5].

Figura 7. Corrientes de flujo sistema reactor – regenerador.⁷



- Balance global de masa:

$$FF + A = FG + P \quad (1)$$

Dónde:

⁷ Fuente: Autor Proyecto.

FF= Flujo másico de carga fresca, kg/s.

A= Flujo másico de aire al regenerador, kg/s.

FG= Flujo másico de gases de combustión, kg/s.

P= Flujo másico de productos, kg/s.

Se desprecia el flujo de las purgas y la adición de catalizador fresco.

- Balance de masa en el reactor:

$$FF + RC = P + SC \quad (2)$$

Dónde:

RC= Flujo másico de catalizador regenerado, kg/s.

SC= Flujo másico de catalizador gastado, kg/s.

- Balance de masa en el regenerador:

$$SC + A = FG + RC \quad (3)$$

3.9. BALANCES DE ENERGÍA

El balance de energía es utilizado como herramienta para predecir y evaluar los cambios que afectan la cantidad y calidad de los productos [2]

$$\left(\text{Energía total que entra al sistema} \right) - \left(\text{Energía total que sale del sistema} \right) = \left(\text{Acumulación de energía del sistema} \right)$$

La primera ley de la termodinámica define que la energía en un proceso no se crea ni se destruye, solo cambia de forma [6].

Para entender el balance de energía de una FCC es importante identificar las interacciones energéticas que se tienen entre el reactor y el regenerador.

El regenerador, es el equipo donde se lleva a cabo el proceso de regeneración del catalizador gastado, el cual consiste en remover por combustión las fracciones de hidrocarburo que se depositaron en los poros activos del catalizador en forma de coque durante las reacciones.

Para la combustión, se inyecta aire con un compresor por la parte inferior del regenerador distribuido de forma uniforme para mantener en estado fluidizado el lecho catalítico. De acuerdo a la densidad del catalizador en el regenerador existen dos fases; la fase densa en la parte inferior cerca al distribuidor de aire y la fase diluida cercana a la entrada de los ciclones la cual contiene menor cantidad de catalizador.

La combustión de coque es una reacción exotérmica. Una parte del calor liberado en la combustión es transportado por el catalizador regenerado hacia el elevador de carga (Riser) para suministrar la energía necesaria en la vaporización de la carga y aportar el calor para que se lleven a cabo las reacciones endotérmicas en el craqueo catalítico.

Altos contenidos de coque en el catalizador ocasionan altas temperaturas en las fases densa y diluida del regenerador generando afectaciones a la metalurgia interna, desactivación del catalizador y pérdida de selectividad.

La combustión en el regenerador se puede llevar a cabo de dos formas:

- **Combustión parcial:** en este modo de operación el coque presente en el catalizador no es convertido en su totalidad a CO₂, permitiendo operar el regenerador a menores temperaturas y procesar un mayor volumen de cargas pesadas. Esta operación genera mayor contenido de carbón en el catalizador circulante y disminuye su actividad [4].

- **Combustión total:** Se utiliza un exceso de oxígeno para completar la combustión de CO a CO₂ y disminuir el contenido de coque en el catalizador circulante. Este es el modo de operación más común por favorecer la actividad y selectividad del catalizador, los gases de combustión que se emiten a la atmosfera contienen menor contenido de monóxido de carbono.

El balance de energía está vinculado con el de coque, este aporta el combustible para mantener el balance energético del sistema. La fuente de energía de la unidad es la combustión del coque, figura 8 y deberá proveer el calor necesario para los siguientes requerimientos:

- Elevar la temperatura de la carga hasta la temperatura de reacción.
- Aportar la energía necesaria en las reacciones.
- Compensar las pérdidas de energía en los productos salida del reactor
- Elevar la temperatura del aire de combustión.
- Calor perdido por radiación en las paredes de los equipos.
- Compensar las pérdidas de energía en los gases de combustión del regenerador.

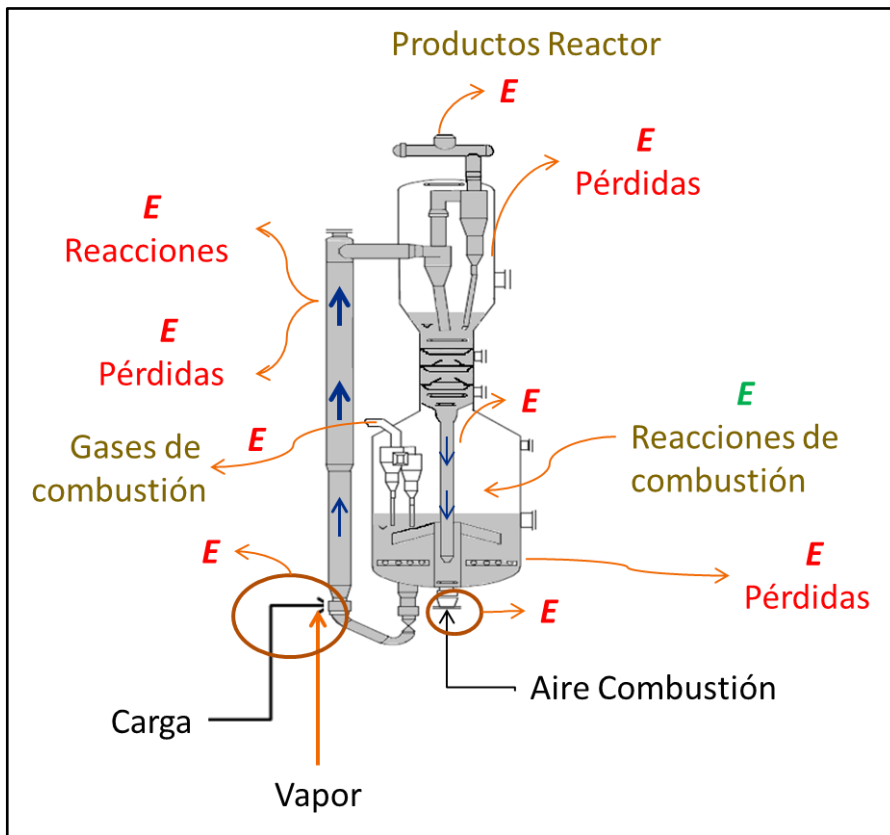


Figura 8. Energía del sistema

4. ESTADO DEL ARTE

El craqueo catalítico fluidizado es uno de los procesos más complejos y difíciles de comprender. La variación en un parámetro de operación está relacionado con cambios en el balance térmico, la conversión, rendimientos y calidad de los productos [7], cambios en la temperatura de reacción y la actividad del catalizador afectan directamente la producción de GLP, gasolina y ALC.

Dependiendo de las necesidades del mercado, las unidades FCC pueden trabajar en diferentes esquemas operativos para maximizar o direccionar la producción a GLP y gasolina o ALC reduciendo al mínimo la producción de fondos [8].

Otros trabajos se han enfocado en estudios sobre el impacto de la actividad del catalizador en los rendimientos de las unidades FCC y la calidad de los productos [9].

Otra de las limitaciones o cambios grandes que han tenido las unidades de FCC son sus cargas. Estas provienen de crudos cada vez más pesados que contienen mayor cantidad de fracciones pesadas con altos niveles de metales contaminantes como níquel y vanadio. La operación de las FCC con estas cargas está limitada debido a la alta tendencia a la formación de coque y a la desactivación con metales del catalizador lo que hace más difícil incrementar su margen económico. Particularmente, el vanadio es considerado como el contaminante más nocivo para los catalizadores de FCC. Diversos trabajos se han realizado para mitigar su impacto, obteniéndose en la actualidad catalizadores con mayor resistencia a los contaminantes metálicos y con una orientación a maximizar la producción de ALC o Gasolina [10].

Existen herramientas computacionales como los simuladores, que han sido utilizados para determinar las condiciones operacionales y optimizar rendimientos de las unidades de proceso. En las FCC es posible predecir el impacto económico generado por los cambios en la materia prima y en los catalizadores. SHARC™ es un simulador desarrollado inicialmente para las Refinerías de SHELL y del cual se han beneficiado numerosas refinerías [11].

De acuerdo a lo descrito anteriormente se demuestra que las unidades de craqueo catalítico tienen cierto grado de flexibilidad que permite cambiar su esquema operativo, con el objeto de maximizar la producción de gasolina o ALC sin afectar negativamente el margen económico y la integridad de las instalaciones. De esta manera se pueden suplir los requerimientos de gasolina y utilizar el ALC como mezcla en diésel y disminuir las importaciones, para esto es requerido identificar escenarios operativos de la FCC Orthoflow teniendo en cuenta la integridad de los equipos, la calidad de los productos, las cargas disponibles y el potencial económico de dichos escenarios.

5. METODOLOGÍA

5.1. RECOPIACIÓN DE DATOS DE OPERACIÓN

En esta etapa del trabajo se recolectó información de las condiciones operacionales reales en estado estable, resultados de los análisis de laboratorio de las muestras tomadas en planta industrial por parte del ICP (Instituto Colombiano de Petróleo) de los últimos años.

Igualmente, se recopiló los datos de las variables operacionales más representativas mediante el sistema PI Data Link. Los análisis del muestreo realizado a cargas y productos se tomaron del sistema de información que posee el laboratorio de la Refinería de Barrancabermeja CDLAB para el periodo de enero a septiembre de 2015.

5.2. IDENTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LAS VARIABLES SIGNIFICATIVAS DEL PROCESO A ESTUDIAR

Para la identificación de las variables del sistema de estudio se tuvieron en cuenta: las cargas disponibles, parámetros de operación como temperatura, flujos, presiones de diseño de cada uno de los equipos y conceptos técnicos. Las variables independientes consideradas fueron la temperatura de reacción, temperatura de precaliente de la carga, , adición de catalizador, la calidad de la carga y reciclo de aceite pesado de ciclo (APC).

El reciclo de APC en esta FCC no es utilizado durante la operación diaria, su uso se realiza en procedimientos de arranque. Sin embargo se incluye dentro de las variables a analizar con el objeto de observar que efecto produce en los rendimientos de gasolina, ALC y slurry .

Las variables dependientes consideradas fueron la temperatura en la fase densa del regenerador, la temperatura en fase diluida del regenerador, la relación catalizador aceite, Aire del regenerador, y la conversión.

5.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos, es utilizado para planear un conjunto de pruebas experimentales, con el propósito de obtener información de un problema o sistema en estudio y facilitar la toma correcta de decisiones. Es fundamental definir correctamente el diseño de experimentos para así obtener datos representativos que conduzcan a un análisis objetivo y generar conclusiones válidas del problema.

Una vez definidas las variables de entrada y salida se realiza el diseño experimental utilizando el método del hipercubo latino, el cual está basado en el método de cuadrados latinos. Se utiliza este método para obtener un resultado representativo [12].

El método de hipercubo latino procede de la siguiente manera:

- El intervalo de cada una de las p variables de entrada se divide en N partes iguales formándose una malla de Np hipercubos.
- Se eligen aleatoriamente N hipercubos con el requisito de que para cada subintervalo de cada variable hay un único hipercubo seleccionado.
- En cada hipercubo se elige un punto aleatoriamente en él.

Este método es estratificado en todas las direcciones. En la figura 9 se observa un ejemplo de 3 muestras de una data bidimensional generadas por este método, generando 3 observaciones de la muestra.

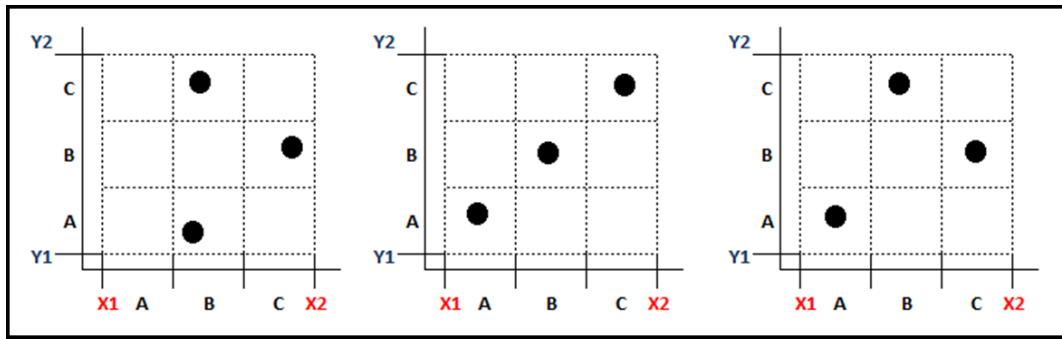


Figura 9 Hipercono latino ($N=3, p=2$)⁸

Se identificaron 5 variables de entrada, cada una con 7 parámetros de análisis y se determinaron 60 simulaciones producto del método de experimento seleccionado. Las variables analizadas fueron:

- a) Temperatura de reacción.
- b) Temperatura de precaliente.
- c) Adición de catalizador fresco.
- d) Gravedad API de la carga combinada.
- e) Reciclo APC en la carga total.

5.4. IDENTIFICACIÓN CASO BASE

Para definir el caso base en la FCC, se utilizaron datos experimentales resultado del monitoreo en tiempo real de cada una de las variables independientes y dependientes en operación estable. El monitoreo está sujeto a errores. Por lo tanto, fue necesario analizar en detalle la información obtenida. En la **Tabla 2** se describen los datos más importantes de las variables identificadas para el proyecto.

⁸ Fuente: Tomado de Modelos sustitutos y diseños óptimo de sistemas complejos

El caso base es usado como referencia para evaluar los resultados operacionales o económicos obtenidos por modificaciones realizadas al esquema de operación en cada caso de simulación.

Los parámetros del caso base definido se encuentran en la **Tabla 2**, estos son el resultado de mezclar dos cargas pesadas (GAO + DMO) manteniendo las condiciones operacionales dentro de los parámetros de integridad mecánica de los equipos que conforman el sistema de estudio y garantizando la combustión total del coque en el regenerador.

Tabla 2. **Caso base**

| VARIABLE | UNIDAD | VALOR |
|----------------------------------|--------|----------|
| Temp de reacción | °F | 977.0 |
| Temp de precaliente | °F | 380.0 |
| Temp Fase Densa Rg | °F | 1,346.0 |
| Temp Fase Diluida Rg | °F | 1,374.0 |
| O2 en Gas de combustion | %mol | 3.5 |
| Aire al Regenerador | scfm | 65,400.0 |
| Relacion Cat/Oil | | 7.8 |
| Volumen de carga total | bls/d | 19.1 |
| Gravedad API carga total | API | 19.2 |
| Residuo Carbon Conradson (CCR) | %wt | 1.74 |
| Niquel en la carga | ppm | 3.01 |
| Vanadio en la carga | ppm | 4.42 |
| Contenido de Gasoleo en la carga | % | 80 |
| Contenido de DMO en la carga | % | 20 |
| Adición de catalizador fresco | Ton | 3.4 |

| RENDIMIENTOS DEL REACTOR | UNIDAD | VALOR |
|--------------------------|--------|-------|
| Gas seco | %vol | 4.7 |
| GLP | %vol | 14.8 |
| GASOLINA | %vol | 51.4 |
| ALC | %vol | 21.2 |
| APC + SLURRY | %vol | 9.4 |
| Coque | %wt | 6.23 |
| Conversión | %vol | 69.4 |

Fuente: Autor Proyecto

5.5. SIMULACIÓN DE LA SECCIÓN DE REACCIÓN - REGENERACIÓN

El modelo utilizado describe el comportamiento en estado estable del sistema reactor – regenerador de la FCC Orthoflow y la interacción entre ellos.

Los parámetros de simulación usados se relacionan en la **Tabla 3**, la densidad API de la carga combina es el resultado de mezclar DMO en proporción del 20 al 32 % vol. con gasóleo.

Tabla 3. Parámetros y rango de simulación.

| VARIABLES INDEPENDIENTES | | | |
|------------------------------|--------|-------|-------|
| | Unidad | Menor | Mayor |
| Temperatura de reacción | °F | 970 | 990 |
| Temperatura de precaliente | °F | 380 | 415 |
| Reciclo de APC | bls/d | 0 | 1,500 |
| Adición de catalizador | Ton. | 4.7 | 5.2 |
| Gravedad API carga combinada | °API | 18.10 | 18.84 |

| VARIABLES DEPENDIENTES | | |
|--------------------------------------|--------|-------------|
| | Unidad | Restricción |
| Temperatura fase densa Regenerador | °F | < 1,360.0 |
| Temperatura fase diluida Regenerador | °F | < 1,380.0 |

Fuente: Autor Proyecto

La simulación se realizó con un software comercial que posee la Refinería de Barrancabermeja, el cual es usado para realizar análisis operacional de las unidades de cracking catalítico y predecir el comportamiento del proceso.

Este simulador contempla modelos cinéticos de la FCC y los mecanismos de reacción por lo que es posible realizar optimizaciones, estimar los rendimientos y propiedades de los productos.

Con el propósito de analizar el comportamiento de las diferentes variables en el sistema de reacción y encontrar los escenarios óptimos de operación de la FCC Orthoflow para maximizar los rendimientos a productos valiosos, se realizaron diferentes simulaciones con este software analizando únicamente los casos factibles, aquellos que sus condiciones de operación cumplen con los parámetros de integridad operacional del sistema en evaluación. Las simulaciones incluyen los siguientes escenarios:

- Búsqueda de un punto de operación óptimo mediante variaciones de la temperatura de reacción en un rango de 970°F a 990°F, teniendo en cuenta que no se presentara sobre-craqueo a productos más livianos, el flujo de carga a la unidad permaneció constante al igual que los demás parámetros del modelo.
- Variaciones de la temperatura en la entrada de carga total (precaliente) en un rango entre 370°F y 415°F, el flujo de carga permaneció constante al igual que los demás parámetros del modelo.
- Incremento del contenido de DMO en la carga total, modificando los demás parámetros de operación sin afectar la integridad mecánica de la unidad.
- Se realizaron simulaciones incluyendo una corriente de recicló de Aceite pesado de Ciclo.

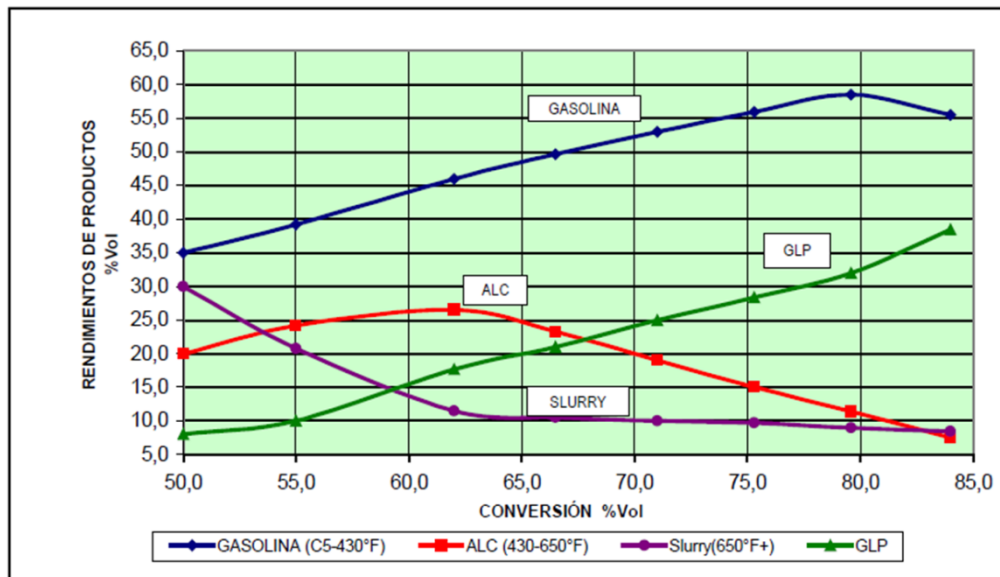
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se analizaron los datos disponibles para identificar la relación entre las variables independientes y dependientes.

El análisis se enfocó en los modos de operación para Maximización en la producción de gasolina y producción de ALC. Típicamente, la selección de estos modos de operación trae consigo modificaciones significativas en los rendimientos de productos impactando la economía de la unidad FCC Orthoflow.

En la figura 10, se observa una proyección de los productos en función de la conversión de la carga en la FCC Orthoflow, esta grafica representa las orientaciones de producción posibles de la unidad al escenario más conveniente para los objetivos de la Refinería [13].

Figura 10. Conversión y rendimientos FCC Orthoflow.⁹



⁹ Fuente: Worldwide Refinery Processing Review. Fluid catalytic cracking and energy management and conservation. 4Q 2015.

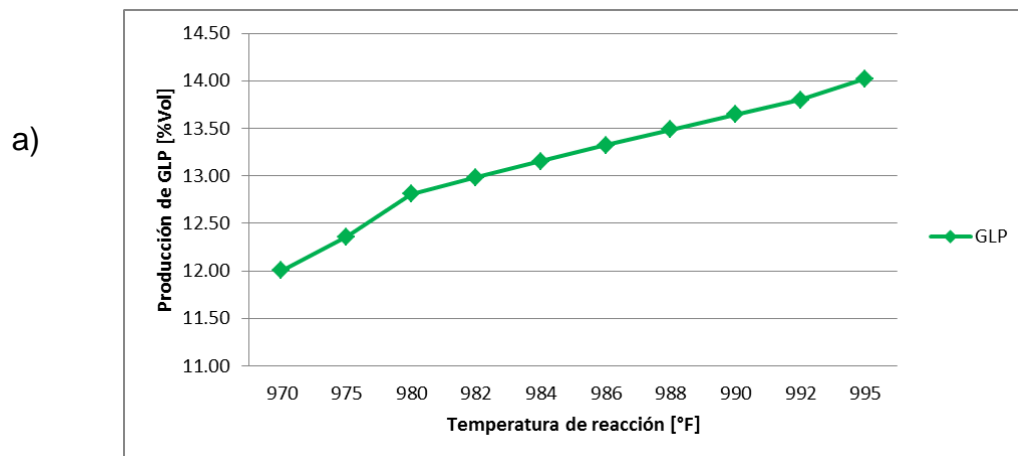
Basado en la evaluación económica realizada para cada uno de los modos de operación analizados se definen escenarios para máxima producción de gasolina o máxima producción de ALC

En el desarrollo del trabajo se observó que existen unas variables más significativas que otras, afectando los rendimientos de los productos salida del reactor (% vol.).

6.1. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE REACCIÓN

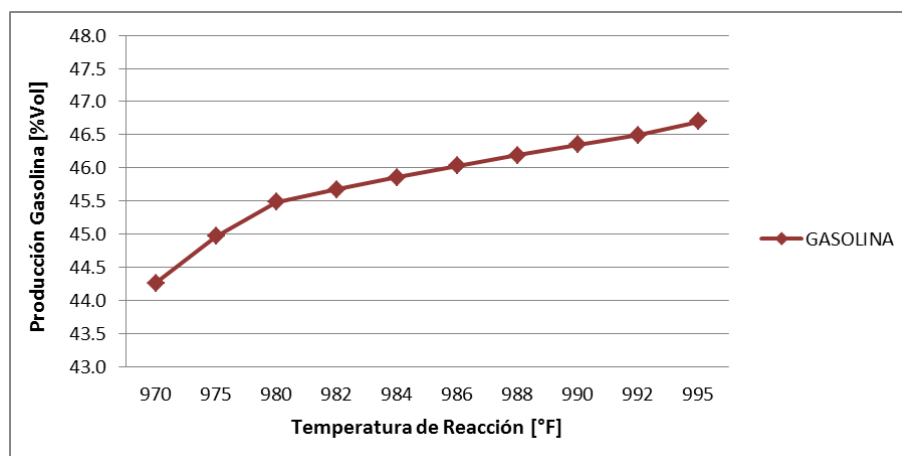
La temperatura de reacción es la variable de proceso más importante y manipulada para obtener la conversión deseada, un incremento en la temperatura de reacción se refleja en un aumento en la producción de GLP y gasolina, y una disminución de productos pesados como slurry y ALC figura 11.

Figura 11 Comportamiento de los rendimientos de GLP, Gasolina, ALC y Slurry con respecto a la temperatura de reacción.¹⁰

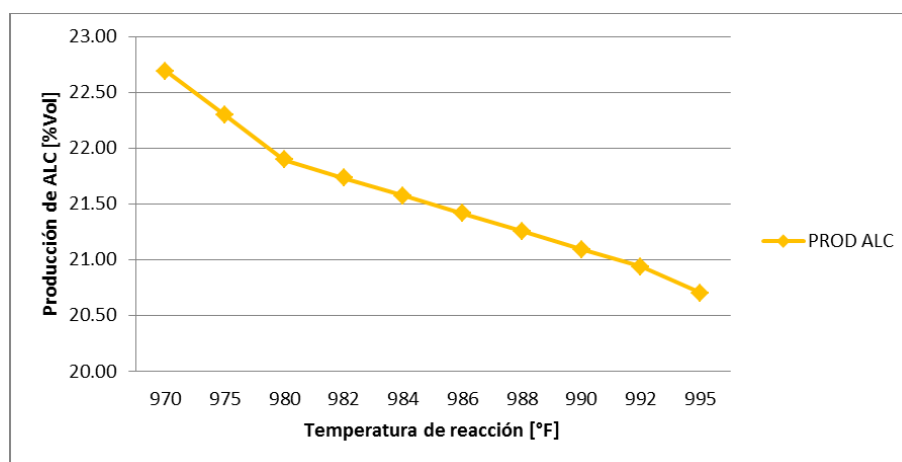


¹⁰ Fuente: Autor. Resultado simulación

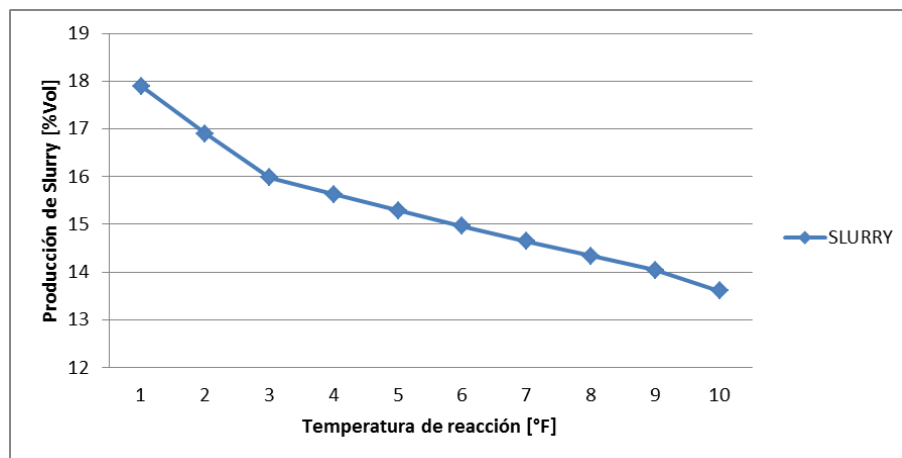
b)



c)



d)



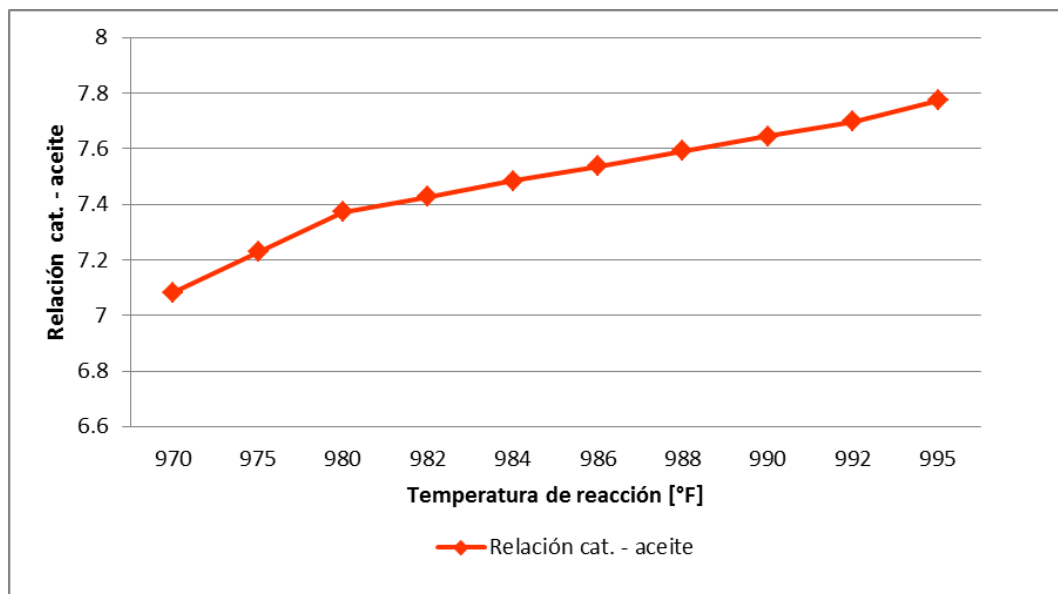
Sin embargo temperaturas de reacción muy elevadas no son deseables porque se presenta un sobre-craqueo en la gasolina, reflejada en una disminución en el

volumen de gasolina y un incremento de productos como Gas seco y GLP. Esta condición también fue considerada en el desarrollo del trabajo en la búsqueda de un escenario para maximizar la producción de gasolina.

La formación de coque se incrementa directamente con la temperatura de reacción, requiriendo una mayor cantidad de aire para mantener la combustión total, este cambio genera altas temperaturas en el regenerador y puede limitar la operación del compresor de aire.

Los rendimientos observados en la producción de gasolina por el efecto temperatura de reacción, obedecen al cambio en el balance energía en el reactor y regenerador, y a un aumento o disminución en la relación catalizador aceite Figura 12.

Figura 12. Comportamiento de la relación catalizador aceite con la temperatura de reacción.¹¹



¹¹ Fuente: Autor Proyecto.

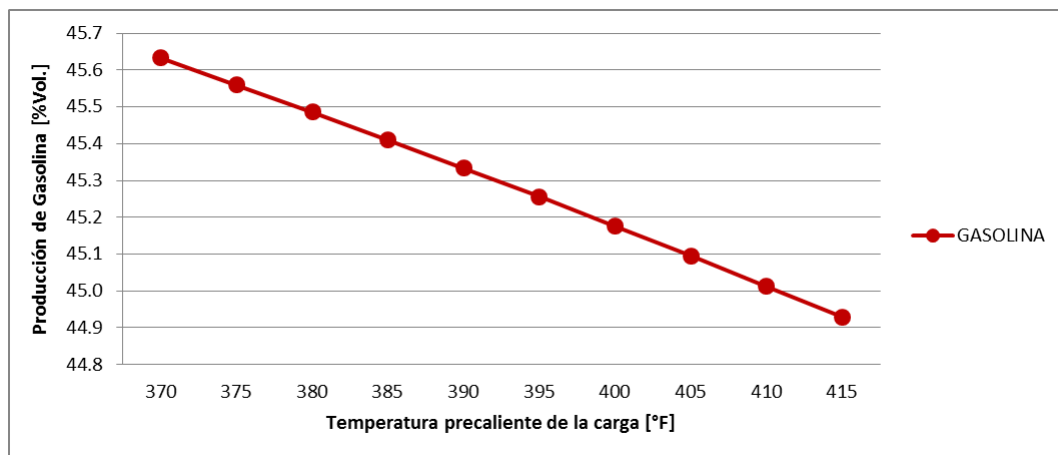
6.2. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE PRECALIENTE EN LA CARGA

La temperatura en el precaliente de la carga afecta la conversión y la formación de coque, debido a que puede afectar la vaporización de la carga y el balance de energía de la unidad. Con el objetivo de buscar una temperatura óptima en el precaliente se evaluaron diferentes escenarios.

Para cargas pesadas es importante operar con temperaturas altas permisibles en el precaliente, la alta viscosidad que presenta este tipo de carga afecta la vaporización de la misma.

Con una temperatura de reacción constante en 980°F y variando la temperatura del precaliente de 370°F a 415°F, se observa que la conversión a gasolina disminuye 0.07% en vol., **figura 13.**, la producción de ALC se incrementa 0.35% en vol. **figura 14**, y la producción de slurry aumenta en 2.47% en vol. **figura 15.**

Figura 13. Efecto de la temperatura de precaliente en la producción de gasolina.¹²



¹² Fuente: Autor Proyecto.

Figura 14. Efecto de la temperatura de precaliente en la producción de ALC.¹³

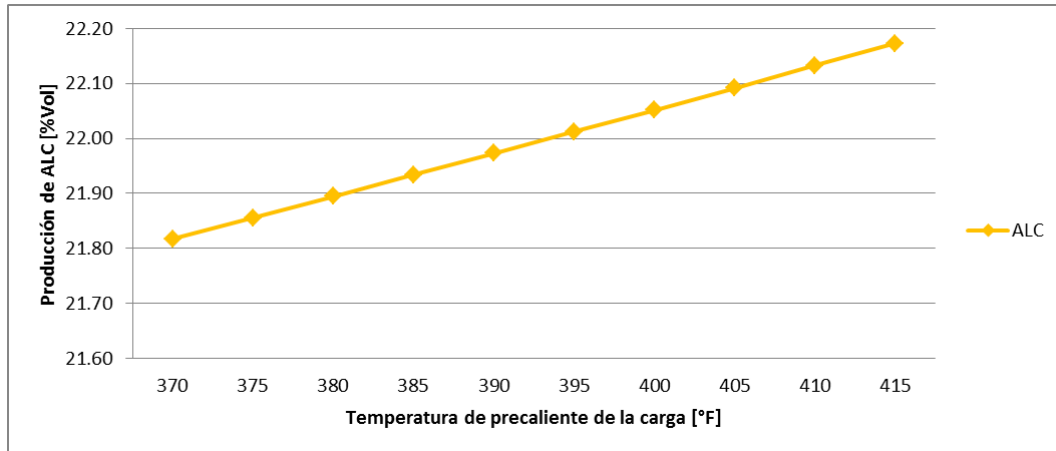
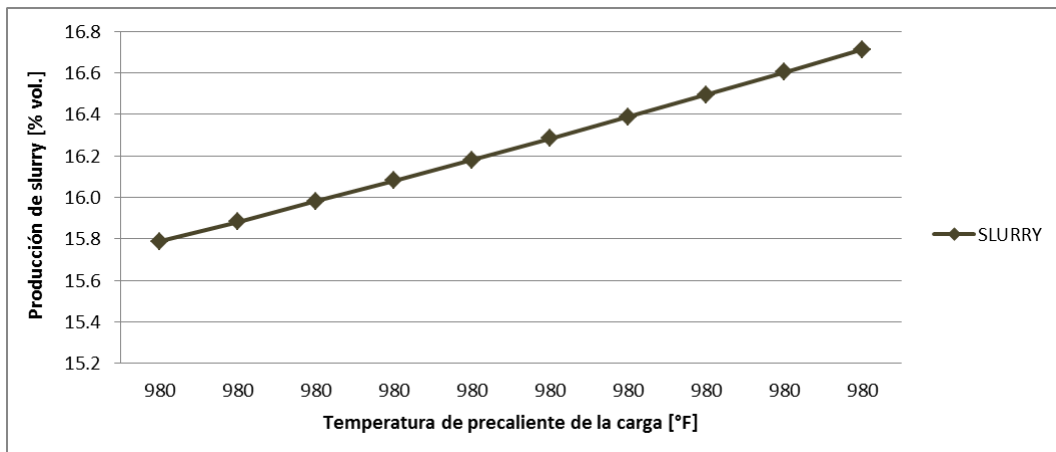


Figura 15. Efecto temperatura de precaliente en la producción de slurry.¹⁴



Para un escenario donde la FCC este orientada a una mayor conversión de gasolina o maximizar la producción de ALC es importante encontrar un equilibrio con otras variables como la temperatura de reacción, composición de carga, adición de catalizador, relación catalizador aceite.

¹³ Fuente: Autor Proyecto.

¹⁴ Fuente: Autor Proyecto.

6.3. RELACIÓN CATALIZADOR ACEITE

La relación catalizador aceite es una variable dependiente muy importante en el proceso. Como lo hemos visto anteriormente está relacionada principalmente con las temperaturas de reacción y de precaliente. Un aumento o disminución en esta variable se refleja en los rendimientos de Gasolina, ALC y Slurry

El incremento en la relación catalizador aceite es directamente proporcional a la conversión de la planta manteniendo en flujo de carga constante. Este fenómeno se debe a un mayor volumen de catalizador regenerado retornando al Riser lo cual incrementa número de sitios activos que favorecen las reacciones en cracking.

La FCC Orthoflow debe operar a combustión total. Para lograrlo requiere manejar un exceso de Oxígeno en el regenerador con el propósito de realizar una combustión completa del Coque a CO₂, de este modo se garantiza la operación continua del precipitador electrostático.

6.4. CALIDAD DE LA CARGA

El flujo de carga a la unidad es constante y obedece a un programa de producción que se debe cumplir en la Refinería. Sin embargo, este flujo puede sufrir cambios en composición o en volumen durante la operación de acuerdo a las necesidades de la Refinería, por este motivo se analizaron los efectos en las variables de procesos y productos.

Uno de los parámetros más monitoreados en la calidad de la carga es el contenido de carbón Conradson (CCR). Un incremento en este parámetro afecta el balance de energía en el convertidor, observándose altas temperaturas en el regenerador por la formación de coque y limitando el procesamiento de carga pesada. El

contenido de CCR en el gasóleo varía entre 0.27 y 1.8 %wt., en el DMO entre 4.3 y 6.37 %wt.

Por la condición operacional de esta FCC en la temperatura máxima de regeneración del catalizador y por el flujo máximo que maneja el compresor de aire, el contenido de CCR en la carga mezclada no debe superar 2,5 %wt.

El incremento de Metales en la carga (níquel, vanadio y sodio) afecta la actividad del catalizador, disminuye la producción de gasolina, incrementa la producción de coque y aumenta la producción de hidrogeno y metano. Para mitigar los efectos negativos que genera el contenido de metales se han realizado reformulaciones en los catalizadores con el objetivo que estos tengan una mayor resistencia metálica.

Otra variable importante en la carga combinada es el contenido de azufre. En el último año este se ha incrementado desde 0.933 %wt a 1.42 %wt, afectando la calidad de los productos.

6.5. ESCENARIOS OPERACIONALES

A partir de los datos recopilados en planta, los obtenidos en el diseño experimental y el análisis de resultados se observó que la FCC Orthoflow mediante ajustes en sus variables operacionales puede ser orientada a maximizar la producción de gasolina o ALC, esto permite definir esquemas de operación para ser adaptados a las necesidades de la Refinería. Los escenarios definidos están limitados a los parámetros operacionales relacionados en la **Tabla 3**.

Con el propósito de incrementar el porcentaje de carga pesada, las variables analizadas son:

X_1 = temperatura de reacción [°F].

X_2 = temperatura de precaliente de carga [°F].

X_3 = adición de catalizador [ton].

X_4 = Gravedad API de la carga combinada [API].

X_5 = Reciclo de APC [BDP].

Y_1 = Producción de gasolina [%Vol].

Y_2 = Producción de ALC [%Vol].

Figura 16 Matriz de correlación

| | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | Y_1 | Y_2 |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| X1 | 1 | | | | | | |
| X2 | -0.01485895 | 1 | | | | | |
| X3 | -0.04378016 | -0.02416992 | 1 | | | | |
| X4 | -0.00924152 | -0.00755958 | -0.02846373 | 1 | | | |
| X5 | 0.03328274 | 0.0018685 | -0.03036758 | -0.85040395 | 1 | | |
| Y1 | 0.70149451 | -0.22417142 | -0.0351721 | -0.10663355 | 0.45900013 | 1 | |
| Y2 | -0.92152803 | 0.21418272 | 0.03150443 | 0.06436997 | -0.24906148 | -0.91086901 | 1 |

En la matriz de correlación Figura 18, se despliega los coeficientes de correlación para cada posible par de variables en el análisis.

En la inspección de la matriz se observa que la variable X_3 y la variable X_4 tienen una relación muy baja con la variable Y_1 y Y_2 pues:

$$R(Y_1, X_3) = -0,035.$$

$$R(Y_2, X_3) = 0,0315.$$

$$R(Y_1, X_4) = -0,1066.$$

$$R(Y_2, X_4) = 0,06437$$

Por lo que no serán buenos predictores de las variables Y_1 y Y_2 .

La variable X_1 , tienen buen potencial como variable de predicción:

$$R (Y1, X1) = 0,7015.$$

$$R (Y2, X1) = -0,9215.$$

Las variables X2 y X5 tienen un potencial no muy fuerte con las variables independientes Y1 y Y2, y no presentan multicolinealidad con la variable X1 pues

$$R (X1, X2) = -0,0148 \text{ y } R (X1, X5) = 0,033$$

$$R (Y1, X2) = -0,224.$$

$$R (Y2, X2) = 0,214.$$

$$R (Y1, X5) = 0,46$$

$$R (Y2, X5) = -0,25$$

La multicolinealidad surge cuando las variables predictoras tienen una correlación muy alta entre ellas, interfiriendo entre sí, ya que explican la misma varianza de la variable dependiente, es decir estas variables de predicción no son independientes y es difícil de distinguir que cantidad del efecto observado se debe a una variable de predicción individual.

Como no es el caso entre todas ellas, se dejaron todas las variables (X_1, X_2, X_3, X_4 y X_5) en el modelo de regresión lineal múltiple y mediante prueba de hipótesis utilizando la estadística t- student se determinó que los coeficientes de regresión muestral son confiables.

6.5.1 Escenario para mayor conversión, máxima producción de Gasolina: A continuación se presentan los resultados estadísticos del análisis de regresión múltiple hecho sobre los valores de las variables y los resultados obtenidos en las simulaciones (Anexo E)

Figura 17. Análisis estadístico máxima producción de gasolina

| <i>Estadísticas de la regresión</i> | |
|--|-------------|
| Coefficiente de correlación múltiple | 0.996918585 |
| Coefficiente de determinación R ² | 0.993846665 |
| R ² ajustado | 0.993276912 |
| Error típico | 0.123388914 |
| Observaciones | 60 |

ANÁLISIS DE VARIANZA

| | <i>Grados de libertad</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i> | <i>Valor crítico de F</i> |
|-----------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------|---------------------------|
| Regresión | 5 | 132.7867871 | 26.55735742 | 1744.345756 | 2.26442E-58 |
| Residuos | 54 | 0.822140505 | 0.015224824 | | |
| Total | 59 | 133.6089276 | | | |

| | <i>Coefficientes</i> | <i>Error típico</i> | <i>Estadístico t</i> | <i>Probabilidad</i> | <i>Inferior 95%</i> | <i>Superior 95%</i> | <i>Inferior 95,0%</i> | <i>Superior 95,0%</i> |
|--------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| Intercepción | -193.9777691 | 3.214953548 | -60.3361032 | 3.07338E-51 | -200.4233628 | -187.5321753 | -200.4233628 | -187.5321753 |
| X1 | 0.124133649 | 0.001989467 | 62.3954389 | 5.14599E-52 | 0.120145008 | 0.128122289 | 0.120145008 | 0.128122289 |
| X2 | -0.017360366 | 0.000892091 | -19.46031896 | 4.56095E-26 | -0.0191489 | -0.015571833 | -0.0191489 | -0.015571833 |
| X3 | 0.351663572 | 0.067683327 | 5.19571936 | 3.19258E-06 | 0.215966672 | 0.487360472 | 0.215966672 | 0.487360472 |
| X4 | 6.539235277 | 0.135447542 | 48.27872976 | 4.18581E-46 | 6.267679306 | 6.810791249 | 6.267679306 | 6.810791249 |
| X5 | 0.003077651 | 4.92199E-05 | 62.52861285 | 4.59344E-52 | 0.002978971 | 0.003176331 | 0.002978971 | 0.003176331 |

Modelo de regresión lineal múltiple.

$$Y_1 = -193,977 + (0,12413X_1) + (-0,017360X_2) + (0,35166X_3) + (6,539235X_4) + (0,003077X_5)$$

De la figura 19, se observa que el coeficiente de determinación es $R^2 = 0,9938$

Lo que indica que el 99,38% de la variación total de Y1 se explica mediante las variables productoras a través de la recta de regresión lineal.

Error Típico = 0.1233

F. Calculado = 1744,34

F calculado = (suma de los cuadrados de la regresión/ (K-1)) / (suma cuadrados residuales / (n-k))

Siendo: K= número de variables (6) y n = el número de corridas (60)

Valor crítico de F = 2,2644E-58

Análisis de la varianza de los datos utilizando la estadística de prueba Fisher y tomando un nivel de significancia alfa = 5%

$\alpha = 0.05$

Grados de libertad $n_1 = 5$ y $n_2 = 54$, con estos parámetros buscamos en la gráfica de distribución de Fisher, F teórico o crítico.

$$F(n_1/n_2, \alpha) = F(5 / 54, 0,05) = 2,41$$

Utilizando la distribución de Fisher, se explica que la ecuación para Y_1 predice un porcentaje significativo de la varianza en la producción de gasolina.

La hipótesis nula y alternativas son:

$$H_0 : \rho^2 = 0$$

$$H_a : \rho^2 > 0$$

Regla de Decisión: Se rechaza la hipótesis nula si el valor estadístico F calculado es mayor que 2,41. Como el F calculado = 1744,34 es mayor que 2,41 la hipótesis nula se rechaza con muy poca probabilidad de error ($2,26 \cdot 10^{-58}$), por tanto se concluye que la ecuación de regresión explica un porcentaje significativo de la varianza de la producción de gasolina.

De acuerdo al análisis anterior el escenario para máxima producción de gasolina se describe en la tabla 4.

Tabla 4. Escenario para máxima producción de Gasolina

| ESCENARIO MAXIMA PRODUCCIÓN DE GASOLINA | | | |
|--|---------------|---------------------------|---------------------------|
| | | Sin reciclo de APC | Con reciclo de APC |
| Variables operativas | Unidad | Valor | Valor |
| Temperatura reacción | °F | 990 | 990 |
| Tempertura precaliente carga | °F | 370 | 370 |
| Adición de catalizador | Ton. b.s. | 4.4 | 4.4 |
| Gravedad °API | °Api | 18.37 | 18.46 |
| Reciclo de APC | BPD | 0 | 1200 |
| Temperatura regenerador fase densa | °F | 1320.33 | 1313.29 |
| Temperatura regenerador fase diluida | °F | 1348.18 | 1341.14 |
| Carga | Unidad | Valor | Valor |
| DMO | KBPD | 3.8 | 3.8 |
| Gasoleo | KBPD | 15.2 | 15.2 |
| Productos reactor | Unidad | Valor | Valor |
| C3/C3= | %vol | 4.22 | 4.31 |
| GLP | %vol | 14.63 | 15.03 |
| GASOLINA | %vol | 46.96 | 48.07 |
| ALC | %vol | 20.06 | 20.76 |
| APC + SLURRY | %vol | 14.72 | 12.3 |
| Coque | %wt | 4.22 | 4.31 |
| Conversión | %vol | 65.2 | 67.9 |
| GRAVEDAD API PRODUCTOS | Unidad | Valor | Valor |
| Aceite liviano de ciclo (ALC) | °Api | 16.74 | 15.51 |
| Aceite pesado de ciclo (APC) | °Api | 10.10 | 8.07 |
| SLURRY | °Api | 1.20 | -0.59 |

Para el caso de la operación en escenario de máxima gasolina, sin reciclo de APC la conversión fue de 65.2% vol. menor a la conversión que se obtiene con reciclo de APC de 67.9%vol. Cuando la FCC se trabaja en este escenario la gravedad API del slurry disminuye dificultando la operación del sistema de fondos ocasionando obstrucciones en los intercambiadores de calor.

Los beneficios económicos esperados en este escenario de operación con reciclo de APC es de USD 0.39 por Barril de carga a la unidad.

6.5.2 Escenario para mayor producción de ALC:

Figura 18. Análisis estadístico máxima producción de ALC

| Estadísticas de la regresión | |
|--|-------------|
| Coefficiente de correlación múltiple | 0.999351065 |
| Coefficiente de determinación R ² | 0.998702552 |
| R ² ajustado | 0.998582418 |
| Error típico | 0.026327147 |
| Observaciones | 60 |

ANÁLISIS DE VARIANZA

| | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Promedio de los cuadrados | F | Valor crítico de F |
|-----------|--------------------|-------------------|---------------------------|-------------|--------------------|
| Regresión | 5 | 28.81028405 | 5.76205681 | 8313.233026 | 1.27486E-76 |
| Residuos | 54 | 0.037428407 | 0.000693119 | | |
| Total | 59 | 28.84771246 | | | |

| | Coefficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad | Inferior 95% | Superior 95% | Inferior 95,0% | Superior 95,0% |
|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| Intercepción | 122.5540672 | 0.685965621 | 178.6591973 | 1.51191E-76 | 121.1787889 | 123.9293455 | 121.1787889 | 123.9293455 |
| X1 | -0.078104171 | 0.000424487 | -183.9966446 | 3.09225E-77 | -0.078955216 | -0.077253126 | -0.078955216 | -0.077253126 |
| X2 | 0.007664538 | 0.000190343 | 40.26701407 | 5.80488E-42 | 0.007282924 | 0.008046153 | 0.007282924 | 0.008046153 |
| X3 | -0.104362657 | 0.014441402 | -7.226629382 | 1.7653E-09 | -0.133315924 | -0.07540939 | -0.133315924 | -0.07540939 |
| X4 | -1.458859362 | 0.028900062 | -50.47945419 | 3.96887E-47 | -1.516800498 | -1.400918226 | -1.516800498 | -1.400918226 |
| X5 | -0.000697493 | 1.05019E-05 | -66.41585939 | 1.84314E-53 | -0.000718548 | -0.000676438 | -0.000718548 | -0.000676438 |

$$Y_2 = 122,5540 + (-0,0781X_1) + (0,00766X_2) + (-0,10436X_3) + (-1,4588X_4) + (-0,00069X_5)$$

$$R^2 = 0,9987$$

Lo que indica que el 99,87% de la variación total de Y2 se explica mediante las variables predictoras a través de la recta de regresión lineal múltiple.

$$\text{Error Típico} = 0,0263$$

$$F \text{ Calculado} = 8313,23$$

$$\text{Valor crítico de F} = 1,2748E-76$$

Análisis de la varianza para los datos utilizando la estadística de Fisher asumiendo un nivel de significancia de 5%:

$$\alpha = 0.05$$

$$\text{Grados de libertad } n_1 = 5 \text{ y } n_2 = 54$$

$$F(n_1/n_2, \alpha) = F(5 / 54, 0,05) = 2,41$$

Utilizando la distribución de Fisher, se explica que la ecuación de regresión lineal múltiple para Y_2 predice un porcentaje significativo de la varianza en la producción de ALC.

La prueba F se usa para determinar si la ecuación de regresión múltiple explica un porcentaje significativo de la varianza de Y_2 .

La hipótesis nula y alternativas son:

$$H_0: \rho^2 = 0$$

$$H_a: \rho^2 > 0$$

Regla de Decisión: Se rechaza la hipótesis nula si el valor estadístico F calculado es mayor que 2,41. Como el F calculado (8313) es mayor que 2,41 la hipótesis nula se rechaza con muy poca probabilidad de error ($1,27 \cdot 10^{-76}$) y se concluye que la ecuación de regresión lineal múltiple muestral explica un porcentaje significativo de la varianza en la producción de ALC.

El escenario para máxima producción de ALC se describe en la tabla 5.

Tabla 5. Escenario para máxima producción de ALC.

| ESCENARIO MAXIMA PRODUCCIÓN DE ALC | | | |
|---|---------------|---------------------------|---------------------------|
| | | Sin reciclo de APC | Con reciclo de APC |
| Variables operativas | Unidad | Valor | Valor |
| Temperatura reacción | °F | 970 | 970 |
| Tempertura precaliente carga | °F | 415 | 415 |
| Adición de catalizador | Ton. b.s. | 4.2 | 4.2 |
| Gravedad °API | °Api | 18.63 | 18.65 |
| Reciclo de APC | BPD | 0 | 1200 |
| Temperatura regenerador fase densa | °F | 1348.92 | 1339.15 |
| Temperatura regenerador fase diluida | °F | 1376.77 | 1367 |
| Carga | Unidad | Valor | Valor |
| DMO | KBPD | 4.56 | 4.56 |
| Gasoleo | KBPD | 14.44 | 14.44 |
| Productos reactor | Unidad | Valor | Valor |
| C3/C3= | %vol | 3.91 | 3.98 |
| GLP | %vol | 11.37 | 12.02 |
| GASOLINA | %vol | 42.41 | 43.35 |
| ALC | %vol | 22.33 | 22.74 |
| APC + SLURRY | %vol | 21.36 | 18.96 |
| Coque | %wt | 5.88 | 6.22 |
| Conversión | %vol | 56.29 | 58.98 |
| GRAVEDAD API PRODUCTOS | Unidad | Valor | Valor |
| Aceite liviano de ciclo (ALC) | °Api | 20.32 | 19.45 |
| Aceite pesado de ciclo (APC) | °Api | 14.77 | 13.11 |
| SLURRY | °Api | 5.29 | 3.84 |

Para el escenario de máxima producción de ALC, con reciclo de APC la conversión aumento de 56.29% vol. a 58.98% vol. Por el esquema de operación de la refinería y con el objeto de suplir la demanda de productos en la región, la FCC Orthoflow está orientada a maximizar la producción de ALC.

El uso de reciclo de APC en este esquema de operación contribuye a una mayor selectividad de ALC y gasolina a expensas de la producción de slurry, a medida

que se disminuye la temperatura de reacción, se reduce la formación de aromáticos lo que hace que las fracciones de ALC, APC y slurry sean menos aromáticas y más craqueables a ALC y una parte a gasolina.

Con el reciclo de APC a la carga, se observa una disminución de la temperatura del regenerador, permitiendo incrementar el volumen de carga pesada de DMO de 20% a 24% con respecto al escenario de máxima producción de gasolina.

El beneficio económico en este escenario de operación con reciclo de APC es de USD 0.37 por Barril de carga a la unidad, este beneficio se puede incrementar por el mayor consumo de DMO en la mezcla de carga.

Los precios considerados para productos y cargas para los escenarios evaluados se relacionan en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Precio de productos y carga.

| CARGAS | UNIDAD | VALOR |
|--------|--------|-------|
| GAO | USD\$ | 41.30 |
| DMO | USD\$ | 37.30 |

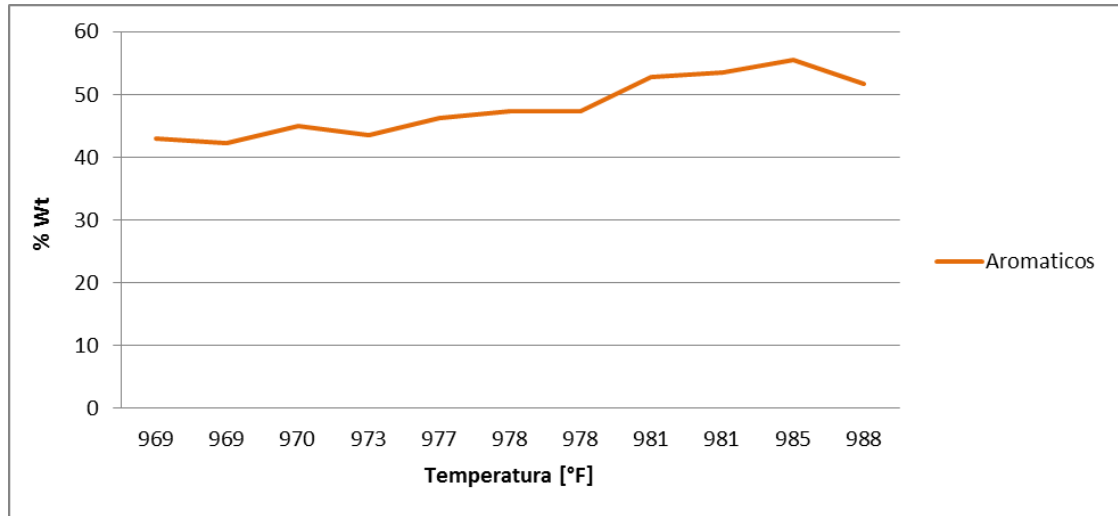
| PRODUCTOS | UNIDAD | VALOR |
|-----------|--------|-------|
| C3/C3= | USD\$ | 14.35 |
| GLP | USD\$ | 26.60 |
| GASOLINA | USD\$ | 52.00 |
| ALC | USD\$ | 49.70 |
| SLURRY | USD\$ | 26.70 |

6.6. RECICLO DE APC

Cuando se trabaja a baja severidad en la unidad, el APC presenta un menor carácter aromático (**Figura 21**). Los aromáticos se reducen considerablemente, este comportamiento es importante cuando en este escenario se utiliza como

reciclo al Riser APC, porque este tiende a craquear hacia ALC y otra parte a Gasolina [13].

Figura 19. Relación de la severidad Vs carácter aromático del APC.¹⁵



Durante la operación con reciclo de APC no se observó incremento en la temperatura de la fase densa del regenerador, esto se da como resultado al bajo contenido de carbón conradson en el APC (0.02 % wt.) tabla 7, lo que permitió incrementar la carga pesada al Riser, en la tabla 7 se describe las características del APC producto en planta..

Tabla 7. Destilación APC Orthoflow

| Estudio | Fecha | Muestra | Análisis | Valor | Uom |
|---------------------|------------|---------------|---------------------------|-------|--------|
| U-500 URC ORTHOFLOW | 08/03/2016 | APC ORTHOFLOW | PTO INICIAL DE EBULLICION | 497.8 | °F |
| U-500 URC ORTHOFLOW | 08/03/2016 | APC ORTHOFLOW | 5% vol RECOBRADO | 577.8 | °F |
| U-500 URC ORTHOFLOW | 08/03/2016 | APC ORTHOFLOW | 10% vol RECOBRADO | 608.5 | °F |
| U-500 URC ORTHOFLOW | 08/03/2016 | APC ORTHOFLOW | 50% vol RECOBRADO | 662.2 | °F |
| U-500 URC ORTHOFLOW | 08/03/2016 | APC ORTHOFLOW | 90% vol RECOBRADO | 707.2 | °F |
| U-500 URC ORTHOFLOW | 08/03/2016 | APC ORTHOFLOW | 95% vol RECOBRADO | 724.6 | °F |
| U-500 URC ORTHOFLOW | 08/03/2016 | APC ORTHOFLOW | PTO FINAL DE EBULLICION | 730.8 | °F |
| U-500 URC ORTHOFLOW | 06/05/2016 | APC ORTHOFLOW | MICROCARBON RESIDUAL | 0.02 | g/100g |

¹⁵ Fuente: Autor Proyecto.

La inyección de APC como reciclo en la FCC con cargas combinadas con DMO benefician el proceso debido a que el APC por sus características aromáticas actúa como diluyente, manteniendo los asfaltenos presentes en el DMO en suspensión en la emulsión de hidrocarburo, evitando que estos se transformen fácilmente en coque al entrar en contacto con el catalizador regenerado [13].

No se encontró documentación que explique porque no es utilizado el reciclo de APC al Riser en la planta, en la **Tabla 8** se relaciona el flujo de APC promedio día en los últimos 6 años.

Tabla 8. Flujo de reciclo de APC promedio año

| AÑO | Bls/día |
|------------|----------------|
| 2010 | 111.93 |
| 2011 | 18.48 |
| 2012 | 44.30 |
| 2013 | 116.60 |
| 2014 | 30.60 |
| 2015 | 84.54 |

7. CONCLUSIONES

- Las unidades de FCC disponen de un rango amplio de variables y escenarios de operación. De las variables analizadas: temperatura de reacción, temperatura de precaliente de carga, adición de catalizador, Gravedad API de la carga combinada y Reciclo de APC para el sistema de reacción, se determinó mediante el modelo de regresión lineal múltiple y mediante prueba de hipótesis utilizando la estadística t- student que los coeficientes de regresión muestral para cada una de las variables seleccionadas son confiables para determinar un escenario operacional de baja o alta severidad.
- Cuando se trabaja en escenario de temperatura baja de reacción, el uso de reciclo de APC es muy importante porque se obtiene una mayor selectividad a ALC a desventajas de Slurry.
- La utilización del reciclo de APC cuando la FCC trabaja a baja carga aumenta el flujo volumétrico total al Riser, e incrementa la relación catalizador aceite.
- Con el uso del reciclo de APC al Riser disminuyó la temperatura de la fase densa del regenerador lo que permitió procesar una carga con mayor concentración de DMO.
- La inyección de APC como reciclo en la carga combinada incrementa la producción de gasolina y disminuye la producción de Slurry.

8. RECOMENDACIONES

- Realizar una evaluación del consumo de APC como reciclo en cada una de las unidades de Cracking de la Refinería.
- Cuando se tiene baja disponibilidad de carga a la unidad, se recomienda utilizar reciclo de APC con el objeto de compensar el flujo volumétrico mínimo requerido por diseño pasando por las boquillas de carga y así favorecer la atomización y dispersión de la carga y sin afectar los rendimientos.
- La carga a las unidades de Cracking debe ser suministrada desde un tanque exclusivo para esta actividad, durante este proceso este tanque no debe recibir la producción de las unidades de Topping, con el fin de garantizar una mayor estabilidad en la operación de las FCC.
- El muestreo y análisis de laboratorio a la carga de las URC es muy bajo, se requiere ampliar la rutina de muestras y los datos analizados, para facilitar la toma de decisiones en el control operacional y la orientación en la producción de la unidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FELIX, G. (2006, ca.). *Simulación del proceso FCC: Caracterización de las corrientes de alimentación y productos del Riser a través de la función de distribución gamma*. Tesis de maestría Ingeniería Química. Recuperado de:
<http://www.iqcelaya.itc.mx/~richart/TesisDoctorado/2006%20Felix%20Flores.pdf>

[2] REZA SADEGHBEIGI. *Fluid Catalytic Cracking Handbook*. 2 ed. Houston. TX. Gulf publishing Company, 2000. 126 p

[3] VICEPRESIDENCIA DE REFINACIÓN Y PETROQUÍMICA GERENCIA COMPLEJO BARRANCABERMEJA. *Manual de descripción de procesos de la unidad FCCU Orthoflow*.

[4] FABRICA CARIOCA DE CATALISADORES, Flexcool: mayor control sobre la temperatura del regenerador en el procesamiento de alta severidad. Febrero, 2014. Ed 03, p. 6-12

[5] Delgado, J.G, Delgado, G. y Mercado, R. (2009). *Balances de masa y energía simplificados, aplicados a un proceso de craqueo catalítico de petróleo*. Recuperado de https://www.google.com.co/?gfe_rd=ssl&ei=UZzKVc_SNIad-gXGuYSIDA#q=.balances+de+masa+y+energia+unidades+de+cracking

[6] Cengel, Yunes A. & Boles, Michael A. *Termodinámica séptima edición*. New York. McGraw-Hill, 2011.

[7] Stratiev, D., y Dinkov, R. (2007), Evaluation of FCC unit process variables impact on yield distribution and product quality part I. Evaluation of FCC unit variables impact on yield distribution. *Petroleum & coal* (49), 71-77.

[8] Chanaga, T., Giraldo, S., & Almaza, L. (2008). *Modificación de la relación zeolita-matriz en los catalizadores de FCC y su impacto en los rendimientos y la calidad de los destilados medios.* Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-21262009000100001&script=sci_arttext

[9] Bhattacharyya, D., Karthikeyani, A.V., Mandal, S., & Das, A.K. Middle Destillate Maximization in FCC Unit. En: encuentro sudamericano de Craqueo Catalítico (6: 19-22, septiembre: Gramado – Rio Grande do Sul). Memorias. FCC S.A., 2005 ca. p.28

[10] TOREM, Marcelo, LAU LAM, Yiu & ALVARENGA, Claudia. Solucoes catalíticas para aplicacoes de frontera no proceso de FCC. Septiembre, 2005. 6° Encuentro Sudamericano de Craqueo Catalítico..

[11] Mo, W., Hadjigeorge G., Khouw F., Van der Werf R., Muller F (2002). FCCU process modelling and development in Shell. [Article]. Hydrocarbon Asia, (10), 30-42.

[12] ZERPA, Luis y QUEIPO, Néstor. Modelos sustitutos y diseño óptimo de sistemas complejos. República Bolivariana de Venezuela Universidad del Zulia Facultad de Ingeniería División de Estudios para Graduados, 2004. 10 p. Instituto de Cálculo Aplicado

[13] GOMEZ, Carlo, VARGAS, Clemencia, GRIMALDOS, Maria y PEREZ, Pedro. Desempeño del catalizador inteligente Coral 733 Orthoplus en la URC Orthoflow de Ecopetrol S.A. Septiembre, 2005. 6° Encuentro Sudamericano de Craqueo Catalítico.

BIBLIOGRAFIA

BHATTACHARYYA, D., KARTHIKEYANI, A.V., MANDAL,S., & DAS, A.K. Middle Destillate Maximization in FCC Unit. En: encuentro sudamericano de Craqueo Catalítico (6: 19-22, septiembre: Gramado – Rio Grande do Sul). Memorias. FCC S.A., 2005 ca. p.28

CENGEL, YUNES A. & BOLES, MICHAEL A. Termodinámica séptima edición. New York. McGraw-Hill, 2011.

CHANAGA, T., GIRALDO, S., & ALMAZA, L. (2008). Modificación de la relación zeolita-matriz en los catalizadores de FCC y su impacto en los rendimientos y la calidad de los destilados medios 2008. [en línea] {citado 15 de junio de 2016} Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-21262009000100001&script=sci_arttext

DELGADO, J.G, DELGADO, G. Y MERCADO, R. (2009). Balances de masa y energía simplificados, aplicados a un proceso de craqueo catalítico de petróleo. 2009. [en línea] {citado 21 de junio de 2016} Disponible en:https://www.google.com.co/?gfe_rd=ssl&ei=UZzKVc_SNIad-gXGuYSIDA#q=.balances+de+masa+y+energia+unidades+de+cracking

FABRICA CARIOCA DE CATALISADORES, Flexcool: mayor control sobre la temperatura del regenerador en el procesamiento de alta severidad. Febrero, 2014. Ed 03, p. 6-12

FELIX, G. Simulación del proceso FCC: Caracterización de las corrientes de alimentación y productos del Riser a través de la función de distribución gamma.

Tesis de maestría Ingeniería Química. 2006 [en línea] {citado 25 de junio de 2016}
Disponible en: <http://www.iqcelaya.itc.mx/~richart/TesisDoctorado/2006%20Felix%20Flores.pdf>

GOMEZ, Carlo, VARGAS, Clemencia, GRIMALDOS, Maria y PEREZ, Pedro. Desempeño del catalizador inteligente Coral 733 Orthoplus en la URC Orthoflow de Ecopetrol S.A. Septiembre, 2005. 6° Encuentro Sudamericano de Craqueo Catalítico.

MO, W., HADJIGEORGE G., KHOUW F., VAN DER WERF R., MULLER F. FCCU process modelling and development in Shell. [Article]. Hydrocarbon Asia, (10), 30-42. 2002

REZA SADEGHBEIGI. Fluid Catalytic Cracking Handbook. 2 ed. Houston. TX. Gulf publishing Company, 2000. 126 p

STRATIEV, D., Y DINKOV, R. Evaluation of FCC unit process variables impact on yield distribution and product quality part I. Evaluation of FCC unit variables impact on yield distribution. Petroleum & coal (49), 71-77. 2007

TOREM, Marcelo, LAU LAM, Yiu & ALVARENGA, Claudia. Solucoes catalíticas para aplicacoes de frontera no proceso de FCC. Septiembre, 2005. 6° Encuentro Sudamericano de Craqueo Catalítico..

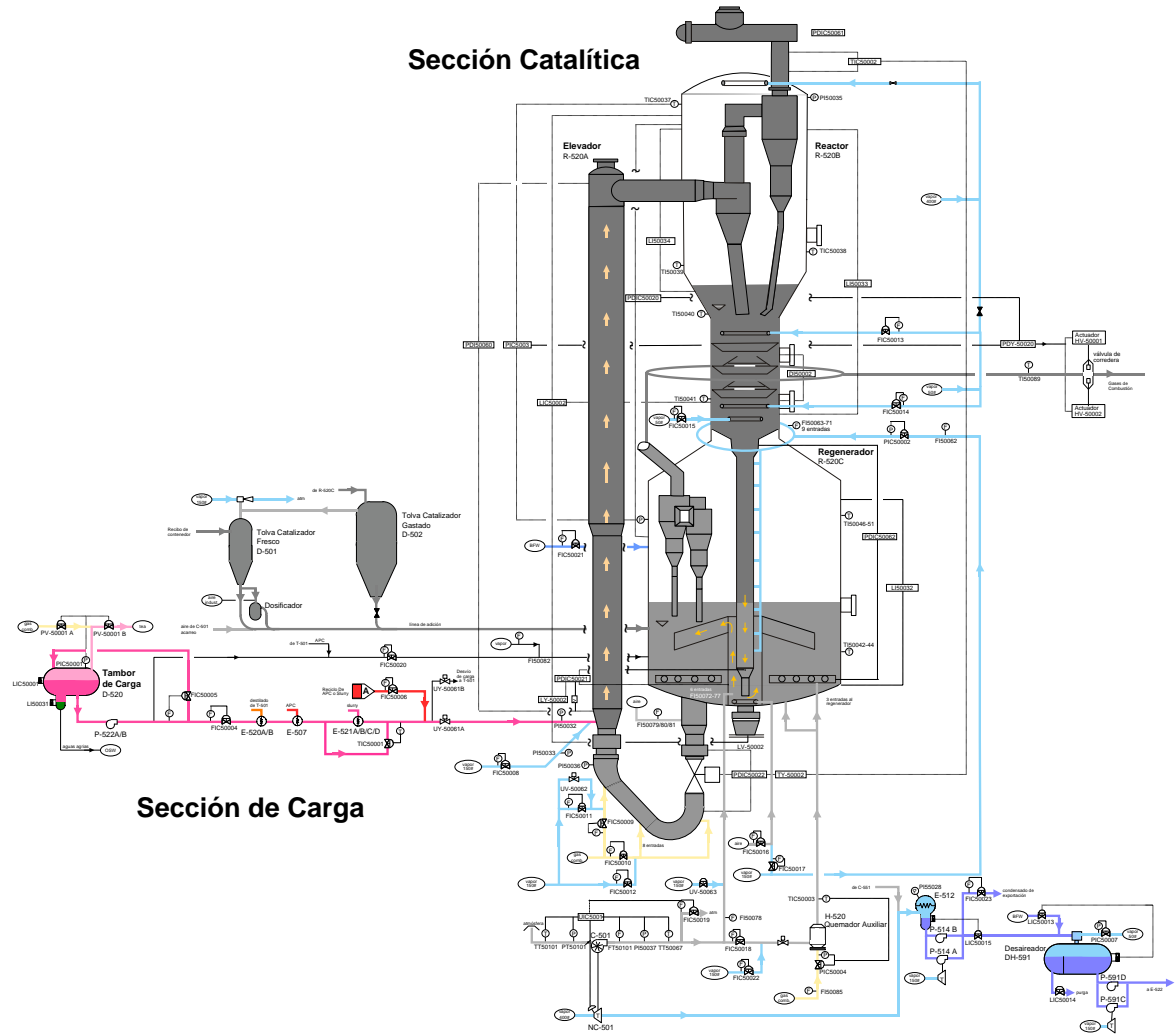
VICEPRESIDENCIA DE REFINACIÓN Y PETROQUÍMICA GERENCIA COMPLEJO BARRANCABERMEJA. Manual de descripción de procesos de la unidad FCCU Orthoflow.

ZERPA, Luis y QUEIPO, Néstor. Modelos sustitutos y diseño óptimo de sistemas complejos. República Bolivariana de Venezuela Universidad del Zulia Facultad de

Ingeniería División de Estudios para Graduados, 2004. 10 p. Instituto de Cálculo
Aplicado

ANEXOS

Anexo A. Diagrama de flujo sistema de reacción.



Fuente: Suministrado por Refinería Barrancabermeja – confidencial. 2009.

Anexo B. Propiedades cargas individuales

| Propiedad | Unidad | GASOLEO | DMO |
|------------------|--------|---------|-------|
| Densidad a 15°C | g/ml | 0.934 | 0.966 |
| Densidad API | °API | 19.86 | 14.90 |
| Carbon Conradson | % wt | 0.73 | 5.89 |
| Azufre | ppm | 11840 | 14800 |
| Nitrogeno Basico | ppm | 516 | 1004 |
| Nitrogeno Total | ppm | 1600 | 2920 |
| Niquel | ppm | 1.79 | 8.67 |
| Vanadio | ppm | 3.15 | 9.96 |

| Destilacion D-7169 | Unidad | GASOLEO | DMO |
|--------------------|--------|---------|-----|
| Gasolina < 450°F | % wt | 0 | 0 |
| 450 a 650°F | % wt | 12 | 1 |
| > 750°F | % wt | 68 | 92 |
| > 1000°F | % wt | 5 | 70 |

| Aromaticos | Unidad | GASOLEO | DMO |
|--------------------|--------|---------|-------|
| Monoaromáticos | % wt | 4.69 | 5.22 |
| Diaromáticos | % wt | 3.42 | 3.75 |
| Triaromáticos | % wt | 3.64 | 3.60 |
| Tetra-aromáticos | % wt | 2.59 | 5.64 |
| Aromáticos Totales | % wt | 14.34 | 18.21 |

Anexo C. Simulación con y sin reciclo de APC

| VARIABLES | UNIDAD | CASO SIN RECICLO DE APC | CASO CON RECICLO DE APC |
|--------------------------------|--------|----------------------------|----------------------------|
| CARGA COMBINADA | bls/d | 19,000.0 | 19,000.0 |
| Gravedad API | API | 18.8 | 18.4 |
| Residuo Carbon Conradson (CCR) | %wt | 1.79 | 1.66 |
| Niquel | ppm | 3.2 | 3.0 |
| Vanadio | ppm | 4.5 | 4.2 |

| | | | |
|--------------------------------|-------|------|------|
| Gasóleo | % vol | 80.0 | 80.0 |
| Gravedad API | API | 19.9 | 19.9 |
| Residuo Carbon Conradson (CCR) | %wt | 0.73 | 0.73 |
| Niquel | ppm | 1.8 | 1.8 |
| Vanadio | ppm | 3.2 | 3.2 |

| | | | |
|--------------------------------|-------|------|------|
| DMO | % vol | 20.0 | 20.0 |
| Gravedad API | API | 14.9 | 14.9 |
| Residuo Carbon Conradson (CCR) | %wt | 5.9 | 5.9 |
| Niquel | ppm | 8.7 | 8.7 |
| Vanadio | ppm | 10.0 | 10.0 |

| | | | |
|--------------------------------|-------|---|---------|
| RECICLO APC | bls/d | 0 | 1,500.0 |
| Gravedad API | API | 0 | 18.9 |
| Residuo Carbon Conradson (CCR) | %wt | 0 | 0.02 |

| Condiciones de operación | | | |
|-------------------------------|------|----------|----------|
| Temp de reacción | °F | 990.0 | 990.0 |
| Temp de precaliente | °F | 370.0 | 370.0 |
| Temp Fase Densa Rg | °F | 1,320.3 | 1,311.6 |
| O2 en Gas de combustion | %mol | 3.0 | 3.0 |
| Aire al Regenerador | scfm | 58,080.0 | 62,013.0 |
| Relacion Cat/Oil | | 8.3 | 8.5 |
| Adición de catalizador fresco | Ton | 4.4 | 4.4 |

| PRODUCTOS | | | |
|--------------|-------|-------|-------|
| GLP | % vol | 14.63 | 15.51 |
| GASOLINA | % vol | 46.97 | 48.60 |
| ALC | % vol | 20.07 | 19.72 |
| HCO + SLURRY | % vol | 14.72 | 11.71 |
| Conversión | % vol | 65.21 | 68.56 |

Anexo D. Balances de la planta, rendimientos salida reactor.

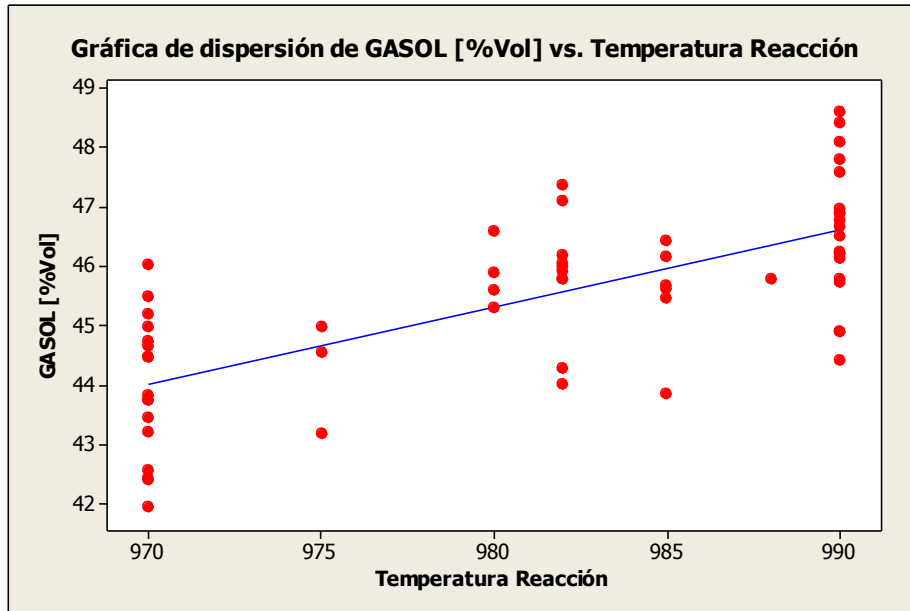
| ORTHOFLOW | | Balance N° | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 |
|--|-------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| | | Tiempo Inicial | 28-ene-16 | 29-ene-16 | 30-ene-16 | 31-ene-16 | 1-feb-16 | 2-feb-16 | 3-feb-16 | 21-feb-16 | 19-mar-16 | 3-mar-16 | 15-mar-16 |
| | | Tiempo Final | 29-ene-16 | 30-ene-16 | 31-ene-16 | 1-feb-16 | 2-feb-16 | 3-feb-16 | 4-feb-16 | 22-feb-16 | 20-mar-16 | 4-mar-16 | 16-mar-16 |
| Menú | Descripción | | | | | | | | | | | | |
| Descripción | | Tag | Unidad | | | | | | | | | | |
| BALANCE U-500 ORTHOFLOW | | | | | | | | | | | | | |
| Rendimientos Producto Reactor, %vol | | | | | | | | | | | | | |
| H2S | %vol | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Hidrógeno, H2 | %vol | 5.77 | 5.99 | 5.86 | 5.81 | 5.74 | 5.53 | 5.31 | 5.47 | 5.09 | 5.62 | 5.54 | |
| Metano, CH4 | %vol | 5.29 | 5.49 | 5.37 | 5.32 | 5.26 | 5.07 | 4.87 | 5.29 | 6.83 | 5.60 | 5.62 | |
| Etano, C2H6 | %vol | 2.49 | 2.61 | 2.56 | 2.53 | 2.50 | 2.41 | 2.30 | 2.65 | 3.35 | 2.87 | 2.88 | |
| Etileno, C2H4 | %vol | 2.36 | 2.45 | 2.40 | 2.38 | 2.35 | 2.26 | 2.17 | 2.79 | 2.97 | 2.88 | 2.83 | |
| Gas Seco | %vol | 15.94 | 16.57 | 16.22 | 16.06 | 15.87 | 15.30 | 14.68 | 16.21 | 18.23 | 16.97 | 16.87 | |
| Propano, C3H8 | %vol | 0.29 | 0.45 | 0.46 | 0.46 | 0.42 | 0.39 | 0.34 | -0.59 | 1.41 | 0.02 | 1.40 | |
| Propileno, C3H6 | %vol | 6.60 | 7.02 | 7.19 | 7.18 | 7.08 | 7.03 | 6.94 | 7.10 | 7.09 | 7.27 | 5.69 | |
| C3 Totales | %vol | 6.89 | 7.47 | 7.65 | 7.64 | 7.50 | 7.42 | 7.28 | 6.50 | 8.50 | 7.29 | 7.09 | |
| I-Butano, I-C4H10 | %vol | 0.30 | 0.44 | 0.46 | 0.47 | 0.42 | 0.40 | 0.38 | -0.17 | 0.01 | 0.03 | 0.65 | |
| N-Butano, N-C4H10 | %vol | 0.36 | 0.62 | 0.68 | 0.72 | 0.62 | 0.58 | 0.58 | -0.46 | -0.57 | -0.32 | 1.32 | |
| i2-Buteno | %vol | 0.81 | 0.82 | 0.84 | 0.85 | 0.83 | 0.83 | 0.80 | 0.86 | 0.86 | 0.81 | 0.80 | |
| 1-Buteno | %vol | 0.42 | 0.42 | 0.43 | 0.43 | 0.42 | 0.42 | 0.40 | 0.43 | 0.46 | 0.41 | 0.41 | |
| i-Buteno | %vol | 0.42 | 0.42 | 0.43 | 0.43 | 0.42 | 0.42 | 0.40 | 0.43 | 0.46 | 0.41 | 0.41 | |
| c2-Buteno | %vol | 0.86 | 0.87 | 0.89 | 0.89 | 0.88 | 0.87 | 0.85 | 0.91 | 0.91 | 0.86 | 0.85 | |
| 1,3-Butadieno | %vol | 0.23 | 0.24 | 0.24 | 0.23 | 0.23 | 0.22 | 0.21 | 0.24 | 0.27 | 0.24 | 0.24 | |
| Butilenos | %vol | 2.74 | 2.78 | 2.83 | 2.84 | 2.79 | 2.76 | 2.66 | 2.86 | 2.96 | 2.74 | 2.70 | |
| C4 Totales | %vol | 3.40 | 3.83 | 3.97 | 4.02 | 3.82 | 3.73 | 3.62 | 2.23 | 2.40 | 2.45 | 4.66 | |
| GLP | %vol | 10.29 | 11.30 | 11.62 | 11.66 | 11.33 | 11.15 | 10.90 | 8.74 | 10.90 | 9.74 | 11.75 | |
| Nafta Liviana | %vol | 36.86 | 37.94 | 37.32 | 37.82 | 37.72 | 37.59 | 36.96 | 40.34 | 36.73 | 35.90 | 42.07 | |
| Nafta Pesada | %vol | 13.53 | 13.58 | 13.40 | 13.59 | 13.98 | 14.34 | 13.80 | 13.68 | 14.41 | 14.88 | 14.11 | |
| Nafta Total | %vol | 50.39 | 51.52 | 50.72 | 51.41 | 51.71 | 51.93 | 50.76 | 54.02 | 51.14 | 50.78 | 56.19 | |
| ALC | %vol | 19.35 | 18.90 | 19.36 | 19.19 | 19.16 | 19.25 | 20.47 | 24.18 | 20.76 | 20.57 | 17.35 | |
| HCO | %vol | 9.09 | 8.71 | 8.83 | 8.70 | 8.68 | 8.73 | 8.68 | 5.20 | 7.79 | 7.86 | 6.47 | |
| Fondo | %vol | 10.82 | 10.20 | 10.32 | 10.14 | 10.07 | 9.94 | 9.61 | 8.81 | 8.73 | 7.80 | 7.58 | |
| Slurry | %vol | 19.90 | 18.91 | 19.15 | 18.85 | 18.74 | 18.67 | 18.29 | 14.01 | 16.52 | 15.66 | 14.05 | |
| Expansión Volumétrica | %vol | 99.93 | 100.62 | 100.84 | 101.11 | 100.94 | 101.00 | 100.42 | 100.95 | 99.33 | 96.74 | 99.34 | |
| Conversión | %vol | 60.75 | 62.20 | 61.49 | 61.96 | 62.09 | 62.08 | 61.24 | 61.81 | 62.71 | 63.77 | 68.60 | |
| GASÓLEO | Ton/día | 2296 | 2386 | 2446 | 2434 | 2423 | 2430 | 2475 | 2100 | 2019 | 2067 | 2032 | |
| | BPD | 15378 | 15985 | 16382 | 16304 | 16231 | 16275 | 16578 | 14067 | 13523 | 13849 | 13613 | |
| Flujo PI | BPD | 15378 | 15985 | 16382 | 16304 | 16231 | 16275 | 16578 | 14067 | 13523 | 13849 | 13613 | |
| Flujo Corregido por medidor de flujo y Usuario | BPD | 15378 | 15985 | 16382 | 16304 | 16231 | 16275 | 16578 | 14067 | 13523 | 13849 | 13613 | |
| Flujo Corregido por medidor de flujo y Usuario | Klb/hr | 211 | 219 | 225 | 224 | 223 | 223 | 227 | 193 | 185 | 190 | 187 | |
| Temperatura | °F | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | |
| DMO | Ton/día | 617 | 664 | 690 | 700 | 713 | 706 | 606 | 667 | 677 | 690 | 678 | |
| | BPD | 4025 | 4333 | 4499 | 4568 | 4651 | 4610 | 3957 | 4349 | 4416 | 4501 | 4423 | |
| Flujo PI | BPD | 4025 | 4333 | 4499 | 4568 | 4651 | 4610 | 3957 | 4349 | 4416 | 4501 | 4423 | |
| Flujo Corregido por medidor de flujo y Usuario | BPD | 4025 | 4333 | 4499 | 4568 | 4651 | 4610 | 3957 | 4349 | 4416 | 4501 | 4423 | |
| Flujo Corregido por medidor de flujo y Usuario | Klb/hr | 57 | 61 | 63 | 64 | 65 | 65 | 56 | 61 | 62 | 63 | 62 | |
| Temperatura | °F | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | |

Anexo E. Data diseño de experimento

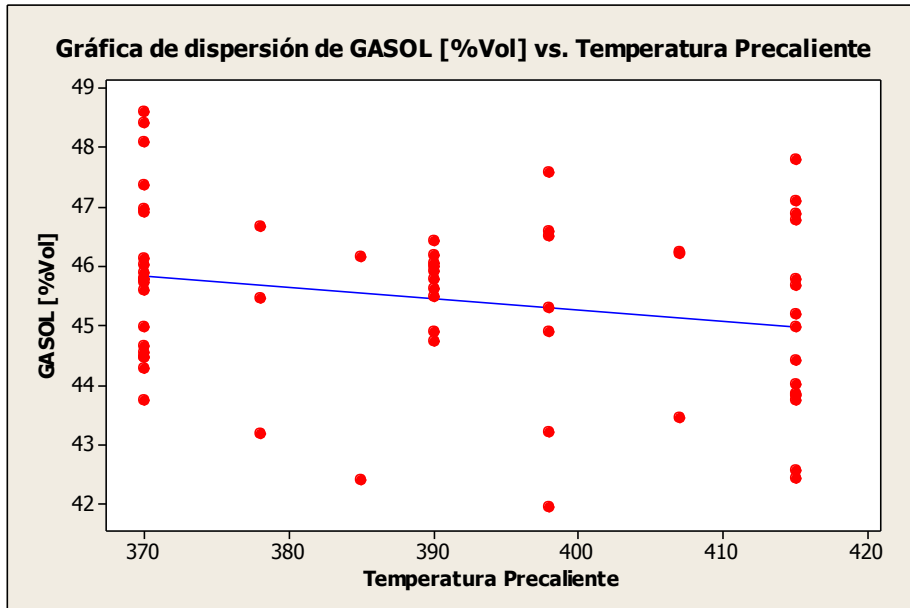
| Temperatura Reacción [°F] | Temperatura Precaliente [°F] | Carga Combinada ° API | Reciclo APC [Kbl/día] | Adición de Catalizador [Ton] |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| 970 | 415 | 18.64 | 0 | 4.2 |
| 990 | 407 | 18.58 | 0.5 | 3.8 |
| 970 | 370 | 18.14 | 1.5 | 3.8 |
| 990 | 370 | 18.24 | 1 | 3.8 |
| 970 | 398 | 18.54 | 0 | 3.8 |
| 990 | 378 | 18.84 | 0 | 3.8 |
| 990 | 370 | 18.37 | 1.5 | 4.4 |
| 970 | 370 | 18.79 | 0 | 4.4 |
| 975 | 370 | 18.69 | 0 | 4.4 |
| 988 | 415 | 18.10 | 1.5 | 3.8 |
| 970 | 370 | 18.46 | 1.2 | 4.4 |
| 990 | 398 | 18.84 | 0 | 4.1 |
| 985 | 415 | 18.84 | 0 | 3.8 |
| 980 | 370 | 18.84 | 0 | 3.8 |
| 970 | 390 | 18.33 | 1.5 | 3.9 |
| 990 | 370 | 18.38 | 0.5 | 4.4 |
| 970 | 370 | 18.84 | 0 | 3.9 |
| 990 | 370 | 18.37 | 1.5 | 3.8 |
| 982 | 390 | 18.44 | 0.8 | 4.1 |
| 990 | 370 | 18.84 | 0 | 4.4 |
| 970 | 415 | 18.29 | 0.8 | 4.2 |
| 990 | 390 | 18.54 | 0 | 4.4 |
| 970 | 385 | 18.54 | 0 | 4.4 |
| 982 | 415 | 18.37 | 1.5 | 4.1 |
| 975 | 378 | 18.54 | 0 | 3.8 |
| 982 | 390 | 18.49 | 0.8 | 4.4 |
| 970 | 415 | 18.38 | 1 | 3.8 |
| 985 | 385 | 18.44 | 0.8 | 4 |
| 970 | 390 | 18.53 | 0.8 | 3.8 |
| 990 | 370 | 18.46 | 1.2 | 3.8 |
| 980 | 370 | 18.10 | 1.5 | 3.8 |
| 990 | 370 | 18.10 | 1.5 | 4.4 |
| 970 | 407 | 18.10 | 1.5 | 4 |
| 985 | 415 | 18.54 | 0 | 4.2 |
| 970 | 415 | 18.84 | 0 | 4 |
| 970 | 398 | 18.69 | 0 | 4.4 |
| 970 | 415 | 18.46 | 1.2 | 4.4 |
| 982 | 390 | 18.38 | 1 | 4.2 |
| 982 | 390 | 18.38 | 1 | 4.1 |

| Temperatura Reacción [°F] | Temperatura Precaliente [°F] | Carga Combinada ° API | Reciclo APC [Kbl/día] | Adición de Catalizador [Ton] |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| 980 | 398 | 18.52 | 1 | 4.1 |
| 990 | 415 | 18.32 | 1.2 | 4.4 |
| 990 | 398 | 18.59 | 0 | 3.8 |
| 982 | 370 | 18.53 | 0.5 | 4.1 |
| 982 | 390 | 18.84 | 0 | 4.2 |
| 990 | 415 | 18.54 | 0 | 4.2 |
| 990 | 415 | 18.68 | 0.5 | 4.4 |
| 985 | 390 | 18.49 | 0.8 | 4.1 |
| 990 | 415 | 18.37 | 1.5 | 3.8 |
| 980 | 398 | 18.10 | 1.5 | 4.4 |
| 975 | 415 | 18.19 | 1.5 | 4.4 |
| 970 | 370 | 18.24 | 1 | 4.2 |
| 982 | 370 | 18.54 | 0 | 4.1 |
| 982 | 415 | 18.64 | 0 | 3.8 |
| 990 | 398 | 18.28 | 1.5 | 4.1 |
| 990 | 370 | 18.64 | 0 | 4.1 |
| 985 | 378 | 18.29 | 0.8 | 4.4 |
| 990 | 407 | 18.10 | 1.5 | 4.1 |
| 982 | 370 | 18.33 | 1.5 | 3.8 |
| 970 | 370 | 18.19 | 1.5 | 4.3 |
| 985 | 390 | 18.18 | 1.2 | 4.1 |

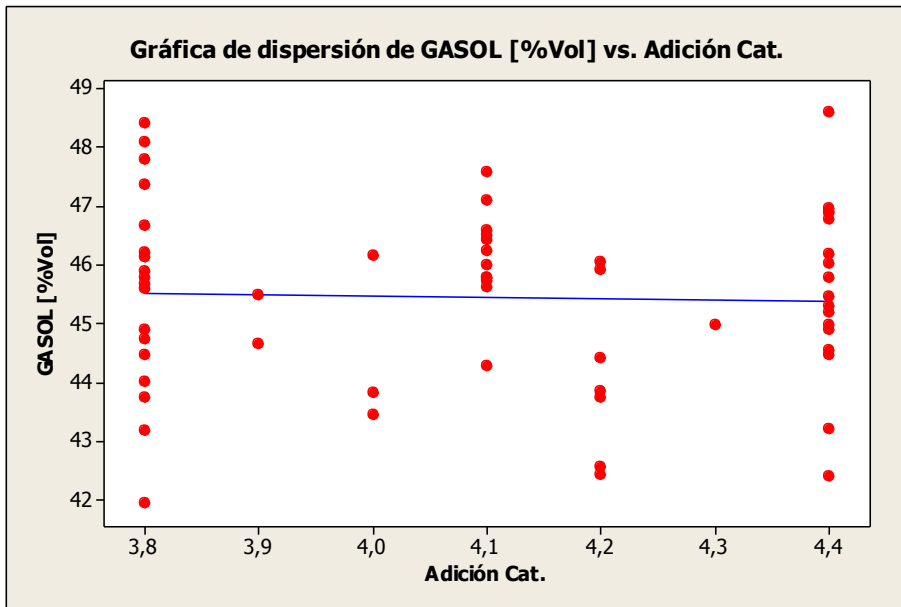
Anexo F. Correlaciones resultados del análisis de varianza de la data utilizada.



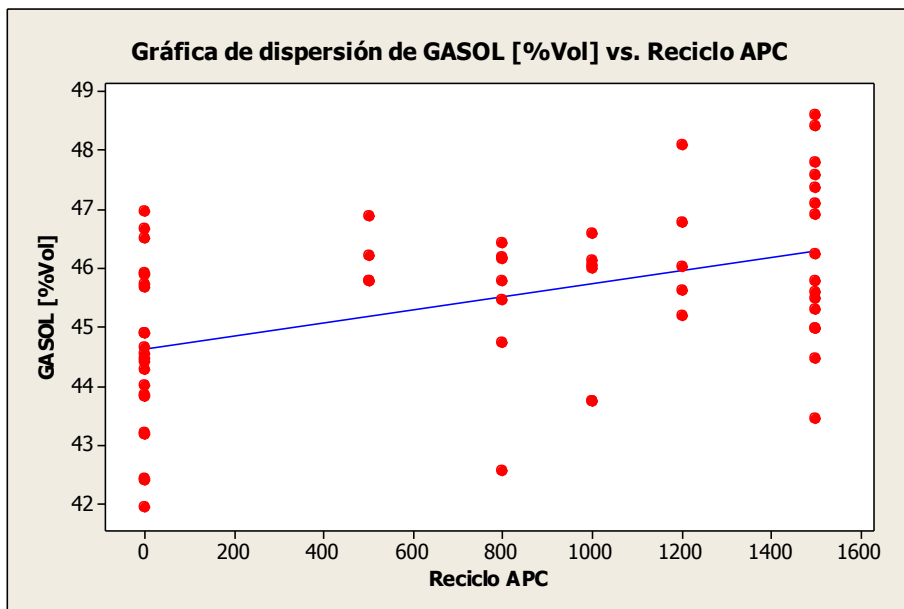
Rendimiento de gasolina Vs. Temperatura de reacción



Rendimiento de gasolina Vs. Temperatura precaliente.



Rendimiento de gasolina Vs. Adición de catalizador.



Rendimiento de gasolina Vs. Reciclo de APC