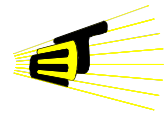


**DEFINICIÓN DE LOS MODOS DE FALLO DE UNA UNIDAD DE RUPTURA  
CATALÍTICA A PARTIR DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y  
CONOCIMIENTO PREVIO**

MARÍA CLEMENCIA ORTIZ BARAJAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
Bucaramanga  
2008



**DEFINICIÓN DE LOS MODOS DE FALLO DE UNA UNIDAD DE RUPTURA  
CATALÍTICA A PARTIR DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y  
CONOCIMIENTO PREVIO**

MARÍA CLEMENCIA ORTIZ BARAJAS

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Electrónica

Director:  
Rodolfo Villamizar Mejía, PhD

Tutor  
Carlos Fernando Agudelo Gómez, Master

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
Bucaramanga  
2008

## CONTENIDO

	pág
LISTA DE TABLAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE ANEXOS	vii
GLOSARIO	viii
RESUMEN	xiii
SUMMARY	xiv
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN DE CRAQUEO	3
1.2. CIRCULACIÓN DEL CATALIZADOR	5
1.3. DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN DE FRACCIONAMIENTO	5
2. MODOS DE FALLO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES	7
2.1. EQUIPOS PRINCIPALES	7
2.2. VARIABLES ANALIZADAS	8
2.3. DEFINICIÓN DE LOS MODOS DE FALLO	12
2.4. CAUSALIDAD ENTRE LOS MODOS DE FALLO	14
3. DIAGRAMAS DE CAUSALIDAD	16
3.1. INTERPRETACIÓN	16
3.2. IDENTIFICADORES	18
3.2.1. Colores	18
3.2.2. Etiquetas	18
4. FALLOS GENERALES DE LA UNIDAD	20
4.1. ALTA TEMPERATURA EN EL REGENERADOR	20
5. MANUAL DE LA HERRAMIENTA INTERACTIVA	24
5.1. MENÚ PRINCIPAL	24
5.2. VENTANA DE FALLOS GENERALES	25
5.3. INTERFAZ GRÁFICA	28
5.4. DIAGRAMAS DE CAUSALIDAD	31
6. CONCLUSIONES	34
7. RECOMENDACIONES	36
8. DESARROLLOS A FUTURO	37
BIBLIOGRAFÍA	38
ANEXOS	39

## LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Equipos analizados	7
Tabla 2. Variables analizadas	9
Tabla 3. Modos de fallo	12
Tabla 4. Etiquetas de las variables	18
Tabla 5. Condiciones de operación - Alta temperatura en el Rg.	21
Tabla 6. Fallas mecánicas - Alta temperatura en el Rg.	22
Tabla 7. Propiedades del catalizador - Alta temperatura en el Rg.	23
Tabla 8. Características de la carga - Alta temperatura en el Rg.	23
Tabla B1. Efectos de daños en válvulas de la URC	55
Tabla B2. Efectos de daños en bombas de la URC	59
Tabla B3. Efectos de daños en intercambiadores de calor de la URC	60
Tabla C1. Condiciones de operación - Circulación limitada	61
Tabla C2. Fallas mecánicas - Circulación limitada	63
Tabla C3. Propiedades del catalizador - Circulación limitada	64
Tabla C4. Condiciones de operación - Flujo inverso	65
Tabla C5. Fallas mecánicas - Flujo inverso	66
Tabla C6. Condiciones de operación - Depósitos de coque	67
Tabla C7. Fallas mecánicas - Depósitos de coque	68
Tabla C8. Propiedades del catalizador - Depósitos de coque	69
Tabla C9. Características de la carga - Depósitos de coque	69
Tabla C10. Condiciones de operación - Baja conversión	70
Tabla C11. Fallas mecánicas - Baja conversión	71
Tabla C12. Propiedades del catalizador - Baja conversión	71
Tabla C13. Características de la carga - Baja conversión	72
Tabla C14. Condiciones de operación - Alta producción de gas seco	73
Tabla C15. Fallas mecánicas - Alta producción de gas seco	73
Tabla C16. Propiedades del catalizador - Alta producción de gas seco	73
Tabla C17. Características de la carga - Alta producción de gas seco	74
Tabla C18. Condiciones de operación - Baja producción de gasolina	74
Tabla C19. Fallas mecánicas - Baja producción de gasolina	75
Tabla C20. Propiedades del catalizador - Baja producción de gasolina	75
Tabla C21. Características de la carga - Baja producción de gasolina	76
Tabla C22. Condiciones de operación - Bajo octanaje de la gasolina	76
Tabla C23. Fallas mecánicas - Bajo octanaje de la gasolina	77
Tabla C24. Propiedades del catalizador - Bajo octanaje de la gasolina	77
Tabla C25. Características de la carga - Bajo octanaje de la gasolina	77

## LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Componentes básicos de la sección de craqueo	4
Figura 2. Estructura causa - efecto	14
Figura 3. Estructura de los diagramas de causalidad	15
Figura 4. Diagrama de causalidad del tambor de vapor D-551	17
Figura 5. Menú principal	24
Figura 6. Iconos de acceso a los diagramas de causalidad	25
Figura 7. Ventana de un fallo general	26
Figura 8. Ventana de un fallo general con información desplegada	26
Figura 9. Causa de la categoría condiciones de operación	27
Figura 10. Icono de acceso al menú principal	27
Figura 11. Factores que evalúan la baja calidad y rendimientos	28
Figura 12. Menú de causas para baja calidad y rendimientos	28
Figura 13. <i>Display</i> principal de la unidad	29
Figura 14. <i>Display</i> reactor – regenerador	30
Figura 15. Vínculos ubicados al final de los flujos	30
Figura 16. Estructura de una variable en el diagrama de causalidad	31
Figura 17. Estructura de un equipo en el diagrama de causalidad	32
Figura 18. Botón que comunica ambos diagramas	33
Figura A1. Alimentación y precaliente de la carga	41
Figura A2. Reactor	42
Figura A3. Regenerador	44
Figura A4. Reactor - Regenerador	45
Figura A5. Producto de fondos	47
Figura A6. Sección de fraccionamiento	49
Figura A7. Torres despojadoras	50
Figura A8. Circuito de cima	51
Figura A9. Sopladores y tanque de condensado	53
Figura A10. Circuito de generación de vapor	54

## LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo A. MARCO TEÓRICO COMPLEMENTARIO	40
A.1. DESCRIPCIÓN DEL REACTOR	40
A.2. DESCRIPCIÓN DEL REGENERADOR	43
A.3. VUELTAS EN U Y CIRCULACIÓN DEL CATALIZADOR	46
A.4. FLUJOS DE LA FRACCIONADORA PRINCIPAL	47
A.5. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO ESPECIAL	52
Anexo B. FALLAS MECÁNICAS	55
B.1. VÁLVULAS	55
B.2. BOMBAS	59
B.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR	60
Anexo C. OTROS FALLOS GENERALES DE LA UNIDAD	61
C.1. CIRCULACIÓN LIMITADA	61
C.2. FLUJO INVERSO	65
C.3. DEPÓSITOS DE COQUE	66
C.4. BAJA CALIDAD Y RENDIMIENTOS	70

## GLOSARIO

ACEITE DE ANTORCHA (*torch oil*): gasóleo que se usa principalmente para calentar el catalizador en el regenerador durante puestas en marcha, antes de introducir la carga en la planta.

ACEITE DE CICLO PESADO – HCO: suele referirse al gasóleo de 650 °F que se recircula a la unidad de craqueo catalítico.

ACTIVIDAD DEL CATALIZADOR: es la aptitud del catalizador de convertir una carga estándar en productos más livianos.

AIREACIÓN: es la inyección de vapor o aire para conseguir una fluidización del catalizador y permitir su circulación entre el reactor y el regenerador.

CÁMARA PLENA: está ubicado en el domo o parte alta del reactor y regenerador y allí descargan los gases procedentes de todos los ciclones, para salir por una línea común.

CARBÓN EN EL CATALIZADOR GASTADO: es la cantidad de carbón depositada sobre el catalizador que proviene del reactor después de haberse puesto en contacto con la carga.

CARBÓN SOBRE EL CATALIZADOR REGENERADO: es la cantidad de carbón que queda adherido al catalizador después de someterlo a altas temperaturas en el regenerador en presencia de aire.

CATALIZADOR: es una sustancia que acelera la velocidad de reacción química sin entrar a formar parte del producto. El catalizador de craqueo es un compuesto químico en forma de polvo muy fino, que contiene una zeolita o tamiz molecular (aluminio silicato cristalino) altamente activa y una matriz de soporte con un tamaño medio de 70 micrones.

**CATALIZADOR FRESCO:** es el catalizador sin usar, tal como se recibe del fabricante.

**CATALIZADOR GASTADO:** es el catalizador que sale del despojador del reactor hacia el regenerador después de haber reaccionado con la carga. El carbón que se deposita en su superficie se debe quemar antes de que se vuelva a usar.

**CATALIZADOR REGENERADO:** es el catalizador que sale del pozo de rebose del regenerador después de haber quemado el carbón que se había depositado sobre su superficie, para regresar al reactor y realizar su acción catalítica nuevamente.

**CATALIZADOR ZEOLÍTICO:** es el catalizador empleado en el craqueo catalítico fluido; contiene un aluminio silicato cristalino tipo "X" o "Y". Tales compuestos se llaman también zeolitas o tamices moleculares.

**CICLONES:** recipientes cilíndricos de fondo cónico, ubicados en la parte superior interna del regenerador y del reactor. Se usan para separar el catalizador de los gases de combustión y de los vapores de hidrocarburos, aprovechando la fuerza centrífuga que se genera cuando éstos pasan por los ciclones. Los ciclones trabajan en paralelo por pares seriados.

**COQUE (*coke*):** una mezcla de polímeros deficitarios de hidrógeno, de alto peso molecular y de carbono que se forma en el reactor como subproducto del craqueo y a la que se suman los aceites no removidos del catalizador gastado con el carbón de la carga. El coque desactiva el catalizador; su combustión permite la regeneración del catalizador y provee el calor necesario para vaporizar y craquear la carga.

**CRAQUEO CATALÍTICO:** proceso de conversión por rompimiento de moléculas pesadas, en presencia de un catalizador, en moléculas más livianas. Normalmente la carga a craquear es un gasóleo pesado con rango de ebullición de 600°F a 1050°F y los productos obtenidos son: gas seco, LPG, gasolina y destilados medios.

**ELEVADOR (*riser*):** es un tubo que se usa para elevar el catalizador a un nivel más alto por medio de aireación. El elevador del reactor es donde se pone en contacto el catalizador con la carga y se realiza el 80% del craqueo. El elevador del regenerador lleva el catalizador gastado al interior de este recipiente.

**ENCARBONAMIENTO:** es la rápida acumulación de carbón en el catalizador gastado, que se inicia y continúa por obra de la regeneración incompleta y por efecto creciente y acumulativo de los niveles más altos de carbón en el rendimiento de coque.

**FASE DENSA:** es la porción inferior y más pesada del lecho de catalizador en el reactor o en el regenerador.

**FASE DILUIDA:** la porción superior y menos densa del lecho de catalizador fluidizado en el reactor y en el regenerador.

**FRACCIONES LIVIANAS:** productos de bajo peso molecular, usualmente C4 y más livianos.

**NAFTAS:** destilados livianos del petróleo, generalmente en la escala de ebullición C5-450 °F.

**PERDIDAS EN CHIMENEA:** es el catalizador que escapa a la atmósfera por la chimenea del regenerador, junto con los gases de combustión. Esto sucede con las finas del catalizador, que son demasiado pequeñas para que las retengan los ciclones del regenerador. Un mal funcionamiento de los ciclones o una alta rata de aire al regenerador pueden producir el mismo efecto.

**PIERNAS DE LOS CICLONES:** los tubos verticales de los ciclones que devuelven el catalizador de los separadores de ciclones a la fase densa.

**PLACAS DEFLECTORAS - DEFLECTORES:** son planchas soldadas a las paredes de recipientes, generalmente de despojadores, para variar el patrón de flujo de los vapores de hidrocarburos y del catalizador, a fin de promover el mejor contacto entre unos y otros.

**POST-COMBUSTIÓN:** se llama post-combustión la conversión del Monóxido de Carbono (CO) a Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) después de que los gases han dejado la fase densa del regenerador. Este fenómeno es indeseable porque incrementa la temperatura en la parte superior del regenerador y no en la fase densa.

**POZOS VERTEDEROS DE REBOSE:** secciones desaireadas en la parte alta de los tubos estantes o de los despojadores, a través de las cuales entra el catalizador procedente del lecho denso.

**RATA DE AIRE DE COMBUSTIÓN:** es la cantidad de aire al regenerador que se requiere para oxidar (quemar) el coque depositado en el catalizador, a fin de regenerarlo y virtualmente restaurarle su actividad original.

**RATA DE CATALIZADOR (RATA DE CIRCULACIÓN):** es el número de toneladas que circulan por la unidad (entre el regenerador y el reactor) durante un minuto. Generalmente se calcula por el equilibrio térmico entre el reactor y el regenerador.

**RELACIÓN CATALIZADOR - ACEITE (C/A):** es la relación entre la rata de circulación de catalizador en libras y el peso en libras de la carga total al reactor.

**RETENCIÓN:** retención es el número de toneladas de catalizador sostenidas encima de la rejilla en el regenerador o en el despojador del reactor.

**SELECTIVIDAD:** la selectividad del catalizador se relaciona con los rendimientos de los productos obtenidos para una conversión dada de la carga. El catalizador de buena selectividad da un rendimiento bajo de carbón y gas y un rendimiento alto de gasolina. La selectividad varía con la composición del catalizador y se pierde por contaminación con metales que pueden ser acarreados por la carga (níquel, vanadio, sodio) o recogidos en la unidad.

**SINTERIZACIÓN DEL CATALIZADOR:** Es el proceso por medio del cual con el aumento de la temperatura, las partículas del catalizador se unen por fuerzas atómicas convirtiéndose en sólidos.

**SOBRECRAQUEO (RECRAQUEO):** es el craqueo excesivo de las cadenas de hidrocarburos sobrepasando el grado deseado. Esto conlleva a una alta producción de gases y de coque.

**TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO DE LA CARGA:** es la temperatura que tiene la carga combinada al cargarse a la planta de craqueo. La carga combinada la componen la carga de tanques más la carga caliente de Crudo y Viscosreductora.

**TEMPERATURA DEL REACTOR:** es la temperatura de reacción de la mezcla de catalizador y carga en el reactor.

**TEMPERATURA DEL REGENERADOR:** es la temperatura en la fase densa del regenerador, la cual es producto de la combustión durante la quema de coque en el catalizador gastado. Otros puntos del regenerador donde también se mide la temperatura son: la fase diluida, a la entrada de los ciclones, en la cámara plena o en la chimenea.

**TIEMPO DE RETENCIÓN EN EL REACTOR:** es el tiempo que el catalizador permanece en el reactor en contacto con la carga antes de dirigirse al regenerador.

**TUBO ESTANTE (*standpipe*):** es un tubo vertical que se usa para crear una presión estática que desarrolla la fuerza necesaria para la circulación del catalizador. El tubo estante debe airearse para mantener el catalizador en estado fluidizado. Cuando el catalizador está fluidizado la columna de catalizador ejerce una presión en el fondo, semejante a la que desarrollan las columnas de líquidos.

**VÁLVULAS DE CORREDERA:** válvulas grandes de compuerta ubicadas a la salida de los gases de combustión del regenerador para regular la presión diferencial entre éste y el reactor, y así controlar el flujo en las vueltas en U por donde circula el catalizador entre el reactor y el regenerador.

**VAPOR DE ATOMIZACIÓN:** es el vapor de alta velocidad y alta presión, inyectado coaxialmente con la carga al reactor para atomizarla o fragmentarla finamente y crear una buena mezcla con el catalizador regenerado caliente, mejorando la eficiencia del craqueo catalítico.

**VAPOR DE DESPOJAMIENTO:** es el vapor inyectado en contracorriente al flujo de catalizador gastado que cae al despojador del reactor, para desprender (y devolver al reactor) los hidrocarburos adheridos al catalizador durante la reacción.

**VAPOR O CONDENSADO DE ENFRIAMIENTO:** es el condensado (o vapor) que se atomiza en el regenerador para reducir la temperatura del metal en puntos críticos, generalmente en la fase diluida.

## RESUMEN

**TÍTULO:** DEFINICIÓN DE LOS MODOS DE FALLO DE UNA UNIDAD DE RUPTURA CATALÍTICA A PARTIR DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CONOCIMIENTO PREVIO \*

**AUTORA:** MARÍA CLEMENCIA ORTIZ BARAJAS \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Causalidad, modos de fallos, ruptura catalítica, sistema experto.

### **DESCRIPCIÓN:**

El trabajo presentado en este documento corresponde a labores desarrolladas por la estudiante durante la práctica empresarial realizada en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) apoyando tareas enmarcadas dentro de la tercera fase del Proyecto de Gerenciamiento de Alarmas liderado por este instituto.

El resultado de esta práctica es una herramienta software interactiva que reúne información técnica de la Unidad de Ruptura Catalítica (URC) de la refinería de Cartagena (RCSA), y la integra con el conocimiento práctico proporcionado por el personal a cargo de la unidad y con material visual de la estación de control. Esta es presentada de forma amigable y organizada de manera que sirva de herramienta de apoyo para quienes desean familiarizarse con la Unidad, y como base de conocimiento para el diseño de algoritmos de detección y diagnóstico de fallos en etapas posteriores a esta práctica.

Los objetivos planteados a lo largo de la práctica para obtener la base de conocimiento fueron los siguientes:

- Definir los modos de fallo asociados a los equipos principales, las causas que pueden originarlos y como la operación de un equipo en un modo de éstos desencadena otros modos de fallo en equipos adyacentes.
- Relacionar las causas y síntomas observables de los modos de fallo de los principales equipos de la Unidad de Ruptura Catalítica (URC) para crear secuencias que describan la causalidad entre ellos.
- Asociar los modos de fallo de los equipos principales con los estados de fallo generales de la URC.
- Representar en un diagrama causal las transiciones entre modos de fallo de los equipos y el desencadenamiento de estados de fallo de la URC.

---

\* Trabajo de grado en la modalidad de práctica empresarial

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: PhD. Rodolfo Villamizar Mejía.

## SUMMARY

**TITLE:** FAILURE MODES DEFINITION OF AN FLUID CATALYTIC CRACKING UNIT BASED ON TECHNICAL INFORMATION AND KNOWLEDGE \*

**AUTHOR:** MARÍA CLEMENCIA ORTIZ BARAJAS \*\*

**KEY WORDS:** Causality, failure modes, catalytic cracking, expert system.

### **DESCRIPTION:**

This document presents some results of an original work done by the student during an internship in “Instituto Colombiano del Petróleo - ICP”. Such work has supported some tasks related with the third stage of the Alarm Management Project, under the leadership of the institute.

The final result of this work is an interactive software tool, what integrates technical information, practical knowledge provided by the technical staff and visual material of the control station of the Cartagena’s Refinery Fluid Catalytic Cracking Unit (FCCU). This tool is presented in a friendly, organized and easy way to be understood. The tool can be used as support for those who want to get familiarized with the unit and as a knowledge source for designing failure-detection and diagnosis algorithms in other stages after this internship practice.

The main objectives proposed to achieve during this internship practice were:

- To define failure modes associated with main equipments, its causes, and how failure modes into other equipments are generated by the equipment on failure.
- To relate the causes and observed symptoms of the main equipments’ failure modes, in order to create sequences describing its causality.
- To associate the main equipments’ failure modes with the FCCU general failure.
- To represent the transitions between main equipments’ failure modes and the generation of FCCU failure by means of a causal diagram.

---

\* Degree project under internship practice modality.

\*\* Faculty of Physics-Mechanical Engineering. Electrical and Electronic Engineering and of Telecommunication School. Director: PhD. Rodolfo Villamizar Mejía.

## INTRODUCCIÓN

La automatización de procesos en la industria ha reemplazado algunas labores humanas y ha permitido realizar otras que no podían ser llevadas a cabo por operadores. Esto ha hecho que los operadores tengan a cargo nuevas tareas tales como: monitorización, identificación de fallas y coordinación del mantenimiento. Una de estas tareas es la respuesta a situaciones anormales del proceso, que pueden ser ocasionadas por fallas en el sistema, entradas erróneas, desgaste de los equipos, entre otras. Cuando estas situaciones se presentan, una alarma alerta al operario e indica la falla, que debe ser evaluada y corregida en lo posible por él. Para darle apoyo al operario en estas tareas se busca desarrollar técnicas automatizadas para la detección y diagnóstico de fallas. En caso de detectarse una falla, el sistema debe estar en capacidad de establecer la causa de la misma y recomendar al operario las acciones necesarias para su corrección.

El Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) está desarrollando métodos para la detección y diagnóstico de fallos en sus plantas de procesamiento. Para empezar esta labor han escogido la Unidad de Ruptura Catalítica de la refinería de Cartagena (RCSA) y están diseñando algoritmos con base en información recopilada sobre su funcionamiento. El objetivo es extrapolar los métodos desarrollados a las demás plantas y optimizar el funcionamiento de todos los procesos.

La presente práctica se encuentra enmarcada dentro del desarrollo de un Proyecto de Gerenciamiento de Alarmas liderado por el ICP, cuyo objetivo principal es reducir el número de alarmas presentadas a los operadores, de manera que en los procesos solo se activen alarmas relacionadas con variables realmente determinantes para la correcta operación de la unidad. Este proyecto consta de tres fases desarrollándose simultáneamente en diferentes unidades de las refinerías de Ecopetrol S.A. Tales fases son:

- Fase 1: Detección y eliminación de malos actores de alarmas
- Fase 2: Racionalización de alarmas
- Fase 3: Manejo Inteligente de alarmas

Durante la realización de ésta práctica se llevaron a cabo tareas relacionadas con la tercera fase del Proyecto de Gerenciamiento de Alarmas. En ésta fase se desarrollan métodos para la detección y diagnóstico de fallos diseñando algoritmos con base en información recopilada sobre el funcionamiento de la unidad; la herramienta aquí presentada es una de estas bases de conocimiento necesarias para el diseño de los algoritmos que permitirán detectar y diagnosticar fallos en etapas posteriores.

Para cumplir los objetivos propuestos durante la práctica fue necesario llevar a cabo las siguientes tareas:

- Realizar una revisión bibliográfica sobre el funcionamiento de la Unidad de Ruptura Catalítica (URC) de la refinería de Cartagena.
- Recopilar información de alarmas, variables de proceso y equipos asociados a la URC, además de analizar información relacionada a los modos de fallo de los principales equipos de dicha unidad.
- Estudiar las causas y síntomas observables de los principales problemas asociados a una URC y determinar la causalidad entre los modos de fallo de las variables más importantes del proceso.
- Diseñar una representación gráfica de las secuencias desencadenadas por la presencia de un fallo en la URC que muestre la causalidad entre estos modos de fallo.
- Reunir información de los fallos generales más importantes de la URC que permita relacionarlos con los modos de fallo definidos para los principales equipos.
- Relacionar los fallos generales de la URC con los modos de fallo de los equipos principales.

La recopilación de la información necesaria para la definición de los modos de fallos y la causalidad entre ellos se realizó a partir de manuales, planos de la URC, y entrevistas con el personal a cargo de la Unidad. El desarrollo de las tareas de ésta práctica estuvo limitado a estas fuentes de conocimiento y su alcance es fundamentalmente teórico.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN DE CRAQUEO

El Craqueo Catalítico Fluido (FCC) es un proceso en el que se convierte una carga de gasóleos en productos más livianos, rompiendo sus moléculas pesadas en presencia de un catalizador. Los elementos obtenidos de este proceso son: gas seco, LPG, butano, gasolina de alto octanaje, *flux oil*, HCO, alquitrán aromático y coque; los cuales son extraídos como productos, a excepción del coque, el cual es consumido internamente en el proceso para producir el calor requerido por la reacción de craqueo.

En esta unidad se trabaja con catalizador zeolítico, el cual es fabricado en forma de polvo fino con un tamaño promedio de partícula de 60 micrones. A pesar de ser sólido, es mantenido en suspensión (fluidizado) en los recipientes y en las líneas de transferencia por medio de una corriente gaseosa. En este estado, el catalizador se comporta como un fluido y viaja entre el reactor y el regenerador.

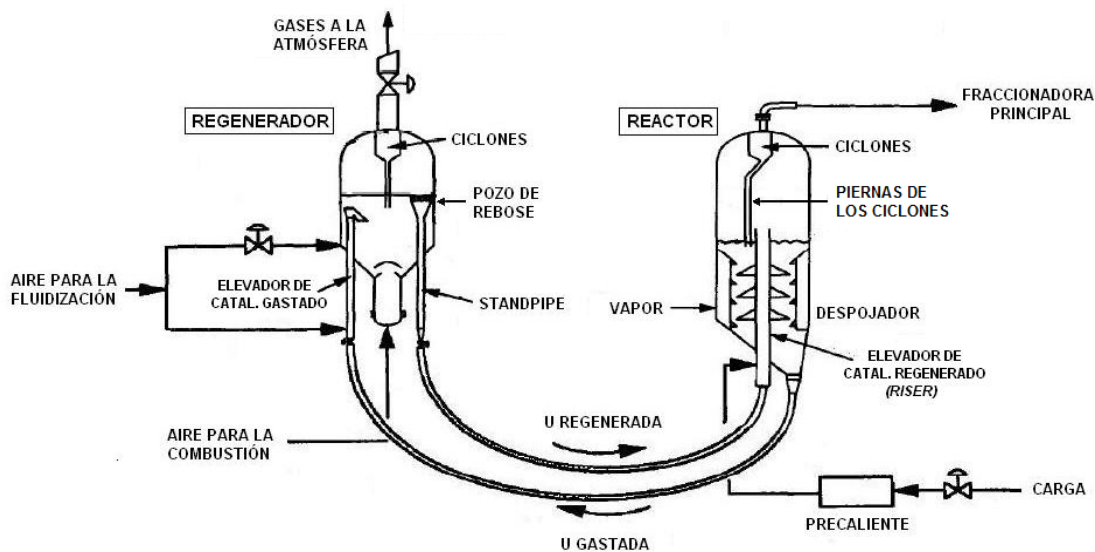
La carga de la unidad pasa a través de unos intercambiadores de calor donde es calentada; posteriormente es atomizada con vapor e inyectada a través de unas boquillas al elevador de carga del reactor (*riser*), como se muestra en la Figura 1. Cuando la carga se pone en contacto con el catalizador caliente en el elevador, se vaporiza y craquea hacia componentes más livianos. El incremento de volumen asociado a esta reacción provee la fuerza o impulso necesario para llevar los productos y el catalizador hacia arriba, al interior del reactor. La reacción dura entre 1.5 y 3 segundos, antes de que los productos de la reacción se desprendan del catalizador en la fase densa del reactor; la separación ocurre tan pronto como los vapores salen del elevador para evitar que se craquee el producto deseado.

Como consecuencia de las reacciones de craqueo, una sustancia carbónica llamada coque se deposita en la superficie del catalizador, contaminándolo y reduciendo su actividad (catalizador gastado). Los vapores de hidrocarburo viajan a la cima del reactor arrastrando partículas de catalizador que son recuperadas en su mayoría por tres juegos de ciclones ubicados a la salida del *riser*, los cuales utilizando la fuerza centrífuga separan el catalizador de los vapores y envían estas partículas a la sección de despojamiento (ubicada en el fondo del reactor) a través

de las piernas de los ciclones. Los vapores de hidrocarburo al abandonar los ciclones fluyen por la cima del reactor hacia la fraccionadora principal, donde son separados en varios productos según su punto de ebullición.

En la zona de despojamiento el catalizador gastado es inyectado con vapor para removerle el aceite que aún permanece sobre su superficie y los vapores de hidrocarburo arrastrados entre sus partículas. El catalizador despojado fluye a través de la U gastada y entra por el elevador de catalizador gastado a la fase densa del regenerador, donde el coque es quemado con aire a alta temperatura, restableciendo así la actividad del catalizador. El catalizador regenerado, caliente por la combustión, fluye sobre el pozo de rebose hacia la U regenerada y regresa de nuevo al elevador de carga del reactor, proporcionando toda la energía necesaria para la reacción.

Los gases de combustión provenientes de la quema del coque se desprenden de la fase densa y pasan por un juego de ciclones de doble etapa, donde las partículas de catalizador arrastradas por el gas son recuperadas y devueltas al lecho denso del regenerador. Los gases conteniendo partículas no recuperadas por los ciclones son venteados a la atmósfera.



Fuente: Autora, basada en figura de referencia [2].

Figura 1. Componentes básicos de la sección de craqueo

## **1.2. CIRCULACIÓN DEL CATALIZADOR**

El proceso de craqueo catalítico produce el calor necesario para satisfacer sus propias necesidades, es decir, el calor que consume el reactor está balanceado con el calor que produce el regenerador. La circulación de catalizador es la que produce la transferencia de calor entre el reactor y el regenerador, y es la manera como se logra mantener el balance térmico en la unidad.

El sistema de circulación de catalizador consta de dos vueltas en U: gastada y regenerada. Por la U gastada circula el catalizador gastado desde el despojador del reactor hasta la fase densa del regenerador. Por la U regenerada circula el catalizador regenerado desde el pozo de rebose hasta el elevador del reactor, donde se encuentra con la carga atomizada que actúa como medio impulsador.

Uno de los factores mas importantes para la adecuada circulación del catalizador es su correcta aireación, y ésta se logra inyectando de manera controlada aire o vapor en diferentes puntos de las vueltas en U, para mantener fluidizado el catalizador y garantizar una circulación suave a través de él.

La forma más efectiva de controlar la rata de circulación de catalizador es el cambio del diferencial de presión entre las cimas del reactor y el regenerador; esto se logra variando la presión del regenerador con las válvulas de corredera de la chimenea. El flujo de catalizador gastado circula debido al cambio de presión del regenerador, llega al lecho de este recipiente y desborda el pozo de rebose aumentando o disminuyendo en igual proporción la circulación por la U regenerada. Cuando la presión del regenerador varía se produce una variación igual en la fuerza impulsora del catalizador por la U regenerada, entonces el pozo de rebose cambia su altura para compensar la diferencia de presión con respecto al reactor y hace circular el catalizador de vuelta por la U regenerada.

## **1.3. DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN DE FRACCIONAMIENTO**

La carga que entra a la fraccionadora son los vapores que resultan de la reacción de craqueo, los cuales ingresan a la torre por el fondo y suben a través de ella para ser separados en varios productos individuales, en proporción a su producción en el reactor. Una torre fraccionadora separa una mezcla compleja de hidrocarburos de acuerdo con sus puntos de ebullición. Un producto liviano tiene

un rango de ebullición más bajo, y un producto pesado tiene un rango de ebullición más alto.

La torre fraccionadora T-552 tiene 29 platos empleados en el fraccionamiento y remoción de calor con tres reflujo circulantes; y 7 filas de desviadores usados para des-supercalestar los vapores del reactor y condensar los fondos.

Los vapores calientes que salen del reactor deben ser enfriados en la torre para poder recuperar los productos individuales en sus distintos puntos de ebullición. El enfriamiento es logrado recirculando tres flujos obtenidos en distintos puntos de la torre los cuales entregan su calor a otros fluidos. Estos flujos son: reflujo circulante de fondo, reflujo circulante medio y reflujo circulante de cima.

La sección de des-supercalestamiento está ubicada por debajo de la sección de fraccionamiento y es la encargada de sacar grandes cantidades de calor de los vapores supercalestados provenientes del reactor, para que puedan así pasar a la torre donde serán fraccionados o separados. Simultáneamente se condensa una pequeña cantidad de material pesado en esta sección el cual se convierte en los fondos de la fraccionadora (*slurry*).

El anexo A presentado al final de este documento contiene una descripción más detallada del proceso y los equipos de la Unidad de Ruptura Catalítica (URC) de la refinería de Cartagena (RCSA).

## 2. MODOS DE FALLO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES

### 2.1. EQUIPOS PRINCIPALES

Los equipos principales de la Unidad de Ruptura Catalítica (URC) son el reactor, el regenerador y la fraccionadora principal; sin embargo serán también considerados para el análisis de este trabajo aquellos equipos que están involucrados en la operación de la unidad e interactúan con los tres equipos principales para cumplir los objetivos del proceso.

En la Tabla 1 se presentan los equipos analizados y se relacionan con la etiqueta que los identifica. Estos equipos pertenecen a las secciones de craqueo y fraccionamiento de la URC.

Tabla 1. Equipos analizados

Tipo	Etiqueta	Equipo
Tanques	TK-501	Tanque de condensado
Torres	T-551	Torre despojadora de HCN
	T-552	Torre fraccionadora
	T-553	Torre despojadora de ALC
Sopladores	C-501	Soplador principal
	C-502	Soplador de control
Condensadores	E-501	Condensador de vapor
	E-556	Condensadores de cima
Tambores	D-501	Reactor
	D-502	Regenerador
	D-506	Tolva de catalizador
	D-551	Tambor de vapor
	D-553	Tambor de destilado
	D-554	Tambor de carga
	D-555	Tambor de destilado
D-556	Tambor de gasóleo	

Fuente: Autora del proyecto.

Para la definición de los modos de fallo de estos equipos se realizó un análisis de su funcionamiento y se determinó que las condiciones indeseadas de su operación se presentan cuando variables como flujo, presión, nivel y temperatura alcanzan valores límites para su correcto funcionamiento o el de la unidad.

## **2.2. VARIABLES ANALIZADAS**

Teniendo en cuenta que la información recopilada en el desarrollo de este trabajo será utilizada como una base de conocimiento para el diseño de algoritmos de detección y diagnóstico de fallos (en etapas no contempladas en el alcance de este proyecto), es necesario que las variables a analizar sean cuantitativas de manera que su comportamiento pueda ser estudiado para determinar sus efectos sobre las demás variables del proceso.

En la Tabla 2 se encuentran reunidas 70 variables de operación correspondientes a entradas y salidas de los equipos principales. Estas variables fueron elegidas por ser importantes en el funcionamiento del equipo al que pertenecen, y así mismo en el proceso de craqueo.

Debido a que una misma variable (por ejemplo un flujo) puede ser salida de un equipo y entrada de otro, se estableció una prioridad para el reactor, el regenerador y la fraccionadora principal; de manera que si una variable presenta esta dualidad, es mencionada una sola vez y asignada teniendo en cuenta la prioridad aquí mencionada.

Cada columna de la Tabla 2 contiene información importante para la identificación de las variables y su ubicación en el proceso. Los datos allí considerados son: equipo al que pertenece la variable, clasificación de la variable como entrada o salida, tipo de variable (flujo, presión, nivel o temperatura), descripción, etiqueta del instrumento que la mide, límite de alarma por bajo (L1), límite de alarma por alto (H1) y unidades. Las variables con los campos L1 y H1 vacíos no tienen alarmas configuradas.

Para facilitar el manejo de las variables estas fueron numeradas de 1 a 70 como se indica en la última columna de la Tabla 2. A lo largo de este trabajo las variables podrán ser identificadas por el número asignado, de manera que la tabla aquí presentada será una herramienta de consulta importante en este documento.

Tabla 2. Variables analizadas

Equipo	E/S	Variable	Descripción	Etiqueta	L1	H1	Unid.	No.
TK-501	S	Nivel	Tanque de condensado	FC- LIC-504	65	95	%	1
E-501	E	Flujo	Agua de la TAE I	No hay medidor				2
		Presión	Agua de la TAE I	FF-PI-574	75	-	Psig	3
	S	Nivel	Condensador de superficie	FC- LIC-503	25	75	%	4
C-501	E	Flujo	Vapor de 600# al soplador ppal.	FC-FI-515	60000	-	lb\h	5
		Presión	Vapor de 600# al soplador ppal.	FF-PI-203	580	-	Psig	6
	S	Presión	Soplador Principal	FC-PDI-503	-	32.5	Psid	7
C-502	S	Presión	Soplador de Control (succión)	FC-PI-502	-	-	Psig	8
D-506	S	Presión	Cima tambor D-506	FC-PIC-511	38	62	Psig	9
D-502	E	Flujo	Aire principal al Rg.	FC-FI-527	41000	-	Scfm	10
		Presión	Aire de Control al Rg.	FC-PI-501	-	-	Psig	11
		Temperatura	Aire de Control al Rg.	FC-TI-509	-	500	°F	12
		Flujo	Aire de Control al Rg.	FC-FIC-502	4000	-	Scfm	13
		Flujo	Catalizador fresco al Rg.	FC-WI-300 A	Acumulado diario			14
		Flujo	Inyección de condensado al Rg.	FC-FIC-514	0	23.4	Gpm	15
		Presión	Inyección de condensado al Rg.	FC-PI-514	-	-	Psig	16
		Nivel	Catalizador en el pozo de rebose	FC-LI-501 A	1,5	8,5	Ton	17
	Nivel	Catalizador en el lecho del Rg.	FC-LI-3 B	75	150	Ton	18	
	S	Presión	Cima del regenerador	FC-PI-5002	-	26	Psig	19
		Temperatura	Fase densa del Rg.	FC-TI-114 FC-TI-507	1260 50	1360 1450	°F	20
		Temperatura	Fase diluida del Rg.	FC-TI-138 FC-TI-139	-	-	°F	21
		Flujo	Retiro de catalizador	No hay medidor				22
		Temperatura	Retiro de catalizador	FC-TI-121	-	700	°F	23
Temperatura		Gases de chimenea del Rg.	FC-TIC-503	805	1280	°F	24	

Equipo	E/S	Variable	Descripción	Etiqueta	L1	H1	Unid.	No.
Rx – Rg		Flujo	Circulación de catalizador gastado	No hay medidor (calculada)				25
		Flujo	Circulación de catalizador regenerado	No hay medidor (calculada)				26
		Presión	Diferencial Rx. – Rg.	FC-PDIC-507	-3,5	3,5	psi	27
D-501	E	Flujo	Vapor de 140# al despojador del reactor	FC-FIC-532	-	-	Lb\h	28
		Flujo	Carga al reactor	FF-FIC-551	17000	31000	b\d	29
		Temperatura	Carga al reactor	FC-TI-561 FF-TIC-553	-	-	°F	30
	S	Nivel	Catalizador en el despojador	FC-LI-1 C	-	-	Ton	31
		Temperatura	Reactor	FC-TIC-518	935	990	°F	32
		Presión	Cima del reactor	FC-PI-5001	-	26,5	psig	33
D-554	S	Nivel	Tambor de carga	FF-LI-560 FF-LIC-553	50 50	- 75	%	34
D-551	S	Presión	Vapor de cima	FF-PIC-552	125	185	psig	35
		Nivel	Tambor de vapor	FF-LIC-557	25	75	%	36
D-556	S	Nivel	Tambor de HCO	FF-LIC-562	30	75	%	37
		Temperatura	Producto HCO a la salida del E-561	FF-TI-581	-	200	°F	38
T-552	E	Flujo	Reflujo circulante del fondo	FF-FI-2	25000	-	b\d	39
		Temperatura	Reflujo circulante de fondo	FF-TI-569	-	-	°F	40
		Flujo	Reflujo caliente	FF-FIC-566	-	5585	b\d	41
		Flujo	Reflujo circulante medio	FF-FIC-6	15000	36000	b\d	42
		Temperatura	Reflujo circulante medio	FF-TIC-557	355	435	°F	43
		Flujo	Nafta de T-602 a la fraccionadora (Aceite esponja)	FL-FI-603	-	-	b\d	44
		Flujo	Reflujo circulante de cima	FF-FIC-572	40000	69000	b\d	45
		Temperatura	Reflujo circulante de cima	FF-TI-563	-	205	°F	46

Equipo	E/S	Variable	Descripción	Etiqueta	L1	H1	Unid.	No.
T-552	S	Nivel	Fondos de la fraccionadora	FF-LIC-561	25	65	%	47
		Flujo	Producto de fondos	FF-FIC-555	1000	-	b\l	48
		Temperatura	Producto de fondos	FF-TI-577	190	215	°F	49
		Temperatura	Fondo fraccionadora	FF-TI-226 FF-TI-227 FF-TI-228	-	-	°F	50
		Temperatura	Zona media fraccionadora	FF-TI-220	-	-	°F	51
		Flujo	Líquido de HCN a la T-602	FF-FIC-556	2500	7639	b\l	52
		Temperatura	Cima fraccionadora	FF-TIC-554	61	339	°F	53
		Presión	Cima fraccionadora	FF-PI-14	-	-	psig	54
T-551	E	Flujo	Líquido de HCN a la T-551	No existe medidor				55
		Flujo	Vapor de 140# al despojador de la T-551	FF-FIC-554	-	1582	lb\h	56
	S	Nivel	HCN en la torre T-551	FF-LIC-551	25	75	%	57
		Flujo	HCN a tratamiento	FF-FIC-563	-	7665	b\l	58
T-553	E	Flujo	Líquido de ALC a la T-553	No existe medidor				59
		Temperatura	Líquido de ALC a la T-553	FF-TI-572	-	-	°F	60
		Flujo	Vapor de 140# al despojador de la T-553	FF-FIC-573	-	1580	lb\h	61
	S	Nivel	ALC en la despojadora T-553	FF-LIC-3	25	75	%	62
		Flujo	ALC a tanques	FF-FIC-574	-	-	b\l	63
		Temperatura	ALC a tanques	FF-TI-564	-	190	°F	64
E-556	E	Flujo	Agua lavado de productos de cima	FF-FIC-568	20	-	gpm	65
D-553	S	Nivel	Hidrocarburo en el tambor D-553	FF-LI-555	25	75	%	66
		Nivel	Agua en el tambor D-553	FF-LIC-556	25	75	%	67
		Flujo	Hidrocarburo hacia la T-2603	FF-FIC-8	5000	15000	b\l	68
D-555	S	Nivel	Hidrocarburo en el tambor D-555	FF-LIC-1	25	75	%	69
		Nivel	Agua en el tambor D-555	FF-LDIC-1	25	75	%	70

Fuente: Autora del proyecto.

### 2.3. DEFINICIÓN DE LOS MODOS DE FALLO

Como se mencionó anteriormente un equipo se encuentra en modo de fallo cuando sus variables de mayor impacto alcanzan valores límites para su correcto funcionamiento o la operación adecuada de la unidad.

En la Tabla 3 se presentan los modos de fallo para las variables elegidas en la sección anterior. Estos modos de fallo corresponden a valores altos y/o bajos de dichas variables, es decir, a los estados de operación en que se alcanzan valores críticos para el proceso.

Tabla 3. Modos de fallo

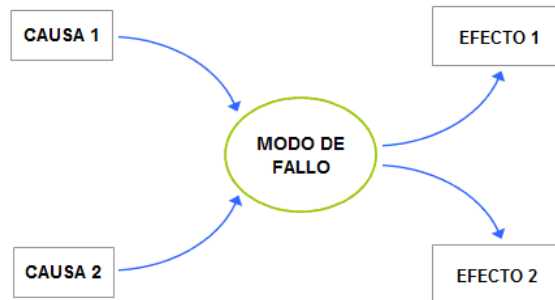
Equipo	E/S	Variable	Modos de fallo		No.
TK-501	S	Nivel - Condensado	Bajo nivel	Alto nivel	1
E-501	E	Flujo - Agua de la TAE I	Bajo flujo	-	2
		Presión - Agua de la TAE I	Baja presión	-	3
	S	Nivel – Condensado	Bajo nivel	Alto nivel	4
C-501	E	Flujo - Vapor de 600#	Bajo flujo	-	5
		Presión - Vapor de 600#	Baja presión	-	6
	S	Presión - Soplador Principal	Baja presión	-	7
C-502	S	Presión - Soplador de Control	-	Alta presión	8
D-506	S	Presión - Cima tambor	Baja presión	Alta presión	9
D-502	E	Flujo - Aire principal	Bajo flujo	Alto flujo	10
		Presión - Aire de Control	Baja presión	Alta presión	11
		Temperatura - Aire de Control	-	Alta temp.	12
		Flujo - Aire de Control	Bajo flujo	Alto flujo	13
		Flujo - Catalizador fresco	Bajo flujo	Alto flujo	14
		Flujo - Inyección de condensado	Bajo flujo	Alto flujo	15
		Presión - Inyección de condensado	Baja presión	Alta presión	16
		Nivel – Catal. en el pozo de rebose	Bajo nivel	Alto nivel	17
	Nivel – Catal. en el lecho	Bajo nivel	Alto nivel	18	
	S	Presión - Cima del regenerador	Baja presión	Alta presión	19
		Temperatura - Fase densa	Baja temp.	Alta temp.	20
		Temperatura - Fase diluida	Baja temp.	Alta temp.	21
		Flujo - Retiro de catalizador	Bajo flujo	Alto flujo	22
		Temperatura - Retiro de catalizador	Baja temp.	Alta temp.	23
Temperatura - Gases de chimenea		Baja temp.	Alta temp.	24	
Rx – Rg		Circulación de catal. gastado	Bajo flujo	Alto flujo	25
		Circulación de catal. regenerado	Bajo flujo	Alto flujo	26
		Presión Diferencial Rx – Rg	Baja presión	Alta presión	27

Equipo	E/S	Variable	Modos de fallo		No.
D-501	E	Flujo - Vapor de 140#	Bajo flujo	Alto flujo	28
		Flujo - Carga al reactor	Bajo flujo	Alto flujo	29
		Temperatura - Carga al reactor	Baja temp.	Alta temp.	30
	S	Nivel – Catal. en el despojador	Bajo nivel	Alto nivel	31
		Temperatura - Reactor	Baja temp.	Alta temp.	32
		Presión - Cima del reactor	Baja presión	Alta presión	33
D-554	S	Nivel - Tambor de carga	Bajo nivel	Alto nivel	34
D-551	S	Presión - Vapor de cima	Baja presión	Alta presión	35
		Nivel - Tambor de vapor	Bajo nivel	Alto nivel	36
D-556	S	Nivel - Tambor de HCO	Bajo nivel	Alto nivel	37
		Temperatura - salida del E-561	-	Alta temp.	38
T-552	E	Flujo - Reflujo circulante del fondo	Bajo flujo	Alto flujo	39
		Temp. - Reflujo circulante de fondo	Baja temp.	Alta temp.	40
		Flujo - Reflujo caliente	Bajo flujo	Alto flujo	41
		Flujo - Reflujo circulante medio	Bajo flujo	Alto flujo	42
		Temp. - Reflujo circulante medio	Baja temp.	Alta temp.	43
		Flujo - Aceite esponja	Bajo flujo	Alto flujo	44
		Flujo - Reflujo circulante de cima	Bajo flujo	Alto flujo	45
		Temp. - Reflujo circulante de cima	Baja temp.	Alta temp.	46
	S	Nivel - Fondos de la torre	Bajo nivel	Alto nivel	47
		Flujo - Producto de fondos	Bajo flujo	Alto flujo	48
		Temp. - Producto de fondos	Baja temp.	Alta temp.	49
		Temp. - Fondo fraccionadora	Baja temp.	Alta temp.	50
		Temp. - Zona media	Baja temp.	Alta temp.	51
		Flujo - HCN a la T-602	Bajo flujo	Alto flujo	52
T-551	E	Flujo - HCN a la T-551	Bajo flujo	Alto flujo	55
		Flujo - Vapor de 140#	Bajo flujo	Alto flujo	56
T-551	S	Nivel - HCN	Bajo nivel	Alto nivel	57
		Flujo - HCN a tratamiento	Bajo flujo	Alto flujo	58
T-553	E	Flujo - ALC	Bajo flujo	Alto flujo	59
		Temperatura - ALC	Baja temp.	Alta temp.	60
		Flujo - Vapor de 140#	Bajo flujo	Alto flujo	61
	S	Nivel – ALC	Bajo nivel	Alto nivel	62
		Flujo - ALC a tanques	Bajo flujo	Alto flujo	63
		Temperatura - ALC a tanques	-	Alta temp.	64
E-556	E	Flujo - Agua lavado prod. de cima	Bajo flujo	-	65

Equipo	E/S	Variable	Modos de fallo		No.
D-553	S	Nivel – Hidrocarburo	Bajo nivel	Alto nivel	66
		Nivel – Agua	Bajo nivel	Alto nivel	67
		Flujo - Hidrocarburo a la T-2603	Bajo flujo	Alto flujo	68
D-555	S	Nivel – Hidrocarburo	Bajo nivel	Alto nivel	69
		Nivel – Agua	Bajo nivel	Alto nivel	70

Fuente: Autora del proyecto.

Las causas que ocasionan estos modos de fallo y los efectos que estos a su vez tienen sobre las demás variables del proceso han sido recopiladas y presentadas de forma gráfica para facilitar su interpretación. Esta representación gráfica tiene una estructura causa - efecto, es decir, muestra como la presencia de un evento dado desencadena otro. En la Figura 2 se observa la forma de esta estructura en la que se representa por medio de flechas el orden en que ocurren los eventos.



Fuente: Autora del proyecto.

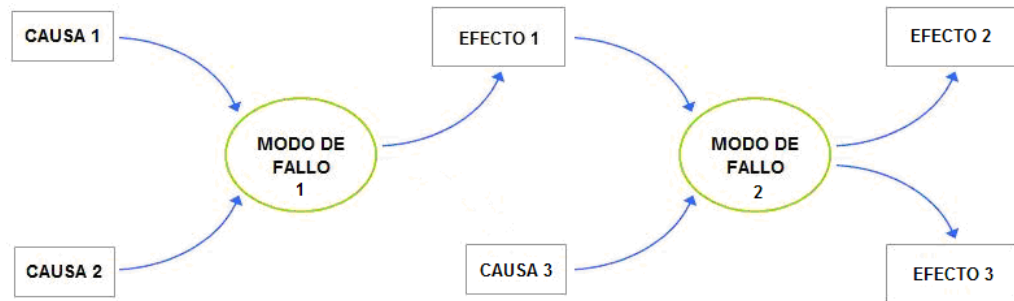
Figura 2. Estructura causa-efecto

Debido al gran número de variables analizadas y a la dimensión de cada una de estas representaciones, las graficas mencionadas no son presentadas en este documento sino en la herramienta software interactiva creada para tal fin.

## 2.4. CAUSALIDAD ENTRE LOS MODOS DE FALLO

Como se mencionó anteriormente la presencia de un modo de fallo tiene efecto sobre el comportamiento de otras variables del proceso, y dicho efecto puede ser la causa que desencadene un nuevo modo de fallo en otro equipo. Según esta relación, si se unen las representaciones causa-efecto de la sección anterior se

mostraría la causalidad que tienen los modos de fallo entre si. La estructura que se obtiene de la unión planteada se presenta en la Figura 3 y se llamará de aquí en adelante diagramas de causalidad.



Fuente: Autora del proyecto.

Figura 3. Estructura de los diagramas de causalidad

Los diagramas de causalidad construidos con la unión de todas las estructuras causa - efecto se presentan en la herramienta software interactiva mencionada anteriormente. En el capítulo 3 de este documento se encuentran las indicaciones para interpretar estos diagramas, y en el capítulo 5 se presenta un manual que explica el manejo de la herramienta construida.

La razón por la que estos diagramas de causalidad son importantes es porque permiten construir diferentes secuencias de ejecución de los eventos. Algunos ejemplos de secuencias para el diagrama de la Figura 3 son:

- causa 1 → modo de fallo 1 → efecto 1 → modo de fallo 2 → efecto 3
- causa 3 → modo de fallo 2 → efecto 2

Estas secuencias deben ser evaluadas, de manera que si la URC durante su operación real (*online*) ejecuta algunas de ellas, pueden construirse reglas que permitan predecir éste comportamiento en situaciones futuras.

Ésta metodología será empleada por el grupo de automatización de la empresa para detectar fallos incipientes y diagnosticarlos con base en las reglas construidas y las causas raíz allí contempladas.

### **3. DIAGRAMAS DE CAUSALIDAD**

Los diagramas de causalidad son representaciones gráficas de los efectos que tiene la presencia de un modo de fallo sobre el comportamiento de las demás variables del proceso, y de la forma como se desencadenan otros modos de fallo en equipos adyacentes.

Para facilitar la comprensión de los diagramas, el proceso analizado fue dividido en dos secciones. El diagrama “RX-RG” comprende el proceso de craqueo y regeneración y el diagrama “Fraccionadora” comprende la sección de fraccionamiento. En el primer diagrama se encuentran las variables correspondientes al tanque de condensado, el condensador de vapor, el soplador principal, el soplador de control, el regenerador, el reactor y el tambor de carga; mientras que en el segundo diagrama se encuentran las variables del tambor de vapor, el tambor de gasóleo, la fraccionadora principal, las torres despojadoras, los condensadores de cima y los tambores de destilado.

Debido al número de variables involucradas en el diagrama, no es posible desplegarlo en éste documento; sin embargo en este capítulo se explican las características que se deben tener en cuenta para su correcta interpretación.

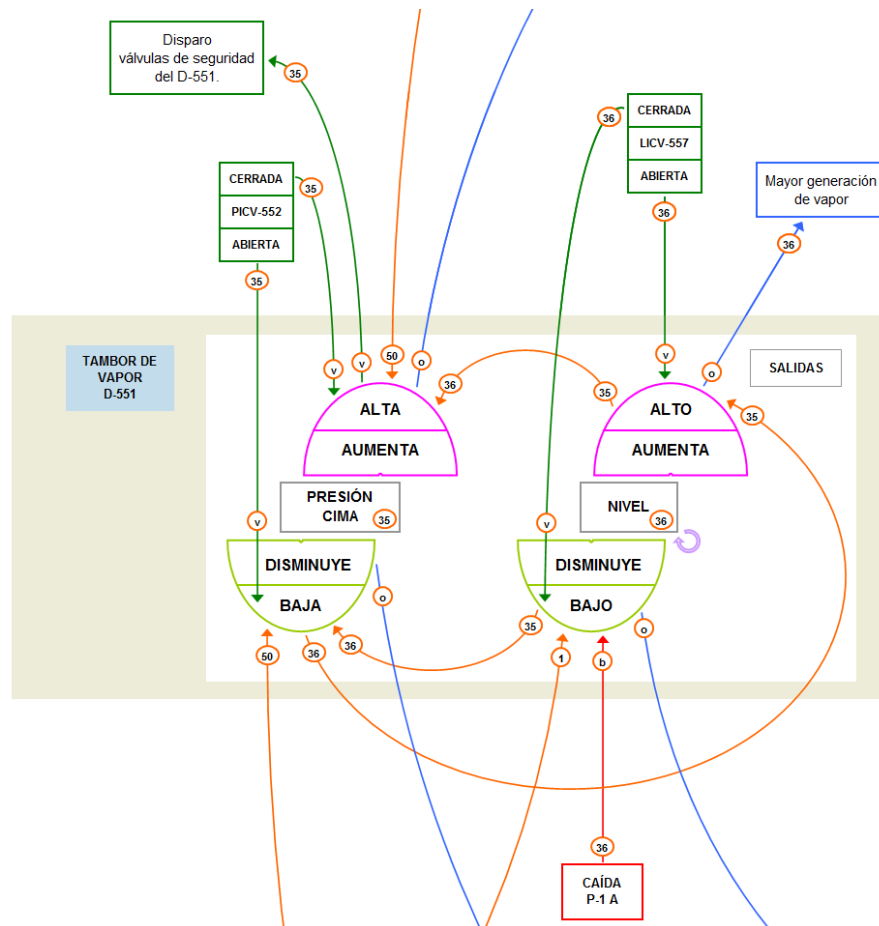
#### **3.1. INTERPRETACIÓN**

Las variables dentro de los diagramas de causalidad pueden presentar cuatro estados diferentes: aumento, disminución, alto y bajo. Los dos primeros estados describen la tendencia de la variable, y los dos últimos indican presencia de un modo de fallo.

Los diagramas construidos tienen la estructura causa - efecto explicada en el capítulo anterior, por lo tanto las flechas que entran a una variable dada representan las causas que ocasionan la presencia de uno de sus estados, y las flechas que salen de ella son los efectos que tiene esta variable sobre el comportamiento de las variables a su alrededor.

Cuando se desea determinar cual de las causas probables fue la que ocasionó la presencia de un modo de fallo, se deben tener en cuenta los síntomas observables asociados a cada una de estas causas. Los síntomas observables de una causa determinada son los demás efectos paralelos que ésta tenga sobre otras variables. Según lo anterior, la presencia de uno de estos síntomas observables de forma paralela a la presencia del modo de fallo analizado, podría confirmar la causa que ha desencadenado ambos eventos.

La Figura 4 es un fragmento del diagrama de causalidad de la sección de fraccionamiento; allí se muestran las variables analizadas para el tambor de vapor D-551. En esta gráfica se puede observar que un alto nivel en el tambor de vapor ocasiona una alta presión en la cima de éste, de la misma manera como un bajo nivel ocasiona una baja presión.



Fuente: Autora del proyecto.

Figura 4. Diagrama de causalidad del tambor de vapor D-551

### 3.2. IDENTIFICADORES

Entre las causas tenidas en cuenta para la presencia de los modos de fallo se encuentran algunos daños en válvulas, bombas e intercambiadores de calor. Por otra parte algunas consecuencias que también fueron consideradas en los diagramas son: daños en equipos, la activación de los sistemas de emergencia de la unidad y caídas o paradas de la planta.

Para clasificar los tipos de causas y/o consecuencias, e identificarlos a simple vista se emplearon ciertas características que se explican a continuación.

**3.2.1. Colores:** Los colores de las flechas que conectan las variables en los diagramas de causalidad no tienen ningún significado, su asignación es arbitraria y su única finalidad es la de facilitar la interpretación del diagrama. Solamente las flechas correspondientes a daños en válvulas, bombas e intercambiadores de calor poseen un color distintivo que permite identificar estos tres grupos. Las flechas relacionadas con daños en las válvulas son de color verde; las relacionadas con las bombas son rojas, y aquellas asociadas a fallas en los intercambiadores de calor son vinotinto.

**3.2.2. Etiquetas:** Al igual que las variables analizadas son identificadas con los números del 1 al 70 como se indica en la última columna de la Tabla 2, el resto de las variables consideradas en los diagramas de causalidad también poseen una etiqueta que permite identificar el tipo de información que manejan. En la Tabla 4 se encuentran listadas las etiquetas empleadas en los diagramas.

Tabla 4. Etiquetas de las variables

Etiqueta	Descripción
Números de 1 a 70	VARIABLES ANALIZADAS
Letra [v]	Válvulas
Letra [b]	Bombas
Letra [e]	Intercambiadores de calor
Letra [o]	Otras variables
Letra [d]	Daño o apagada de los sopladores
Letra [f]	Sistemas de emergencia (FLAC)
Letra [P]	Caída o parada de la planta
Abreviatura [cir]	Circulación de catalizador (gastado y regenerado)

Fuente: Autora del proyecto.

La letra [o] se usa para identificar las causas y consecuencias no contempladas en los otros grupos mencionados en la Tabla 4.

Las variables de circulación de catalizador gastado y regenerado son identificadas por los números 25 y 26 respectivamente; sin embargo en operación normal el comportamiento de estas circulaciones es el mismo, por lo tanto su análisis se reúne en una sola variable llamada circulación de catalizador, representada por la etiqueta [cir].

Las flechas de los diagramas de causalidad presentan en cada extremo una etiqueta que se interpreta así: la etiqueta en el origen de la flecha indica la variable a la que se dirige, y la etiqueta al final de la flecha indica la variable de donde proviene. Esta explicación se puede validar observando las flechas presentes en la Figura 4.

## **4. FALLOS GENERALES DE LA UNIDAD**

La Unidad de Ruptura Catalítica (URC) puede presentar diferentes tipos de problemas relacionados con la operación e integridad de los equipos, la calidad de los productos obtenidos y los flujos principales del proceso (catalizador, hidrocarburo y aire), entre otros. Debido a que en el pasado la unidad ha experimentado varios de los problemas que le podrían ocurrir, el historial de estas causas es una fuente valiosa de información para la detección de fallos futuros.

En esta etapa se eligieron cinco de los problemas más importantes y usuales de la unidad, para analizarlos e identificar los factores que los desencadenan. Los fallos generales escogidos son: circulación limitada, flujo inverso, alta temperatura en el regenerador, depósitos de coque, y baja calidad (del producto) y rendimientos (de la carga).

Estos problemas son ocasionados por diferentes tipos de causas que se pueden clasificar en cuatro grandes grupos: condiciones de operación, fallas mecánicas, propiedades del catalizador y características de la carga. En este capítulo se presenta el fallo Alta Temperatura en el Regenerador, como un ejemplo del análisis realizado, abordando los diferentes tipos de causas que lo desencadenan. El anexo C reúne el análisis de los otros cuatro fallos escogidos.

### **4.1. ALTA TEMPERATURA EN EL REGENERADOR**

Cuando se habla de la temperatura del regenerador sin especificar su punto de medición se trata de la temperatura de su fase densa, la cual es producto de la combustión del coque presente en el catalizador gastado. Esta temperatura está influenciada por la rata de circulación de catalizador y por la formación de coque en la reacción.

El regenerador esta hecho para trabajar a altas temperaturas, sin embargo existen ciertos límites de diseño mecánico que no se deben alcanzar pues la estructura de este recipiente sufriría daños importantes.

Otros efectos indeseados de las altas temperaturas del regenerador son: sinterización del catalizador, desactivación térmica del catalizador, promoción de reacciones térmicas y mayor producción de gas.

En las tablas a continuación se presentan los diferentes tipos de causas que pueden desencadenar este fallo, y se explica como cada una de estas causas resulta en una alta temperatura en el regenerador.

Tabla 5. Condiciones de operación - Alta temperatura en el Rg.

Causa	Descripción
Alta temperatura en el reactor (mayor de la requerida para la reacción).	<p>Una alta temperatura en el reactor hace que la presión del regenerador aumente para disminuir la circulación de catalizador. Con la menor transferencia de calor del regenerador al reactor, la temperatura del regenerador aumenta. Además una alta temperatura en el reactor hace que aumente la producción de carbón; la quema de este exceso de coque eleva la temperatura del regenerador.</p> <p>Esto se cumple para condiciones estables de carga y precaliente.</p> <p><i>Síntomas observables:</i> aumenta la conversión y la producción de carbón y gas. Los rendimientos de gasolina disminuyen, y aumenta su calidad.</p>
Alta temperatura de precaliente.	<p>Una alta temperatura de precaliente (con igual cantidad de carga) disminuye la rata de circulación y por lo tanto se extrae menos calor del regenerador, aumentando su temperatura.</p> <p><i>Síntomas observables:</i> La menor rata de circulación disminuye la relación C/A, disminuye la conversión.</p>
Poco vapor de despojo.	<p>Si el flujo de vapor de 140# es bajo, hay un despojamiento deficiente en el reactor y el catalizador llega al regenerador impregnado con hidrocarburo. La quema de este exceso de material eleva la temperatura del regenerador.</p>
Poco vapor de atomización de la carga (en el riser).	<p>Si este flujo de vapor es bajo la carga no es atomizada correctamente y no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente. Lo anterior causa que la carga no se vaporice por completo produciéndose más coque de lo normal.</p>

Baja circulación de catalizador.	Una menor circulación de catalizador representa una menor remoción de calor del regenerador, y por lo tanto un aumento en su temperatura.
Alto flujo de aire principal (con alto porcentaje de carbón).	<p>El flujo de aire principal suministra el oxígeno necesario para la combustión. Si este flujo es alto y no hay suficiente coque para quemar, el regenerador se enfría por exceso de aire; sin embargo si el flujo de aire principal es alto y el porcentaje de coque en el catalizador gastado es alto también, la temperatura del regenerador aumenta porque cuenta con más carbón y más oxígeno para la combustión.</p> <p>Una posible causa del alto porcentaje de carbón es que haya ocurrido previamente una mala regeneración del catalizador, de manera que el coque se acumula sobre él.</p>
Inyección accidental de aceite antorcha al regenerador.	<p>El aceite de antorcha es usado durante los periodos de arranque y apagada, o cuando la unidad se encuentra desbalanceada térmicamente. Si este aceite se inyecta cuando no se necesita calor adicional, la temperatura del regenerador se eleva más de lo esperado.</p> <p><i>Síntoma observable:</i> Daños en la metalurgia de los componentes del regenerador.</p>
Alta adición de catalizador.	Una alta adición de catalizador aumenta la actividad del catalizador que esta circulando en la unidad; este aumento en la actividad resulta en una mayor producción de carbón, lo cual representa un aumento en el material para la combustión.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla 6. Fallas mecánicas - Alta temperatura en el Rg.

Causa	Descripción
Taponamiento en los inyectores de vapor de despojo.	Esto ocasionaría un despojamiento deficiente, y por lo tanto el catalizador llega impregnado de hidrocarburo al regenerador.
Daño del distribuidor de vapor de despojo.	
Daño interno del despojador.	
Boquillas de carga dañadas.	La carga no es atomizada correctamente y por lo tanto no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente. Lo anterior causa que la carga no se vaporice por completo, produciéndose más coque de lo normal.
Daño en distribuidores de vapor de atomización.	

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla 7. Propiedades del catalizador - Alta temperatura en el Rg.

Causa	Descripción
Alto nivel de tierras raras (defecto de fábrica).	<p>Las tierras raras hacen que el catalizador sea más refractario (resistente al calor), es decir la partícula absorbe más calor.</p> <p>Las tierras raras favorecen la reacción de sobrecraqueo, generando altas temperaturas en el catalizador.</p>
Alto nivel en la actividad de la matriz.	El catalizador muy activo favorece el sobrecraqueo en el reactor y esto aumenta la generación de coque (más material para la combustión).
Catalizador contaminado con níquel y vanadio proveniente de la carga.	Esta contaminación lo hace más refractario y acumula más calor, causando una alta temperatura en el regenerador.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla 8. Características de la carga - Alta temperatura en el Rg.

Causa	Descripción
<p>Alto porcentaje de carga pesada (fracción de 1050°F).</p> <p>Un síntoma de esto es el alto nivel de carbón en la carga.</p>	<p>Esta fracción de carga pesada no reacciona completamente y produce más coque, lo cual representa más material para la combustión. Además, el carbón que trae la carga se adiciona al generado en la reacción (coque), aumentando este material.</p> <p><i>Síntoma observable:</i> menor circulación de catalizador.</p>
Alto contenido de metales (níquel y vanadio)	Contaminan el catalizador y lo hacen más refractario, acumulando más calor y causando alta temperatura en el regenerador.

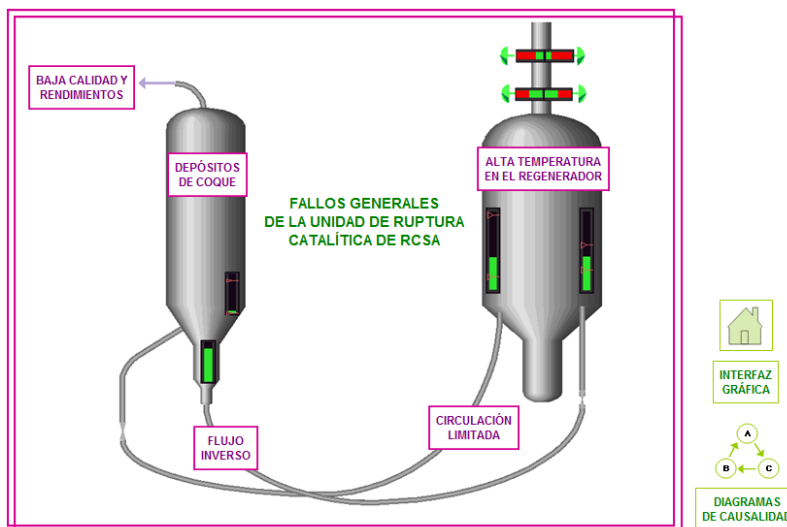
Fuente: Autora del proyecto.

## 5. MANUAL DE LA HERRAMIENTA INTERACTIVA

Para facilitar el manejo de la información recopilada a lo largo de este trabajo, se ha construido una herramienta computacional que integra y presenta de forma didáctica la teoría de los fallos generales escogidos, la interfaz gráfica de la unidad y los diagramas de causalidad de las principales variables de la URC. El objetivo de este capítulo es explicar el manejo de la aplicación y cómo esta organizada la información en ella. El software empleado para la construcción de esta herramienta fue Microsoft Excel 2003.

### 5.1. MENÚ PRINCIPAL

Al ejecutar la herramienta se despliega la ventana principal mostrada en la Figura 5, que es la ventana de acceso a toda la información recopilada en este trabajo. El dibujo del fondo es una imagen de la sección de craqueo, y sobre ella se encuentran los nombres de los cinco fallos generales analizados en este documento. Haciendo *click* en cada uno de ellos se accede a una ventana donde se presenta la información de las causas que los desencadenan.

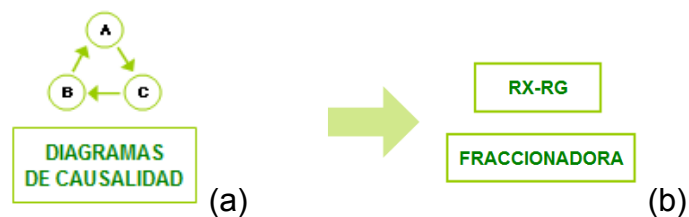


Fuente: Autora del proyecto.

Figura 5. Menú principal

Desde este menú principal también se tiene acceso a la interfaz gráfica de la unidad y a los diagramas de causalidad seleccionando los iconos correspondientes (ubicados en la parte inferior derecha de esta ventana).

Cuando se selecciona el icono de los diagramas de causalidad, mostrado en la Figura 6a, aparecen a su derecha dos opciones que permiten elegir entre los dos diagramas disponibles, el primero corresponde a la sección de craqueo y regeneración, y el segundo a la sección de fraccionamiento, como se muestra en la Figura 6b. Si se desea ocultar las opciones desplegadas, esto se logra haciendo *click* en la flecha verde a su izquierda.



Fuente: Autora del proyecto.

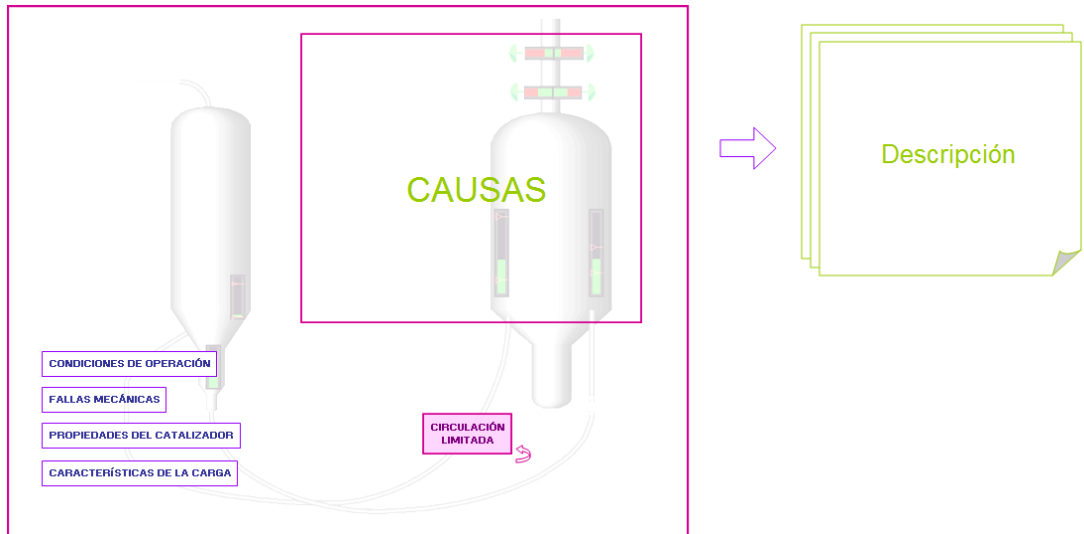
Figura 6. Iconos de acceso a los diagramas de causalidad

## 5.2. VENTANA DE FALLOS GENERALES

Cuando se selecciona uno de los fallos generales en el menú principal se despliega una ventana como la que se muestra en la Figura 7. En la parte inferior izquierda de esta ventana se encuentran los cuatro tipos de causas que pueden desencadenar el fallo analizado, los cuales son: condiciones de operación, fallas mecánicas, propiedades del catalizador y características de la carga.

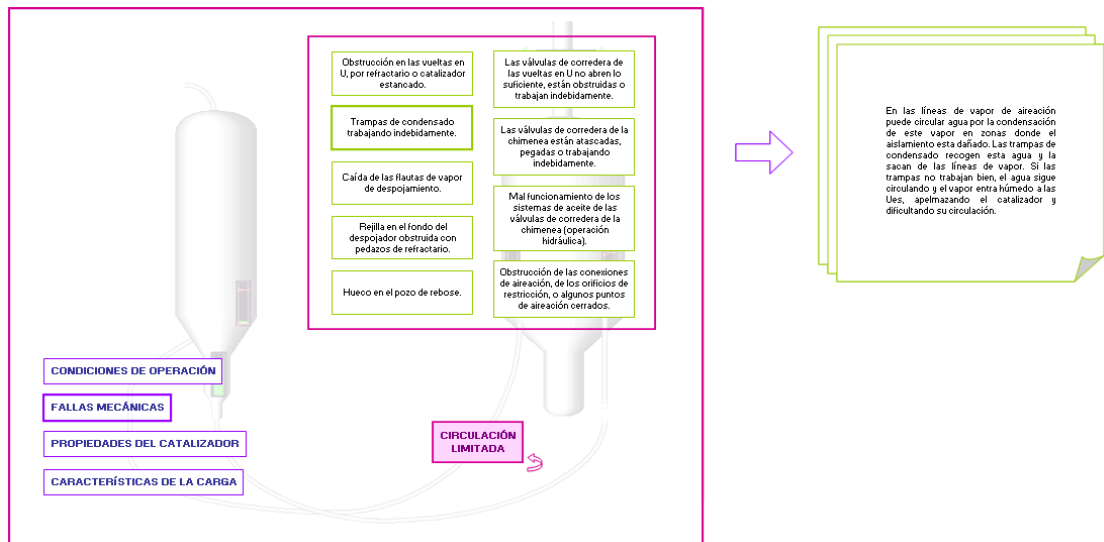
Al seleccionar uno de los cuatro tipos de causas, se despliegan en la sección etiquetada con la palabra "CAUSAS", todos los factores que puedan desencadenar esta falla y clasifiquen dentro de esta categoría.

Una vez listadas las causas, como se muestra en la Figura 8, haciendo *click* en cada una de ellas aparece en la sección etiquetada con la palabra "Descripción", la explicación de porque la causa elegida desencadena el fallo analizado.



Fuente: Autora del proyecto.

Figura 7. Ventana de un fallo general

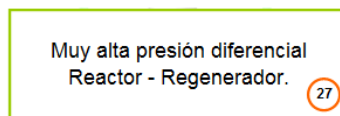


Fuente: Autora del proyecto.

Figura 8. Ventana de un fallo general con información desplegada

Cuando un tipo de causa es seleccionada, su cuadro se resalta sobre los demás e indica cuales causas se están desplegando. Así mismo sucede con el cuadro de la causa seleccionada para identificar a cual de ellas corresponde la descripción presentada.

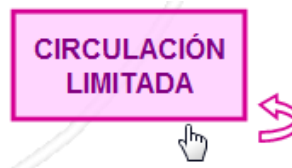
Algunas causas dentro de la categoría de “condiciones de operación” tienen un vínculo como el que se muestra en la Figura 9, el cual identifica la variable con el número asignado en la Tabla 2 de este documento. Este vínculo comunica la causa analizada con el diagrama de causalidad donde se muestra su relación con las demás variables principales de la unidad.



Fuente: Autora del proyecto.

Figura 9. Causa de la categoría condiciones de operación

Para regresar al menú principal desde cualquier ventana de un fallo general, se debe hacer *click* en el nombre de este fallo (de la misma manera como se hizo para acceder desde el menú principal a la ventana del fallo), como se muestra en la Figura 10.



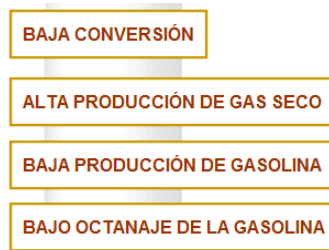
Fuente: Autora del proyecto.

Figura 10. Icono de acceso al menú principal

Las ventanas de los cinco fallos generales tienen la misma estructura que fue explicada en este apartado, sin embargo la ventana del fallo “Baja calidad y rendimientos” presenta algunas diferencias que serán explicadas a continuación.

Debido a que la baja calidad y rendimientos puede ser evaluada por cuatro factores (baja conversión, alta producción de gas seco, baja producción de gasolina y bajo octanaje de la gasolina), estos se despliegan en pantalla como se muestra en la Figura 11.

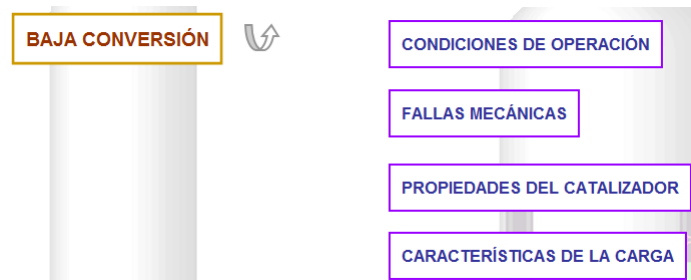
El análisis de estos cuatro factores se realiza como si fueran fallos independientes, de manera que se presentan para cada uno de ellos las posibles causas que los desencadenan.



Fuente: Autora del proyecto.

Figura 11. Factores que evalúan la baja calidad y rendimientos

Al seleccionar el factor que se desea estudiar, aparecen a su derecha los cuatro tipos de causas, como se muestra en la Figura 12. Una vez se elige el tipo de causa a analizar, el manejo de la ventana es el mismo al explicado anteriormente.



Fuente: Autora del proyecto.

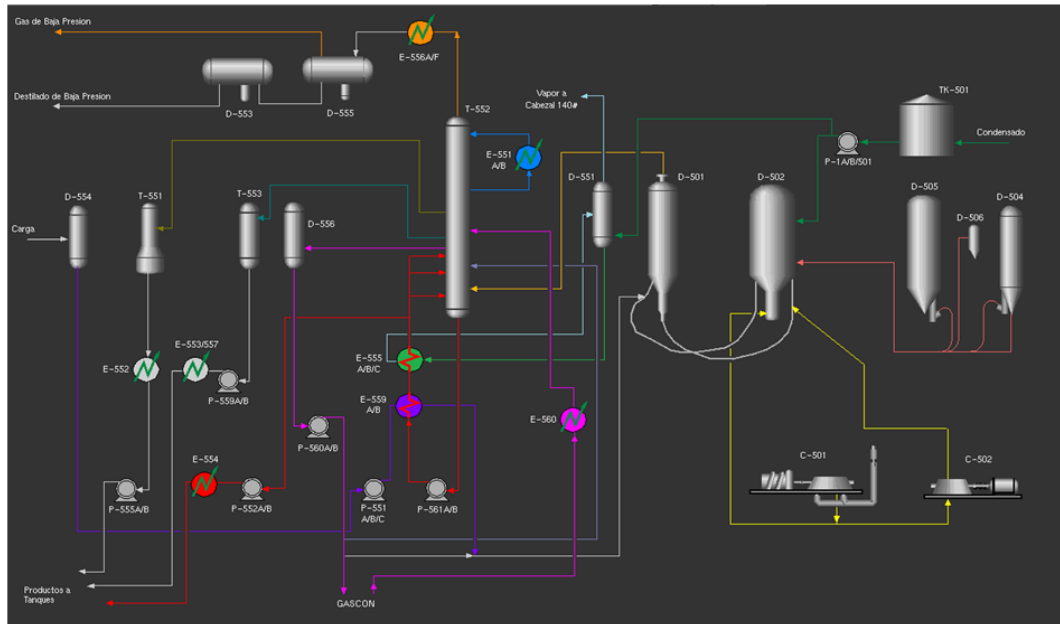
Figura 12. Menú de causas para baja calidad y rendimientos

Para elegir otro de los cuatro factores se debe hacer *click* en la flecha ubicada a la derecha del factor en estudio, y esto hará que se despliegue en ventana el menú mostrado en la Figura 11.

### 5.3. INTERFAZ GRÁFICA

La interfaz gráfica de esta herramienta presenta los tableros o *displays* visualizados por el operador en la sala de control de la unidad. Los *displays* incluidos en la herramienta fueron editados para su mayor comprensión.

Cuando se accede a la interfaz gráfica desde el menú principal, aparece en pantalla la ventana mostrada en la Figura 13, la cual corresponde al *display* principal de la unidad.



Fuente: Autora, basada en figura del tablero de la URC.

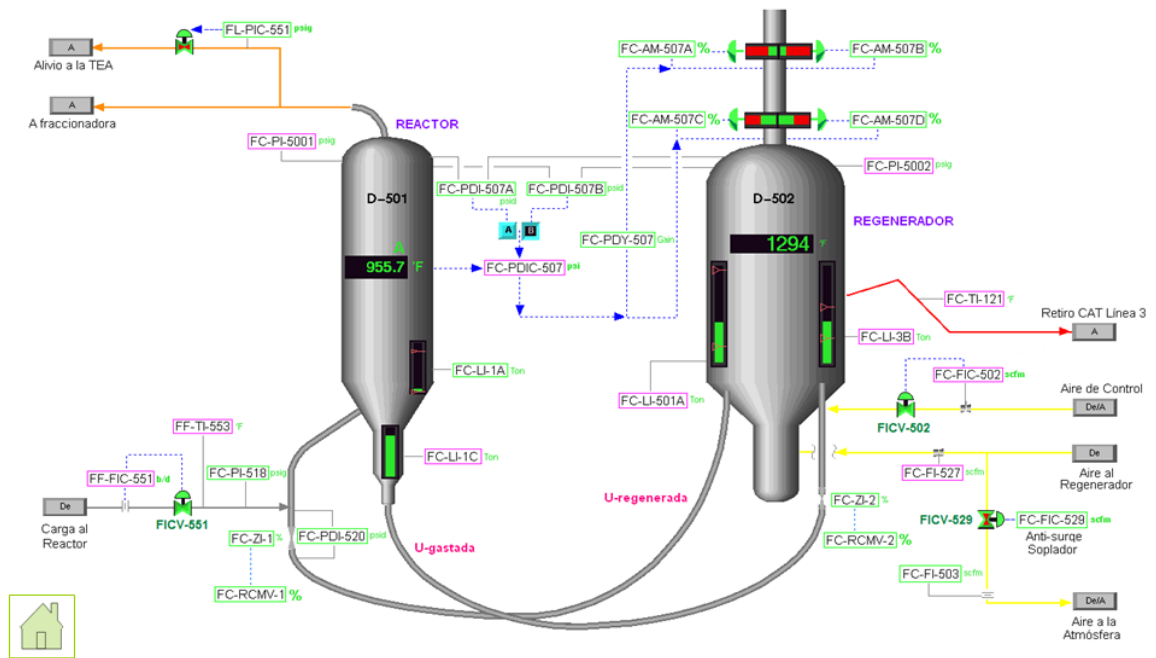
Figura 13. *Display* principal de la unidad

El *display* principal presenta la sección del proceso que fue analizada en este trabajo, y se comunica con los *displays* de todos los equipos que aparecen en él haciendo *click* en cada uno de ellos. Para regresar desde esta ventana al menú principal se debe seleccionar el icono de inicio que aparece en la parte inferior derecha de la Figura 13.

Además de los equipos, las vueltas en U del *display* principal también poseen un vínculo que las comunica con el *display* de la sección de craqueo y regeneración, mostrado en la Figura 14.

En todos los *displays* incluidos en esta herramienta se presentan las etiquetas (*tags*) de las variables medidas en cada sección del proceso. En la Figura 14 se puede observar que algunos *tags* tienen un recuadro fucsia que indica que corresponden a las variables analizadas en este trabajo. Al hacer *click* en cualquiera de estos *tags* se accede al diagrama causa - efecto de la variable seleccionada, el cual la relaciona con las demás variables principales de la unidad.

En el caso del *display* mostrado en la Figura 14, los recipientes del reactor y el regenerador poseen vínculos que los comunican con *displays* más específicos de la operación interna de estos equipos.



Fuente: Autora, basada en figura del tablero de la URC.

Figura 14. *Display* reactor - regenerador

Los *displays* también pueden comunicarse entre si por medio de vínculos ubicados al final de las líneas de flujo, accediendo de esta manera al *display* donde se encuentra el equipo relacionado con dicho flujo. Por ejemplo, el vínculo del flujo mostrado en la Figura 15 comunica el *display* actual con el del soplador de control.



Fuente: Autora, basada en figura del tablero de la URC.

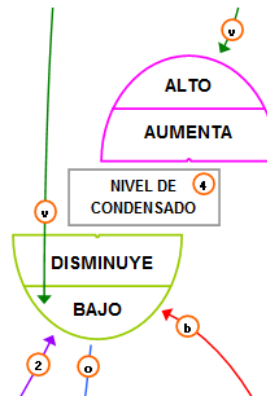
Figura 15. Vínculos ubicados al final de los flujos

Para regresar desde cualquier *display* al *display* principal se debe seleccionar el icono en forma de casa que aparece en la parte inferior izquierda de la Figura 14.

## 5.4. DIAGRAMAS DE CAUSALIDAD

Los diagramas de causalidad muestran por medio de flechas como el comportamiento de una variable tiene efecto en las demás variables analizadas, es decir si el aumento o disminución de una variable dada define la tendencia de otra variable, o hace que alcance un valor alto o bajo. Estos valores de alto o bajo representan la activación de una alarma, para aquellas variables que tengan alarmas configuradas.

En la Figura 16 se muestra la estructura de cada variable dentro del diagrama de causalidad; en ella se identifican los cuatro estados que puede tener, aunque algunas variables no los poseen todos. También se puede observar que dentro del rectángulo que contiene el nombre de la variable se encuentra el número que la identifica según la asignación hecha en el capítulo 2 de este documento. Al ubicar el *mouse* sobre este número se muestra el *tag* de la variable señalada.

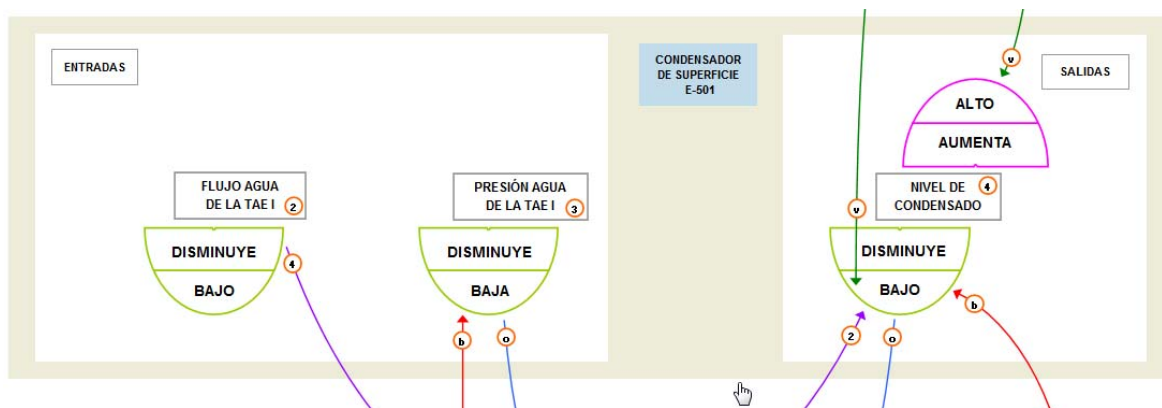


Fuente: Autora del proyecto.

Figura 16. Estructura de una variable en el diagrama de causalidad

Las variables que pertenecen a un mismo equipo se agrupan dentro de un gran rectángulo gris y se clasifican en subconjuntos de entradas y salidas como se muestra en la Figura 17. El nombre del equipo al que pertenecen estas variables se presenta en un cuadro azul ubicado en medio de estos subconjuntos.

Los rectángulos grises que agrupan las variables por equipos, están programados para que al hacer *click* en ellos se pueda regresar a la ventana desde donde se accedió al diagrama de causalidad, es decir, al menú principal, a las condiciones de operación de los fallos generales o cualquiera de los *displays*, según sea el caso.



Fuente: Autora del proyecto.

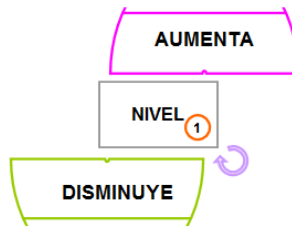
Figura 17. Estructura de un equipo en el diagrama de causalidad

Para facilitar la exploración de los diagramas se han incluido vínculos en los identificadores ubicados en los extremos de las flechas, de manera que al hacer *click* en ellos, se recorre el diagrama llegando a la variable que se encuentra al otro extremo de la flecha.

Los diagramas de causalidad tienen varias formas de ser visualizados. La forma más general y la que se presenta por defecto, es desplegar todas las variables involucradas en los diagramas y todas las flechas que las conectan entre sí. Esta presentación permite conocer cómo se relacionan todas las variables entre sí, pero su visualización se hace un poco confusa, por lo tanto se han creado otras formas de explorar los diagramas.

Haciendo *click* en el nombre de la variable a analizar, se despliegan sólo las flechas relacionadas con esta variable, es decir se presenta la estructura causa - efecto de dicha variable. De esta manera se puede acceder a las variables que se relacionan con ella utilizando los vínculos ubicados en los extremos de las flechas.

Otra opción de visualización es seleccionar los estados alto y aumenta para desplegar sólo las flechas que describen este comportamiento, o seleccionar los estados bajo y disminuye con la misma finalidad. Para volver a la forma general de visualización, en la que se muestran todas las flechas, se debe hacer *click* en el fondo blanco del diagrama, por fuera de los rectángulos de los equipos.



Fuente: Autora del proyecto.

Figura 18. Botón que comunica ambos diagramas

Teniendo en cuenta que se construyó un diagrama para cada sección de la unidad pero que su funcionamiento no es independiente, existen algunas variables que hacen parte de ambos diagramas. Estas variables replicadas poseen un botón que permite cambiar de un diagrama a otro para observar el comportamiento de la misma variable con respecto a la otra parte del proceso. Este botón se muestra en la Figura 18, a la derecha del cuadro que contiene el nombre de la variable.

## 6. CONCLUSIONES

- En este proyecto se definieron los modos de fallo asociados a los equipos principales de la URC, y para ello fue necesario recopilar información sobre el funcionamiento de la unidad, que permitiera identificar las variables más importantes del proceso y los equipos con los que estas se relacionan. Una vez estas variables fueron definidas se determinaron las causas que podían llevarlas a límites indeseados de operación.
- Debido a que en la URC los procesos se desarrollan paralelamente para obtener los productos, la operación de un equipo se relaciona con la de los equipos a su alrededor, de manera que un comportamiento inadecuado en uno de ellos puede repercutir en el de los demás. Es por esto que es importante determinar la causalidad entre las variables del proceso, para conocer de antemano los efectos que tendrán los eventos inesperados, sobre el funcionamiento general de la unidad.
- Como una manera sencilla de interpretar la causalidad entre las diferentes variables del proceso, se crearon representaciones gráficas que reúnen las posibles secuencias ejecutadas por las variables durante su operación normal o en modos de fallo.
- Para relacionar los modos de fallo con problemas generales de la Unidad, que repercuten en su producción o en la integridad de sus equipos, se analizaron cinco fallos importantes y usuales, reuniendo los diferentes tipos de causas que podrían desencadenarlos. Aquellas causas correspondientes a condiciones operacionales, que se encuentran entre las variables analizadas en la primera etapa del proyecto, fueron relacionadas con los diagramas de causalidad para encontrar su posible causa raíz, y los efectos paralelos que tienen en equipos adyacentes.

- Se construyó una herramienta software interactiva para facilitar el manejo de la información recopilada, presentándola de forma amigable y organizada para su mayor comprensión.
- Con la realización de este trabajo de grado en la modalidad de práctica empresarial, la estudiante entró en contacto con la realidad de contextos empresariales, aplicando y fortaleciendo competencias personales y profesionales.

## 7. RECOMENDACIONES

La información recopilada para la construcción de la herramienta interactiva fue obtenida de manuales, trabajos anteriormente desarrollados para esta unidad, y entrevistas con operadores e ingenieros de proceso. Se recomienda que la teoría allí presentada sea validada por un grupo multidisciplinario que determine su veracidad y aplicabilidad.

La herramienta interactiva esta orientada a ser una base de conocimiento para la construcción de algoritmos inteligentes que determinen el orden en que se ejecutan los eventos y puedan anticipar los fallos, tal que se eviten. Sin embargo esta herramienta también puede ser utilizada para el entrenamiento de operadores de manera que puedan relacionarse con el proceso, los *displays*, las fallas y los factores críticos que las desencadenan.

Existen algunas mejoras que se pueden realizar para tener un mejor control del proceso, una de ellas es instalar instrumentos que permitan monitorizar aquellas variables importantes que actualmente no son medidas, ni calculadas, como por ejemplo el flujo de agua de la TAE I al E-501, el flujo de retiro de catalizador y los flujos de HCN y ALC a las despojadoras.

## 8. DESARROLLOS A FUTURO

Existen varias tareas a futuro que se pueden desarrollar para continuar con el trabajo aquí realizado. Una de ellas es crear un diccionario de fallos específicos de los equipos en el que no sólo se consideren los modos de fallo de sus variables principales, sino cualquier tipo de fallo que el equipo pueda presentar, como por ejemplo: el secado de platos de la cima de la fraccionadora, y la baja transferencia de calor en los intercambiadores de calor. Esto con el fin de realizar una cobertura del proceso que involucre fallas en variables, fallas en equipos y fallas en la unidad.

Otra tarea que se puede desarrollar es extender el análisis de variables aquí realizado al resto de la URC, teniendo en cuenta que este trabajo se baso solamente en las secciones de craqueo, regeneración y fraccionamiento, y hay muchas otras secciones sin cubrir, como por ejemplo la de compresión de gases y la de productos livianos, entre otras.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Angélica Cáceres B., Adriana M. Roper T. *Desarrollo de un modelo de simulación para el análisis de fallos en la Unidad de Ruptura Catalítica de la Refinería de Cartagena – Ecopetrol S.A.* Trabajo de Grado Universidad Pontificia Bolivariana, 2006, pp. 67-178
  
- [2] R. C. McFarlane, R. C. Reineman, J. F. Bartee, C. Georgakis. *Dynamic simulator for a model IV fluid catalytic cracking unit.* Computers and Chemical Engineering, Vol 17, No 3, 1993, pp. 275-297
  
- [3] R. Rojas R. y J. Castaño B. *Manual de Cracking - Coordinación de Cracking GRC*, Versión 01, 2005, pp. 7-171
  
- [4] R. Sadeghbeigi. *Fluid Catalytic Cracking Handbook: Design, Operation, and Troubleshooting of FCC Facilities.* Gulf Professional Publishing. Second Edition. 2000, pp. 234-275

## **ANEXOS**

## ANEXO A. MARCO TEÓRICO COMPLEMENTARIO

La operación aquí descrita corresponde a la Unidad de Ruptura Catalítica Modelo IV de la Refinería de Cartagena, y cubre lo correspondiente a: el reactor, el regenerador, la fraccionadora principal y las facilidades de manejo de catalizador.

### A.1. DESCRIPCIÓN DEL REACTOR

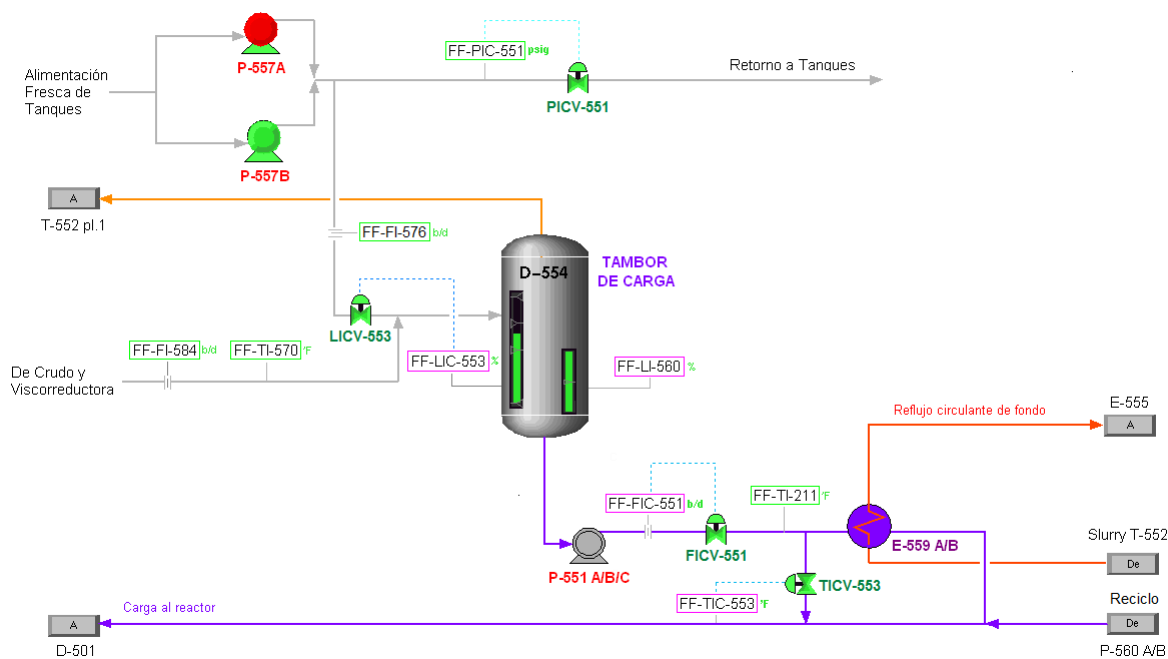
La función principal del reactor es la de poner en contacto la carga y el catalizador regenerado caliente, controlando la temperatura y el tiempo de reacción para producir los rendimientos deseados de cada producto.

En la parte superior del reactor hay tres juegos de ciclones que recuperan el catalizador arrastrado por los vapores de reacción. El vapor libre de catalizador es descargado por los ciclones en la cámara plena ubicada en la cima del reactor y de allí fluye hacia la fraccionadora principal. El catalizador recogido en los ciclones es devuelto a través de sus piernas a la fase densa del reactor.

Durante las reacciones de craqueo se forma carbón que se deposita, junto con pequeñas cantidades de vapores de hidrocarburo, en la superficie de las partículas de catalizador. El catalizador gastado, después de separarse de los vapores de la reacción, cae a una sección de despojamiento provista de platinas desviadoras donde se inyecta vapor de agua en contracorriente para arrastrar los vapores de aceite adheridos al catalizador y hacerlos fluir hacia la cima del reactor. El catalizador despojado se recoge en el fondo del reactor y se envía al regenerador usando presiones diferenciales y aireación con vapor.

**A.1.1. Sistema de alimentación y precaliente:** La carga total de la sección de craqueo consta de dos chorros: la carga fresca y el reciclo de gasóleo proveniente de la fraccionadora principal. La carga fresca puede ser fría, proveniente de los tanques, o caliente, proveniente de la Viscosreductora o de la Planta de Crudo.

La carga fría disponible en los tanques es tomada por las bombas P-557 A/B y enviada al tambor acumulador de carga D-554, el cual posee un controlador de nivel (LIC-553) que regula éste flujo de carga por medio de la válvula LICV-553, como se observa en la Figura A1.



Fuente: Autora, basada en figura del tablero de la URC.

Figura A1. Alimentación y precaliente de la carga

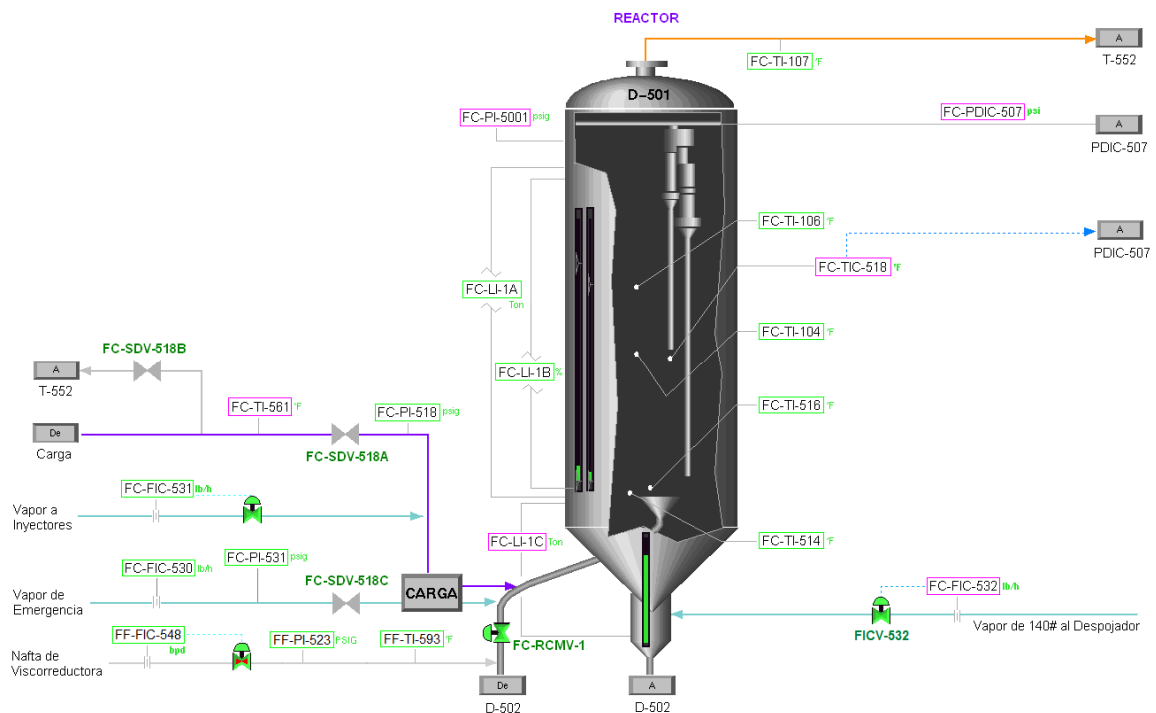
El tambor acumulador de carga D-554 sirve de fuente de suministro de las bombas de carga caliente P-551 A/B/C, las cuales toman la carga del fondo del tambor mediante control del flujo del FIC-551 y la envían al sistema de precaliente. La carga recibe calor del reflujo circulante de fondo de la fraccionadora (*slurry*) pasando a través de los intercambiadores E-559 A/B. La temperatura de precalentamiento es controlada por el TIC-553 el cual regula la cantidad de carga que recibe calor del slurry, operando una válvula que sirve de *bypass* a los intercambiadores de calor.

**A.1.2. Zona de reacción:** La totalidad de la carga precalentada fluye al elevador del reactor a través de unas boquillas que la atomizan y dispersan para que pueda vaporizarse rápidamente al contacto con el catalizador caliente que asciende por el riser, asegurando una mezcla efectiva entre los vapores de aceite y el catalizador, y llevando a cabo de manera simultánea las reacciones de craqueo catalítico.

El elevador del reactor desemboca a un cono, a través del cual los vapores de la reacción pasan a la fase densa de este recipiente. La temperatura de reacción es medida y controlada por el transmisor de temperatura TIC-518, el cual junto con el

controlador de presión diferencial (reactor-regenerador) PDIC-507, controla la circulación de catalizador entre ambos equipos. La ubicación de estos transmisores se muestra en la Figura A2.

**A.1.3. Recobro de catalizador:** Los vapores de hidrocarburo que dejan la fase densa llevan consigo partículas de catalizador que deben ser removidas antes de pasar a la fraccionadora. La separación del catalizador gastado se lleva a cabo en tres juegos de ciclones de doble etapa. Los vapores suben a través de la fase diluida y entran a los ciclones, donde la fuerza centrífuga lanza las partículas sólidas de catalizador contra las paredes del ciclón efectuándose así la separación. Estas partículas resbalan hacia abajo, dentro de las piernas de los ciclones hasta llegar de nuevo a la fase densa del reactor. Los vapores pasan a la segunda etapa de los ciclones, donde la mayoría del catalizador restante se queda gracias a la misma acción centrífuga. Los vapores relativamente libres de catalizador, pasan a la cámara plena de donde fluyen por la cima, a la fraccionadora.



Fuente: Autora, basada en figura del tablero de la URC.

Figura A2. Reactor

**A.1.4. Despojador de catalizador gastado:** Durante la reacción, la superficie del catalizador se cubre con depósitos de coque que reducen su actividad. Este

coque es eliminado por combustión en el regenerador; sin embargo es importante remover los restos de aceite despojable presentes en el catalizador, antes de enviarlo a ser regenerado. Esto es necesario para no aumentar la carga enviada al regenerador y para aumentar los rendimientos de hidrocarburos.

Una vez el catalizador gastado entra en el despojador fluye en contracorriente a un chorro de vapor que es inyectado en el fondo del reactor; este flujo de vapor es controlado por el FIC-532. Para aumentar el área de contacto entre el catalizador y el vapor de despojamiento, se han provisto varias filas de platinas desviadoras a lo largo del despojador. Los hidrocarburos livianos pasan al reactor junto con el vapor y salen con los demás productos de la reacción. El catalizador despojado cae al tubo en U y pasa al regenerador.

**A.1.5. Retención del reactor:** La retención del reactor es el número de toneladas de catalizador sostenidas en el despojador, y depende de la cantidad total de catalizador en la unidad. El nivel de catalizador en el reactor es indicado por el LI-1 C.

## **A.2. DESCRIPCIÓN DEL REGENERADOR**

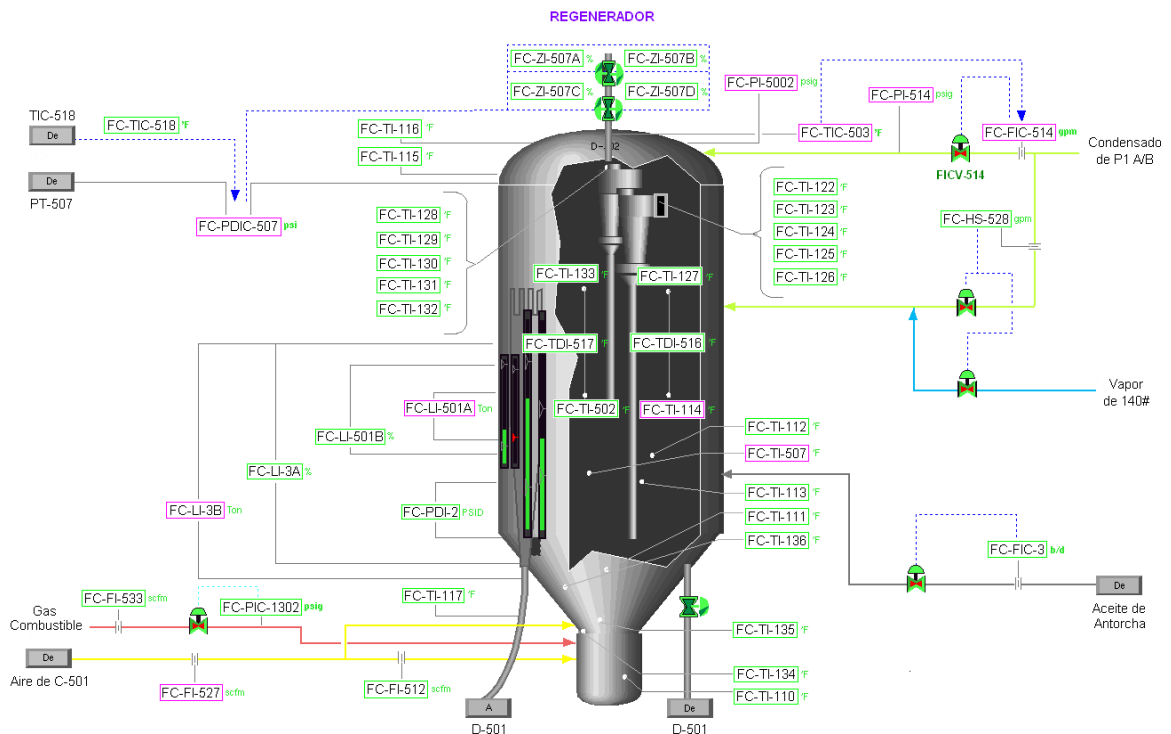
La función principal del regenerador es la de devolver al catalizador la actividad pérdida durante la reacción; para ello se debe quemar el carbón depositado sobre el catalizador y los aceites que no fueron separados en el despojador. El calor liberado durante la combustión es absorbido en su mayor parte por el catalizador, el cual se vierte por el borde del pozo de rebose y fluye por un tubo en U de vuelta al reactor, supliendo las necesidades de calor tanto para la reacción como para la vaporización de la carga.

En el fondo del regenerador hay una rejilla utilizada para distribuir los vapores que pasan a través de ella, y en la cima, hay seis juegos de ciclones de doble etapa que recuperan las partículas de catalizador arrastradas por los gases de combustión, y descargan a la cámara plena los gases relativamente libres de catalizador, para que salgan a la atmósfera a través de la chimenea.

El aire para la combustión es suministrado por el soplador principal, fluye por el quemador auxiliar y pasa a través de la rejilla hacia el regenerador. El aire de control inyectado en el elevador del regenerador ayuda al catalizador gastado a entrar a la fase densa donde será regenerado.

**A.2.1. Recobro de catalizador:** Los gases resultantes de la combustión del coque arrastran partículas de catalizador que deben recuperarse antes de que estos gases sean liberados a la atmósfera; para llevar a cabo esta separación, los gases entran a los ciclones donde por acción de la fuerza centrífuga las partículas son enviadas de vuelta a la fase densa del regenerador, de la misma forma como ocurre con los ciclones ubicados en el reactor.

**A.2.2. Retención del regenerador:** La retención del regenerador es el número de toneladas de catalizador sostenidas encima de la rejilla. El nivel de catalizador en el pozo de rebose es medido por los transmisores LI-501 A/B, y el nivel de catalizador en el regenerador por LI-3 A/B, como se muestra en la Figura A3.



Fuente: Autora, basada en figura del tablero de la URC.

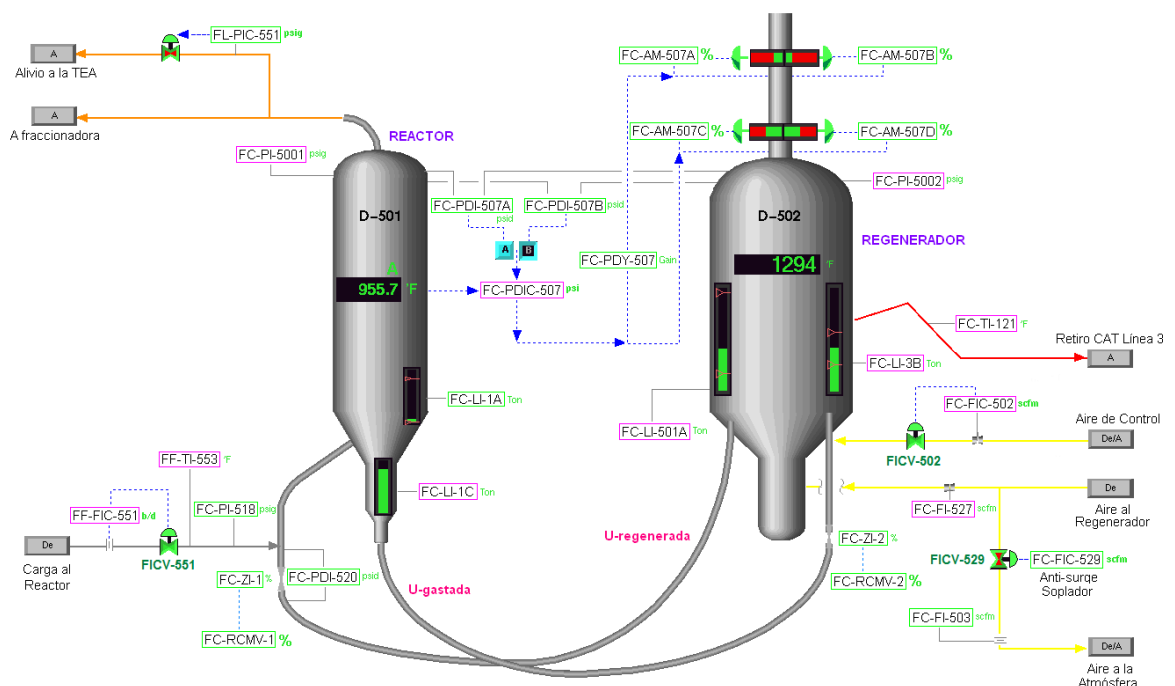
Figura A3. Regenerador

**A.2.3. Control de presión:** El controlador de presión diferencial (reactor-regenerador) PDIC-507 recibe una señal del controlador de temperatura del reactor TIC-518 que le indica la variación de presión necesaria en el regenerador para obtener la circulación de catalizador adecuada y así controlar la temperatura del reactor.

El control de presión del regenerador se realiza a través de cuatro válvulas de corredera instaladas por parejas en la chimenea del regenerador. Las dos válvulas inferiores reducen el 60% de la presión total, y las superiores absorben el 40% restante.

**A.2.4. Condensado de cámara plena:** A pesar de que el regenerador esta diseñado para trabajar a altas temperaturas, cuenta con cuatro rociadores de condensado instalados en la cámara plena los cuales ayudan a bajar la temperatura en casos en que ésta se eleve demasiado. En la salida de los gases de la cámara plena existe un controlador de temperatura (TIC-503) que se comunica con el controlador de flujo de condensado (FIC-514) para regular su paso hacia los rociadores mediante la operación de la válvula FICV-514.

**A.2.5. Retiro de catalizador gastado:** Existen facilidades para retirar el catalizador en forma continua, usadas para renovar el catalizador que se encuentra circulando en la unidad y así mantener su actividad. La temperatura de las líneas de retiro de catalizador es medida por los trasmisores TI-120 y TI-121, como se observa en la Figura A4.



Fuente: Autora, basada en figura del tablero de la URC.

Figura A4. Reactor - Regenerador

### **A.3. VUELTAS EN U Y CIRCULACIÓN DEL CATALIZADOR**

Los elevadores de catalizador de las vueltas en U poseen válvulas de corredera que durante la operación normal se encuentran completamente abiertas, pero durante apagadas, arrancadas o situaciones de emergencia se cierran evitando que el flujo de catalizador viaje en dirección opuesta en la U respectiva. Las válvulas de la U regenerada y la U gastada se llaman RCMV-1 y RCMV-2 respectivamente y se muestran en la Figura A4.

**A.3.1. Circulación del catalizador gastado:** La fuerza que impulsa al catalizador para que circule del reactor al regenerador es la combinación de la presión en el reactor y la cabeza estática creada por el nivel de catalizador en el despojador. La resistencia a la circulación gastada la constituyen la presión en el regenerador, y la cabeza estática que debe vencer el catalizador para subir por el elevador de catalizador gastado.

Un factor importante en el control de la circulación por la U gastada es la densidad del catalizador en el elevador pues de ella depende la presión estática que se opone al flujo. Los cambios en la densidad del catalizador se realizan añadiendo aire de control en esta zona.

**A.3.2. Circulación del catalizador regenerado:** Éste flujo no es controlado por el operador, y ocurre cuando el nivel en el pozo de rebose es suficiente para vencer la resistencia al flujo. Esta resistencia es la combinación entre la fricción en la U y la diferencia de presión entre el reactor y el regenerador. A medida que el catalizador cae en el pozo de rebose es descargado a la vuelta en U; si la resistencia al flujo aumenta, el nivel del pozo sube, aumentando la cabeza estática y venciendo dicha resistencia, de manera que se mantiene la circulación. El nivel en el pozo no depende de la rata de circulación, sino del balance de presiones.

**A.3.3. Aire de control:** La rata de circulación de catalizador puede ser controlada por medio de cambios en la cantidad de aire de control inyectado al elevador de catalizador gastado. Un aumento en la inyección de aire disminuye la densidad en esta zona y por lo tanto la presión estática en ese extremo. Esto resulta en una mayor fuerza impulsora en todo el tubo en U, lo que a su vez aumenta la circulación del reactor al regenerador. Debido a que el pozo de rebose mantiene constante el nivel de catalizador en el regenerador, la circulación en la U regenerada aumentará automáticamente en igual cantidad.

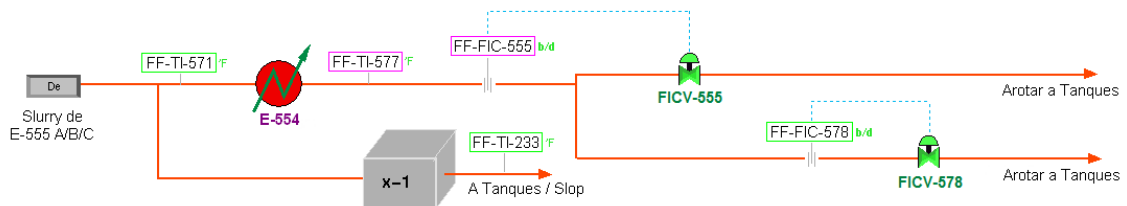
El aire de control es un método secundario en el control de la circulación y su mayor aplicación es la de tener la diferencial de presión (reactor-regenerador) y por lo tanto el nivel del pozo de rebose en los rangos óptimos de operación.

**A.3.4. Distribución de las partículas por tamaño:** Otro factor que puede afectar la circulación de catalizador es el tamaño de sus partículas, debido a que es difícil mantenerlo fluidizado si el catalizador es demasiado grueso, y la circulación se hace errática e inestable. En general es deseable no tener más del 25% en peso de catalizador con tamaño de partícula mayor de 80 micrones.

#### A.4. FLUJOS DE LA FRACCIONADORA PRINCIPAL

**A.4.1. Flujo de fondos:** El slurry de los fondos es bombeado por las P-561 A/B bajo control manual a través de los E-559 A/B (precalentadores de la carga al reactor) y los E-555 A/B/C (generadores de vapor). Este flujo se divide en las siguientes corrientes:

- Una porción se extrae como producto de fondos y se envía al E-554 para ser enfriada. A su salida se reparte en dos chorros que fluyen hacia tanques, uno controlado por el FIC-555 y otro controlado por el FIC-578, como se observa en la Figura A5.
- Otra parte vuelve a la fraccionadora repartiéndose a lo largo de la sección de desviadores para des-supercalentar los vapores de cima del reactor. Este flujo que retorna a la torre se conoce como reflujo circulante de fondo y es registrado por el transmisor FI-2, como se muestra en le Figura A6.



Fuente: Autora, basada en figura del tablero de la URC.

Figura A5. Producto de fondos

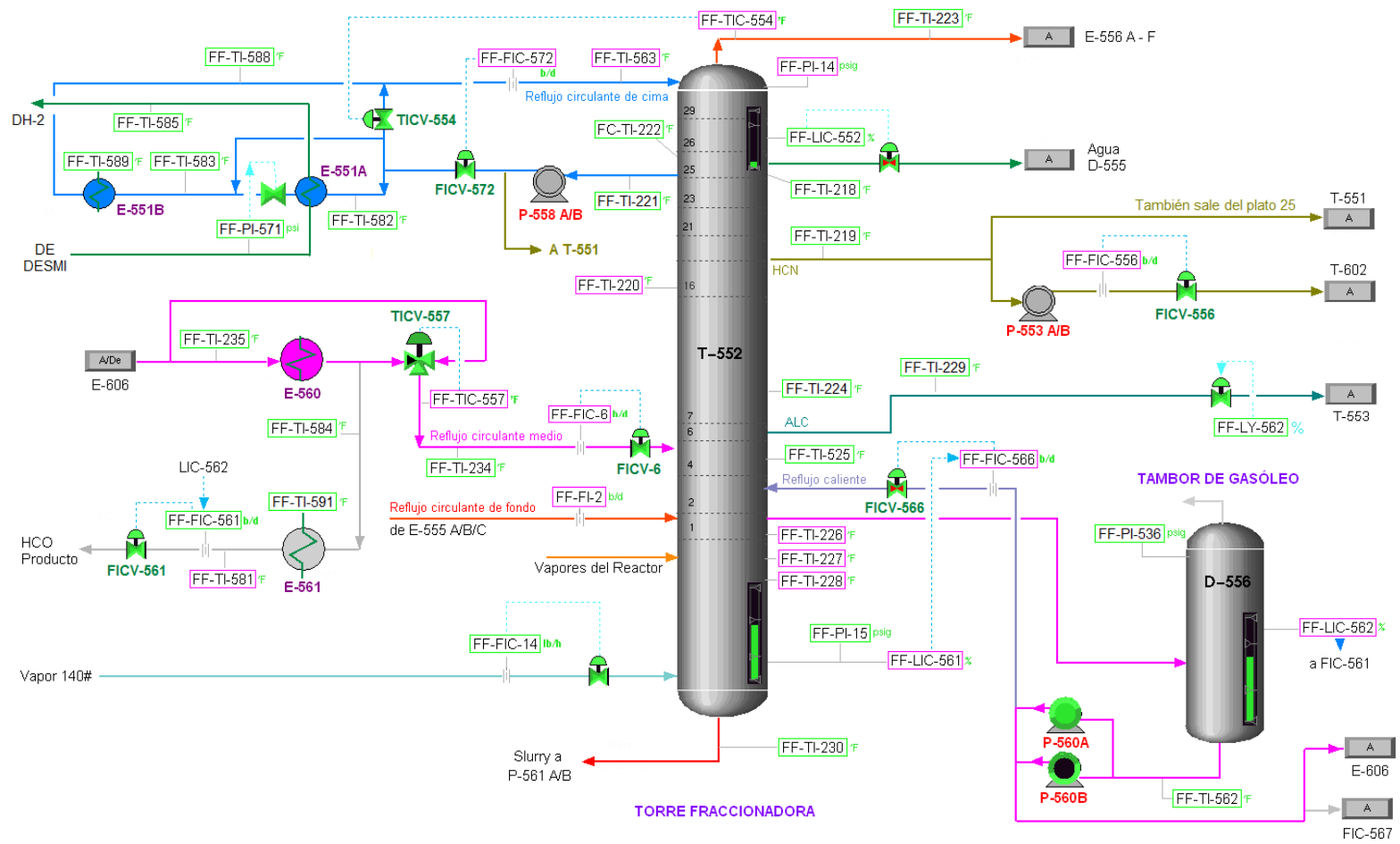
El nivel de fondos de la fraccionadora está controlado por el LIC-561, el cual actúa sobre el controlador de flujo FIC-566 para que permita mayor o menor paso de reflujo caliente de acuerdo al nivel deseado en la torre. Cuando sea necesario también se puede ayudar a mantener un nivel dado, ajustando el flujo de producto de fondos con los controladores FIC-578/555.

**A.4.2. Flujo de HCO:** El gasóleo pesado (HCO) fluye por gravedad, del plato 2 de la fraccionadora al tambor acumulador D-556 desde donde es bombeado por las P-560 A/B. El flujo que sale de estas bombas se divide en 3 caudales así:

- Una porción se devuelve a la torre como reflujo caliente (por encima del plato 3) controlando el nivel de los fondos bajo la acción del FIC-566.
- La segunda porción se recicla al reactor haciendo parte de la carga total, bajo control de flujo del FIC-567. Esta facilidad no está en uso actualmente.
- La tercera porción se envía al rehervidor de la torre desbutanizadora de livianos E-606 bajo el control de flujo del FIC-6, pasa por el enfriador E-560 y entra a la fraccionadora por el plato 6 como reflujo circulante medio. El control de temperatura de este flujo se hace regulando su paso al enfriador por medio de una válvula de 3 vías (TICV-557). A la salida del E-560 también se saca HCO como producto, a través del E-561, para ser usado como diluyente en la preparación del combustóleo.

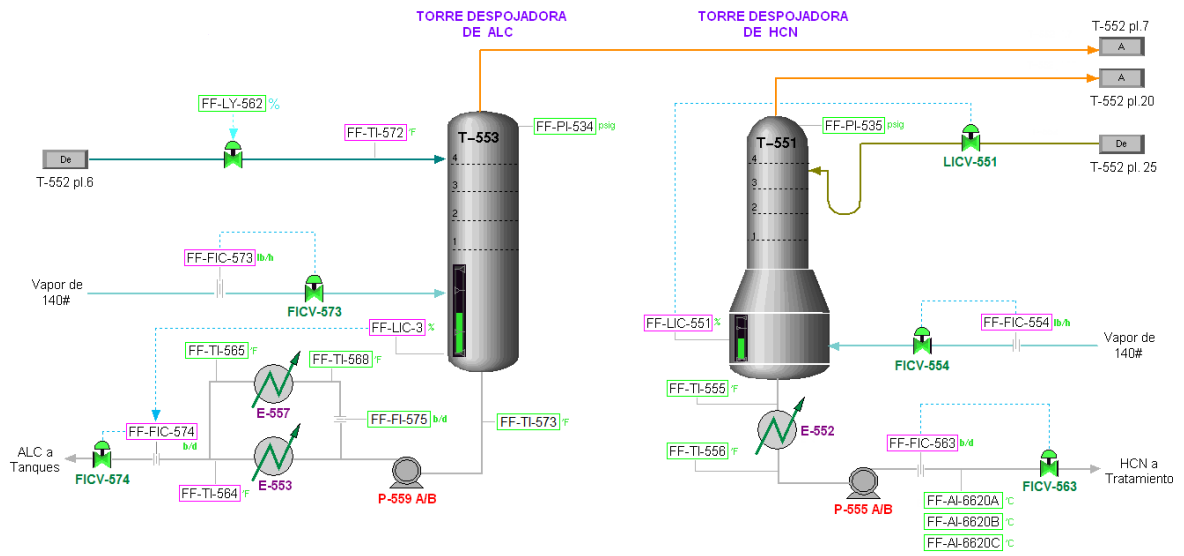
El nivel en el tambor de gasóleo D-556 está controlado por el LIC-562 quien a su vez controla la extracción de HCO producto ajustando el controlador FIC-561. Los flujos mencionados anteriormente se encuentran ilustrados en la Figura A6.

**A.4.3. Flujo de ALC:** El aceite de dilución (ALC) fluye por gravedad, desde el plato 6 de la fraccionadora hasta la torre despojadora T-553. Este flujo de salida es regulado por el controlador de nivel LIC-3 dispuesto en el fondo de la despojadora. El producto se despoja para obtener el punto de chispa deseado inyectando vapor de media presión en el fondo de la torre T-553. Los vapores de la despojadora regresan a la fraccionadora por debajo del plato 8, y el producto de ALC ya despojado es bombeado por las P-559 A/B (bajo el control de flujo del FIC-574) hacia los enfriadores E-553 y E-557 para finalmente ser enviado a tanques. El flujo de ALC a través de la despojadora T-553 se muestra en la Figura A7.



Fuente: Autora, basada en figura del tablero de la URC.

Figura A6. Sección de fraccionamiento



Fuente: Autora, basada en figura del tablero de la URC.

Figura A7. Torres despojadoras

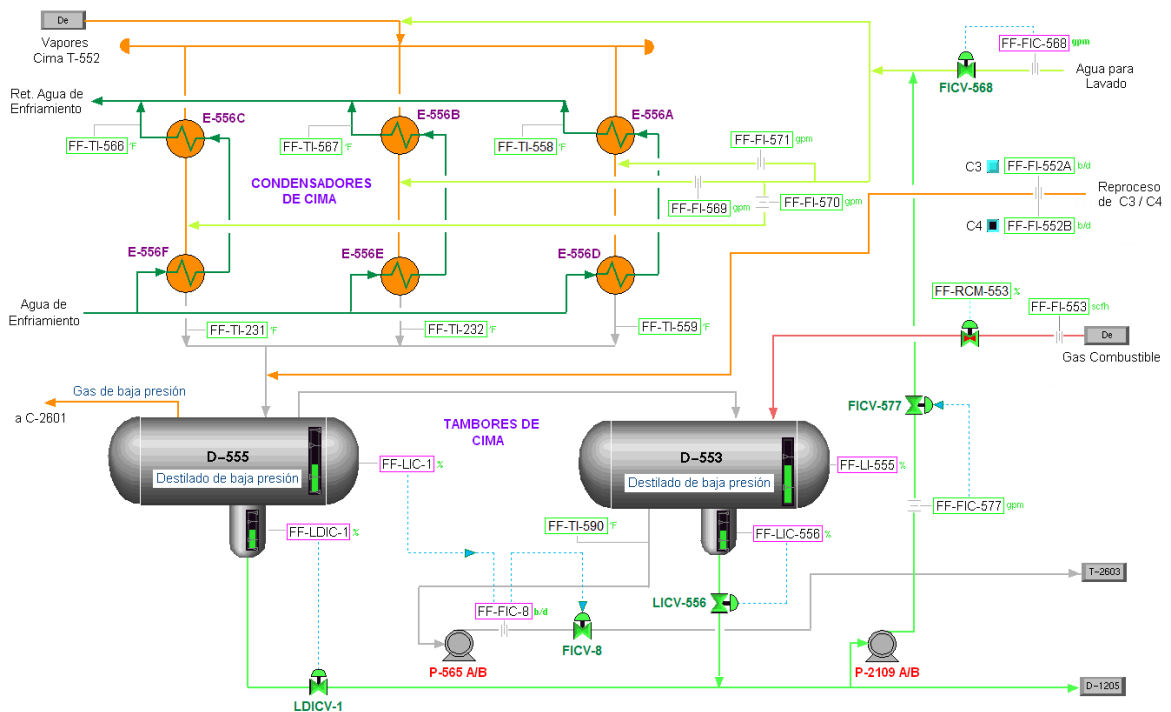
**A.4.4. Flujo de HCN:** La nafta pesada (HCN) fluye por gravedad desde el plato 19 de la fraccionadora y se divide en 2 flujos de la siguiente manera:

- La primera porción del flujo entra a la torre despojadora T-551 y su caudal es controlado por el nivel de fondos de esta torre (LIC-551). El flujo de HCN entra por la parte superior de la torre y es despojado por un flujo de vapor de media presión, que se inyecta por debajo del plato 1. Este vapor y los vapores de hidrocarburo salen por la cima de la torre y regresan a la fraccionadora por el plato 20. La nafta pesada ya despojada sale por el fondo de la torre y pasa por el enfriador E-552; de allí es tomada por las bombas P-555 A/B y enviada bajo control del FIC-563 hacia la planta de tratamiento. El flujo de HCN a través de la despojadora T-551 se muestra en la Figura A7.
- La segunda porción del flujo de HCN es enviada a la torre esponja (T-602) de la Planta de Livianos, impulsada por las bombas P-553 A/B bajo el control de flujo del FIC-556. En esta torre se absorben los componentes más pesados que lleva el flujo, para luego enviarlo (con hidrocarburos mas livianos) de vuelta a la fraccionadora, entrando por el plato 21.

Adicionalmente existe la facilidad para extraer HCN del plato 25 de la fraccionadora y enviarla a la torre T-551, mediante la comunicación entre la descarga de las bombas P-558 A/B del reflujo de cima y la válvula LICV-551.

**A.4.5. Reflujo circulante de cima:** El reflujo circulante de cima sale del plato 25 de la torre fraccionadora y es bombeado por las P-558 A/B a través de los enfriadores E-551 A/B como se observa en la Figura A6. Este flujo de salida es controlado por el FIC-572 que se comunica con la válvula FICV-572 para permitir un mayor o menor paso de flujo. El flujo enfriado regresa a la fraccionadora por encima del plato 29, y su temperatura es controlada por el TIC-554 que regula el paso del flujo por los enfriadores E-551 A/B variando la apertura de la válvula TICV-554.

**A.4.6. Productos de cima:** Los materiales que hierven por debajo de 300°F se extraen por la cima de la fraccionadora y se condensan parcialmente en los E-556 A/B/C/D/E/F. Los líquidos condensados y los vapores no condensados pasan al tambor D-555 donde son separados en gas y destilado de baja presión. El gas de baja presión allí recogido pasa a la sección de compresión de gases (C-2601).



Fuente: Autora, basada en figura del tablero de la URC.

Figura A8. Circuito de cima

El destilado de baja presión fluye por gravedad a través de unos vasos comunicantes desde el D-555 hasta el tambor D-553. El Destilado acumulado en el tambor D-553 es enviado por las bombas P-565 A/B como carga a la torre absorbadora de livianos T-2603. Este flujo de salida es regulado por los controladores FIC-8 (descarga de las bombas) y LIC-1 (nivel del tambor D-555) como se muestra en la Figura A8.

El agua que se separa en el D-555 es recogida en un pote, y de allí sale por control de nivel (LDIC-1) hacia el tambor separador de agua D-1205. El agua arrastrada por el destilado de baja presión llega al D-553 donde es separada y recogida igualmente en un pote, desde donde sale mediante control de nivel (LIC-556) a unirse a la línea de descarte de agua del D-555.

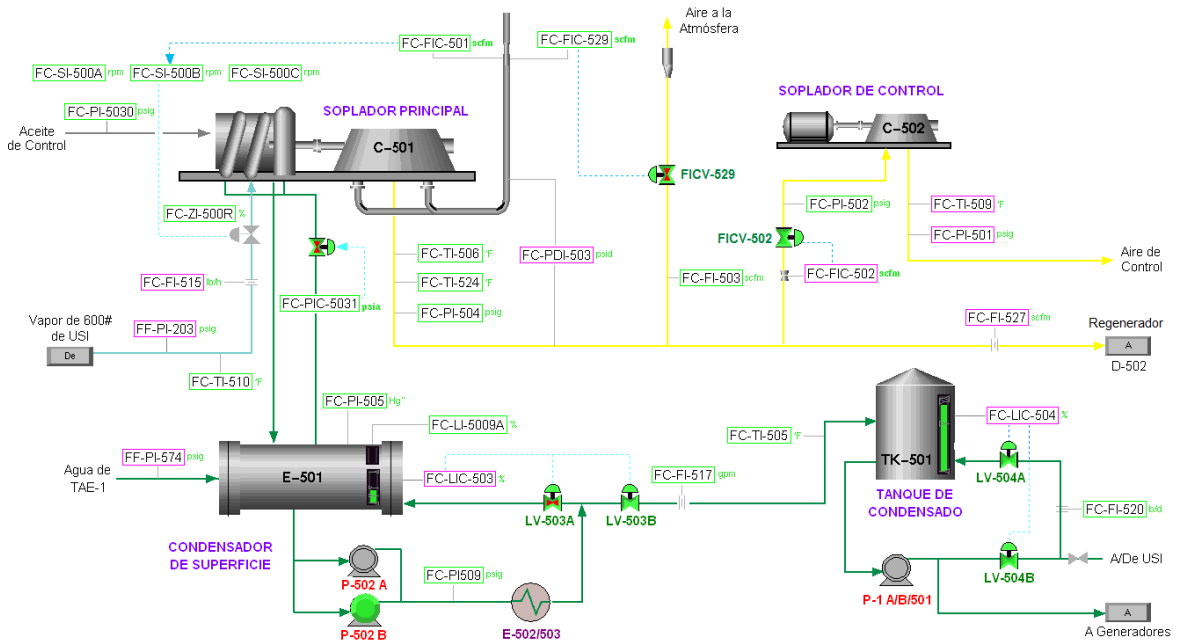
## **A.5. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO ESPECIAL**

**A.5.1. Sopladores de aire:** La sección de craqueo cuenta con un soplador principal y un soplador de control, debido a que se necesita aire comprimido en varios puntos del proceso. Estos sopladores son mostrados en la Figura A9.

- Soplador principal: Este soplador comprime aire (de 0 a 30 Psig) para la combustión de coque en el regenerador, y para alimentar la succión del soplador de control. El elemento motor del soplador es una turbina de condensación total que exhasta a un condensador de superficie. El aire comprimido pasa por un tubo que lo lleva directamente a la entrada de aire primario y secundario del quemador auxiliar. Este vapor es necesario para mantener la fluidez del catalizador sobre la rejilla.
- Soplador de control: Este soplador comprime aire (de 28,5 a 32,7 Psig) necesario para la aireación del catalizador en el elevador del regenerador. La toma del soplador de control es una línea que viene del cabezal de descarga del soplador principal. El control de la rata de flujo se obtiene por medio de la válvula FICV-502 ubicada en la línea de succión. El elemento motriz es un motor eléctrico. El aire de control también se puede utilizar para adicionar o retirar catalizador del regenerador.

**A.5.2. Sistema de condensado:** El condensado proveniente de los condensadores de superficie, de las turbinas del soplador principal y del compresor de gases, es recogido en el tanque TK-501 para suministrarlo a los generadores de vapor E-555 A/B/C y a los rociadores del regenerador. El nivel de

este tanque es mantenido por el controlador LIC-504 el cual regula la entrada de condensado y envía el excedente a la planta eléctrica. El condensado es tomado del tanque por las bombas P-1 A/B y P-501 que lo envían al sistema de generación de vapor y a los rociadores del regenerador.



Fuente: Autora, basada en figura del tablero de la URC.

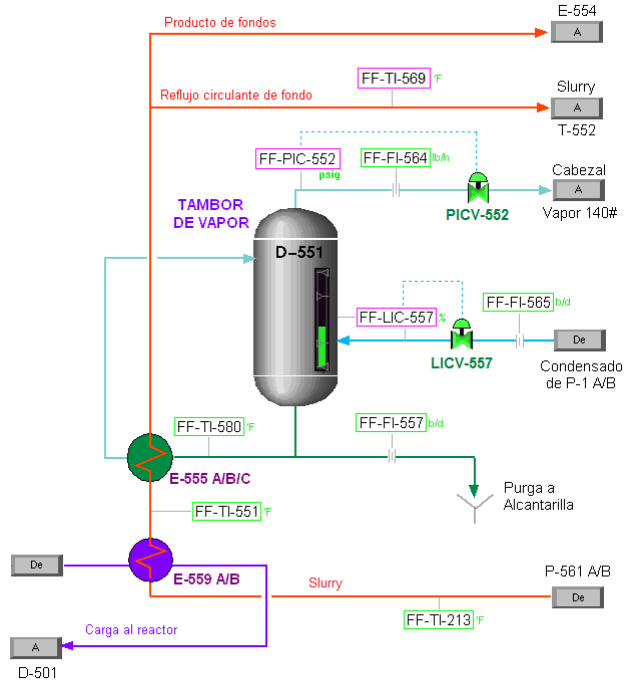
Figura A9. Sopladores y tanque de condensado

**A.5.3. Generación de vapor:** El tambor de vapor D-551 recibe el condensado suministrado por las bombas P-1 A/B y P-501, y regula este flujo de entrada con el controlador de nivel LIC-557 que se observa en la Figura A10.

El condensado del tambor de vapor pasa en paralelo a través de los tres generadores de vapor (E-555 A/B/C) en donde obtiene calor del reflujo circulante de slurry (el condensado circula por el casco de los generadores y el slurry va por los tubos). El vapor generado en el intercambio de calor regresa al tambor D-551 por una línea que entra cerca de la cima, allí se retiene el líquido arrastrado y se descarga el vapor por la cima del tambor.

El propósito principal de esta generación de vapor es enfriar el circuito de slurry; una forma de hacerlo es por medio de la presión en el tambor: un aumento en la presión del tambor hace que suba el punto de ebullición del condensado, y esto

disminuye la producción de vapor, teniendo como resultado un aumento en la temperatura de retorno del *slurry*.



Fuente: Autora, basada en figura del tablero de la URC.

Figura A10. Circuito de generación de vapor

## ANEXO B. FALLAS MECÁNICAS

Los tipos de causas que pueden ocasionar un fallo en la unidad son: cambios en las condiciones de operación, fallas mecánicas, cambios en las propiedades del catalizador o en la calidad de la carga. En este anexo se considerarán las fallas mecánicas en válvulas, bombas e intercambiadores de calor, que causan la presencia de modos de fallo en los equipos principales.

Las fallas mecánicas de estos equipos están incluidas en los diagramas de causalidad, sin embargo, estas causas tienen efecto sobre diferentes variables y por ello pueden aparecer varias veces en un mismo diagrama. A continuación se reúnen en tablas las consecuencias de éstas fallas mecánicas para su mejor comprensión.

### B.1. VÁLVULAS

En la Tabla B1 se presentan los efectos que tiene sobre las variables analizadas el hecho de que una válvula de control este completamente abierta o cerrada.

Tabla B1. Efectos de daños en válvulas de la URC

Válvula	Estado	Límite	Variable	No.
LDICV-1	Abierta	Bajo	Nivel de agua en el D-555	70
	Cerrada	Alto		
FICV-6	Abierta	Alto	Flujo - reflujo circulante medio T-552	42
	Cerrada	Bajo		
FICV-8	Abierta	Bajo	Nivel de hidrocarburo en el D-553	66
			Nivel de hidrocarburo en el D-555	69
		Alto	Flujo de hidrocarburo hacia la T-2603	68
	Cerrada	Bajo	Flujo de hidrocarburo hacia la T-2603	68
		Alto	Nivel de hidrocarburo en el D-553	66
			Nivel de hidrocarburo en el D-555	69

Válvula	Estado	Límite	Variable	No.
FICV-502	Abierta	Alto	Flujo de aire de Control al Rg.	13
	Cerrada	Bajo		
LICV-503 A ó B	Abierta	Alto	Nivel del condensador de superficie E-501	4
	Cerrada	Bajo		
LICV-504 A ó B	Abierta	Alto	Nivel de condensado del TK-501	1
	Cerrada	Bajo		
KIC-505	Abierta	Alto	Flujo de catalizador fresco al Rg.	14
	Cerrada	Bajo		
FICV-514	Abierta	Alto	Flujo inyección de condensado al Rg.	15
	Cerrada	Disminuye	Flujo Inyección de condensado al Rg.	15
		Baja	Presión inyección de condensado al Rg.	16
SDV-518A	Cerrada	Bajo	Flujo de carga al Rx.	29
SDV-518B	Abierta	Aumenta	Nivel de fondos de la fraccionadora	47
		Bajo	Flujo de carga al Rx.	29
FICV-529	Abierta	Bajo	Flujo de aire principal al Rg.	10
			Flujo de aire de Control al Rg.	13
FICV-532	Abierta	Alto	Flujo de vapor de 140# al despojador del Rx.	28
	Cerrada	Bajo		
PICV-551	Abierta	Bajo	Nivel de gasóleo en D-554	34
	Cerrada	Alto		
LICV-551	Abierta	Alto	Flujo de HCN a la T-551	55
			Flujo de HCN a tratamiento	58
		Aumenta	Nivel de HCN en la torre T-551	57
	Cerrada	Bajo	Flujo de HCN a la T-551	55
			Nivel de HCN en la torre T-551	57
			Flujo de HCN a tratamiento	58
FICV-551	Abierta	Alto	Flujo de carga al Rx.	29
	Cerrada	Bajo		

Válvula	Estado	Límite	Variable	No.
PICV-552	Abierta	Baja	Presión vapor de cima del D-551	35
	Cerrada	Alta		
TICV-553	Abierta	Baja	Temperatura de la carga al Rx.	30
	Cerrada	Alta		
LICV-553	Abierta	Alto	Nivel de gasóleo en D-554	34
	Cerrada	Bajo		
FICV-554	Abierta	Alto	Flujo de vapor de 140# al la T-551	56
	Cerrada	Bajo		
TICV-554	Abierta	Alta	Temperatura del reflujo circulante de cima	46
	Cerrada	Baja		
FICV-555	Cerrada	Bajo	Flujo producto de fondos	48
LICV-556	Abierta	Bajo	Nivel de agua en el D-553	67
	Cerrada	Alto		
FICV-556	Abierta	Alto	Flujo de HCN a la T-602	52
	Cerrada	Bajo		
LICV-557	Abierta	Alto	Nivel de condensado en el D-551	36
	Cerrada	Bajo		
TICV-557	Abierta	Alta	Temperatura HCO a la salida del E-561	38
			Temperatura reflujo circulante medio	43
	Cerrada	Bajo	Flujo - reflujo circulante medio T-552	42
			Temperatura del reflujo circulante medio	43
FICV-561	Abierta	Bajo	Nivel de gasóleo en el D-556	37
			Nivel de fondos de la fraccionadora	47
	Cerrada	Alto	Nivel de gasóleo en el D-556	37
			Nivel de fondos de la fraccionadora	47
LY-562	Abierta	Alto	Flujo de ALC a la T-553	59
			Nivel de ALC en la despojadora T-553	62

Válvula	Estado	Límite	Variable	No.
LY-562	Cerrada	Bajo	Flujo de ALC a la T-553	59
			Nivel de ALC en la despojadora T-553	62
			Flujo de ALC a tanques	63
FICV-563	Abierta	Bajo	Nivel de HCN en la torre T-551	57
		Aumenta	Flujo de HCN a tratamiento	58
	Cerrada	Disminuye	Flujo de HCN a tratamiento	58
		Alto	Nivel de HCN en la torre T-551	57
FICV-566	Abierta	Alto	Nivel de fondos de la fraccionadora	47
			Flujo - reflujo caliente	41
	Cerrada	Bajo	Nivel de fondos de la fraccionadora	47
			Flujo - reflujo caliente	41
FICV-568	Cerrada	Bajo	Flujo agua lavado de productos de cima	65
FICV-572	Abierta	Alto	Flujo - reflujo circulante de cima	45
	Cerrada	Bajo		
FICV-573	Abierta	Alto	Flujo de vapor de 140# a la T-553	61
	Cerrada	Bajo		
FICV-574	Abierta	Bajo	Nivel de ALC en la T-553	62
		Alto	Flujo de ALC a tanques	63
	Cerrada	Bajo	Flujo de ALC a tanques	63
		Alto	Nivel de ALC en la T-553	62
FICV-577	Cerrada	Bajo	Flujo agua lavado de productos de cima	65
FICV-578	Cerrada	Bajo	Flujo producto de fondos	48
LICV-613	Abierta	Alto	Flujo de aceite esponja a la fraccionadora	44
	Cerrada	Bajo		
TY-629A	Abierta	Baja	Temperatura del reflujo circulante medio	43

Fuente: Autora del proyecto.

## B.2. BOMBAS

La Tabla B2 reúne las consecuencias que tienen los fallos, daños o taponamientos en las bombas de las secciones de craqueo y fraccionamiento, sobre las variables analizadas.

Tabla B2. Efectos de daños en bombas de la URC

Bomba	Estado	Límite	Variable	No.
P-1	Caída	Bajo	Nivel de condensado del TK-501	1
			Nivel de condensado en el D-551	36
			Presión Inyección de condensado al Rg.	16
	Taponamiento	Bajo	Flujo Inyección de condensado al Rg	15
P-501	Caída	Bajo	Nivel de condensado del TK-501	1
			Presión Inyección de condensado al Rg.	16
	Taponamiento	Bajo	Flujo Inyección de condensado al Rg	15
P-551	Daño o falla	Bajo	Flujo de carga al reactor	29
P-502	Caída	Bajo	Nivel condensador de superficie E-501	4
P-553	Caída	Bajo	Flujo de HCN a la T-602	52
P-555	Caída	Bajo	Flujo de HCN a tratamiento	58
		Alto	Nivel de HCN en la torre T-551	57
P-557	Falla	Bajo	Nivel de gasóleo en el D-554	34
P-558	Caída	Bajo	Flujo - reflujo circulante de cima	45
			Flujo de HCN a la T-551	55
P-559	Falla o caída	Bajo	Flujo de ALC a tanques	63
		Alto	Nivel de ALC en la despojadora T-553	62
P-560	Caída	Bajo	Flujo - reflujo caliente	41
	Falla o caída	Bajo	Flujo - reflujo circulante medio	42
	Fallas	Bajo	Nivel fondos de la fraccionadora	47
		Alto	Nivel de gasóleo en el D-556	37

Bomba	Estado	Límite	Variable	No.
P-561	Caída	Bajo	Flujo producto de fondos	48
			Temperatura producto de fondos	49
		Alto	Nivel fondos de la fraccionadora	47
	Falla	Bajo	Flujo - reflujo circulante del fondo	39
	Cambio	Alto	Flujo - reflujo circulante del fondo	39

P-565	Caída	Alto	Nivel de hidrocarburo en el D-555	69
	Falla	Alto	Nivel de hidrocarburo en el D-553	66
		Disminuye	Flujo de hidrocarburo hacia la T-2603	68

P-2109	Falla	Bajo	Flujo agua lavado de productos de cima	65
--------	-------	------	--	----

Fuente: Autora del proyecto.

### B.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR

En la Tabla B3 se presentan los efectos que tienen los daños o fallas de algunos de los intercambiadores de calor pertenecientes a las secciones analizadas de la unidad, sobre las variables operacionales aquí consideradas.

Tabla B3. Efectos de daños en intercambiadores de calor de la URC

Intercamb.	Estado	Límite	Variable	No.
E-551	Daño	Alta	Temperatura del reflujo circulante de cima	46
E-553	Daño	Alta	Temperatura de ALC a tanques	64
E-554	Daño	Alta	Temperatura producto de fondos	49
E-557	Daño	Alta	Temperatura de ALC a tanques	64
E-559	Bypass abierto	Baja	Temperatura de la carga al Rx.	30
	Bypass cerrado	Alta		
E-560	Daño	Alta	Temperatura del HCO a la salida del E-561	38
		Alta	Temperatura del reflujo circulante medio	43
	Taponamiento	Bajo	Flujo - reflujo circulante medio T-552	42
E-561	Daño	Alta	Temperatura del HCO a la salida del E-561	38

Fuente: Autora del proyecto.

## ANEXO C. OTROS FALLOS GENERALES DE LA UNIDAD

### C.1. CIRCULACIÓN LIMITADA

El catalizador viaja a través de los tubos estantes, las vueltas en U, las válvulas de corredera, y los elevadores, muy parecido a como lo hace un fluido, gracias al aire y/o vapor que se inyecta en estas líneas de transferencia. Para que el catalizador conserve sus propiedades de fluido a través de las distintas condiciones experimentadas en la unidad, es necesaria una aireación adecuada que permita mantener una circulación de catalizador estable, factor indispensable para un buen control la unidad.

Cuando se alcanza la máxima circulación aparente, de manera que la rata de carga y la conversión no pueden ser incrementadas, se presenta una situación indeseable en la unidad. En este capítulo se reúnen las posibles causas de este fallo y las descripciones de cómo estas causas resultan en una circulación limitada.

En las tablas a continuación se presentan los diferentes tipos de causas que pueden desencadenar este fallo, y se explica como cada una de estas causas resulta en una circulación limitada. No hay características de la carga que causen este fallo.

Tabla C1. Condiciones de operación - Circulación limitada

Causa	Descripción
Aireación excesiva de los tubos estante.	Un aumento en la aireación resulta en una mayor velocidad de circulación, sin embargo si la aireación es excesiva, el vapor es demasiado para la cantidad de catalizador que se encuentra circulando y se forman "burbujas" que restringen el flujo de catalizador.
Vapor de aireación húmedo.	En las líneas de vapor puede circular agua por la condensación de este vapor en zonas donde el aislamiento esta dañado. Esto humedece el catalizador apelmazándolo y dificultando su circulación.

<p>Poca fluidización del catalizador por aireación insuficiente de las vueltas en U.</p>	<p><u>Tubos estante:</u> Se debe añadir la cantidad de aireación requerida (de acuerdo a las condiciones de la unidad) en estos tubos verticales, para que la densidad del catalizador (que fluye hacia abajo) permanezca constante a pesar del aumento en la presión estática.</p> <p><u>Vueltas en U:</u> La aireación de las vueltas en U mantiene el catalizador moviéndose a lo largo de la tubería sin depositarse en el fondo de la curvatura. Todas las aireaciones en el fondo de las Ues, y en el flujo hacia arriba de la tubería, deben estar abiertas.</p> <p><i>Síntoma observable:</i> Una variación del perfil de presiones locales a lo largo de las Ues puede indicar desfluidización del catalizador.</p>
<p>Excesivo vapor de despojo.</p>	<p>Si este flujo de vapor que va hacia arriba es excesivo, limita la circulación de catalizador hacia la U gastada.</p>
<p>Muy alta presión diferencial Reactor - Regenerador.</p>	<p>Ante un gran requerimiento de circulación, la presión del regenerador disminuye quedando muy por debajo de la del reactor. Para compensar la menor presión del regenerador, el pozo de rebose eleva su nivel hasta valores que dificultan la aireación y limitan la circulación del catalizador.</p> <p>Una alta presión diferencial ocasiona una circulación limitada sólo cuando la presión del regenerador es baja por razones diferentes al control diferencial (por bajo flujo de aire de control, por deficiencia en los puntos de aireación, etc).</p>
<p>Baja presión diferencial.</p>	<p>Esto limita la circulación solo si el control no esta en cascada.</p>
<p>Vapor de golpe en servicio.</p>	<p>La inyección del vapor de golpe es manual, y se usa para mantener el catalizador en movimiento durante alteraciones graves en la operación, pero no debe ser usado en las operaciones normales.</p> <p>Los puntos de inyección del vapor de golpe están ubicados a lo largo de las Ues. Si se inyecta desprevenidamente (sin necesidad o más del necesario) puede frenar la circulación, pues genera atricción del catalizador y aumenta las finas, alterando el perfil de densidad de las Ues.</p>

Vapor de emergencia al elevador de carga, puesto en servicio.	<p>Este vapor es útil durante el arranque o durante las sacadas de la carga para mantener la circulación, y evitar que el catalizador en el reactor caiga al fondo de este recipiente causando daños al equipo.</p> <p>El vapor de emergencia se inyecta por las boquillas de atomización de la carga. Si se inyecta desprevencidamente (sin necesidad o más del necesario) puede frenar la circulación, pues genera atricción del catalizador y aumenta las finas, alterando el perfil de densidad de las Ues.</p>
Afinamiento indebido o malo de los controladores de las válvulas de corredera de la chimenea.	Un afinamiento indebido de los controladores puede causar que la respuesta de las válvulas sea muy lenta, y a un mayor diferencial de presión éstas no respondan, limitando la circulación.
El control de presión (succión) del compresor de gas es pobre o menos que el adecuado.	Si la presión del compresor se sale de control, hace que la presión del reactor aumente hasta su máximo, limitando la circulación, pues el diferencial de presión no es capaz mantener el balance de presiones.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C2. Fallas mecánicas - Circulación limitada

Causa	Descripción
Obstrucción en las vueltas en U, por refractario o catalizador estancado.	<p>Dependiendo del tamaño del pedazo de refractario o catalizador que obstruye las vueltas en U, puede limitar la circulación de catalizador.</p> <p><i>Síntoma observable:</i> Zonas de alta caída de presión.</p>
Las válvulas de corredera de la chimenea están atascadas, pegadas o trabajando indebidamente.	Si las válvulas están atascadas, pegadas o trabajando indebidamente no responden a las variaciones del controlador diferencial de presión, y por lo tanto no se efectúan los cambios deseados en la circulación de catalizador.
Las válvulas de corredera de las vueltas en U no abren lo suficiente, están obstruidas o trabajan indebidamente.	Estas válvulas deben estar totalmente abiertas en operación normal.
Obstrucción de las conexiones de aireación, de los orificios de restricción, o algunos puntos de aireación cerrados.	Si esto sucede no podrá fluir vapor hacia las vueltas en U.

Rejilla en el fondo del despojador obstruida con pedazos de refractario.	Estos pedazos de refractario taponan la rejilla limitando la circulación.
Hueco en el pozo de rebose.	Puede desviar el aire (hacia el interior del pozo) e interferir con el flujo de catalizador.  Este problema no puede ser corregido en operación.
Mal funcionamiento de los sistemas de aceite de las válvulas de corredera de la chimenea (operación hidráulica).	Las válvulas no responden a los cambios del controlador diferencial de presión, y por lo tanto no se efectúan los cambios deseados en la circulación de catalizador.
Caída de las flautas de vapor de despojamiento.	Si estas flautas que distribuyen el vapor de despojo se caen, el flujo de vapor es excesivo en una sola dirección, y limita la circulación de catalizador hacia la U gastada.
Trampas de condensado trabajando indebidamente.	En las líneas de vapor de aireación puede circular agua por la condensación de este vapor en zonas donde el aislamiento está dañado. Las trampas de condensado recogen esta agua y la sacan de las líneas de vapor. Si las trampas no trabajan bien, el agua sigue circulando y el vapor entra húmedo a las Ues, apelmazando el catalizador y dificultando su circulación.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C3. Propiedades del catalizador - Circulación limitada

Causa	Descripción
Catalizador grueso.	<p>El catalizador grueso es más difícil de fluidizar y de circular que el catalizador más fino.</p> <p>Para determinar que el catalizador que circula es grueso se verifica la distribución de las partículas de catalizador por tamaño. Mientras más grande sea el número de partículas entre 0 y 40 micrones, y menos el número de ellas de más de 80 micrones, más fácil es la circulación.</p> <p>Una posible causa de que el catalizador sea más grueso son las altas pérdidas de finos.</p>

Fuente: Autora del proyecto.

## C.2. FLUJO INVERSO

La circulación del catalizador gastado debe fluir del despojador del reactor al lecho del regenerador, y la del catalizador regenerado del pozo de rebose del regenerador hacia el elevador de carga del reactor. El flujo inverso ocurre cuando cualquiera de estas dos circulaciones cambia su sentido, siendo esto una situación indeseada de la unidad.

Si la carga fresca y/o el catalizador impregnado de aceite viajan del elevador de carga al regenerador, puede ocurrir una combustión incontrolada en el regenerador, y posibles daños en la estructura de este recipiente debido a las altas temperaturas. Si el aire caliente circula del regenerador al reactor e incluso a la fraccionadora principal, estos recipientes pueden sufrir daños mecánicos.

Dos síntomas importantes de que esta ocurriendo flujo inverso son la baja temperatura en la U regenerada y la alta temperatura en la U gastada; la primera indica que se ha detenido la circulación del catalizador regenerado y la segunda indica que el catalizador caliente se esta regresando al reactor por la U gastada.

En las tablas a continuación se presentan los diferentes tipos de causas que pueden desencadenar este fallo, y se explica como cada una de estas causas resulta en un flujo inverso. No hay propiedades del catalizador, ni características de la carga que causen este fallo.

Tabla C4. Condiciones de operación - Flujo inverso

Causa	Descripción
Presión diferencial negativa.	Ante un requerimiento muy bajo de circulación, la presión del regenerador aumenta llegando a ser mayor a la del reactor. Por balance de presiones (presión Rg > presión Rx) la circulación de la U gastada tiende a fluir del regenerador al reactor.
Muy alta presión diferencial.	En este caso el regenerador esta muy despresionado y el pozo de rebose aumenta hasta alcanzar su máximo nivel, el cual no es suficiente para compensar la baja presión del regenerador, y la circulación de la U regenerada tiende a devolverse debido al balance de presiones.

Muy bajo flujo de aire principal.	Esto despresiona el regenerador ocasionando una muy alta presión diferencial.
Muy alto flujo de aire principal.	Esto presiona el regenerador ocasionando una presión diferencial negativa.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C5. Fallas mecánicas - Flujo inverso

Causa	Descripción
Daño del soplador principal o del compresor de gas.	Si el compresor de gas se cae y la válvula de alivio a la TEA no se abre, la presión del reactor aumenta y la diferencial de presión puede llegar a ser muy alta. Igualmente si se cae el soplador principal, el regenerador se despresiona pudiendo tener el mismo efecto.
Daño de las válvulas de corredera de la chimenea quedando totalmente abiertas o totalmente cerradas.	Si están totalmente abiertas el diferencial de presión es muy alto y hay flujo inverso por la U regenerada. Si están totalmente cerradas el diferencial de presión es muy bajo (negativo) y hay flujo inverso por la U gastada.
Falla del controlador de temperatura del reactor.	La señal que envía no corresponde con las necesidades de circulación de la unidad, llevando la diferencial de presión a valores muy altos o muy bajos, ocasionando flujo inverso por una de las Ues.
Fallas mecánicas que ocasionen a altas o bajas presiones en el regenerador o en el reactor.	Altas o bajas presiones en el regenerador o en el reactor ocasionan altas o bajas diferenciales de presión (ver condiciones de operación).

Fuente: Autora del proyecto.

### C.3. DEPÓSITOS DE COQUE

Los depósitos de coque se presentan en casi todas las unidades de craqueo y se encuentran generalmente en las paredes, en la cima y en los ciclones del reactor; en las líneas de transferencia de vapor, en la tubería de entrada a la fraccionadora y en el circuito del reflujo circulante de fondo. Estos depósitos ocurren siempre, pero se vuelven un problema cuando afectan la eficiencia de la unidad.

En las tablas a continuación se presentan los diferentes tipos de causas que pueden desencadenar este fallo, y se explica como cada una de estas causas ocasiona los depósitos de coque.

Tabla C6. Condiciones de operación - Depósitos de coque

Causa	Descripción
Zonas frías en las superficies metálicas de las paredes del reactor o en las líneas de transferencia de vapor, por inyección de aire de purga.	Cuando la temperatura en estas zonas cae por debajo del punto de rocío de los vapores del reactor, estos se condensan alrededor del área enfriada y forman coque a la temperatura existente.
Baja temperatura de reacción.	Si hay una baja temperatura en el reactor la carga no se vaporiza completamente, y las gotas de hidrocarburo sin evaporar se aglomeran formando coque alrededor de las boquillas de carga o en las líneas de transferencia.  Además a bajas temperaturas del reactor los componentes mas pesados de la carga y el producto polímero están mas cerca a sus puntos de rocío, pudiendo condensarse y formar depósitos de coque.
Largo tiempo de residencia en el reactor y en las líneas de transferencia.	Un largo tiempo de residencia acelera la acumulación de coque.
<i>Cracking</i> en el elevador (a menor tiempo de residencia).	Esta manera de <i>cracking</i> con bajo tiempo de residencia, le da menos oportunidad a los compuestos pesados (posiblemente sin vaporizar) de contactar los sitios activos del catalizador. Este material pasa a través de la zona de reacción sin haber reaccionado y esta disponible para depositarse en las partes internas del reactor (despojador, boquillas de carga y U gastada).
Alto nivel de fondos en la fraccionadora.	Si el nivel del fondo de la fraccionadora sube hasta cubrir la entrada de vapores del reactor, se puede acumular coque alrededor de la boquilla de entrada y en el fondo de la torre.
Recirculación insuficiente de fondos ( <i>slurry</i> ) a la zona de transferencia de calor de la fraccionadora.	Poco reflujo circulante de fondo ocasiona altas temperaturas en el fondo de la fraccionadora, debido a que la remoción de calor es insuficiente. Temperaturas superiores a 700°F ocasionan formación de coque en el fondo de la fraccionadora.

Baja generación de vapor en los E-555.	No se remueve suficiente calor del <i>slurry</i> generando una alta temperatura de retorno a la torre. Temperaturas superiores a 700°F ocasionan formación de coque en el fondo de la fraccionadora.
Entrada de carga fresca a la fraccionadora por el <i>bypass</i> de emergencia.	Si se activa el FLAC-518, la carga fresca entra a la fraccionadora enfriando la torre, debido a que es una corriente liviana que llega a una zona caliente. Esta entrada de emergencia aumenta el tiempo de residencia de la carga en el fondo de la torre.
Muy bajo flujo de vapor a las boquillas de atomización.	La carga no es atomizada correctamente y por lo tanto no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente, causando que la carga no se vaporice por completo y forme depósitos de coque en las boquillas de carga.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C7. Fallas mecánicas - Depósitos de coque

Causa	Descripción
Boquillas de carga obstruidas o dañadas.	La carga no es atomizada correctamente y por lo tanto no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente. Lo anterior causa que la carga no se vaporice por completo y forme depósitos de coque.
Aislamiento deficiente de la tubería de cima.	La coquización de la tubería de cima del reactor (línea de transferencia) puede ocurrir donde exista aislamiento deficiente que permita la pérdida excesiva de calor, y por lo tanto la condensación de los vapores del reactor.  <i>Síntoma observable:</i> Aumento en la caída de presión entre la salida del reactor y la entrada a la fraccionadora principal.
Aislamiento deficiente del revestimiento refractario de reactor.	Los depósitos de coque en las paredes interiores del reactor se atribuyen al aislamiento deficiente del revestimiento refractario por permitir la pérdida excesiva de calor.
Daño de las cajas de rebose en el fondo de la fraccionadora.	Si estas cajas están dañadas, se acumulan formaciones de coque debido al contacto no uniforme entre los vapores que fluyen hacia arriba y el líquido que fluye hacia abajo.
Daño en el despojador del reactor (láminas o piezas caídas).	No hay contacto adecuado entre el vapor y el catalizador, causando un atrapamiento de carga sin reaccionar en el catalizador, y produciendo depósitos de coque.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C8. Propiedades del catalizador - Depósitos de coque

<b>Causa</b>	<b>Descripción</b>
Alto contenido de tierras raras (defecto de fábrica).	Los catalizadores con alto contenido de tierras raras tienden a promover reacciones de transferencia de hidrógeno; estas reacciones son bimoleculares y pueden producir multi-anillos aromáticos.
Baja actividad del catalizador por características de fábrica (alta densidad, baja área en la superficie, y alta actividad de transferencia de hidrógeno).	Los catalizadores con estas propiedades generalmente producen altos rendimientos de fondos (baja conversión de la carga), y por lo tanto pueden aumentar la coquización.
Desactivación del catalizador por contaminantes, vapor de golpe o alta temperatura del regenerador.	Si el catalizador se ha desactivado, se queda carga sin reaccionar que forma depósitos de coque. El vapor de golpe atricciona el catalizador reduciendo su área de contacto, y la alta temperatura en el regenerador lo sinteriza y lo apelmaza.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C9. Características de la carga - Depósitos de coque

<b>Causa</b>	<b>Descripción</b>
Altos niveles de asfáltenos.	La coquización en el reactor es mas factible que ocurra con cargas pesadas, pues es probable que algunos de sus componentes no se vaporicen a las condiciones de operación de la unidad, se queden sin reaccionar y se depositen en reactor, acumulando coque.
Altos niveles de carga craqueada (reciclo).	
Polímeros pesados.	En las reacciones de craqueo, algunos compuestos más livianos y muy reactivos pueden combinarse para formar hidrocarburos de alto punto de ebullición y de alto peso molecular polimerizados. Algunos de estos compuestos no son volátiles a la condiciones de operación de la unidad y tienden a depositarse en las partes internas del reactor.
Carga con alto contenido de metales.	Los metales contaminan el catalizador y lo desactivan, causando que se quede carga sin reaccionar y forme depósitos de coque.

Fuente: Autora del proyecto.

## C.4. BAJA CALIDAD Y RENDIMIENTOS

La calidad de los productos y los rendimientos obtenidos de la carga indican el desempeño de la unidad. La baja calidad y rendimientos puede ser evaluada por cuatro factores: baja conversión de la carga, alta producción de gas seco, baja producción de gasolina y bajo octanaje de la gasolina. Estos indicadores son función de la calidad de la carga, las propiedades del catalizador, las variables de operación y las condiciones mecánicas de la unidad. Además se debe resaltar que los factores que aumentan las pérdidas de catalizador, disminuyen la conversión y los rendimientos de la URC.

**C.4.1. Baja conversión:** En las tablas a continuación se presentan los diferentes tipos de causas que pueden desencadenar una baja conversión de la carga.

Tabla C10. Condiciones de operación - Baja conversión

Causa	Descripción
Baja temperatura en el reactor.	La temperatura no es la adecuada para el craqueo de la carga en componentes más livianos.
Baja relación C/A.	Una baja relación C/A significa que la circulación de catalizador no es suficiente para la rata de carga al reactor. Esto puede ocasionar que parte de la carga no reaccione y se quede en el fondo de la fraccionadora.  Una baja relación C/A puede ser causada por un aumento en el precaliente de la carga.
Disminución en el vapor de atomización.	No hay un contacto adecuado entre la carga y el catalizador caliente.
Disminución en la rata de adición de catalizador fresco.	Si no se adiciona la cantidad necesaria de catalizador fresco, disminuye la actividad del catalizador que esta circulando en la unidad, y esto genera una menor conversión.
Bajo flujo de aire principal.	Esto causa una mala regeneración del catalizador gastado y lo desactiva por contaminación, causando que no reaccione bien con la carga.
Bajo vapor de despojo.	Hay mal despojamiento del catalizador, y el hidrocarburo atrapado en él, es quemado en el regenerador. Esto representa una pérdida de carga que se dejó de convertir en producto.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C11. Fallas mecánicas - Baja conversión

<b>Causa</b>	<b>Descripción</b>
Boquillas de carga obstruidas o dañadas.	La carga no es atomizada correctamente y por lo tanto no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente. Lo anterior causa que la carga no se vaporice por completo.
Daño del distribuidor de vapor de despojo.	El despojamiento es deficiente y el catalizador llega impregnado de hidrocarburo al regenerador. Si la regeneración del catalizador no es total, se acumula cada vez más coque sobre el catalizador, disminuyendo su actividad.  Por otro lado el hidrocarburo que no fue despojado se quema en el regenerador. Esto representa una pérdida de carga que se dejó de convertir en producto.
Fallas en los ciclones del reactor o el regenerador.	Algunos de los daños en los ciclones son: lengüeta abierta, caída, atascada abierta o atascada cerrada; refractario caído obstruyendo la pierna, erosión y agrietamiento.  Las fallas en los ciclones ocasionan pérdidas de catalizador, disminuyendo la reacción de la carga.
Agrietamiento del pozo de rebose	Esto inestabiliza la circulación del catalizador, afectando la relación C/A, y por lo tanto la reacción.
Rejilla del regenerador caída o agrietada.	El aire para la combustión no es distribuido correctamente y la regeneración no es la adecuada, disminuyendo la actividad del catalizador. Además esta falla puede hacer que algunos ciclones se carguen más de lo normal aumentando las pérdidas de catalizador, y disminuyendo la conversión.
Erosión de la cámara plena del regenerador.	Esto aumenta las pérdidas de catalizador, reduciendo la cantidad de catalizador que circula en la unidad.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C12. Propiedades del catalizador - Baja conversión

<b>Causa</b>	<b>Descripción</b>
Pocos puntos ácidos por contaminación con níquel, vanadio o hierro.	Estos contaminantes vienen con la carga y envenenan el catalizador, disminuyendo su actividad, y por lo tanto reduciendo la conversión.
Incremento en el CRC (coque sobre el catalizador regenerado).	El exceso de coque sobre el catalizador bloquea sus sitios activos.

Disminución en la actividad (por bajo contenido de tierras raras).	El área superficial es el área de contacto ofrecida por el catalizador a la carga. La disminución de ésta área reduce a actividad del catalizador, y por lo tanto la conversión.
Disminución en el área superficial.	Las posibles causas de la menor área superficial y menor actividad del catalizador son: desactivación térmica o hidrotérmica y presencia de metales en la carga.
Proporción inadecuada de alumina y tierras raras.	Esto genera problemas de baja área superficial y/o baja actividad del catalizador.  Las tierras raras aportan actividad, y la alumina aporta los puntos ácidos (puntos activos).

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C13. Características de la carga - Baja conversión

Causa	Descripción
Aumento en el contenido de carga pesada (fracción de 1050°F).	La carga pesada es más difícil de craquear y es muy refractario. Se queda sin reaccionar y se adhiere al catalizador.
Incremento en los contaminantes de la carga (níquel, vanadio, sodio o nitrógeno).	Contaminan los puntos ácidos del catalizador reduciendo su actividad.
Aumento en las fracciones de naftenos y aromáticos en la carga.	Las moléculas de naftenos y aromáticos son difíciles de romper y tienden a producir productos pesados.
Disminución de parafinas.	Estos son los componentes de la carga fáciles de craquear. Su disminución puede representar un aumento de componentes mas pesados (naftenos, aromáticos asfáltenos).

Fuente: Autora del proyecto.

**C.4.2. Alta producción de gas seco:** En las tablas a continuación se presentan los diferentes tipos de causas que pueden desencadenar una alta producción de gas seco en la unidad.

Tabla C14. Condiciones de operación - Alta producción de gas seco

<b>Causa</b>	<b>Descripción</b>
Alta temperatura en el reactor.	Esto aumenta la conversión, craqueando las moléculas más de lo deseado y aumentando la producción de gas seco.
Alta temperatura en el regenerador.	El catalizador regenerado llega al reactor con una mayor temperatura y sobrecraquea la carga, produciendo más gas seco.
Inyección de nafta de viscorreductora.	Esta carga es liviana y al reaccionar con el catalizador se sobrecraquea aumentando la producción de gas seco.
Alta relación C/A.	Esto significa que la circulación de catalizador es mayor de la requerida por la carga, ocurriendo un mayor rompimiento de la molécula, y aumentando la producción de gas seco.
Inyección de gases de crudo y de viscorreductora en el compresor C-2601 y/o en el D-553.	Estos gases se inyectan para recuperar C3+ en los tambores de baja presión (D-553/555) y en la segunda etapa del compresor, añadiéndose al flujo de gases de estos circuitos y aumentando la producción de gas seco.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C15. Fallas mecánicas - Alta producción de gas seco

<b>Causa</b>	<b>Descripción</b>
Fallo en una termocupla TI-518 del reactor (lectura incorrecta).	Sensa una temperatura incorrecta y el control es inadecuado pues la temperatura real es mas alta de la leída, produciéndose mas gas seco.
Falla en la P-553, P-609, P-602, P-605, E-609, E618/619.	La falla de alguno de estos equipos disminuye la recuperación de C3+ (propano), enriqueciendo la producción de gas seco.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C16. Propiedades del catalizador - Alta producción de gas seco

<b>Causa</b>	<b>Descripción</b>
Contaminación del catalizador por metales que vienen en la carga (níquel, vanadio y sodio).	Los metales contaminan el catalizador y afectan su actividad, disminuyendo la conversión. Además favorecen la selectividad a gases, aumentando su producción. Estos gases congestionan el sistema de compresión y presionan el reactor.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C17. Características de la carga - Alta producción de gas seco

Causa	Descripción
Aumento en el contenido de níquel y vanadio.	Los metales contaminan el catalizador y afectan su actividad, disminuyendo la conversión. Además favorecen la selectividad a gases, aumentando su producción.
Aumento en la concentración de naftenos y olefinas.	Estos son compuestos insaturados y craquean a gases.
Carga con componentes livianos.	Esta carga se sobrecraquea fácilmente produciendo mas gas.

Fuente: Autora del proyecto.

**C.4.3. Baja producción de gasolina:** En las tablas a continuación se presentan los diferentes tipos de causas que pueden ocasionar una baja producción de gasolina.

Tabla C18. Condiciones de operación - Baja producción de gasolina

Causa	Descripción
Baja o muy alta temperatura en el reactor.	Si la temperatura es baja, hay baja conversión; y si la temperatura es muy alta hay sobrecraqueo y mayor producción de gases.
Disminuye la razón C/A.	Una baja relación C/A significa que la circulación de catalizador no es suficiente para la rata de carga al reactor. Esto ocasiona una baja conversión y un aumento en los fondos de la fraccionadora.
Aumento o disminución en el precaliente de la carga.	Un aumento en el precaliente, disminuye la circulación de catalizador, y la relación C/A. Esto ocasiona una baja conversión.  Una disminución en el precaliente, aumenta la circulación de catalizador, generando sobrecraqueo y mayor producción de gases.
Aumento en el contenido de coque sobre el catalizador de equilibrio.	Esto desactiva el catalizador, produciendo una baja conversión.
Disminución del punto final (de ebullición) de la gasolina.	Esto disminuye el rendimiento volumétrico de la gasolina, produciéndose más fondos.
Disminución en la presión de vapor (RVP) de la gasolina.	Esto disminuye el rendimiento volumétrico de la gasolina, produciéndose más gases.

Aumento en el aditivo ZSM-5.	Promueve la formación de gases por un aumento en la intensidad de la reacción.
Disminución de la rata de reciclo.	Promueve la formación de gases por un aumento en la intensidad de la reacción.
Alta o baja diferencial de presión.	Alta o baja circulación de catalizador, generando sobrecrequeo o baja conversión respectivamente.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C19. Fallas mecánicas - Baja producción de gasolina

Causa	Descripción
Deterioro de las boquillas de carga.	Esto causa una mala atomización de la carga y por lo tanto una baja conversión.
Nivel erróneo de catalizador en el despojador del reactor.	Como la lectura del nivel es errónea, puede presentarse un nivel muy alto produciendo sobrecrequeo, o un nivel muy bajo, ocasionando una baja conversión.
Daño en los ciclones.	Esto causa la pérdida de las finas, y por lo tanto una menor circulación de catalizador, ocasionando una menor conversión.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C20. Propiedades del catalizador - Baja producción de gasolina

Causa	Descripción
Disminución en el contenido de tierras raras (menor a la formulación de diseño).	Esto disminuye la actividad del catalizador, bajando la conversión y produciendo menos gasolina.
Disminución en el contenido de zeolitas.	Esto genera un catalizador menos activo y menos selectivo a gasolina, aumentando el producto de fondos.
Disminución en el tamaño de la partícula de catalizador.	Un menor tamaño de partícula significa una menor área de contacto, y esto causa pérdida de la actividad del catalizador.
Disminución en la actividad del catalizador.	Puede darse por envenenamiento, por contaminación, o por atricción, entre otros. Esto disminuye la conversión y por lo tanto la producción de gasolina.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C21. Características de la carga - Baja producción de gasolina

Causa	Descripción
Disminución del nivel de parafinas.	Al disminuir las parafinas, la carga es más pesada y más difícil de craquear. Esto disminuye la conversión y por lo tanto la producción de gasolina. (La carga con parafinas es la que mas gasolina produce)
Cargas que incluyan residuos de otras unidades (cargas pesadas con algo contenido de carbón CCR).	Cargas más difíciles de craquear, disminuyen la actividad del catalizador y la conversión de la carga.

Fuente: Autora del proyecto.

**C.4.4. Bajo octanaje de la gasolina:** En las tablas a continuación se presentan los diferentes tipos de causas que pueden generar un bajo octanaje de la gasolina.

Tabla C22. Condiciones de operación - Bajo octanaje de la gasolina

Causa	Descripción
Baja temperatura en el reactor.	Disminuye la actividad y la selectividad hacia componentes de alto octanaje.
Aumento de la razón C/A.	Hay sobrecraqueo y la carga reacciona a gases, bajando la producción de gasolina.
Disminución del punto final (de ebullición) de la gasolina.	Disminuye la producción de componentes de gasolina de alto octano (aromáticos).
Aumento del punto final de la gasolina.	Causa arrastres de material pesado a la gasolina que hacen que disminuya su nivel de octanaje, es decir, causa aumento de volumen pero no de octano.
Aumento en la presión de vapor de la gasolina (RVP).	Aumento de gases en la gasolina (butano o propano) los cuales tienen bajo octano.
Aumento de la rata de reciclo.	El reciclo hace la carga más pesada y esto disminuye la conversión y la selectividad a gasolina.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C23. Fallas mecánicas - Bajo octanaje de la gasolina

Causa	Descripción
Mal funcionamiento de las boquillas de carga de alta eficiencia.	Se pierde la atomización óptima de la carga, bajando la conversión y la selectividad a componentes de alto octano en la gasolina.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C24. Propiedades del catalizador - Bajo octanaje de la gasolina

<b>Causa</b>	<b>Descripción</b>
Aumento en tierras raras.	Pérdida de actividad y de selectividad a componentes de gasolina de más alto octanaje.
Aumento del tamaño de la unidad de partícula.	Produce un sobrecraqueo afectando los componentes de la gasolina.
Aumento del contenido de sodio.	El sodio promueve las reacciones de deshidrogenación de los aromáticos, perdiéndose el nivel de octanaje.
Disminución de la actividad de la matriz.	Disminuye la conversión y la selectividad a componentes de gasolina de alto octano.
Disminución de contenido de zeolita	Disminuye la conversión y la selectividad a componentes de gasolina de alto octano.

Fuente: Autora del proyecto.

Tabla C25. Características de la carga - Bajo octanaje de la gasolina

<b>Causa</b>	<b>Descripción</b>
Disminución en el índice refractivo.	Estas son medidas del contenido de aromáticos; si disminuye su contenido también lo hace el nivel de octano.
Disminución en el número de bromo.	
Aumento de las parafinas en la carga	Generan gasolinas de menor octanaje porque generan moléculas lineales (no aromáticas).

Fuente: Autora del proyecto.