

**EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS CAUSA – RAÍZ DE LA PÉRDIDA DE EFICIENCIA
DEL SISTEMA DEL TRATAMIENTO CON BAUXITA EN LA UNIDAD DE
ALQUILACIÓN DE LA GRB**

ANGIE MILENE CÁCERES PRADA

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

2012

**EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS CAUSA – RAÍZ DE LA PÉRDIDA DE EFICIENCIA
DEL SISTEMA DEL TRATAMIENTO CON BAUXITA EN LA UNIDAD DE
ALQUILACIÓN DE LA GRB**

ANGIE MILENE CÁCERES PRADA

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniera Química**

MODALIDAD PRÁCTICA EMPRESARIAL

Tutor UIS

Prof. FERNANDO VIEJO ABRANTE

Tutor ECOPETROL

Ing. NELSON FERNANDO ÁNGULO PEDROZO

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

2012

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por que con sus maravillosas e inexplicables hazañas me brindó la oportunidad en el tiempo justo de retomar mi camino y llevarme a cumplir exitosamente una meta profesional.

Agradezco al profesor Aristóbulo Centeno (Q.E.P.D), pues sin duda es de aquellas personas que hacen la diferencia más que con la enseñanza académica, con su experiencia de vida, siempre brindando sus gratos consejos y palabras de sinceridad. Agradezco además al profesor Fernando Viejo por la orientación y apoyo en este proyecto.

Agradezco a mis amigas del colegio, amigos de la universidad y a toda mi familia pues son el apoyo más grande que tengo.

Finalmente agradezco a Ecopetrol por brindarme la oportunidad no solo de participar en sus procesos de aprendizaje, entorno laboral, de la parada de la UOP II y compartir con su gente tan amable, sino también de haber participado en dos eventos que expusieron 3 historias de vida fortalecedoras para el espíritu.

DEDICATORIA

Le dedico este proyecto de vida a mi madre Betty y padre Wilson, porque a pesar de las dificultades, son uno de mis motivos para seguir progresando profesionalmente y brindarles lo que se merecen.

Dedico el tiempo invertido en mis esfuerzos académicos y la realización de este proyecto a mis Abuelos y tío Roger, pues con su ayuda e ilusión cada vez tengo mayores aspiraciones, motivada por la alegría que me llena al saber que se sienten orgullosos de mí; admiro de ellos lo trabajadores y humildes que son.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1 FUNCIONAMIENTO DE LA UNIDAD DE ALQUILACIÓN	16
1.2 FUNCIONAMIENTO DE LA SECCIÓN DE TRATAMIENTO	17
1.2.1 ETAPA PRELIMINAR.....	17
1.2.2 ETAPA DE TRATAMIENTO DEL EFLUENTE.....	19
1.2.3 REGENERACIÓN DE LOS TRATADORES	19
1.2.4 NEUTRALIZACIÓN DEL EFLUENTE DE REGENERACIÓN	20
2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN.....	21
2.1 ESTUDIO DE LOS PROCESOS INVOLUCRADOS EN LA UNIDAD DE ALQUILACIÓN.....	21
2.2 RECOPIACIÓN DE CAUSAS-RAIZ Y RECOMENDACIONES PARA LA SECCIÓN DE TRATAMIENTO	22
2.3 TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DE VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE TRATAMIENTO CON BAUXITA	22
2.4 EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA SECCIÓN DE TRATAMIENTO	23
2.5 EVALUACIÓN DE LAS ACCIONES A IMPLEMENTAR SOBRE LAS CAUSAS-RAIZ Y RECOMENDACIONES DE LA SECCIÓN DE TRATAMIENTO	23
2.6 GESTIÓN DEL CONTACTO DE LOS LICENCIADORES PARA EL SOPORTE TÉCNICO DE LA PROBLEMÁTICA.....	23
3 RESULTADOS.....	24
3.1 TOMA DE DATOS, ANÁLISIS DE VARIABLES Y EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA SECCIÓN DE TRATAMIENTO. RECOPIACIÓN DE CAUSAS-RAIZ Y RECOMENDACIONES.....	24

3.2	EVALUACIÓN DE LAS ACCIONES A IMPLEMENTAR SOBRE LAS CAUSAS-RAIZ Y RECOMENDACIONES DE LA SECCIÓN DE TRATAMIENTO.	28
3.2.1	CAMBIO DE VÁLVULAS EN EL SISTEMA DE LOS TRATADORES (C.R.).	28
3.2.2	DAÑO DE VÁLVULA DE CONTROL DE NIVEL LV -45613 (R).	29
3.2.3	GOLPE DE ARIETE EN LÍNEA DE AGUA – VAPOR (R).....	30
3.2.4	INUNDAMIENTO TOTAL DEL LECHO DE BAUXITA (R)	33
3.2.5	BAJA DISPONIBILIDAD DE AGUA DE LAVADO (C.R.)	34
3.2.6	TIEMPOS DE MANTENIMIENTO MUY PROLONGADOS (C.R)	36
3.2.7	FALTA DE CLARIDAD EN EL CRITERIO PARA INICIAR LA REGENERACIÓN (C.R.).....	37
3.2.8	SUPERAR LOS 200°F EN EL LAVADO CON AGUA (C.R.)	38
3.2.9	DESGASTE Y NO DISPONIBILIDAD DE LA BAUXITA (C.R.)	38
3.2.10	PRESENCIA DE 1-3 BUTADIENO (C.R.)	38
3.3	GESTIÓN DEL CONTACTO DE LOS LICENCIADORES PARA EL SOPORTE TÉCNICO DE LA PROBLEMÁTICA.....	39
4	CONCLUSIONES	40
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
	ANEXOS.....	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes de la problemática de la sección de tratamiento.	15
Tabla 2. Datos de las variables que han superado las Guías Operativas.	24
Tabla 3. Datos de las variables que afectan al proceso de tratamiento con bauxita.	25
Tabla 4. Lista de Causas-Raíz y Recomendaciones priorizadas para la Sección de Tratamiento.	26
Tabla 5. Condiciones de operación de las válvulas utilizadas en la Sección de Tratamiento.	29
Tabla 6. Análisis de las corrientes de agua (Pruebas realizadas el 11 de Octubre de 2011).....	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general del proceso de alquilación.....	17
Figura 2. Sección de Tratamiento – Regeneración de los tratadores de bauxita..	18
Figura 3. Esquema de la metodología utilizada para la evaluación del problema en la Unidad de Alquilación.....	21
Figura 4. Esquemas flujo tapón asociado al efecto de golpe de ariete.....	30
Figura 5. a) Perfil de presión; b) Perfil de temperatura (vapor de 400 psig).	31
Figura 6. Perfil flujo de vapor de 400 psig.....	32
Figura 7. Tiempos de regeneración en cada tratador.....	37

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. ADSORCIÓN.....	45
ANEXO 2. DIAGRAMAS QUÉ PASA SI?.....	54
ANEXO 3. BASES TEORICAS PARA EL PROBLEMA DE GOLPE DE ARIET.....	60

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS CAUSA – RAÍZ DE LA PÉRDIDA DE EFICIENCIA DEL SISTEMA DEL TRATAMIENTO CON BAUXITA EN LA UNIDAD DE ALQUILACIÓN DE LA GRB *

AUTOR: ANGIE MILENE CÁCERES PRADA **

PALABRAS CLAVES: Alquileración, adsorción, bauxita, análisis causa – raíz, olefinas, ácido sulfúrico.

En la Sección de Tratamiento de la Unidad de Alquileración de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja, se han presentado incidentes críticos asociados con la baja eficiencia del proceso. Frente a esta problemática desde el 2004 se han desarrollado diversos estudios e investigaciones con objeto de identificar sus causas-raíz, elaborar recomendaciones y proponer acciones a ejecutar, para posteriormente reducir la raíz del problema y mejorar la eficiencia del sistema de tratamiento con bauxita.

Este proyecto se integra como continuidad al avance de los trabajos realizados, evaluando el estado actual del sistema de tratamiento y en particular de las acciones a ejecutar, la viabilidad de las recomendaciones y, para algunos casos, ejecutando las soluciones o dando recomendaciones alternas.

En la priorización de las causas-raíz y recomendaciones a evaluar, se le dio mayor importancia al cambio del juego de válvulas del sistema de tratamiento, pues ningún tipo de material instalado ha sido el adecuado ya que se corroen fácilmente perdiendo su hermeticidad, con lo que se presenta pase de efluente ácido en regeneración, conllevando a altos costos por mantenimiento y lucro cesante por disminución de carga a la unidad. Ante esta causa-raíz se realizó el contacto con el licenciador de la planta para recibir apoyo técnico.

Así mismo se determinó que el proceso de regeneración no está siendo eficiente debido a que no se tiene un control total de las condiciones del sistemas, superando condiciones normales y de diseño de algunos equipos y soportería, que evidentemente afecta la integridad y confiabilidad de la sección de tratamiento; además no se está cumpliendo con los tiempos de operación de cada tratador, conllevando a la obstrucción e ineficiencia de los lechos.

* *Proyecto de Grado*

***Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Tutor UIS: Prof. FERNANDO VIEJO ABRANTE. Tutor ECOPETROL: NELSON FERNANDO ÁNGULO PEDROZO.*

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE ROOT-CAUSES'S ANALYSIS OF THE LOSS OF EFFICIENCY IN THE TREATMENT SYSTEM WITH BAUXITE IN THE ALKYLATION UNIT FROM THE GRB *

AUTHOR: ANGIE MILENE CÁCERES PRADA **

KEYWORDS: Alkylation, adsorption, bauxite, root-causes's analysis, olefins, sulfuric acid.

The Treatment Section of Gerencia de la Refinería of Barrancabermeja's (GRB) Alkylation Unit has presented critical incidents associated with its low process efficiency of this section. Since 2004, the GRB has been developing several studies and researches with the aim to identify root-causes, generate recommendations and actions to be executed in order to reduce the root of the problem and improve the efficiency of the treatment system with bauxite.

This project is integrated as an extension of the work done previously, where the current state of the treatment system is evaluated, particularly the actions to be executed, the viability of the recommendations and, for some cases, solutions or alternatives recommendations are given.

Among the root-causes and recommendations, the greatest importance was attributed to the change of the valves set in the treatment system: the alloy selected and installed has not been the appropriate; hence it is very susceptible to corrosion damage. The latter finally results in loss of hermetic conditions, leaking of acid effluent in the regeneration process and, subsequently, higher cost for maintenance, as well as diminished profits associated with the lower feed introduced to the treatment system. For this root-cause the plant licensor was contacted to receive technical support.

Likewise, the overall evaluation determined that the regeneration process is not being efficient due to the lack of an adequate control of the system conditions and some equipments are exceeding the design and normal conditions. This evidently affects the integrity and reliability of the treatment section; further, the operation time for each treatment unit is not being satisfied according to the design specification, thus, conducting to the obstruction and inefficiency of the bauxite beds.

* *Bachelor Degree Project*

** *Physicochemical Engineerings Faculty. Chemical Engineering School. Tutor UIS: Prof. FERNANDO VIEJO ABRANTE. Tutor ECOPETROL: NELSON FERNANDO ÁNGULO PEDROZO.*

INTRODUCCIÓN

La Unidad de Alquilación de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB) está diseñada para procesar mezclas de olefinas e isobutano procedentes de las unidades de ruptura catalítica UOP II, UOPI, MODELO IV y ORTHOFLOW. La reacción de alquilación se lleva a cabo en presencia de ácido sulfúrico como catalizador y permite producir alquilato pesado (utilizado como componente de alto octanaje de la gasolina para exportación), y alquilato liviano de alto octanaje (utilizado como componente de gasolina de aviación). Esta unidad está conformada por varias secciones; en particular, la Sección de Tratamiento cuenta con un sistema de tratamiento con bauxita, que tiene como función remover todas las especies ácidas (sulfatos de alquilo y trazas libres de ácido) de la corriente de efluente neto de reacción (alquilato, isobutano, n-butano)

La condición actual es que la Sección de Tratamiento presenta baja confiabilidad operativa y eficiencia (76%), se realizan regeneración ex-situ, se tiene alta reposición de bauxita por su degradación, alta velocidad de corrosión en los tratadores y se evidencia presencia de compuestos ácidos en la corriente de salida de los mismos. El impacto se ve reflejado en altos costos de mantenimiento, lucro cesante por disminución de carga a la unidad, malas especificaciones en el producto y aumento de la corrosión en la Sección de Fraccionamiento, afectando la integridad de equipos y confiabilidad del proceso de alquilación.

Así mismo, se han presentado varios hechos históricos de gran impacto tanto en equipos como en el proceso alterando el producto, que han catalogado la problemática con criticidad alta (Tabla 1). Dada esta situación, se han desarrollado diversos estudios e investigaciones recopilados en varios documentos, de los cuales se destacan los referenciados en [1] y [2], que han permitido verificar diferentes causas raíz a partir de las cuales se han generado varias soluciones y recomendaciones a la problemática [3-14].

Tabla 1. Antecedentes de la problemática de la sección de tratamiento.

FECHA	ANTECEDENTE
Noviembre de 2002	Fuga por orificio de la boquilla de entrada de hidrocarburo ácido del tratador de bauxita D4570A
Enero 12 de 2004	Explosión en el tratador de bauxita D-4570 B
Mayo 2004 (parada)	Construcción de facilidad para utilizar el condensado de la unidad en el proceso de regeneración debido al no abastecimiento de agua, generando así baja eficiencia en la regeneración
Diciembre de 2004	Fuga por orificio de la boquilla de entrada de hidrocarburo ácido del tratador de bauxita D4570B
Posterior a la parada de 2006	Se evidenció incremento de diferenciales de presión (25 → 90 psig) posterior a cada regeneración: tiempo de corridas altos; Taponamiento en los D4570

Aportes técnicos y de ingeniería se han estado elaborando casi desde inicios de la puesta en servicio de la Unidad de Alquiler (Noviembre-2002). No obstante, desde 2008 el trabajo con el Análisis Causa-Raíz (RCA) fue suspendido y a mediados del 2009 se dejó de dar prioridad a esta problemática, haciendo a un lado algunas de las acciones a ejecutar para mitigar las causas –raíz verificadas.

Sin embargo, a principios de 2010 hubo un incidente crítico por fuga de ácido cuando se intervenía uno de los tratadores para dar paso a la regeneración, lo que ocasionó graves quemaduras en el personal de mantenimiento. A partir de entonces se dio una adecuada continuidad al estudio de la problemática de obstrucción de los lechos, y se propuso este proyecto como una conexión entre el trabajo realizado y la eventual ejecución de las acciones preventivas y estrategias.

De este modo, el objetivo principal de este proyecto en particular es contribuir con el propósito de la GRB de dar continuidad al avance de esta importante problemática, evaluando todas las posibles soluciones de las causas – raíz y recomendaciones, analizándolas, proponiendo un plan de desarrollo frente a éstas, con objeto de aumentar y garantizar la eficiencia de los tratadores de bauxita, y recuperar la integridad y confiabilidad del proceso y los equipos de la Sección de Tratamiento y de la Unidad de Alquiler en general. Todo ello permitirá además mantener ciclos de operación según el diseño del licenciador, ahorrar en costos de mantenimiento, cumplir con el plan de programación de producción y aumentar la confiabilidad en la Sección de Fraccionamiento.

1. MARCO TEÓRICO

La Unidad de Alquilación, diseñada por STRATCO (USA), fue puesta en servicio el 22 de noviembre de 2002 con tres contactores (reactores), manejando una corriente de butanos de campo y una carga combinada de olefinas proveniente de las unidades de ruptura catalítica (Unidades Modelo IV, Orthoflow, UOPI y UOPII). Estas corrientes se balancean para obtener una composición adecuada de olefinas e isobutano, que posteriormente reaccionan en presencia de ácido sulfúrico como catalizador para producir alquilato, componente de mezcla para obtención de Avigas (gasolina para uso en motores de aviación alternativo) y para la preparación de gasolinas de alto octanaje. Otros productos de la unidad de alquilación son el propano, isobutano y n-butano.

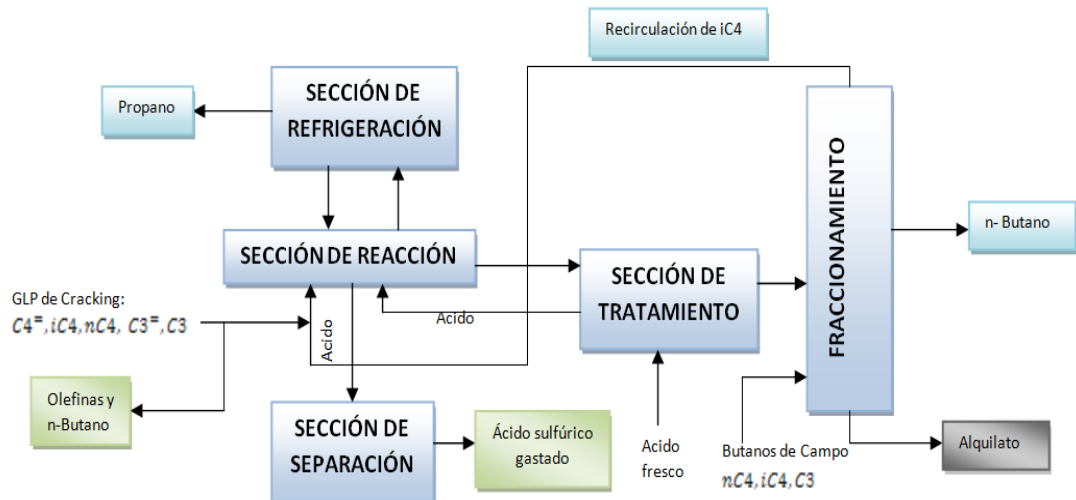
Para mayor eficiencia se instalaron dos secciones de tratamiento a la carga que llega a la Unidad de Alquilación: la Sección de Merox, que neutraliza y elimina los compuestos ácidos por el contacto con soda mediante un proceso de extracción líquido-líquido; y la Sección de Hidroisomerización, que convierte el butadieno presente en las corrientes de carga a olefinas mediante reacción con hidrógeno.

1.1 FUNCIONAMIENTO DE LA UNIDAD DE ALQUILACIÓN

La unidad de alquilación cuenta con las siguientes secciones (figura1): **sección de carga**, balancea las corrientes que se alimentan a la unidad para obtener una composición adecuada de olefinas e isobutano para la producción de alquilato; **sección de reacción** donde el isobutano y las olefinas provenientes de la sección de carga reaccionan en los contactores utilizando ácido sulfúrico como catalizador y produce alquilato y demás productos de la unidad; **sección de separación**, separa el ácido gastado procedente de los sedimentadores (equipo al que llega la corriente de salida de los contactores) del efluente neto de reacción; **sección de refrigeración**, separa los livianos del efluente de los contactores y hay

recirculación del refrigerante (isobutano) hacia la sección de reacción; **sección de tratamiento**, separa el ácido libre y los sulfatos de alquilo y dialquilo de la corriente efluente de los contactores por contacto y mezclado con ácido fresco. Sus remanentes son separados al hacer contacto con un lecho conformado por bauxita. Este sistema que consta de dos unidades, mezclador-coalescedor y tratadores, permite minimizar el ensuciamiento y la corrosión de los equipos en la sección de fraccionamiento; **sección de fraccionamiento**, separa los productos (Isobutanos, Butano, alquilato) de la unidad contenidos en el efluente neto mediante columnas de destilación.

Figura 1. Esquema general del proceso de alquilación.

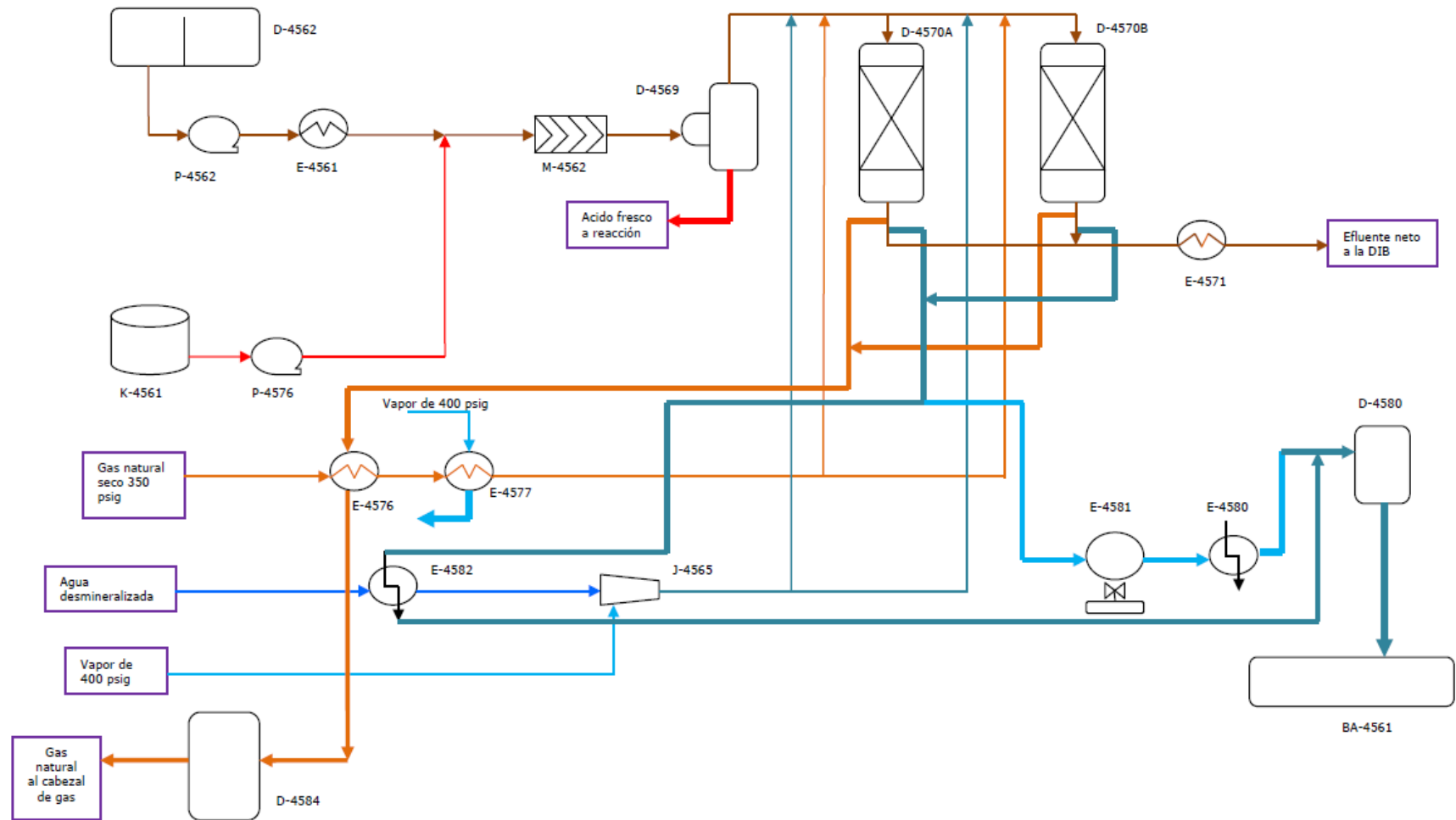


1.2 FUNCIONAMIENTO DE LA SECCIÓN DE TRATAMIENTO

1.2.1 ETAPA PRELIMINAR

El efluente neto proveniente de refrigeración es previamente calentado, y enseguida se combina con una inyección de ácido sulfúrico fresco que fluye desde el tanque de ácido (K-4561, figura 2). La corriente de salida se termina de mezclar homogéneamente en un mezclador (M-4562), donde se forma una emulsión en la que el ácido atrapa la mayoría de sulfatos de alquilo formados por la reacción del ácido sulfúrico con las olefinas.

Figura 2. Sección de Tratamiento – Regeneración de los tratadores de bauxita.



La corriente mezclada posteriormente ingresa a un coalescedor de ácido (D-4569), donde el efluente flota en la superficie y el ácido fresco recuperado desciende al fondo del equipo, el cual retorna como inyección a la sección de reacción. El efluente con trazas de sulfatos y ácido libre sale por la cima del coalescedor hacia uno de los tratadores de bauxita. Para optimizar el proceso existen dos tratadores (D-4570 A/B) de tal forma que, mientras uno opera, el otro se regenera.

1.2.2 ETAPA DE TRATAMIENTO DEL EFLUENTE

El tratamiento con bauxita consiste en un proceso de adsorción, donde los sulfatos de alquilo y el ácido libre presentes en la corriente de efluente neto que no fueron extraídos en el coalescedor ácido, reaccionan con la bauxita formando sulfato de aluminio, que queda adsorbido en el lecho haciendo que la corriente saliente de los tratadores quede libre de estos contaminantes, para finalmente ser calentada en un intercambiador (E-4571), y enviada hacia la sección de fraccionamiento. A medida que transcurre el tiempo de operación, los lechos se saturan con los sulfatos y el ácido libre disminuyendo la efectividad del proceso de adsorción, lo que permite el paso de contaminantes ácidos con el efluente hacia la sección de fraccionamiento. Cuando esto ocurre, se aísla el tratador, se regenera y el otro tratador regenerado es puesto marcha.

1.2.3 REGENERACIÓN DE LOS TRATADORES

Normalmente, la bauxita debe ser regenerada después de aproximadamente cada 15 días de corrida dependiendo de la cantidad de flujo de efluente tratado (250 KB actualmente). El proceso de regeneración de la bauxita tiene lugar en tres etapas:

➤ **Lavado con agua:** el lecho saturado se aísla y el hidrocarburo contenido se drena. Posteriormente, se inyecta a la parte superior del tratador a regenerar una mezcla de agua caliente y un flujo lento de vapor de 400 psig (para calentar agua), que es generada a través de un eyector (J-4565). Esta corriente tiene como

objetivo aumentar la temperatura de la bauxita a 200 °F, permitiendo que los sulfatos presentes en el lecho saturado se conviertan en alcoholes y ácido sulfúrico. Este proceso dura alrededor de 24 horas y depende del pH del efluente.

➤ **Vaporizado:** a continuación se realiza un proceso de vaporizado donde se remueve el agua libre que queda del lavado. Para ello se hace pasar un flujo de vapor por la parte superior del tratador, que es inyectado para conseguir una temperatura aproximada de 400 °F. Este proceso se mantiene por 8 horas aproximadamente controlando una presión de 240 psig.

➤ **Reactivación de la bauxita:** debido al proceso de lavado con agua, parte de la bauxita se convierte a hidrato dejándola inactiva para remover los sulfatos y ácido libre del efluente. Es por ello que la última etapa de la regeneración de la bauxita consiste en un proceso de secado con gas natural a 350 °F, 350 psig y un flujo aproximado de 185000 ft³/h, que entra por la cima del tratador a regenerar. Al hacer contacto con el lecho húmedo, dicho gas elimina el agua retenida en el lecho y sale húmedo por el fondo del tratador. El gas se enfría y se envía a un tambor separador de agua – gas natural (D-4584). El proceso de reactivación dura alrededor de 16 horas o hasta cuando disminuya la acumulación de agua en el D-4584. Luego se suspende el calentamiento del gas y se procede a enfriar el lecho por medio del mismo flujo de gas hasta alcanzar 120°F en todo el lecho del tratador, quedando en condiciones adecuadas para ser colocado en servicio.

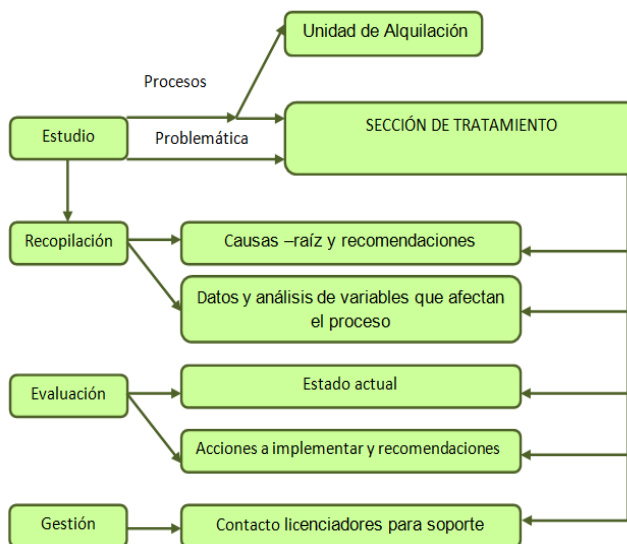
1.2.4 NEUTRALIZACIÓN DEL EFLUENTE DE REGENERACIÓN

Los efluentes de los procesos de lavado con agua y vaporizado se envían a una serie de enfriadores (E-4580/81/82) para finalmente dirigirse hacia el tambor degasificador de agua (D-4580), que también recibe las corrientes de aguas aceitosas y soda gastada procedentes de otros tambores de la unidad. Allí se separa el material en dos fases: una fase de hidrocarburos livianos que sale de la cima y se envía hacia la tea de la unidad y una fase acuosa que fluye hacia la fosa de neutralización (B-4561).

2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

En la Figura 3 se muestra el esquema de la metodología utilizada para llevar a cabo la evaluación de la problemática de la Sección de Tratamiento.

Figura 3. Esquema de la metodología utilizada para la evaluación del problema en la Unidad de Alquiler.



2.1 ESTUDIO DE LOS PROCESOS INVOLUCRADOS EN LA UNIDAD DE ALQUILACIÓN.

Se emprendió el estudio del funcionamiento de la Unidad de Alquiler y de la Sección de Tratamiento en particular, abarcando la identificación de equipos, operaciones unitarias y química del proceso en general. Con ello se desarrolló un trabajo que recopila toda la información técnica tanto de equipos como de corrientes del sistema de tratamiento con bauxita, con apoyo en los manuales de alquiler [15-17] e información compartida por el ingeniero de procesos. El trabajo se sintetiza en un documento interactivo que actualmente facilita la eficaz búsqueda de información para el personal que labora en planta o aquellos que deseen investigar en el tema [18]. Se realizó además una búsqueda en bases de revistas científicas sobre temas relacionados al sistema de tratamiento encontrando 5 artículos [19-23], con objeto de profundizar en el tema y servir de apoyo para futuras investigaciones en la Unidad de Alquiler.

Para el estudio particular de la sección de tratamiento, con apoyo en libros de operaciones unitarias [24-27], se generaron tres documentos que facilitan la comprensión de los procesos de la Unidad de Alquilación: Química.ppt. [28] es una presentación interactiva que explica los procesos químicos de la sección de reacción y de tratamiento; el anexo 1 es un documento explicativo de la operación unitaria adsorción para el caso particular de los tratadores de bauxita, y el anexo 2 es un documento que contempla diagramas qué pasa si? (usado comúnmente en la GRB) donde se plasma la incidencia de alteración de variables de la sección de reacción, de refrigeración y de tratamiento en el sistema de tratamiento, y que sirve como soporte a este proyecto, además de ser una útil herramienta al personal de la unidad a la hora de evaluar problemáticas.

Posteriormente, se estudió y analizó la problemática relacionada con la Sección de Tratamiento, contenida en siete documentos bases [2,4-6, 9, 12,13]. Además, se presentaron varios escenarios de interacción con los operadores e ingenieros de la planta que contribuyeron a la familiarización y orientación de la temática a tratar.

2.2 RECOPIACIÓN DE CAUSAS-RAIZ Y RECOMENDACIONES PARA LA SECCIÓN DE TRATAMIENTO

Se realizó un filtro de toda la información soportada por el ingeniero de procesos para la recopilación de las causas-raíz y recomendaciones (aún están en evaluación)[29]. Para éste trabajo, se creó un *check-list* [30] de evaluación de las causas mitigadas o en su defecto causas aún presentes.

2.3 TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DE VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE TRATAMIENTO CON BAUXITA

Así mismo, se identificaron todas las posibles variables que afectan el proceso de tratamiento con bauxita y se procedió a través de un programa de la refinería (PI) a descargar datos diarios máximos, mínimos y promedio de estas variables para un tiempo de estudio de 01/01/2011 al 18/10/2011, recopilados en [31].

2.4 EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA SECCIÓN DE TRATAMIENTO

A partir de la toma de datos anteriormente mencionada, se identificaron eventos de superación de GCO (guías operativas, afectan la calidad del producto), VO (ventanas operativas, afectan integridad de equipos), tiempos de parada y de regeneración de los tratadores (Análisis de variables [31]). Seguido a esto, se investigaron las condiciones normales y críticas (VO) a las que operan dichas variables para así dar un juicio que lograra justificar la actual ineficiencia de la sección de tratamiento.

2.5 EVALUACIÓN DE LAS ACCIONES A IMPLEMENTAR SOBRE LAS CAUSAS-RAIZ Y RECOMENDACIONES DE LA SECCIÓN DE TRATAMIENTO

Se entrevistó a operadores e ingenieros y se hizo un chequeo visual en la planta para determinar el estado actual de las causas-raíz del problema; se analizó la problemática, y tras una evaluación se dio paso a la priorización de causas-raíz en el estado actual. Posteriormente, se evidenciaron con datos reales e imágenes aquellas acciones que no habían sido implementadas, dándole importancia a su ejecución inmediata. Así mismo, se hizo una evaluación con base en los conocimientos adquiridos tanto en Ecopetrol como estudios previos universitarios de aquellas recomendaciones propuestas aún no evaluadas por los ingenieros [29] para solucionar los problemas relacionados al sistema de tratamiento.

2.6 GESTIÓN DEL CONTACTO DE LOS LICENCIADORES PARA EL SOPORTE TÉCNICO DE LA PROBLEMÁTICA

Dada la criticidad de gestionar la compra de las válvulas en el sistema de tratamiento, se recopiló la información de las modificaciones hechas en la sección de tratamiento durante un estudio previo realizado por el licenciador Dupont para ampliar la capacidad de producción de la Unidad de Alquiler [32] y posteriormente se gestionó su contacto para recibir soporte técnico.

3 RESULTADOS

3.1 TOMA DE DATOS, ANÁLISIS DE VARIABLES Y EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA SECCIÓN DE TRATAMIENTO. RECOPIACIÓN DE CAUSAS-RAIZ Y RECOMENDACIONES.

La tabla 2 muestra una evaluación estadística de las variables para las cuales se estipulan GCO superando éste valor y que inciden de manera significativa en el proceso de tratamiento.

Tabla 2. Datos de las variables que han superado las Guías Operativas.

Variable	Máximos	
	No Eventos de superación GCO	% Superación GCO
Flujo de descarga P-4562	0	0
DP M-4562	18	9,18
Flujo de descarga P-4576 A/B	57	29,08
DP D-4569	3	1,53
DP D-4570 A	58	29,59
DP D-4570 B	45	22,96

La tabla 3 es una recopilación de las variables más importantes relacionadas con el proceso de tratamiento con bauxita. Ésta especifica tanto valores teóricos investigados en toda la bibliografía mencionada (exceptuando libros y artículos) como datos experimentales obtenidos de PI.

La tabla 4 es una recopilación de las causas-raíz y recomendaciones a las cuales se le dio mayor prioridad para la posterior puesta en marcha de las acciones a ejecutar. La recopilación completa de éstas se detalla en el *check-list* [30].de evaluación.

Tabla 3. Datos de las variables que afectan al proceso de tratamiento con bauxita.

Variable	Unidades	VALORES TEORICOS		VALORES EXPERIMENTALES			
		GCO	VO	Valor Normal	Valor promedio	Valor mínimo	Valor máximo
Flujo de descarga P-4562	BPD	25800	-	10000-24000	9679,59	9,45	14753,05
Temperatura de salida E-4561	°F	100	-	85-89,99	85,63	65,83	120,21
DP M-4562	PSI	15	20	8-15	9,66	-0,37 / 0	20,39
Flujo de descarga P-4576 A/B	GPM	mn1 – max 4	min 0,8 – max 7,0	1-6	2,37	0	57
DP D-4569	PSI	15	20	-	0,62	-0,19 / 0,1	20,39
Flujo de vapor 400 psig a E-4577	LPH	-	-	880	0,25	0	1622,16
Flujo de Gas Comb. a E-4576	LPH	-	-	7848	9457,67	0,22	202516,9
Temperatura Salida Gas Comb. E-4577	°F	-	-	120 - 350	92,45	73,46	396,50
Flujo de agua Desmin. a Regen.	GPM	-	-	300	39,25	19,99	222,29
Flujo de vapor a Ejector	LPH	-	-	L:2122; V:18618	1671,31	36,56	18188,82
Temp. Salida Agua-Vapor de Ejector	°F	-	-	200-400	120,04	77,52	537,27
Temperatura cima D-4570 A	°F	-	-	*L:200; V:400; S:350	102,45	68,03	509,87
Temperatura cima D-4570 B	°F	-	-	*L:200; V:400; S:350	84,55	19,96	442,49
Temperatura fondo D-4570 A	°F	-	-	*S:350	82,63	5,67	129,55
Temperatura fondo D-4570 B	°F	-	-	*S:350	82,68	59,63	146,74
DP D-4570 A	PSI	20	25	15-20	15,69	-1,99 / 0	101,99
DP D-4570 B	PSI	20	25	15-20	6,49	-1,99 / 0	101,99
Temp. Sal. D-4570 A	°F	-	-	*L:200; V:400	96,29	36,64	404,56
Temp. Sal. D-4570 B	°F	-	-	*L:200; V:400	78,63	27,65	428,80
Temperatura Ent. D-4580	°F	-	-	120	89,25	15,03	203,96
Nivel D-4580	%	-	-	-	27,04	0,47	101,99
Temp. Vapor de 400 psig	°F	-	-	400	487,02	200,56	624,88
Presión Vapor de 400 psig	PSI	-	-	400	410,50	33,81	436,53
Presión Condensado	PSI	**	**	**	96,08	2,05	241,49
Temperatura Condensado	°F	**	**	**	174,91	79,19	212,43
Flujo Condensado	GPM	**	**	**	82,95	0,45	206,76

*L: Lavado; V: Vaporizado; S: Secado ;

**El condensado producto no tiene mayor control, pues es enviado a Central del Norte, otra unidad de la refinería.

Tabla 4. Lista de Causas-Raiz y Recomendaciones priorizadas para la Sección de Tratamiento.

CAUSAS-RAÍZ /RECOMENDACIONES	PROBLEMÁTICA	ACCIONES A EJECUTAR
CAMBIO DE VÁLVULAS EN EL SISTEMA DE LOS TRATADORES	El material de las válvulas no resiste las condiciones de operación, lo cual ha afectado la hermeticidad de éstas ocasionando continuo pase de hidrocarburo hacia el tratador que va a ser regenerado. Lo anterior hace que el tratador se presione a tal punto de alcanzar valores entre 60 y 130 psig, lo cual dificulta el ingreso del agua de lavado y conlleva a la formación de hidratos, corrosión acelerada y obstrucción del lecho por dilución del ácido, obligando finalmente a la instalación de ciegos en los puntos que tienen facilidad para ello en la regeneración ex-situ.	*Documentar el cambio de las válvulas del sistema y los problemas que han ocurrido. *Instalar las válvulas del material adecuado en todo el sistema de los tratadores con bauxita. *Instalación de doble válvula bridada en la línea de llenado que permita instalar ciegos.
DAÑO DE VÁLVULA DE CONTROL DE NIVEL LV -45613	Actualmente no existe control automático de nivel del tambor degasificador (D-4580) debido a daño del cuerpo de válvula de control por corrosión acelerada y erosión. No hay operación segura y afecta la integridad de los demás equipos en caso de presentarse limitaciones en el control de nivel.	*Gestionar la adquisición e instalación de la válvula LV-45613 (Efluente ácido entre Drum D-4580 y Fosa de Neutralización B-4561)
GOLPE DE ARIETE EN LÍNEA DE AGUA – VAPOR	En procesos de regeneración, el vapor de 400 psig se encuentra sobrecalentado y al mezclarse con el agua genera bolsas de vapor que cambian el régimen de flujo del líquido dentro de la tubería, implicando altas vibraciones en las líneas, accesorios y equipos anexos lo que ocasiona daños en soportería, válvulas, carretas, uniones, aislamiento, etc. Actualmente, no existe atemperamiento del vapor hacia el eyector J-4565 ni para el precalentador de gas natural (E-4577).	*Se recomienda instalar válvula atemperadora en el cabezal de vapor de alta 400 psig previo al Eyector J-4565 y al Precalentador de Gas Natural E-4577
INUNDAMIENTO TOTAL DEL LECHO DE BAUXITA	El lecho de Bauxita en su proceso de regeneración no logra lavarse en su totalidad, debido a diferencias en la cabeza estática entre el drum D-4570 A/B y las líneas anexas al intercambiador E-4582 y al drum D-4580, quedando la zona superior del lecho levemente lavada y con trazas de ácido, generando que en dicha zona se forme una capa sólida de rocas y grumos, ocasionando altos diferenciales de presión y obstruyendo finalmente la circulación de agua, vapor, gas natural y efluente neto.	* Elevar la línea de salida de agua del D-4570A/B a una altura similar o equivalente a la altura de entrada de las corrientes a los tratadores.

<p>BAJA DISPONIBILIDAD DE AGUA DE LAVADO EN REGENERACIÓN</p>	<p>En alguna oportunidad se recomendó utilizar condensado producto de la unidad para compensar déficit de agua de lavado, sin embargo, aunque la idea es buena frente mayor flujo y temperatura de agua de lavado, el punto de mezcla entre el agua desmineralizada y el condensado previo al precalentador E-4582 debe ser modificado debido a que se está comprometiendo la integridad del E-4582, D-4580, fosa de neutralización y líneas anexas debido a la altas temperaturas de salida del efluente ácido.</p>	<p>*Construir una nueva línea de condensado que llegue a la salida del lado casco del precalentador E-4582 y entrada del eyector J-4565 permitiendo un flujo total entre 200 y 220 GPM y una temperatura entre 190 y 200°F requeridos para lograr la regeneración. *Revisar con el coordinador de aguas el porqué no se tiene esta disponibilidad</p>
<p>TIEMPOS DE MANTENIMIENTO MUY PROLONGADOS</p>	<p>El tiempo máximo de mantenimiento por cada tratador con bauxita debe ser de 9 días. Todos los eventos de mantenimiento han sido superiores a este límite.</p>	<p>*Programar trabajos de mantenimiento 24 horas, fines de semana y máximo 9 días. *Suministrar instructivo para realizar las actividades.</p>
<p>FALTA DE CLARIDAD EN EL CRITERIO PARA INICIAR LA REGENERACIÓN</p>	<p>Las indicaciones del manual hablan de un periodo de 15 días pero ajustables según las condiciones de operación. Hasta el momento no se ha realizado un estudio que determine el tiempo exacto de corrida con las condiciones de proceso actuales.</p>	<p>*La regeneración debe hacerse cuando se cumpla el volumen tratado de 250 KBarriles. Excepciones: - Si la diferencial de presión es mayor a 25 psig se debe regenerar. *Se debe configurar un bloque de cálculo con el flujo de efluente neto y la respetiva alarma en este valor. *Cumplir la programación de regeneraciones y coordinar con anterioridad con los servicios industriales involucrados.</p>
<p>SUPERAR LOS 200°F EN EL LAVADO CON AGUA</p>	<p>Debido a esta problemática ocurrió el incidente de rotura de la boquilla en el tratador D-4570B (ver Tabla 1).</p>	<p>Seguir estrictamente el procedimiento de lavado de la bauxita con agua, no superando los 200F en la etapa de lavado.</p>
<p>DESGASTE Y NO DISPONIBILIDAD DE LA BAUXITA</p>	<p>Se presenta desgaste de la actividad de la bauxita por la acelerada disminución en el contenido de alúmina, lo cual se ve evidenciado en las cortas corridas de los tratadores por presionamiento del sistema y en la consecuente disminución de partícula del material. Se presenta además la no disponibilidad de inventario de bauxita.</p>	<p>*Realizar la compra de bauxita cumpliendo con las especificaciones de calidad de este material. *Evaluar regularmente el contenido de alúmina de la bauxita y cambiarla cuando el % de alúmina se reduzca a 60%.</p>
<p>PRESENCIA DE 1-3 BUTADIENO</p>	<p>El análisis de las cargas muestra que el porcentaje de 1-3 butadieno es más alto que la especificación de diseño (0.05%v/v) debido a la no operación de Hidroisomerización.</p>	<p>*Operar de forma continua la unidad de Hidroisomerización.</p>

3.2 EVALUACIÓN DE LAS ACCIONES A IMPLEMENTAR SOBRE LAS CAUSAS-RAIZ Y RECOMENDACIONES DE LA SECCIÓN DE TRATAMIENTO.

A continuación se evalúan las causas raíz (C.R.) y recomendaciones (R) por orden de prioridad.

3.2.1 CAMBIO DE VÁLVULAS EN EL SISTEMA DE LOS TRATADORES (C.R.).

a. Evaluación de falla según el material: el proyecto de alquiler especificó inicialmente válvulas Alloy 20. Sin embargo, las condiciones de diseño requeridas son del orden de los 700 °F para las etapas de regeneración con vapor, y las válvulas y bridas de Alloy 20 no podían ser usadas para temperaturas superiores a 425 °F. Debido a esto, el proyecto cambió las especificaciones de diseño a válvulas de CK20, un material menos resistente al ácido sulfúrico. El proyecto al fin nunca compró dichas e instaló en todo el sistema válvulas de acero al carbono, de mucha menor resistencia al ácido, y que presentaron fallas permanentes. Ya, posterior al proyecto, las válvulas especificadas de CK20 se catalogaron, se compraron y finalmente se instalaron. Sin embargo, hoy en día se tienen problemas con la hermeticidad de las mismas por corrosión y erosión, por lo que es necesario intervenir con la instalación de ciegos para las etapas de regeneración, generando así exposiciones peligrosas a los trabajadores de mantenimiento y altos costos por los mismos.

En conclusión, hasta el momento no se tiene un juego de válvulas eficientes, por lo que la recomendación de cambiar las válvulas del sistema de tratamiento con bauxita sigue presentándose como prioridad debido a los múltiples problemas que genera, y a los antecedentes presentados en la Tabla 1. Actualmente, lo que se quiere es revisar si existe un material más adecuado y/o un tipo de válvula que presente mejor desempeño (hermeticidad) debido a la frecuencia de manipulación. Se requiere de un total de 33 válvulas para los dos tratadores de bauxita que

deben manejar efluente neto, agua desmineralizada, gas natural seco, vapor, agua de proceso efluente y gas natural húmedo. Las condiciones normales y máximas a las cuales podrían estar expuestas las válvulas se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones de operación de las válvulas utilizadas en la Sección de Tratamiento.

	NORMAL		DISEÑO	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
PRESIÓN (PSIG)	15	250	0	469
TEMPERATURA (°F)	70	400	40	770

b. Evaluación de falla según el proceso: se sabe que las condiciones a las que entran los fluidos por las líneas que contienen éste sistema de válvulas también ha afectado la integridad de las mismas. El análisis hecho en el documento Análisis de variables [31], se indican las temperaturas de los tres sistemas entrantes a los tratadores de Bauxita. Se indica que la temperatura del efluente neto ha presentado 21 eventos de superación de las condiciones normales (85 – 89 °F); el sistema agua-vapor ha presentado 15 eventos de superación (400 °F); y el gas natural 15 eventos de superación (350 °F).

En el sistema se han alcanzado temperaturas de hasta 509 °F (Tabla 3), afectando la integridad de algunos equipos como lo son el E-4576 que, presenta 3 eventos de superación de temperatura de diseño (400°F); y el E-4582, que presenta más de 10 eventos de superación (250°F). Esto afecta directamente al D-4580 durante la etapa de lavado, cuya temperatura de diseño es de 170°F; y también a los intercambiadores E-4580 y E-4581 (420°F) con 7 eventos de superación.

3.2.2 DAÑO DE VÁLVULA DE CONTROL DE NIVEL LV -45613 (R).

La acción a ejecutar (Tabla 4) para esta recomendación no se ha llevado a cabo. Actualmente, esta válvula no está en servicio debido a los graves daños por corrosión, y la gestión de su compra es de gran importancia para el control del sistema y confiabilidad de la unidad. Para su compra es recomendable tener como

referencia la oferta técnico – económica que se defina para el sistema de válvulas de la sección de tratamiento.

Para determinar cuál fue la causa-raíz del problema se evaluó las condiciones de la corriente efluente de los tratadores que entra al tambor degasificador de agua (D-4580). Para el D-4580 la temperatura normal es de 120°F, la de operación va de 106 a 120°F y la de diseño es de 170°F. Como se puede ver en la Tabla 3, se han alcanzado temperaturas mayores a 203°F superando los valores permitidos, que no sólo afectan la integridad del tambor si no de los equipos e instrumentos asociados a éste.

3.2.3 GOLPE DE ARIETE EN LÍNEA DE AGUA – VAPOR (R)

El golpe de ariete es básicamente una variación de presiones; se traduce en un choque violento que se produce sobre las paredes de un conducto forzado, cuando el movimiento líquido es modificado bruscamente. En otras palabras, se puede presentar en una tubería que conduzca un líquido hasta el tope, cuando se tiene un frenado o una aceleración en el flujo.

Para nuestro caso de estudio, se presenta un flujo bifásico-tapón (Figura 4) compuesto por tapones de agua y grandes burbujas de vapor (normalmente mucho más largas que un diámetro del tubo) que circula por las tuberías de regeneración en la etapa de lavado. El flujo es dominado por el vapor de 400 psig y su nivel de turbulencia tiende a ser alto, fenómeno observado en altos caudales de gas y líquido.

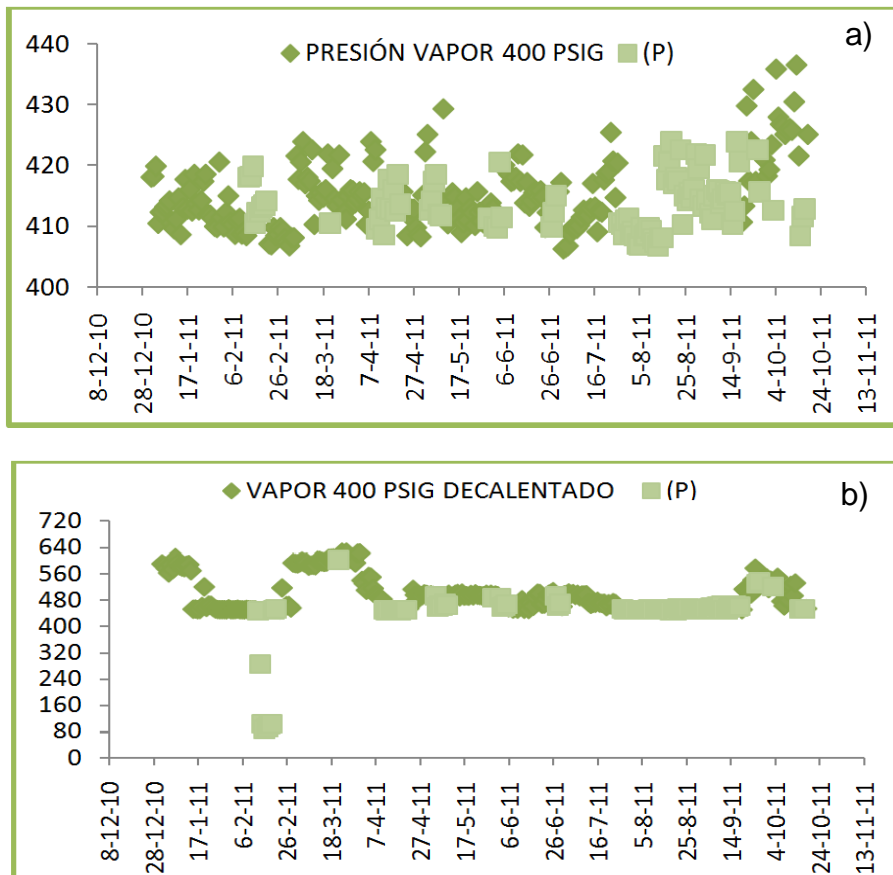
Figura 4. Esquemas flujo tapón asociado al efecto de golpe de ariete.



El golpe de ariete es ocasionado por las siguientes causas (para nuestro caso de estudio son evidenciadas):

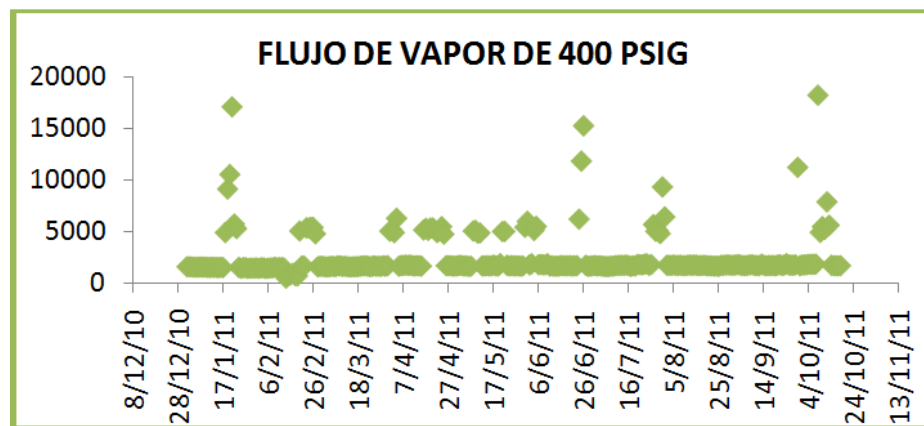
➤ Variación de presiones por la mezcla entre agua – vapor: En primer lugar, la línea que presenta golpe de ariete tiene una presión de diseño de 400 psig, valor superado por la presión del vapor (figura 5.a). Por otro lado, el vapor supera su presión de identidad (400 psig) oscilando entre 405 y 435 psig, indicando sobrepresiones en el sistema. La inestabilidad de esta variable, con ayuda del flujo de agua, causan constantemente una variación de presiones. Por otro lado, los cambios de temperatura en la etapa de lavado pueden causar que la tubería se expanda o contraiga, afectando críticamente la presión en las líneas de agua. Se puede apreciar en la figura 5.b que el vapor que llega al sistema de tratamiento con bauxita diariamente alcanza valores que oscilan entre los 450 y 600 °F. Por estas razones, se hace importante controlar las condiciones de entrada de esta corriente a los tratadores de bauxita.

Figura 5. a) Perfil de presión; b) Perfil de temperatura (vapor de 400 psig).



➤ Aceleración del flujo: se sabe que la válvula que controla el flujo de vapor no está trabajando bien, por lo que a un 1% de abertura maneja un flujo considerable de vapor (Figura 6). Aún en tiempos en los que no hay regeneración y en tiempos de parada, hay un flujo de vapor, indicando que no hay un sello completo de la válvula y un pase de esta corriente que afecta el control de la corriente y puede contribuir a la mala eficiencia del tratador en tiempos de corrida. Se recomienda ajustar los internos, pues esta válvula aún cerrada no es hermética. Todo esto no permite un buen control del flujo y mucho menos de la temperatura de vapor, causante del golpe de ariete generado en las líneas mencionadas anteriormente.

Figura 6. Perfil flujo de vapor de 400 psig.



➤ El adelgazamiento de las tuberías por su uso, puede contribuir significativamente al golpe de ariete: para el proceso de regeneración se debe mantener una temperatura de lavado de 200°F y para el vaporizado de 400°F. En la Tabla 3 y figura 5.b, se evidencian temperaturas superiores a los 400°F para la corriente de agua-vapor y para los lechos de bauxita, en general, lo cual afecta seriamente la integridad de los equipos, altera la normal operación del sistema de tratamiento, y afecta el estado de las tuberías a cargo de este proceso.

La acción a ejecutar para esta problemática (Tabla 4) no se ha llevado a cabo. En el anexo 3, se proponen varios medios para mitigar el golpe de ariete, en el que se

incluye la propuesta de utilizar una válvula decalentadora a mayor profundidad. Queda a evaluación del ingeniero de procesos la decisión.

3.2.4 INUNDAMIENTO TOTAL DEL LECHO DE BAUXITA (R)

Se ha observado que la temperatura en la cima de los tratadores siempre es mayor que en la salida (Tabla 3) por lo cual no es uniforme y cabe la posibilidad de que aún haya canalizaciones en el lecho, dificultando una eficiente regeneración. Para tiempos de operación normal del tratador (adsorción), se identifica un aumento de temperatura a la salida del lecho evidenciándose una operación exotérmica, y para tiempos de regeneración (desorción), se identifica una reducción en la temperatura a la salida del lecho evidenciándose una operación endotérmica.

Las recomendaciones no se han llevado a cabo y están en proceso de evaluación. En este sentido, evaluando la eficiencia de distribución del agua de lavado en los tratadores de bauxita, se debe considerar la medición de temperatura en cada uno de estos; dicha temperatura debe ser uniforme en todo el lecho para garantizar que todo el material adsorbente ha sido regenerado.

➤ Respecto a la recomendación para esta problemática (Tabla 4), elevar la línea de salida de la corriente de agua-vapor aseguraría una inundación total del lecho; sin embargo, esto aumentaría el tiempo de residencia de la corriente, lo que probablemente se vea reflejado en una mayor exposición a altas temperaturas de los internos de los tratadores, tuberías, accesorios y D-4580. Además, en la etapa final de lavado, habría un depósito de agua a la altura de la elevación que no podría ser desplazado por el vapor, debido a que éste no tendría la suficiente presión para hacerlo. Para la situación descrita anteriormente se podría considerar una corriente alterna a la altura de la línea sin modificación con objeto de desplazar por gravedad el agua depositada en la etapa final del lavado.

➤ Por otro lado, se había considerado usar flujo ascendente para la regeneración de los tratadores, lo cual, estudiando los procesos de adsorción (ver anexo 1), resulta ventajoso ya que se consigue una mejor distribución del líquido; sin embargo, también se encontró que a velocidades elevadas y más aún, con un bajo nivel de bauxita, se puede dar lugar a la fluidización de las partículas, lo que provoca colisiones y formación de tinos, levantamiento del lecho con la consecuente caída de presión y pérdida del material.

➤ Si se considera que en el lecho puede existir canalización y que por ello no hay una eficiente distribución del líquido, se podría dar solución a este problema no sólo con la inundación del lecho sino con dos de las siguientes opciones:

- Antes de hacer el lavado con agua, hacer una pequeña vaporización, pues con una mayor temperatura, se asegura una mayor energía cinética de las moléculas, lo que se vería evidenciado en menos material aglomerado a la entrada del tratador.
- Aumentar la presión de llegada del agua de lavado, pues actualmente esta llega con un promedio de 120 psig. Para esto se podría utilizar otra bomba, o incluso, utilizar una mezcla con agua de calderas de la UOP II que llega con un promedio de 600 psig. Aún así, la mejor opción es un mayor flujo de agua, para lo cual se estipula el ideal en 300 GPM.

3.2.5 BAJA DISPONIBILIDAD DE AGUA DE LAVADO (C.R.)

El flujo de agua a los tratadores en la fase de regeneración no ha alcanzado el flujo ideal y ha llegado a un máximo de aproximadamente 222 GPM (Tabla 3) y en promedio no supera los 130 GPM. Por ende no se ha mantenido un flujo constante cercano a los 300 GPM, evidenciándose en la extensión del tiempo de lavado de agua durante la regeneración.

Se verificó con planta de agua la disponibilidad de 300 GPM de agua para la regeneración cada 15 días, y finalmente lo que se concluye junto con tableristas y operadores es que el problema radica fuertemente en el presionamiento de los tratadores a la hora de iniciar el lavado, pues la presión con la cual llega el agua (120 psig) no es la suficiente para entrar a los tratadores. En la Tabla 2 y 3 se evidencia que los tratadores han superado el diferencial de presión de diseño en repetidas ocasiones (ver recomendación de la evaluación anterior, donde se sugiere utilizar agua de calderas de la UOP II a una mayor presión).

La recomendación a esta problemática no se ha llevado a cabo.

➤ En la Tabla 6 se muestra el análisis de agua desmineralizada, agua efluente del tratador y condensado producto. Como se puede apreciar las propiedades del condensado producto saliente del D-4591 son mucho mejores que las del agua desmineralizada que entra por el D-4570. Esto convierte al condensado en un buen candidato para entrar a hacer parte del sistema de lavado en la regeneración de los tratadores. Además, se evidencia una temperatura promedio y máxima para el condensado producto de 174° F y 212°F respectivamente (Tabla 3), casi ideal para ser usado en la etapa de lavado en la que se mantiene una temperatura de 200°F; sin embargo, su presión promedio de 96 psi (Tabla 3), no es suficientemente alta para vencer posibles obstrucciones de flujo por presionamiento en los tratadores. Por otro lado, con el condensado producto se podría evitar el golpe de ariete, esto sí y solo sí, su temperatura es lo suficientemente alta como para evitar usar vapor de 400 psig, y se hace alto respecto a la presión con la que llega a los tratadores.

Tabla 6. Análisis de las corrientes de agua (Pruebas realizadas el 11 de Octubre de 2011)

	Agua Desmineralizada	Agua Efluente	Condensado Producto
pH	6,9	3,5	8,7
Alcalinidad	4	0	4
Sílice	6	18,1	2,2
Conductividad	60	160	37
Dureza	3,6	4	2,7

➤ La recomendación de reformar la llegada del condensado a la sección de tratamiento entre la salida del E-4582 y el J-4565 evita que se comprometa la integridad de varios equipos como son el E-4582 y el D-4580, puesto que el condensado se encuentra a altas temperaturas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que para esta nueva reforma no se puede dejar al E-4582 sin una corriente de enfriamiento. En consecuencia, si se ha de usar el condensado producto, éste vendría a reemplazar al flujo de vapor en la actividad de lavado (debido a su capacidad calorífica); así se emplearían tanto agua desmineralizada que seguiría no sólo cumpliendo con los requerimientos de flujo, sino también con el enfriamiento de la corriente por el lado tubos del E-4582.

3.2.6 TIEMPOS DE MANTENIMIENTO MUY PROLONGADOS (C.R)

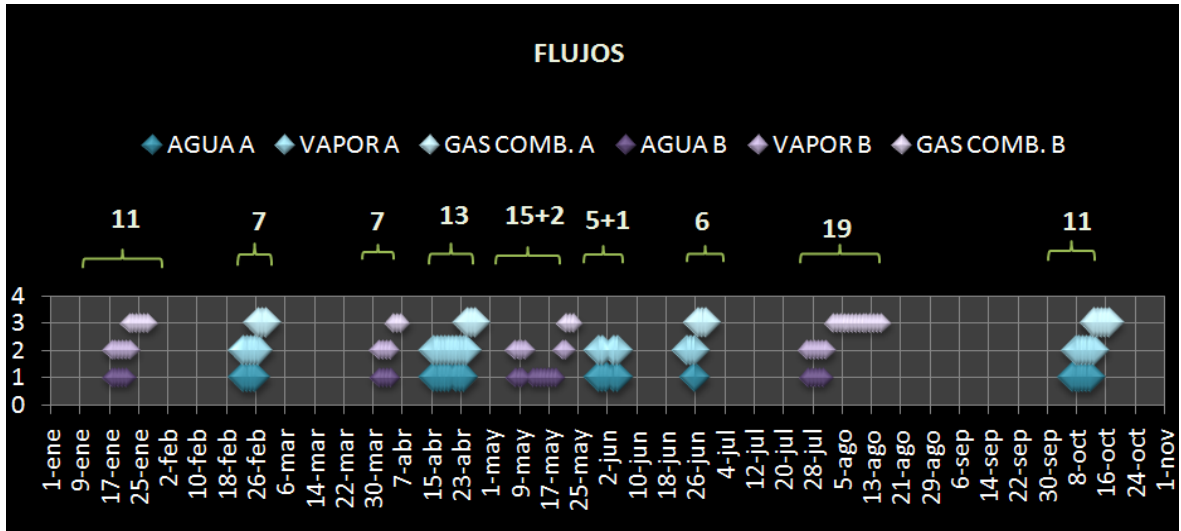
Idealmente, por cada mes (30 días) debería haber 2 regeneraciones, una para cada tratador. Así, teniendo en cuenta los días totales (291), de parada (95) y de operación (196), debería haber 13 regeneraciones en total, 6 para cada tratador.

La evaluación de las regeneraciones llevadas a cabo el año 2011 hasta el 18 de Octubre se muestra en la Figura 7. Para dicha evaluación, se tuvo en cuenta los análisis de elevación de temperatura en los tratadores y el aumento de flujo en las corrientes de agua, vapor y gas natural para el proceso de regeneración. Como se puede observar, para los tratadores D-4570 A y D-4570 B, se han presentado 5 y 4 regeneraciones respectivamente. Además, se determinó que, en promedio, se han superado los 9 días de regeneración con hasta 19 días. Esto indica consecuentemente que el tratador que no está en regeneración ha superado el tiempo máximo de operación sugerido (15 días).

Hasta el momento no se han programado trabajos de mantenimiento 24 horas ni fines de semana. Se recomienda estar programados para la regeneración, asegurando los recursos económicos. Para ello se elaboró un documento técnico

que describe el procedimiento para llevar a cabo la regeneración (Instructivo de Regeneración de la bauxita [33]).

Figura 7. Tiempos de regeneración en cada tratador.



3.2.7 FALTA DE CLARIDAD EN EL CRITERIO PARA INICIAR LA REGENERACIÓN (C.R.)

En condiciones normales debería tratarse 250.000 barriles por cada corrida, que equivale a un flujo de 15.000 BPD durante aproximadamente 15 a 17 días. El flujo promedio ha sido de 9679 BPD y se ha llegado a un flujo máximo de 14753 BPD (Tabla 3); sin embargo, el número de días de operación ha superado los 17, lo que ocasiona consecuentemente la saturación de cada uno de los tratadores, disminuyendo su eficiencia y tiempo de vida útil de la bauxita.

Las recomendaciones hechas para esta causa-raíz no se están llevando a cabo. Para configurar un bloque de cálculo se hace necesario no sólo tener datos del flujo de efluente neto (al cual se accede fácilmente), sino también del contenido de especies ácidas en éste. Para esto se requiere evaluar su acidez periódicamente (de 1 a 2 veces por semana) y hacer el cálculo respectivo que permita determinar

los días en operación de cada tratador. Es importante gestionar que se adopte el procedimiento dado por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) para la medición de especies ácidas en el laboratorio de la GRB.

3.2.8 SUPERAR LOS 200°F EN EL LAVADO CON AGUA (C.R.)

En el análisis hecho a las variables evaluadas, se evidencia que en la etapa de lavado por lo general se supera los 200°F. Si se supera esta temperatura, el efluente de agua que sale de los tratadores tendrá una temperatura aproximada a los 200°F que circulará por el lado tubos del E-4582, poniendo es riesgo su integridad ($T_{\text{diseño}}=250^{\circ}\text{F}$), la del D-4580 ($T_{\text{diseño}}=170^{\circ}\text{F}$) e instrumentos involucrados. Además sobrecalentaría la corriente de entrada por el lado casco del E-4582. Para mayor detalle de esta problemática se puede estudiar junto con el golpe de ariete (Ver sección 3.2.3 de este documento). La acción a ejecutar de esta problemática (Tabla 4) no se ha llevado a cabo debido a la falla por flujo de vapor.

3.2.9 DESGASTE Y NO DISPONIBILIDAD DE LA BAUXITA (C.R.)

Actualmente hay disponibilidad de bauxita; sin embargo, no se ha evaluado el estado actual de la misma (se debe coordinar esta inspección). Para futuras investigaciones de este material adsorbente se puede consultar con el artículo [19] que refiere los puntos geológicos en el mundo donde hay hallazgos de diferentes clases de bauxita.

3.2.10 PRESENCIA DE 1-3 BUTADIENO (C.R.)

Actualmente las recomendaciones de esta problemática (Tabla 4) no se llevan a cabo, debido a la no operatividad de la unidad de Hidroisomerización. Los efectos de no estar en uso la unidad de Hidroisomerización son principalmente que: i) promueve la formación de polímeros, ii) disminuye la eficiencia de la reacción de

alquilación, iii) causa disturbios operacionales en alquilación y iv) aumenta el consumo de ácido sulfúrico y formación de ácido gastado.

3.3 GESTIÓN DEL CONTACTO DE LOS LICENCIADORES PARA EL SOPORTE TÉCNICO DE LA PROBLEMÁTICA

Durante la gestión del contacto con STRATCO (el licenciador de la planta que actualmente pertenece a Dupont), se hizo un estudio previo de los antecedentes con las válvulas y todo lo relacionado con ellas. Tras varias consultas con Andrés A. Rodríguez de Dupont se consiguió que brindara a Ecopetrol el soporte técnico mediante un último correo, que se relaciona en un documento: INQUIETUDES A DUPONT [34] el cual comenta toda la problemática relacionada a este tema. Al término de la práctica empresarial (17 de Enero de 2012), la última razón obtenida fue que se recibiría una respuesta a más tardar en dos semanas.

4 CONCLUSIONES

- Se evaluó el estado actual de las causas-raíz de la problemática, y se hizo una evaluación de factibilidad a las recomendaciones propuestas.
- Se le dio continuidad a algunas de las acciones a ejecutar.
- Se hace necesario la instalación de un nuevo juego de válvulas, pues el actual no proporciona una eficiente hermeticidad debido a las propiedades del material y condiciones de diseño sometidas, ocasionando pase de hidrocarburo hacia líneas de agua –vapor y gas natural, lo que acelera la corrosión en el sistema, reflejándose en altos costos por mantenimiento (instalación de ciegos).
- La fase de regeneración no está siendo eficiente debido a que no se tiene un control total de las condiciones del sistema, superando condiciones normales y de diseño de algunos equipos y soportería. Además no se está cumpliendo actualmente con los tiempos de corrida estipulados. Es importante el cumplimiento de condiciones previstas en el diseño de los procedimientos dados por el licenciador para una eficiente operación.
- Como complemento hacia el objetivo buscado por la GRB, se logró la gestión y comunicación con un agente de DUPONT para dar soporte técnico a la problemática. Se está a la espera de la respuesta a la solicitud enviada.
- Se recopiló información valiosa y útil para la Sección de Tratamiento con Bauxita no sólo para el presente proyecto, sino para proyectos futuros de investigación y personal interesado de Ecopetrol (artículos y anexos). Además, se recopilaron todas las causas-raíz y recomendaciones de varios trabajos de investigación desarrollados en la GRB e ICP para la problemática descrita.

- Se identificaron todas las variables que afectan el proceso de tratamiento, a las cuales se tiene acceso de datos experimentales para finalmente analizarlas y hacerles su respectiva evaluación en cuanto a la problemática tratada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ECOPETROL S.A. Informe investigación incidente D4570B. Barrancabermeja. 2002. 8 p.
- [2] ECOPETROL S.A. Informe final RCA D4570AB. Barrancabermeja. 2005. 34 p.
- [3] ECOPETROL S.A. Anexo2. Análisis de soluciones RCA SD4570AB. Barrancabermeja. 2005. 6 p.
- [4] ECOPETROL S.A. Presentación ALKY – TratadoresRANE. Barrancabermeja. 2008. 50 p.
- [5] ECOPETROL S.A. INFORME ANALISIS BAUXITA REV0. Piedecuesta. 2004. 34 p.
- [6] ECOPETROL S.A. Presentación RCA SD4570AB. Barrancabermeja. 2005. 24 p.
- [7] ECOPETROL S.A. Compromisos próxima reunión. Barrancabermeja. 2008. 3 p.
- [8] ECOPETROL S.A. Análisis de soluciones. RCA DS5670AB, Anexo2. Barrancabermeja. 2008. 6 p.
- [9] ECOPETROL S.A. Informe Eval Bauxita NPA REV0. Piedecuesta. 2004. 35 p.
- [10] ECOPETROL S.A. Recommendations-Alquilación-2005. Piedecuesta. 2005. 1p.
- [11] ECOPETROL S.A. Pendientes. Barrancabermeja. 2004. 4 p.
- [12] ECOPETROL S.A. Evaluación general sistema Tratto EFN. Barrancabermeja. 2005. 11 p.
- [13] ECOPETROL S.A. INFORME ANALISIS BAUXITA REV1. Piedecuesta. 2004. 36 p.
- [14] ECOPETROL S.A. Tratador de bauxita –Ene12. Barrancabermeja. 2002. 10 p.
- [15] ECOPETROL S.A. Manual Planta de Alquilación. Barrancabermeja. 2009. 427 p.
- [16] ECOPETROL S.A. MANUAL ALQUILACIÓN 2001_rev2. Barrancabermeja. 2008. 217 p.

- [17] STRATCO. Manual de operaciones STRATCO. USA.
- [18] ECOPETROL S.A. INFORMACIÓN RECOPIADA DE CORRIENTES Y EQUIPOS. Barrancabermeja. 2011. 69 p.
- [19] B.A Bogatyrev and V.V Zhukov. **Bauxite Provinces of the World**. Geologiya Rudnykh Mestorozhdenni . Vol. 51, No. 5. Pp. 379 – 396. 2009.
- [20] HEINZ HEINEMANN, W.A. LA LANDE, JR AND W.S.W. McCARTER. **Activated Bauxite as a Catalyst for Polymerization of C4 Olefins**. Porocel Corporation , Philadelphia, Pa. 1947.
- [21] HEINZ HEINEMANN, K.A. KRIEGER, AND W.S.W. McCARTER. **Some Physical Properties of Activated Bauxite**. Porocel Corporation , Philadelphia, Pa. 1946.
- [22] J.T. KLOPROGGE, H.D. RUAN, R.L. FROST. **Thermal decomposition of bauxite minerals: infrared emission spectroscopy of gibbsite, boehmite and diaspor**. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 37 1121 – 1129. 2002.
- [23] W.A. La Lande, Jr., W.S.W. McCarter, and J.B. Saborn. **BAUXITE As a Drying Adsorbent**. POROCEL CORPORATION , PHILADELPHIA, PA. 1944.
- [24] Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química. E.J. HENLEY & J.D. SEADER. Editorial Reverté, S.A.
- [25] Operaciones unitarias en INGENIERÍA QUÍMICA 4ª Edición. Warren L. McCabe - Julian C. Smith – Peter Harriot. Editorial Mc Graw Hill.
- [26] OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA 2ª edición. ROBERT E. TREYBAL. Editorial Mc Graw Hill.
- [27] Procesos de transporte y operaciones unitarias 3ª Edición. C.J. Geankoplis. Editorial CECSA.
- [28] ECOPETROL S.A. QUIMICA. Barrancabermeja. 2011. 7 p.
- [29] ECOPETROL S.A. PIM-Z2-REFORMAS ASOCIADAS TRATADOR CON BAUXITA. Barrancabermeja. 2007. 12 p
- [30] ECOPETROL S.A. EVALUACIÓN CAUSAS-RAÍZ, SOLUCIONES Y RECOMENDACIONES. Barrancabermeja. 2011. 20 p.

- [31] ECOPETROL S.A. ANÁLISIS DE VARIABLES. Barrancabermeja. 2011. 216 p.
- [32] ECOPETROL S.A. NUEVO PROYECTO DE ALQUILACI. Barrancabermeja. 2010. 863 archivos, 101 carpetas.
- [33] ECOPETROL S.A. REGENERACIÓN DE LA BAUXITA. Barrancabermeja. 2011. 7 p.
- [34] ECOPETROL S.A. INQUIETUDES A DUPONT. Barrancabermeja. 2011. 5 p.

ANEXO 1

ADSORCIÓN

Operación unitaria en la cual uno o más componentes de una corriente de gas o líquido es adsorbido en la superficies de un sólido y se lleva a cabo una separación, la cual se produce debido a que diferencias de peso molecular o de polaridad dan lugar a que algunas moléculas se adhieren más fuertemente a la superficie que otras. La adsorción suele ocurrir como una monocapa sobre una superficie de los poros, pero a veces se forman varias capas. Cuando el fluido pasa alrededor de la partícula en un lecho fijo, el soluto primero se difunde desde el volumen del fluido hacia toda la superficie exterior de la partícula. Luego, el soluto se difunde hacia el interior del poro hasta la superficie del mismo. Por último, el soluto se adsorbe sobre la superficie.

La alimentación gaseosa circula en sentido descendente a través de uno de los lechos a una tasa de flujo constante mientras que el otro se encuentra en regeneración. El flujo descendente es preferible debido a que el flujo ascendente a velocidades elevadas puede dar lugar a la fluidización de las partículas, lo que provoca colisiones y formación de tinos. Cuando la concentración de soluto en el gas de salida alcanza un cierto valor (lecho casi saturado), o bien para un tiempo previamente establecido, se accionan automáticamente las válvulas con el fin de dirigir la alimentación al otro lecho e iniciar la secuencia de regeneración (mayoría de casos térmica), de modo que ocurre una desorción. Así se recupera el material adsorbido (adsorbato) y el adsorbente sólido queda listo para otro ciclo de adsorción.

La regeneración se realiza pasando un gas caliente a través del adsorbente, generalmente en sentido opuesto. Si el tanque está colocado verticalmente, con frecuencia resulta ventajoso utilizar flujo descendente para evitar el levantamiento del lecho, que provoca trituración de las partículas con la consiguiente caída de

presión y pérdida de material. Sin embargo, con flujo ascendente se consigue una mejor distribución del líquido.

La regeneración puede realizarse con gas inerte caliente, pero generalmente es preferible utilizar vapor de agua cuando el disolvente no es miscible con agua. El vapor de agua condensa en el lecho aumentando la temperatura del sólido y suministrando la energía necesaria para la desorción. El disolvente se condensa, se separa del agua y, con frecuencia, se seca antes de su reutilización. El lecho puede entonces enfriarse y secarse con un gas inerte, no siendo necesario disminuir la temperatura de todo el lecho hasta la temperatura ambiente. Si el gas limpio puede tolerar algo de vapor de agua, la evaporación de agua durante el ciclo de adsorción ayudará a enfriar el lecho y a eliminar parcialmente el calor de adsorción.

La adsorción es un proceso exotérmico y puede originarse un aumento de la temperatura de un lecho entre 10 y 50 °C cuando se tratan vapores con solamente un 1% de adsorbato. En lechos de pequeño diámetro las pérdidas de calor limitarán el aumento de temperatura, pero una unidad grande operará casi adiabáticamente y pueden producirse importantes diferencias en su funcionamiento.

El tamaño del lecho adsorbente está determinado por la velocidad de flujo de gas y por el tiempo de ciclo deseado. El área de la sección transversal se calcula generalmente de tal forma que se obtenga una velocidad superficial de 0,15 a 0,45 m/s, que da lugar a una caída de presión de pocas pulgadas de agua por pie de lecho cuando se utilizan adsorbentes típicos (4 x 10 mallas o 6 x 16 mallas). Para velocidades de flujo muy grandes puede instalarse un lecho rectangular en la parte central de un cilindro horizontal en vez de utilizar un tanque vertical con un diámetro mucho mayor que el espesor del lecho.

Hay cuatro métodos básicos de uso común para el sistema de adsorción cíclico por lotes en lecho fijos. Estos métodos difieren uno de otro principalmente por los medios que se usan para regenerar el adsorbente después del ciclo de adsorción.

1. Ciclo de oscilación de temperatura. También se llama ciclo de oscilación térmica. El lecho de adsorción usado se regenera calentándolo con serpentines de vapor dentro de él, o con una corriente de gas de purga caliente para eliminar el adsorbato. Después, el lecho se enfría, para que se pueda usar para la adsorción en el del ciclo siguiente. El tiempo de regeneración generalmente es de pocas horas.

2. Ciclo de oscilación de presión. En este caso el lecho se desorbe reduciendo la presión a temperatura esencialmente constante y luego purgando el lecho a baja presión con una pequeña fracción de la corriente del producto. Este proceso para gases usa un ciclo muy corto para la regeneración comparado con el ciclo de oscilación de temperatura.

3. Ciclo de remoción con gas de purga inerte. En este ciclo el adsorbato se elimina haciendo pasar un gas inerte o que no se adsorbe a través del lecho. Esto disminuye la presión parcial o la concentración alrededor de las partículas y sobreviene la desorción. Los tiempos de regeneración son de algunos minutos.

4. Ciclo de desplazamiento y purga. La presión y la temperatura se mantienen esencialmente constantes como al emplear gas de purga, pero se utiliza un gas o un líquido que se adsorbe con más fuerza que el adsorbato y lo desplaza. También los ciclos suelen ser de pocos minutos.

PROPIEDADES FISICAS DE LOS ADSORBENTES

- ✓ Tamaño: de (50 micras/0,1 mm) – 12 mm.

- ✓ Estructura muy porosa, con numerosos poros finos cuyo volumen alcanza hasta el 50% del volumen total de la partícula.
- ✓ No deben ofrecer una caída de presión del flujo muy grande, ni deben ser arrastrados con facilidad por la corriente que fluyen. Deben tener adecuada consistencia para que no se reduzca su tamaño al ser manejados o para que no se rompan al soportar su propio peso en lechos del espesor requerido. Si se van a sacar y meter con frecuencia de los recipientes que los contienen, deben fluir libremente.

Puesto que los sólidos poseen frecuentemente una capacidad muy específica para adsorber grandes cantidades de ciertas sustancias, es evidente que la naturaleza química del sólido tiene mucho que ver con sus características de adsorción. Aún así, la simple identidad química no es suficiente para caracterizar su utilidad.

La mayor parte de los adsorbentes son materiales altamente porosos y la adsorción tiene lugar fundamentalmente en el interior de las partículas sobre las paredes de los poros en puntos específicos. Puesto que los poros son generalmente muy pequeños, el área de la superficie interna es varios órdenes de magnitud superior al área externa (su gran número de poros proporciona una enorme superficie para la adsorción) y puede alcanzar valores tan elevados como 2000 m²/g.

Parece esencial una gran superficie por unidad de peso para todos los adsorbentes útiles. En particular, en el caso de la adsorción de gases, la superficie significativa no es la superficie total de las partículas granulares que generalmente se utilizan, sino la superficie mucho mayor de los poros internos de las partículas.

*Los adsorbentes con mayor tamaño de poro son preferibles para el caso de líquidos.

ADSORBENTE DE INTERÉS

Alúmina activada. Para preparar este material se activa el óxido de aluminio hidratado calentándolo para extraer el agua. Las áreas superficiales fluctúan entre 200 y 500 m²/g con un promedio de diámetro de poro de 20 a 140 Å. El producto poroso se puede conseguir como gránulos o polvos; se utiliza principalmente como desecante de gases y líquidos. Puede reactivarse para volverse a utilizar.

Bauxita. Es cierta forma de la alúmina hidratada natural que debe activarse mediante calentamiento a temperaturas que varían entre 450 a 1 500 °F, con el fin de activar su poder de adsorción. Se utiliza para decolorar productos del petróleo y para sacar gases; se puede reactivar mediante calentamiento.

TIPOS DE ADOSRCIÓN

- *Adsorción física*, o adsorción de “van der Waals”, fenómeno fácilmente reversible, es el resultado de las fuerzas intermoleculares de atracción entre las moléculas del sólido y la sustancia adsorbida. Por ejemplo, cuando las fuerzas atractivas intermoleculares entre un sólido y un gas son mayores que las existentes entre moléculas del gas mismo, el gas se condensará sobre la superficie del sólido, aunque su presión sea menor que la presión de vapor que corresponde a la temperatura predominante. Cuando ocurra esta condensación, se desprenderá cierta cantidad de calor, que generalmente será algo mayor que el calor latente de evaporación y parecida al calor de sublimación del gas. La sustancia adsorbida no penetra dentro de la red cristalina ni se disuelve en ella, sino que permanece totalmente sobre la superficie. Sin embargo, si el sólido es muy poroso y contiene muchos pequeños capilares, la sustancia adsorbida penetrará en estos intersticios si es que la sustancia humedece al sólido. La presión de

vapor en el equilibrio de una superficie líquida, cóncava y de radio de curvatura muy pequeño, es menor que la presión de una gran superficie plana; la extensión de la adsorción aumenta por consecuencia. En cualquier caso, la presión parcial de la sustancia adsorbida es igual, en el equilibrio, a la presión de la fase gaseosa en contacto; disminuyendo la presión de la fase gaseosa o aumentando la temperatura, el gas adsorbido se elimina fácilmente o se desorbe en forma invariable. Las operaciones industriales de adsorción, dependen de su reversibilidad para recuperar el adsorbente (que se vuelve a utilizar), para la recuperación de la sustancia adsorbida o para el fraccionamiento de mezclas. La adsorción reversible no se concreta a los gases, también se observa en el caso de líquidos.

- *Quemisorción*, o adsorción activada, es el resultado de la interacción química entre el sólido y la sustancia adsorbida. La fuerza de la unión química puede variar considerablemente y puede suceder que no se formen compuestos químicos en el sentido usual; aún así, la fuerza de adhesión es generalmente mucho mayor que la observada en la adsorción física. El calor liberado durante la quemisorción es comúnmente grande, es parecido al calor de una reacción química. El proceso frecuentemente es irreversible; en la desorción, de ordinario se descubre que la sustancia original ha sufrido un cambio químico.

La misma sustancia, que en condiciones de baja temperatura, sufre esencialmente sólo la adsorción física sobre un sólido, algunas veces exhibe quemisorción a temperaturas más elevadas; además, los dos fenómenos pueden ocurrir al mismo tiempo.

PUNTOS CLAVE

- En casi todos los sistemas de adsorción, a medida que aumenta la temperatura la cantidad adsorbida por el adsorbente va disminuyendo con rapidez, lo cual es útil porque la adsorción normalmente se hace a la temperatura ambiente y la desorción se puede efectuar aumentando la temperatura.
- Al disminuir la presión se reducirá la cantidad de adsorbato sobre el adsorbente
- Como regla general, los vapores y gases se adsorben más fácilmente cuanto mayor es su peso molecular y menor su temperatura crítica, aunque las diferencias químicas como el grado de insaturación de la molécula también influyen sobre el grado de adsorción.
- La adsorción y desorción repetidas, con frecuencia alteran las características de un adsorbente particular, debido tal vez a los cambios progresivos en la estructura de los poros dentro del sólido.
- Se debe utilizar la temperatura máxima adecuada durante el mezclado, puesto que la mayor viscosidad resultante del líquido aumenta tanto la rapidez de difusión del soluto como la facilidad con la cual pueden moverse las partículas de adsorbente a través del líquido.
- Por lo común, la adsorción en el equilibrio disminuye ligeramente a mayores temperaturas, pero la disminución está más que compensada por la mayor rapidez de aproximación al equilibrio. Algunas veces, las operaciones se realizan en el punto de ebullición del líquido, si esta temperatura no afecta a las sustancias presentes.
- Como la cantidad de solución que generalmente se trata es muy grande en comparación con la cantidad de adsorción que ocurre de ordinario puede

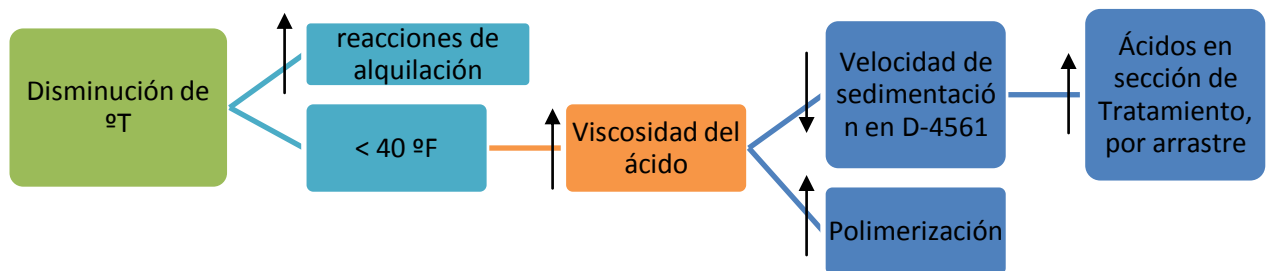
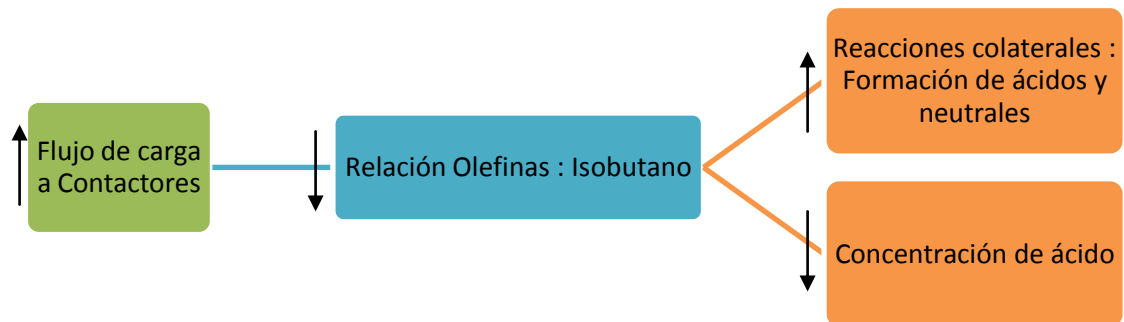
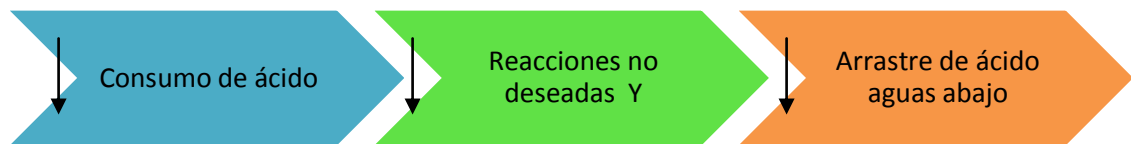
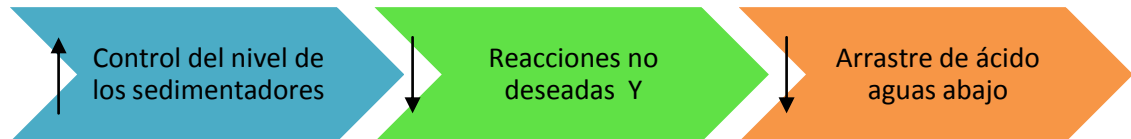
ignorarse el aumento de temperatura provocado por el desprendimiento del calor de adsorción.

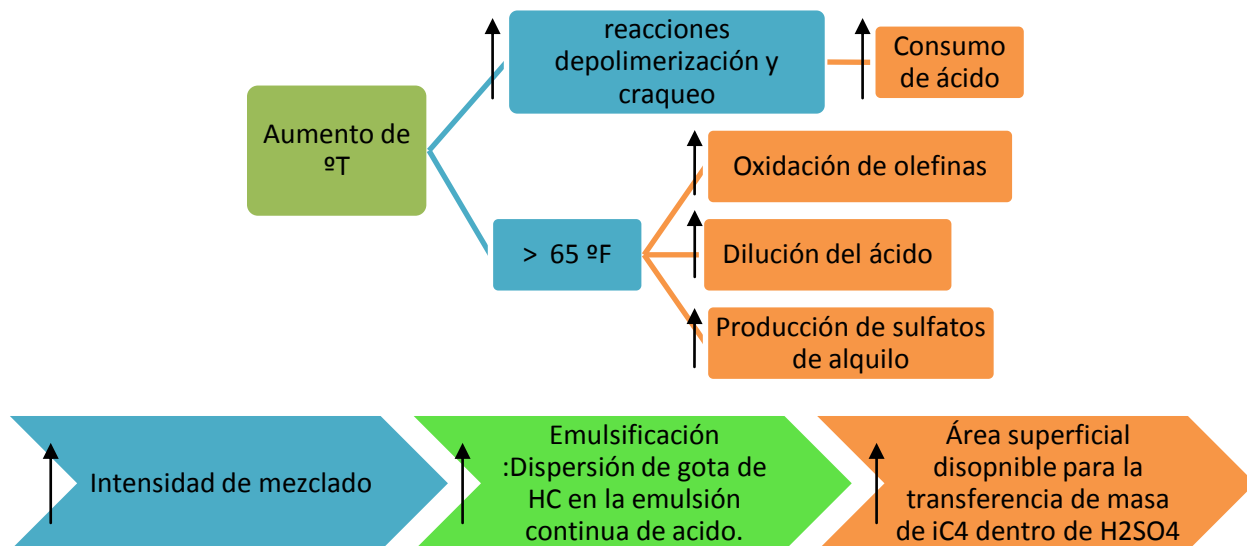
- Si el adsorbato es el producto deseado, puede desorberse por contacto del sólido con un disolvente distinto del que contenía la solución original, un disolvente en que el adsorbato sea más soluble. Esto puede hacerse lavando la torta en el filtro, o dispersando el sólido en cierta cantidad del disolvente. Si el adsorbato es volátil, puede desorberse haciendo que la presión parcial del adsorbato sobre el sólido se reduzca al pasar vapor o aire caliente a través del sólido.

ANEXO 2

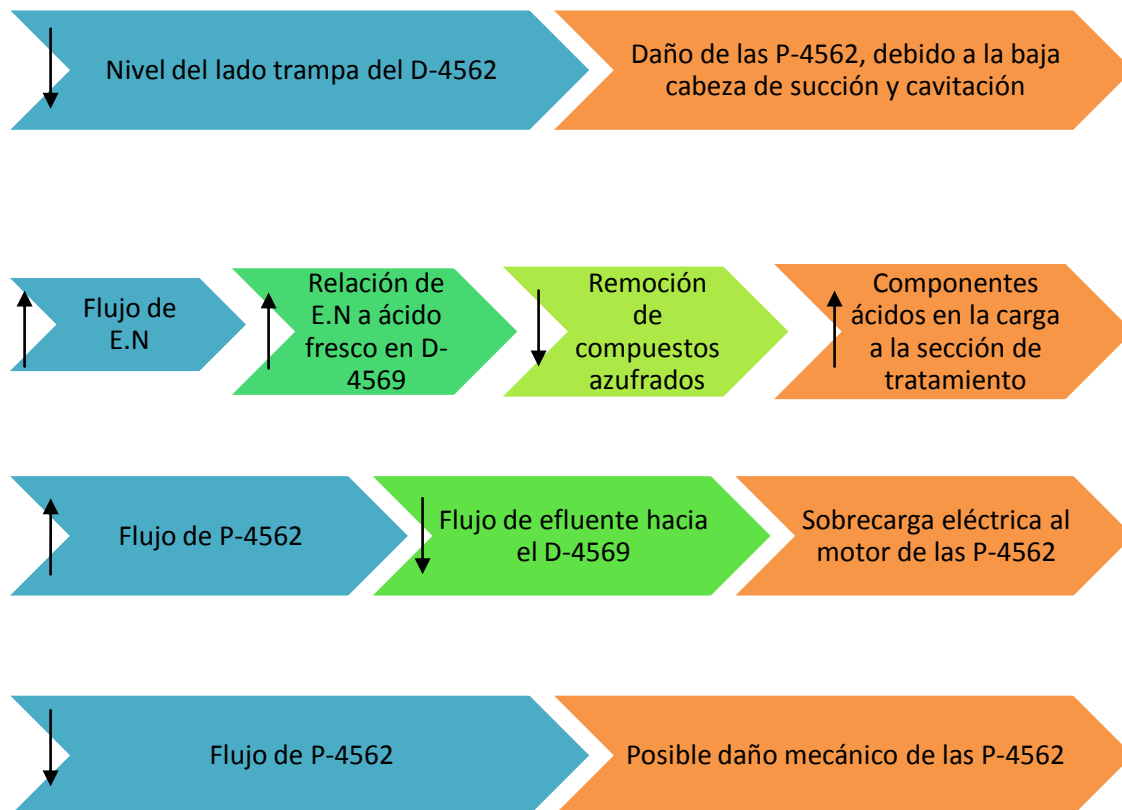
DIAGRAMAS QUÉ PASA SI?

➤ SECCIÓN DE REACCIÓN

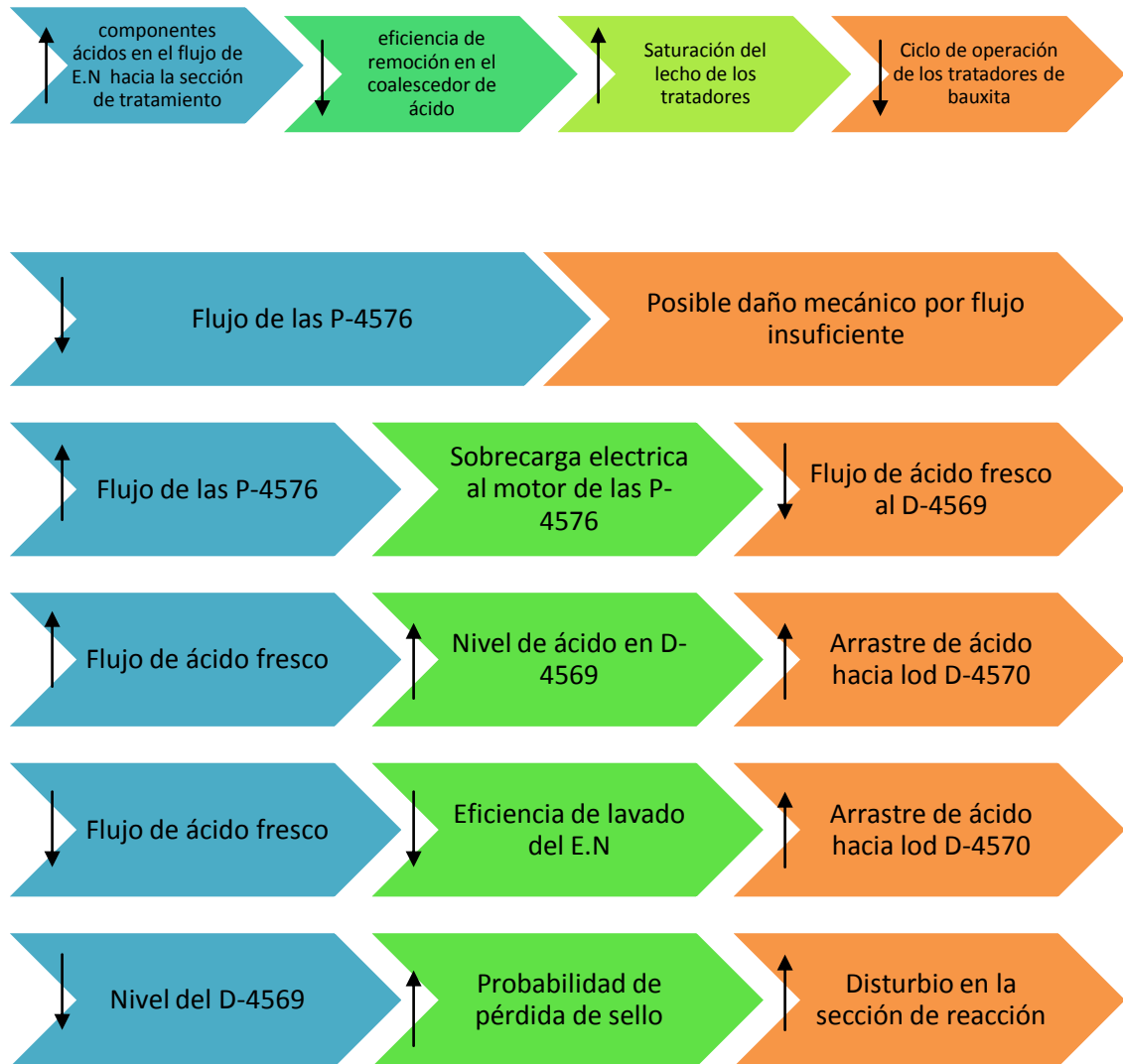


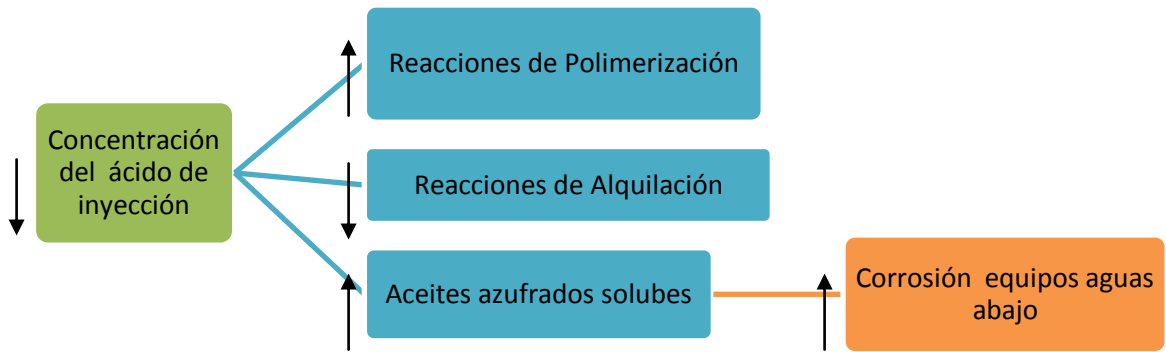
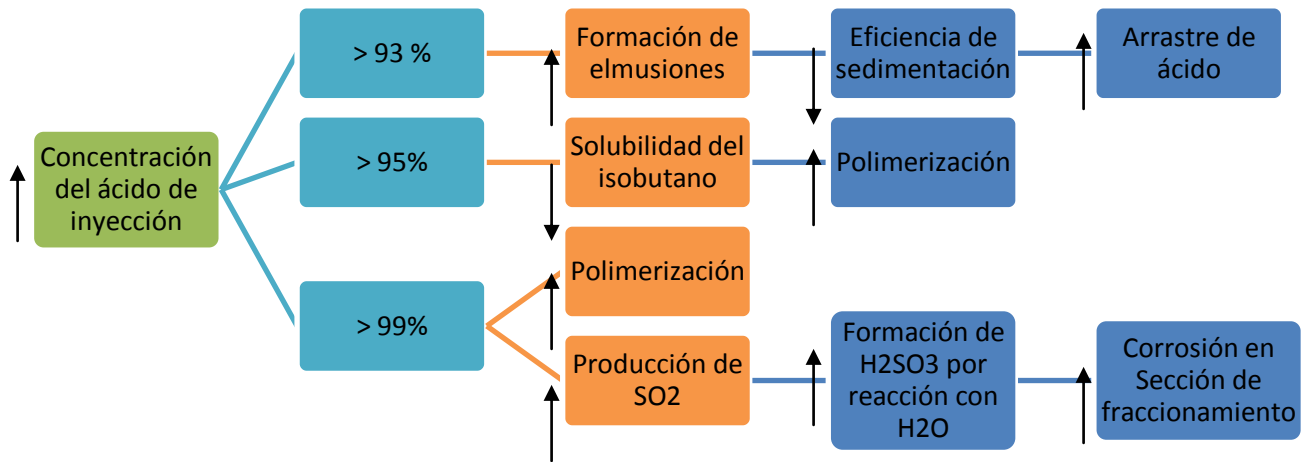


➤ SECCIÓN DE REFRIGERACIÓN

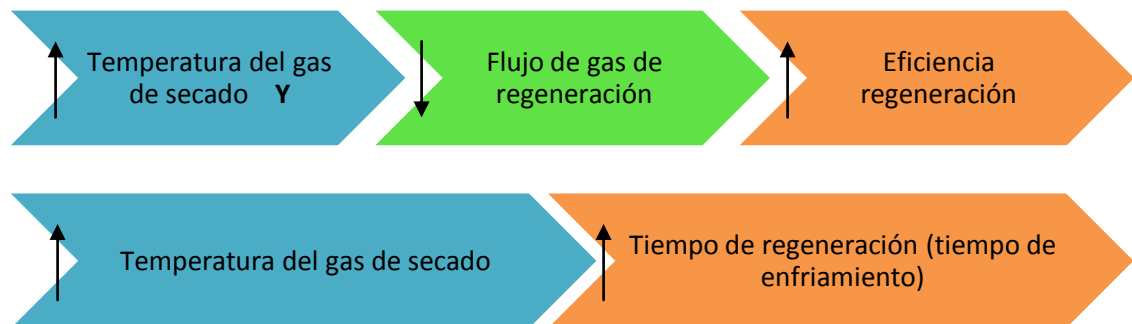


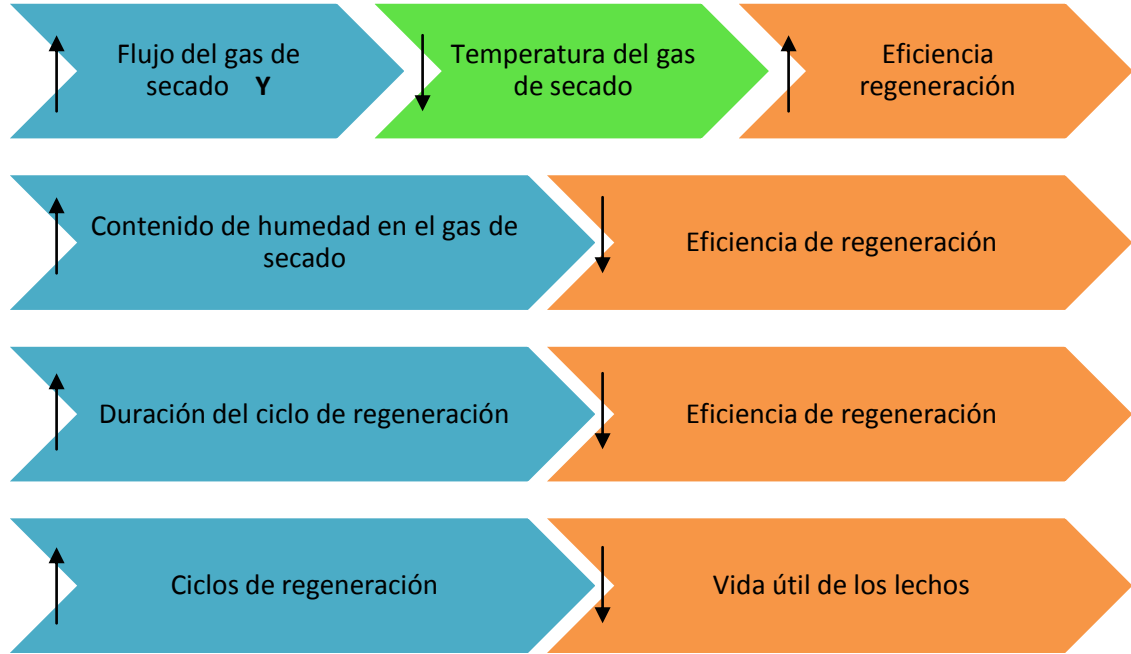
➤ SECCIÓN DE TRATAMIENTO





5.3.1 REGENERACIÓN





➤ **SECCIÓN DE FRACCIONAMIENTO**



ANEXO 3

BASES TEORICAS PARA EL PROBLEMA DE GOLPE DE ARIETE

Se denomina golpe de ariete al choque violento que se produce sobre las paredes de un conducto forzado, cuando el movimiento líquido es modificado bruscamente. En otras palabras, el golpe de ariete se puede presentar en una tubería que conduzca un líquido hasta el tope, cuando se tiene un frenado o una aceleración en el flujo.

El golpe de ariete es uno de los principales causantes de avería en tuberías e instalaciones hidráulicas. Básicamente es una variación de presiones.

Se origina debido a que el fluido es ligeramente elástico. En consecuencia, cuando se cierra bruscamente una válvula instalada en el extremo de una tubería, las partículas del fluido que se han detenido son empujadas por las que vienen inmediatamente detrás y que siguen aún en movimiento. Esto origina una sobrepresión que se desplaza por la tubería a una velocidad que puede superar la velocidad del sonido en el fluido. Esta sobrepresión tiene dos efectos: comprime ligeramente el fluido, reduciendo su volumen, y dilata ligeramente la tubería. Cuando todo el fluido que circulaba en la tubería se ha detenido, cesa el impulso que la comprimía y, por tanto, ésta tiende a expandirse. Por otro lado, la tubería que se había ensanchado ligeramente tiende a retomar su dimensión normal. Conjuntamente, estos efectos provocan otra onda de presión en el sentido contrario. El fluido se desplaza en dirección contraria pero, al estar la válvula cerrada, se produce una depresión con respecto a la presión normal de la tubería. Al reducirse la presión, el fluido puede pasar a estado gaseoso formando una burbuja mientras que la tubería se contrae. Al alcanzar el otro extremo de la tubería, si la onda no se ve disipada, por ejemplo, en un depósito de presión atmosférica, se reflejará siendo mitigada progresivamente por la propia resistencia a la compresión del fluido y la dilatación de la tubería.

$$\text{Fuerza de golpe de ariete} \propto \frac{\text{Longitud del tubo}}{\text{Tiempo de cerrado de la válvula}}$$

1. CONSECUENCIAS

- Roturas en los accesorios instalados en los extremos (grifos, válvulas, etc.)
- Estropea el sistema de abastecimiento de fluido, a veces hace reventar tubería de hierro colado, ensancha la de plomo, arranca cosas instalados, etc.

2. DESCRIPCIÓN DEL PATRON DE FLUJO EN EL DUCTO

Cuando fluyen simultáneamente dos fases en un ducto, las fases de los componentes se distribuyen espacialmente formando una variedad de configuraciones, denominadas patrones de flujo que representan al fenómeno de las dos fases.

Dependiendo de las velocidades del gas y el líquido, se pueden observar diferentes patrones de flujo entre los cuales se tiene: flujo de burbuja, flujo tapón, flujo espumoso y flujo anular.

En los sistemas de tuberías la presencia de estos patrones se puede resumir en flujo de burbujas, de gotas, de películas o bien una combinación de ellas. Por otra parte los patrones de flujo también dependen de los accesorios presentes en las instalaciones como lo son: codos para cambio de dirección, bridas en la extensión de las tuberías, así como su posición la cual puede ser vertical, horizontal o inclinada es decir, de topología de la instalación.

Las variables que fijan los patrones y que describen el comportamiento de las fases son la velocidad de las fases, el flujo másico, el flujo volumétrico, las fuerzas interfaciales, los tensores originados en la interface, y en la pared del

recipiente que los contiene, el fenómeno de atomización, la calidad de la mezcla y la fracción volumétrica de las fases.

El flujo bifásico en conducción adquiere diversas configuraciones que son caóticas y difíciles de clasificar. Básicamente los patrones de flujo se definen de acuerdo a la similitud de la geometría interfacial y a los mecanismos que dominan la caída de presión, así como la transferencia de calor y de masa.

Para nuestro caso de estudio, se presenta un flujo bifásico compuesto por agua – vapor que circulan por las tuberías de regeneración en la etapa de lavado. Se presenta flujo tapón, el cual es dominado en este caso por el vapor de 400 psig. Este flujo está formado por tapones del líquido y grandes burbujas de gas que son normalmente mucho más largas que un diámetro del tubo. Los tapones del líquido se mueven a una frecuencia promedio que depende de las velocidades superficiales del líquido y del gas, las longitudes del tapón y de la burbuja varían de una manera aleatoria. La fracción volumétrica del gas en el tapón líquido suele ser mayor al 10%. Su nivel de turbulencia tiende a ser alto, fenómeno observado en altos caudales de gas y líquido.

En la figura que se presenta a continuación se describen algunos patrones.

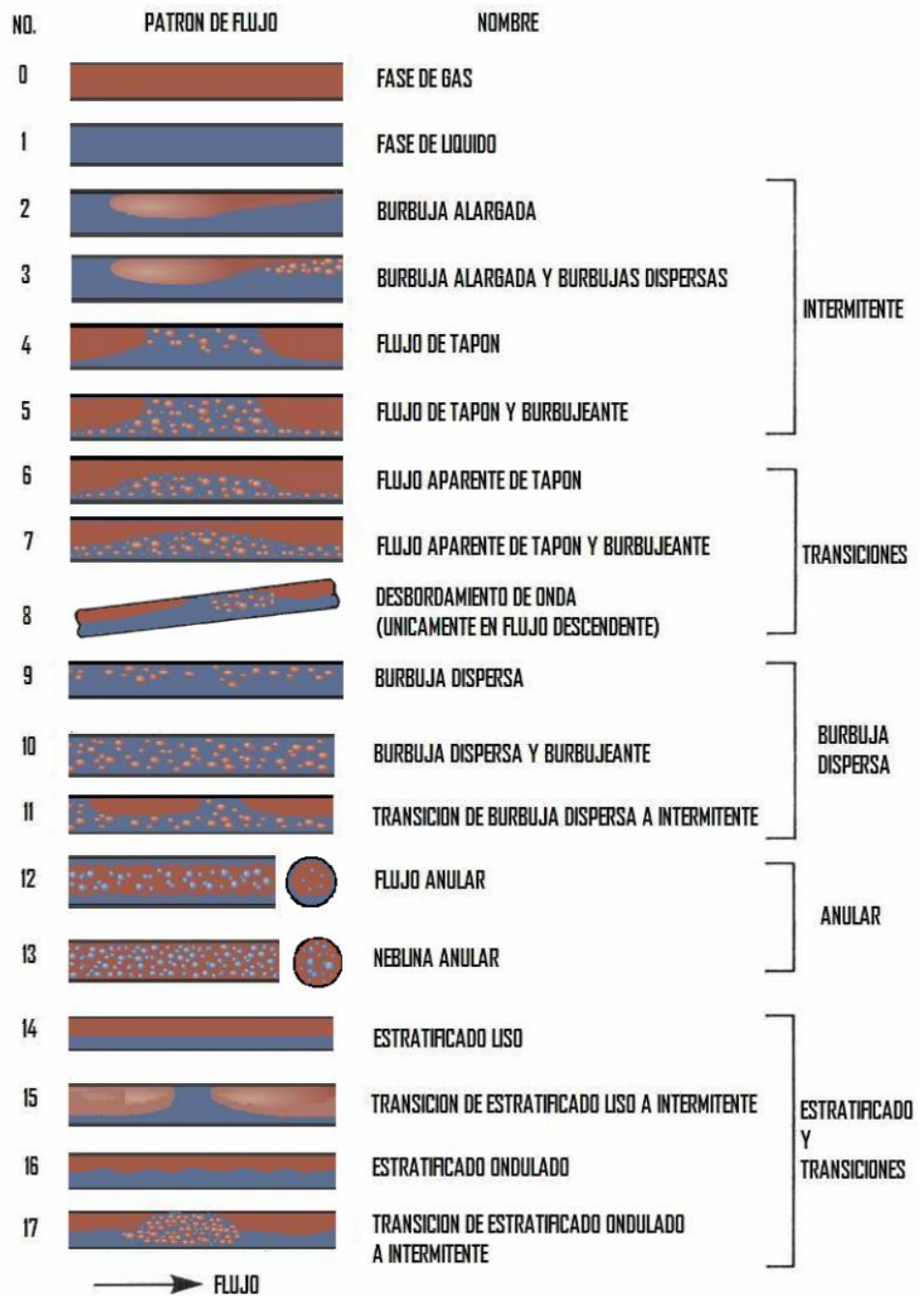


Figura 1.1 Patrones y transición de flujos bifásicos [13]

3. MÉTODOS PARA REDUCIR EL EFECTO DEL GOLPE DE ARIETE

El golpe de ariete es combatido en la práctica por varias medidas.

1. Limitación de la velocidad en tuberías.
2. Cierre lento de válvulas o registros. Construcción de piezas que no permitan la obstrucción muy rápida.
3. Empleo de válvulas o dispositivos mecánicos especiales. Válvulas de alivio, cuyas descargas impiden valores excesivos de presión.
4. Fabricación de tubos con espesor aumentado, teniendo en cuenta la sobrepresión admitida.
5. Construcción de pozos de oscilación, capaces de adsorber los golpes de ariete, permitiendo la oscilación del agua. Esta solución es adoptada siempre que las condiciones topográficas sean favorables y las alturas geométricas pequeñas. Los pozos de oscilación deben ser localizados tan próximos como sea posible de la casa de máquinas.
6. Instalación de cámaras de aire comprimido que proporcionen el amortiguamiento de los golpes. El mantenimiento de estos dispositivos requiere ciertos cuidados, para que sea mantenido el aire comprimido en las cámaras.

En algunos casos se construyen válvulas interruptoras especiales, provistas de un resorte que opera contra la presión del agua, de manera que inmediatamente la velocidad empieza a disminuir como resultado de la detención de la bomba, la válvula comienza a cerrarse, lográndose el cierre completo antes del regreso de la columna líquida.

4. DISPOSITIVOS QUE CONTROLAN EL GOLPE DE ARIETE

4.1 Válvulas de asiento

Controlan la lentitud del cierre de válvula, estrangulando gradualmente la corriente de fluido.

4.2 Volante de inercia

Consiste en incorporar a la parte rotatoria del grupo de impulsión un volante cuya inercia retarde la pérdida de revoluciones del motor, y en consecuencia, aumente el tiempo de parada de la bomba, con la consiguiente minoración de las sobrepresiones. Este sistema crea una serie de problemas mecánicos, mayores cuanto mayor sea el peso del volante.

4.3 Chimeneas de equilibrio

Consiste en una tubería de diámetro superior al de la tubería, colocada verticalmente y abierta en su extremo superior a la atmósfera, de tal forma que su altura sea siempre superior a la presión de la tubería en el punto donde se instala en régimen permanente. Este dispositivo facilita la oscilación de la masa de agua, eliminando la sobrepresión de parada, por lo que sería el mejor sistema de protección si no fuera por aspectos constructivos y económicos. Sólo es aplicable en instalaciones de poca altura de elevación.

4.4 Calderín

Consiste en un recipiente metálico parcialmente lleno de aire que se encuentra comprimido a la presión manométrica. Existen modelos en donde el aire se encuentra aislado del fluido mediante una vejiga, con lo que se evita su disolución en el agua. El calderín amortigua las variaciones de presión debido a la expansión prácticamente adiabática del aire al producirse una depresión en la tubería, y posteriormente a la compresión, al producirse una sobrepresión en el ciclo de parada y puesta en marcha de una bomba. Su colocación se realiza aguas debajo de la válvula de retención de la bomba. Se instala en derivación y con una válvula de cierre para permitir su aislamiento.

4.5 Válvulas de alivio rápido

Son dispositivos que permiten de forma automática y casi instantánea la salida de la cantidad necesaria de agua para que la presión máxima en el interior de la tubería no exceda un valor límite prefijado. Suelen proteger una longitud máxima de impulsión del orden de 2 km. Los fabricantes suelen suministrar las curvas de funcionamiento de estas válvulas, hecho que facilita su elección en función de las características de la impulsión.

4.6 Válvulas anticipadoras de onda

Estas válvulas están diseñadas para que se produzca su apertura en el momento de parada de la bomba y cuando se produce la depresión inicial,

de tal forma que cuando vuelva a la válvula la onda de sobrepresión, ésta se encuentre totalmente abierta, minimizando al máximo las sobrepresiones que el transitorio puede originar.

4.7 Ventosas

Dependiendo de su función, permiten la eliminación del aire acumulado en el interior de la tubería, admisión de aire cuando la presión en el interior es menor que la atmosférica y la eliminación del aire que circula en suspensión en el flujo bajo presión.

Se prefieren trifuncionales:

- 1ª función: introducir aire cuando en la tubería se extraiga el fluido
- 2ª función: extracción de grandes bolsas de aire que se generen, para evitar que una columna de aire empujada por el fluido acabe reventando codos, o como es más habitual en las crestas de las redes donde acostumbran a acumularse las bolsas de aire.
- 3ª función: extracción de pequeñas bolsas de aire, debido a que el sistema de las mismas ventosas por lado tienen un sistema que permite la extracción de grandes cantidades y otra vía para las pequeñas bolsas que se puedan alojar en la misma ventosa.

4.8 Válvulas de retención

Estas válvulas funcionan de manera que sólo permiten el flujo de agua en un sentido, por lo que también se conocen como *válvulas anti-retorno*. Entre

sus aplicaciones se puede señalar:

- En impulsiones, a la salida de la bomba, para impedir que ésta gire en sentido contrario, proteger la bomba contra las sobrepresiones y evitar que la tubería de impulsión se vacíe.
- En impulsiones, en tramos intermedios para seccionar el golpe de ariete en tramos y reducir la sobrepresión máxima.
- En hidrantes, para impedir que las aguas contaminadas retornen a la red.

En redes de distribución con ramales ascendentes, para evitar el vaciado de la mismas al detenerse el flujo.

4.8.1 Válvulas de retención tipo clapeta

Sus limitaciones son:

- No se pueden instalar verticalmente cuando la corriente va hacia abajo.
- No funcionan correctamente cuando la velocidad del agua sobrepasa los 1.5 m/s.
- No funcionan correctamente cuando las presiones estáticas empiezan a ser elevadas. Si se trabaja con más de 3 atmósferas de presión, conviene asegurarse de la fiabilidad de la válvula de clapeta simple que se trate de elegir.
- No funcionan correctamente cuando las sobrepresiones del golpe de ariete empiezan a ser importantes. En ocasiones, la presión estática puede ser baja, pero una gran longitud de la tubería puede dar lugar a golpes de ariete excesivos para ciertas válvulas de retención.
- No funcionan correctamente cuando los caudales son importantes.
- Su funcionamiento es incorrecto cuando se cierran bruscamente, produciendo vibraciones que pueden dañar las tuberías y otras válvulas.

4.8.1.1 Válvulas de retención tipo clapeta simple

Son de fácil construcción. El disco se levanta por acción del agua hasta unos noventa grados. Su cierre suele ser muy brusco y entonces produce un golpetazo que repercute en las tuberías y en otros elementos adyacentes y puede originar un fuerte golpe de ariete.

4.8.1.2 Válvulas de retención tipo clapeta simple con contrapeso

Aminorar en cierta medida la brusquedad en el cierre.

4.8.1.3 Válvulas de retención tipo clapeta simple con corto recorrido de clapeta

Supone una mejora extraordinaria en la válvula simple, pues al tener la clapeta un menor recorrido no produce apenas golpetazo y puede admitir velocidades y presiones mayores. Esta válvula se puede utilizar también con aguas sucias.

4.8.1.4 Válvulas de retención tipo clapeta simple con sistema amortiguador y contrapeso

Supone una mejora sobre las anteriores. El contrapeso permite regular in situ la cadencia del cierre hasta optimizarla. El amortiguador deja que

la válvula se cierre en un 90 % antes de empezar a actuar, y de esta manera, el 10 % final del recorrido de la clapeta está controlado. Esta es una de las pocas válvulas de retención que se pueden emplear con aguas negras. La máxima velocidad admisible es del orden de 2 m/s y puede permitir presiones de hasta 10 ó 20 atmósferas, dependiendo de los materiales de su construcción.

4.8.1.5 Válvulas de retención con clapeta de eje semicentrado

Es la válvula de clapeta que se puede considerar más fiable. En las anteriores, la clapeta gira por medio de una bisagra colocada en su extremo, mientras que en esta válvula la clapeta gira en dos semiejes descentrados que evitan que se produzca golpetazo. Es la que produce menos pérdida de carga, son de coste más bien elevado y no se deben usar con aguas negras.

4.8.1.6 Válvulas de retención de semiclapeta doble o de disco partido

La clapeta o disco se ha partido en dos y las bisagras se colocan en un eje centrado. Los semidiscos van ayudados en el cierre por unos muelles, pero a pesar de ello, no se deben colocar para flujos verticales hacia abajo. No suele dar golpetazo si está debidamente diseñada y construida con los materiales adecuados. Admite velocidades de hasta 5 m/s y puede construirse para grandes presiones. Suele venderse para ser encajada entre dos bridas, al no disponer de bridas propias.

4.8.2 Válvulas de retención de disco sobre eje longitudinal centrado

Las características de estas válvulas de retención, también conocida como válvulas de retención Williams–Hager, permiten las siguientes aplicaciones:

- Son recomendables cuando se esperen presiones de trabajo elevadas o cuando se puedan producir fuertes sobrepresiones por golpe de ariete.
- Admiten velocidades del flujo de agua de hasta 3 m/s.
- Se pueden colocar en cualquier posición, incluso verticalmente, cuando se quiera que retengan flujos de agua dirigidos hacia abajo.
- Se deben colocar exclusivamente en instalaciones de aguas limpias, nunca en aguas negras.