

**EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS DE CAUSA-RAÍZ DE LA PÉRDIDA DE
CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO SE-2505 DE LA UNIDAD
DEMEX DE LA GRB**

LAURA VIVIANA ANGARITA PINZÓN

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

2014

**EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS DE CAUSA –RAÍZ DE LA PÉRDIDA DE
CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO SE-2505 DE LA UNIDAD
DEMEX DE LA GRB**

LAURA VIVIANA ANGARITA PINZÓN

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

Director

FERNANDO VIEJO ABRANTE

Ingeniero Químico, Ph.D

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

2014

DEDICATORIA

Le dedico este proyecto a mi mamá Yolanda porque a pesar de las dificultades siempre me ha apoyado y ha confiado en cada una de mis decisiones, a ella por ser el motor que mueve mi vida y alimenta mi alma.

Dedico todos mis esfuerzos académicos a la hermosa familia que Dios me dio, a Cesar y mis hermanos Christopher, Jessica y Jennifer pues ellos llenan de ilusión cada uno de mis días y es por ellos que intento ser cada vez mejor para que se sientan orgullosos de mí, siendo la motivación que me inspira a superarme.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas y cada una de las personas que hicieron parte de mi camino, por todo su apoyo brindado y la confianza que siempre pusieron en mí, a mi familia por haber sido mi soporte incondicional y a todos mis amigos Sebastián, Andrés, Camila, Ana María, Oscar, Fede, Sergio, Leo, Cristian, Felipe, Leidy, Andrey y David por haber escrito junto a mí una de las historias más bonitas e importantes de mi vida, la etapa universitaria.

Agradezco a mi alma máter por haberme hecho una gran profesional y a la Escuela de Ingeniería Química por toda la orientación y enseñanza brindada, al profesor Crisóstomo Barajas y a mi director Fernando Viejo a quienes estaré eternamente agradecida por todo su apoyo durante la culminación de mi carrera profesional.

Finalmente agradezco a ECOPETROL por la gran oportunidad de permitirme formar parte de su equipo de trabajo y haber fortalecido mis conocimientos como ingeniera, a mis tutores Yenny y Gleidy por todos los conocimientos brindados y especialmente a mis grandes amigos Steven, Stefanny, Johan y Joel a quienes quiero inmensamente por brindarme tanta felicidad.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. METODOLOGIA	20
1.1 Estudio del proceso de la Unidad Demex	20
1.2 Identificación del problema	21
1.3 Recopilación de datos históricos y creación de una línea de tiempo	21
1.4 Simulación del caso real y el caso diseño	21
1.5 Identificación de las hipótesis causales	22
1.6 Análisis de causa-raíz (RCA)	22
1.7 Planteamiento y estudio de las alternativas de solución a la causa raíz	22
1.8 Evaluación de la matriz de criterios de las alternativas elegidas	23
1.9 Acciones a implementar y recomendaciones	23
1.10 Actualización de los datasheets de los intercambiadores de calor de las plantas Demex, Unibón, Generación de hidrógeno y Viscorredutora II	23
2. RESULTADOS	24
2.1 Recopilación de datos históricos. Análisis de variables relevantes	24
2.2 Simulación del caso real y el caso diseño	25
2.3 Análisis de causa-raíz (RCA)	28
2.3.1 Diseño inadecuado del sistema de enfriamiento	28
2.3.2 Metalurgia inapropiada de la tubería	29
2.3.3 Parámetros de calidad del agua de enfriamiento deficientes	32
2.4 Planteamiento y estudio de las alternativas de solución	32
2.4.1 Rediseño del sistema SE-2505 A-F en paralelo	32
2.4.2 Reducir el área total de transferencia del sistema SE-2505 A-F	34

2.4.3	Realizar una integración térmica con el sistema SE-2503	35
2.4.4	Realizar cambio de metalurgia por una aleación más resistente	36
2.5	Evaluación de las alternativas en una matriz de criterios	47
3	CONCLUSIONES	40
4.	RECOMENDACIONES	42
	CITAS BIBLIOGRÁFICAS	44
	BIBLIOGRAFÍA	46
	ANEXOS	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema de la Unidad Demex	15
Figura 2.	Sistema de intercambiadores de calor SE-2505.	17
Figura 3.	Esquema de la metodología utilizada para el análisis y evaluación del problema.	20
Figura 4.	Tasa media entre falla (TMEF) y tasa de falla de los intercambiadores de calor.	24
Figura 5.	Configuración del sistema SE-2505 A-F en paralelo.	33
Figura 6.	Integración térmica con el sistema de intercambiadores SE-2503.	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Fechas de modificación de los haces de los intercambiadores E-2505 A-H.	24
Tabla 2.	Datos establecidos por diseño del agua de enfriamiento y solvente.	25
Tabla 3.	Datos reales tomados en planta del agua de enfriamiento y solvente (21/03/2013).	26
Tabla 4.	Resultados de la simulación del caso diseño.	27
Tabla 5.	Resultados de la simulación del caso real.	27
Tabla 6.	Causa raíz y problemática de sus consecuencias	30
Tabla 7.	Evaluación económica estimada de las alternativas.	37
Tabla 8.	Puntuación de los criterios establecidos para la valoración de cada alternativa.	38
Tabla 9.	Matriz de criterios empleada en la valoración de cada alternativa.	39

LISTA DE ANEXOS

Anexo A.	Columna de destilación atmosférica y de vacío.	47
Anexo B.	Composición del solvente empleado en el proceso de extracción líquido-líquido en la Unidad Demex.	48
Anexo C.	Imagen intercambiadores SE-2505 A-F y Torre T-2501.	48
Anexo D.	Imagen intercambiadores SE-2505 G-H y Torre T-2521.	49
Anexo E.	Intercambiadores de calor tipo AJS.	50
Anexo F.	Valoración de la matriz RAM.	50
Anexo G.	Eventos de falla de cada intercambiador de calor.	53
Anexo H.	Condiciones del sistema y rangos óptimos de operación.	56
Anexo I.	Diagrama de flujo obtenido de los intercambiadores de calor en PROII.	58
Anexo J.	RCA diseño inadecuado del sistema: Causas probables y descartadas.	59
Anexo K.	Fase envolvente del solvente	61
Anexo L.	Muestra de las cañuelas del haz de tubos estudiado	62
Anexo M.	Factores principales que generan el fenómeno de corrosión por descincificación.	62
Anexo N.	Composición química de la tubería Admiralty en el sistema.	63
Anexo O.	RCA parámetros de calidad del agua de enfriamiento deficientes: causas probables y descartadas.	63
Anexo P.	Composición química del Dúplex SAF 2507.	67
Anexo Q.	Alternativas de solución descartadas.	67
Anexo R.	Análisis de los PRO-CONTRA de las alternativas aceptadas	69
Anexo S.	Cálculos económicos estimativos de las alternativas	71

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS DE CAUSA-RAÍZ DE LA PÉRDIDA DE CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO SE-2505 DE LA UNIDAD DEMEX DE LA GRB.*

AUTOR: LAURA VIVIANA ANGARITA PINZÓN**

PALABRAS CLAVES: Intercambiadores de calor, corrosión, análisis causa-raíz, solvente, DMO, rotura de tubería.

En la Unidad de extracción Demex de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja, se han presentado eventos de rotura a causa de corrosión por descincificación de la tubería, eventos que han generado grandes pérdidas por lucro cesante. A causa de esta problemática se han desarrollado diversos estudios con el fin de determinar los factores causantes de los eventos y generar recomendaciones, sin embargo no se ha realizado ninguna acción relevante para la mitigación del problema.

El presente proyecto tuvo como propósito llevar a cabo un análisis de causa-raíz de mayor rigor con objeto de esclarecer e identificar los problemas causantes de la falla existente, determinando la causa-raíz del problema y, con base en ello, proponer alternativas que permitan incrementar la confiabilidad del sistema de enfriamiento de la Unidad.

Del estudio realizado se determinó una causa raíz y dos causas probables, donde la causa-raíz es la incorrecta distribución de las cargas térmicas debido al diseño inadecuado del sistema y las causas probables son la metalurgia inapropiada y la baja calidad de agua de enfriamiento.

Así mismo se analizaron varias alternativas de solución de las cuales fueron evaluadas cuatro, donde tres de ellas atacan directamente la causa-raíz del problema y la otra la ataca de manera indirecta, la evaluación de estas alternativas se realizó con base en una matriz de criterios, que arrojó como resultado que las alternativas más viables a implementar son el rediseño del sistema con distribución de flujo en paralelo y la reducción del área de transferencia.

* Trabajo de Grado

** *Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Fernando Viejo Abrante.*

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION ROOT-CAUSES'S ANALYSIS TO LOSS RELIABILITY IN THE COOLING SYSTEM SE-2505 IN THE DEMEX UNIT FROM THE GRB.*

AUTHOR: LAURA VIVIANA ANGARITA PINZÓN**

KEYWORDS: Heat exchanger, corrosion, root-causes's analysis, solvent, DMO, pipe break.

In the extraction Demex Unit of Gerencia de la Refinería of Barrancabermeja's (GRB), events of dezincification corrosion pipe rupture have occurred, It events have generated large losses for lost profits. Because this problem have been developed many studies to determinate the causative factors of the events and generate recommendations, however there has been no significant action to mitigate the problem.

This project was aimed to conduct a root cause analysis more rigorous in order to clarify and identify the issues causes of the existing fault, determining the root cause of the problem, and based on this, propose alternatives to increase the reliability of the cooling systems Unit.

The study executed a root cause was determined also two probable causes, where the root cause is the incorrect distribution of the duty due to improper system design and the probable causes were the improper metallurgy and the low quality of cooling water.

Besides several alternative solutions were analysis which were four evaluated, where three of them directly attack the root cause on problem and the other attacked indirectly, the evaluation of these alternatives was made based on a criteria matrix, resulting the most viable alternatives are to implement the redesign of the distribution system with parallel flow and reduced transfer area.

* *Bachelor Degree Project*

** *Physicochemical Engineerings Faculty. Chemical Engineering School. Director: Dr. Fernando Viejo Abrante.*

INTRODUCCIÓN

La Gerencia Complejo Barrancabermeja (GRB) de ECOPETROL tiene una capacidad para refinar 250.000 barriles por día (BDP) de crudo y convertirlos en productos valiosos como diésel, nafta, jet, productos petroquímicos como bases lubricantes, parafinas, aromáticos y polietilenos, así como también dióxido de carbono para las industrias gaseosas entre otros.

Este crudo, luego de pasar por un proceso de desalinización en el cual se retiran lodos, sales y aguas de crudo, es enviado a la columna de destilación atmosférica de la cual se obtienen cuatro productos principales: gas atmosférico de cima, nafta virgen sin estabilizar, destilados medios y, finalmente, el residuo pesado. Este residuo pasa a continuación a una columna de destilación al vacío en la que se separan productos como gasóleo, que serán enviados principalmente a las Unidades de Craqueo Catalítico (URC's) y, como remanente, los residuos más pesados llamados 'fondos de vacío' que se envían a la Unidad Demex (Anexo A).

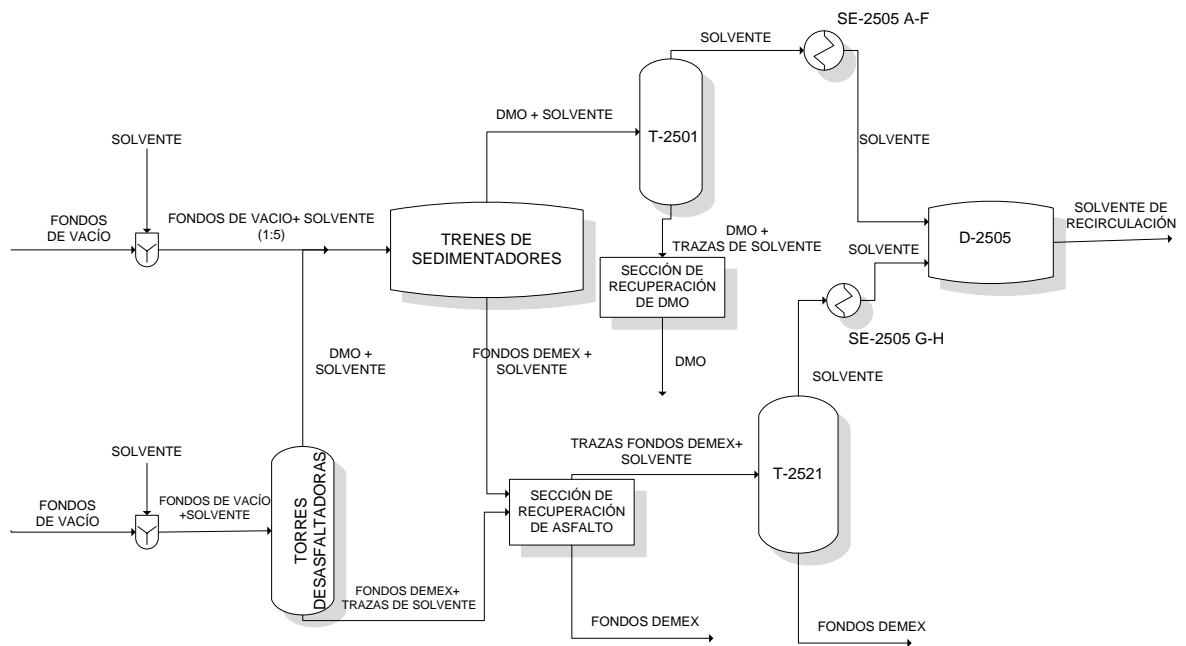
Aproximadamente 45.000 barriles por día (BPD) de fondos de vacío son enviados a tratamiento en la Unidad Demex con el fin de obtener de ellos aceite demetalizado (DMO) y fondos Demex. El DMO es enviado a la Unidad de Hidrotratamiento Unibón o a las URC's directamente, mientras que los fondos Demex son enviados a la planta Viscorredutora II que se encarga de extraer combustóleo a través de craqueo térmico y enviar el resultante como asfalto.

Funcionamiento de la Unidad Demex

La Unidad Demex es una planta cuyo proceso unitario principal es la extracción líquido-líquido, con el cual se busca separar la fracción más liviana de los fondos de vacío, el DMO. Este proceso es llevado a cabo en dos trenes de sedimentadores (zona de extracción horizontal) y dos torres desasfaltadoras (zona

de extracción vertical) (Figura 1). Esta Unidad fue puesta en marcha el 17 de diciembre de 1979 con capacidad de carga de 38.000 BPD de fondos de vacío y el 13 de noviembre de 1992 experimentó una ampliación con objeto de aumentar su capacidad hasta los 45.000BPD que se procesan actualmente [1]. En el proceso de extracción líquido-líquido se emplea una relación volumétrica de carga de fondos de vacío: solvente de 1:5 que garantiza la efectiva extracción de DMO del hidrocarburo pesado [2]. Esto corresponde a 225.000BDP de solvente aproximadamente. La composición de dicho solvente consiste en una mezcla de hidrocarburos livianos donde alrededor del 85% (en volumen) es básicamente n-butano e isobutano, alrededor del 12% es propano, y el resto se reparte en otras fracciones de etano, etileno, propileno, etc.(Anexo B).

Figura 1. Esquema de la Unidad Demex.



En el proceso de separación de las zonas de extracción se obtienen dos corrientes: DMO+ solvente (95%) y Fondos Demex + solvente (5%). Ambas corrientes pasan a un proceso de recuperación de solvente con el fin de recuperar

alrededor del 99% del solvente ingresado que luego será recirculado en el proceso. El 90% de este solvente es recuperado de la torre separadora T-2501, en la que se separa el DMO del solvente que sale del tren de sedimentadores, mientras que del 3 al 5% de solvente se obtiene de la torre separadora T-2521 de la sección de recuperación de asfalto; el porcentaje restante se recupera en la T-2504 de la sección de recuperación de DMO la cual no será tomada en cuenta para este trabajo. En los dos primeros casos, el solvente sale de las torres a una temperatura aproximada de 280°F (en forma gaseosa) y debe ser reingresado al sistema a una temperatura de 150°F (en forma líquida). Esto se logra con el sistema de enfriamiento SE-2505 que luego de condensar y sub-enfriar el solvente lo envía al tambor D-2505 para ser recirculado a una presión controlada de 230 psi.

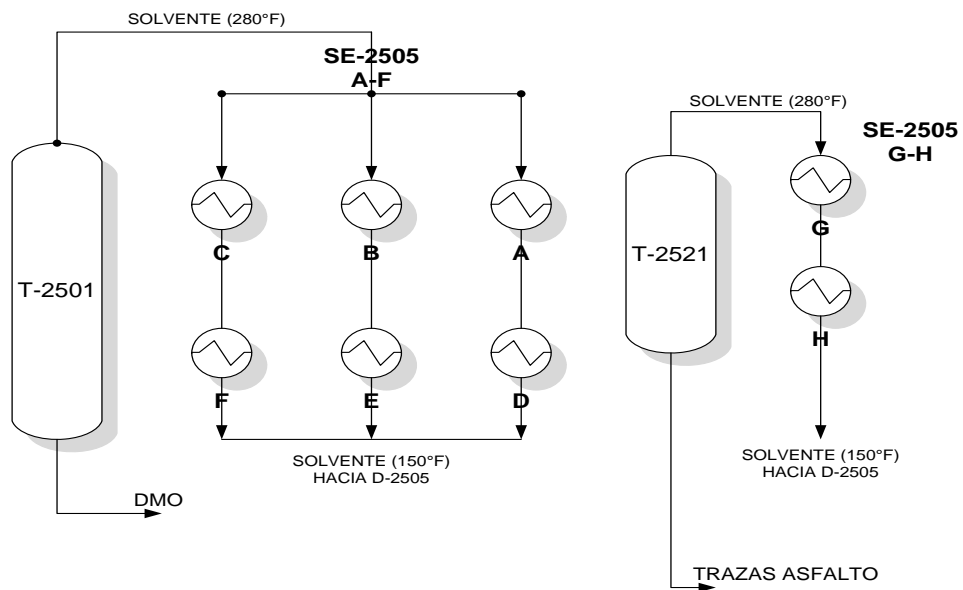
Si el solvente no entra totalmente condensado podría causar un sobrepresionamiento en el D-2505, lo que haría disparar el sistema de alarma de alta integridad de la planta Demex, provocando que el sistema de control decida cortar el envío de vapor a todos los calentadores de ésta. Por otro lado, el bajo nivel de solvente líquido en el tambor D-2505 podría causar un corte en la succión de las bombas de recirculación e impedir la extracción en el sistema. Este hecho finalmente provocaría un “shutdown” en toda la planta o un “slowdown” en caso de rotura de un haz. Eventualmente, esto conduciría a una posible reducción de carga de crudo en toda la refinería.

Funcionamiento y problemática del sistema de enfriamiento SE-2505

Para alcanzar el enfriamiento del solvente, la Unidad Demex contaba inicialmente con tres parejas de intercambiadores de calor (SE-2505 A-F) y con la ampliación de la capacidad llevada a cabo en 1992, se incluyó una pareja más (SE-2505 G-H) al sistema de enfriamiento (Figura 2). Los intercambiadores trabajan en serie-paralelo, donde los superiores de cada pareja (A, B, C y G) tienen como función

principal condensar el solvente que llega a 280°F, mientras que los intercambiadores inferiores (D, E, F y H) tienen como función sub-enfriar el solvente a la temperatura requerida por el proceso (150°F). Cabe mencionar que la pareja G-H fue diseñada con la misma capacidad que sus homologas A-F, con el fin de que funcionaran como respaldo y, por lo tanto, la cantidad de solvente debía ser distribuida entre las 4 parejas. Sin embargo, a pesar de existir un alineamiento de solvente proveniente de la T-2501 hacia la pareja G-H, el sistema hidráulico no permite una correcta distribución, adicionalmente el solvente proveniente de la torre T-2521 en ocasiones contiene trazas de asfalto ocasionando taponamiento y contaminación de los intercambiadores, por lo que en la actualidad dicha pareja funciona como “sacrificio”, con el fin de evitar la contaminación del resto del sistema. Es por ello que cada pareja A-F recibe aproximadamente 67.500 BPD de solvente de la torre T-2501 (Anexo C), mientras que la pareja G-H recibe entre 15.000 y 18.000 BPD de la torre T-2521 (Anexo D).

Figura 2. Sistema de intercambiadores de calor SE-2505.



Por otro lado, todos los intercambiadores de calor son del tipo tubo y carcasa AJS (Anexo E), donde por el lado de los tubos circula agua de enfriamiento, y por el

lado de la carcasa circula solvente. Los haces de los tubos de los intercambiadores están fabricados en latón Admiralty, una aleación Cu-Zn que tiene una vida útil estimada de 15 años. Sin embargo, a los tres años de puesta en marcha la Unidad (1982), dichos haces comenzaron a dar muestra de principios de corrosión por descincado, presentándose el primer evento de rotura en 1988. Desde entonces, el sistema de intercambio de calor ha venido perdiendo confiabilidad de tal forma que, los intercambiadores más críticos están presentando una tasa media entre falla (TMEF) de 2-3 años, lo cual ocasiona severos problemas en el correcto funcionamiento de la planta.

Esta rotura de haz genera paso de solvente al cabezal de agua de enfriamiento ocasionando contaminación del sistema con gases altamente inflamables y un elevado riesgo de incendio en otras unidades de proceso. Tal es el caso de la torre de enfriamiento T-2945 de la Unidad de Servicios Industriales de Balance (SIBA) encargada del envío de agua de enfriamiento a todas las plantas de Balance. Asimismo, durante los últimos 3 años, se han presentado dos eventos slowdown: en marzo-abril de 2011 y enero-febrero de 2013 con 24 y 25 días de baja carga, respectivamente [3-4]. Estos eventos han causado grandes pérdidas económicas (alrededor de MUSD\$ 2,3 de lucro cesante), no sólo por reducción de carga, sino también por costos de mantenimiento y reentubado de los intercambiadores de calor, además de los problemas medioambientales y de imagen de la empresa inherentes, como el ocurrido en Julio de 2009 [5] (Valoración matriz RAM) (Anexo F).

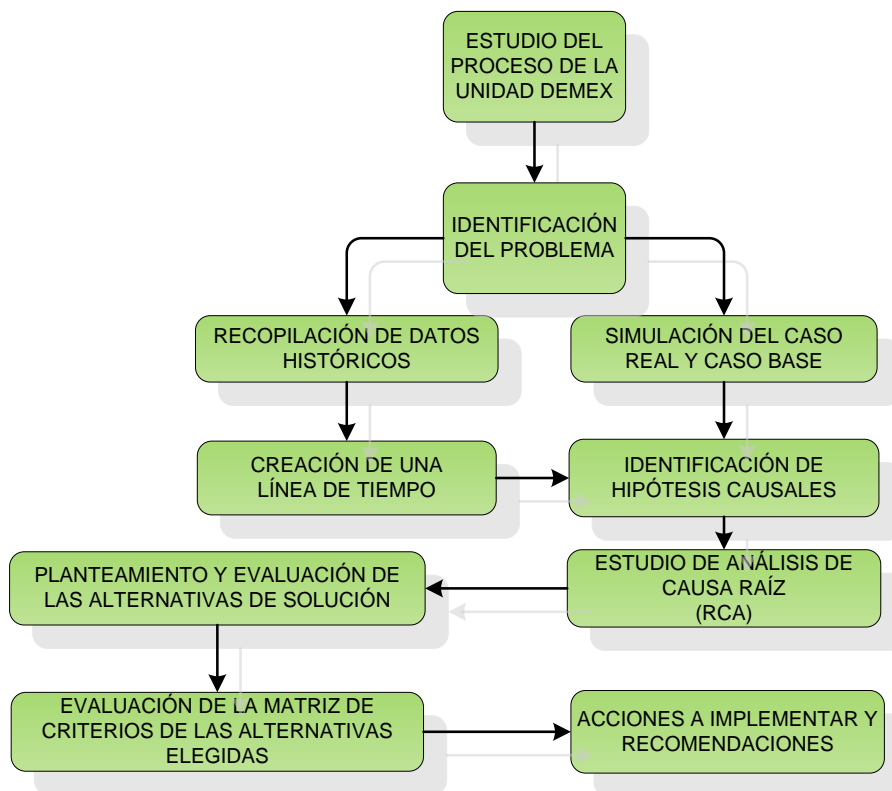
En el año 2011 se dio a conocer toda la problemática por parte de los ingenieros y del equipo núcleo de la planta Demex, e incluso se llegó a realizar un análisis de causa-raíz (RCA), pero no se ejecutó ninguna acción relevante para la mitigación del problema [6-7]. Es por ello que la presente práctica empresarial tuvo como propósito llevar a cabo un RCA de mayor rigor con objeto de esclarecer e

identificar los problemas causantes de la falla existente y, con base en ello, proponer alternativas que permitan incrementar la confiabilidad del sistema de enfriamiento de solvente de la Unidad Demex. Es de aclarar que, este trabajo tomo como caso de estudio las parejas A-F. La pareja G-H se tomó como un sistema aparte y no fue evaluada en las alternativas propuestas, pues sus condiciones de funcionamiento son distintas. No obstante, sí se generaron algunas recomendaciones al respecto.

1. METODOLOGIA

En la Figura 3 se esquematiza la metodología usada para el estudio, análisis y solución de la problemática del sistema de enfriamiento SE-2505 A-F.

Figura 3. Esquema de la metodología utilizada para el análisis y evaluación del problema



1.1 Estudio del proceso de la Unidad Demex

Se llevó a cabo el estudio del proceso en la Unidad Demex abarcando operaciones unitarias, identificación de equipos, ventanas operativas (VO), guías de control (GC) y rangos óptimos de operación, para conocer todas las variables que podrían estar implicadas en el sistema SE-2505 y cuáles podrían afectar de

manera directa e indirecta al óptimo funcionamiento de éste. Se realizó la lectura de manuales y guías [8-9-10] para comprender el funcionamiento de la Unidad, y tener un esquema global de las implicaciones de falla del sistema de enfriamiento.

1.2 Identificación del problema

En base a la información suministrada por la Coordinación de Ingeniería de Procesos y el Departamento de Refinación de Fondos, se identificó cuál era el problema principal generado en el sistema de enfriamiento de solvente haciendo un análisis inicial de las hipótesis planteadas en estudios RCA anteriores [6, 11-12].

1.3 Recopilación de datos históricos y creación de una línea de tiempo

Se recopilaron todos los antecedentes (1979-2013) de cada uno de los intercambiadores de calor con base en los archivos de seguimiento, en los cuales se lleva el registro de cada intervención realizada a cada uno de ellos y el posterior diagnóstico generado por el ingeniero de equipo estático encargado [13-14-15-16]. Así mismo, se llevó a cabo un filtro de los eventos de shutdown y slowdown de la unidad para identificar las fallas a través del tiempo (1979-2013) del sistema de enfriamiento con el fin de ubicar cada evento con su respectiva descripción en una línea de tiempo, para así tener un amplio espectro de la hoja de vida de cada intercambiador de calor.

1.4 Simulación del caso real y el caso diseño

Se realizó la simulación en el software PRO II del caso real con datos tomados previamente en campo el día 21 de marzo de 2013 con una carga de 45.200BPD de fondos de vacío, 228.000BPD de circulación de solvente, 17.500GPM de agua de enfriamiento con una presión de descarga de agua de enfriamiento de 36psi y

una presión de retorno de 30psi. Así mismo, teniendo en cuenta los “datasheets” generados por la firma diseñadora *Foster Wheeler USA Corporation* [17-18], se llevaron a cabo diversas simulaciones de los intercambiadores tomando como base únicamente los datos indicados en dichos datasheets. Después de realizadas las simulaciones, se contrastaron ambos casos para determinar los valores aproximados del factor de ensuciamiento de cada uno de los intercambiadores. Adicionalmente se llevó a cabo un análisis comparativo de la capacidad de carga calórica que podía soportar cada intercambiador, análisis del cual se pudo determinar si la distribución de cargas en el diseño era la correcta.

1.5 Identificación de las hipótesis causales

A partir de la línea de tiempo generada y la simulación del caso diseño y real se procedió a identificar las posibles causas de los eventos de falla para su posterior análisis y escrutinio, teniendo en cuenta también los RCA realizados previamente.

1.6 Análisis de causa-raíz (RCA)

Posteriormente, se realizó un estudio riguroso de cada hipótesis causal, con la asesoría de los ingenieros de las diferentes áreas de la planta, con el fin de desprender de cada una de ellas las causas más probables que podrían estar generándolas, tomando como base para descartar o aprobar dichas hipótesis, documentos, archivos, datos y experiencias del personal. Luego de descartar y aprobar, cada una de las causas probables identificadas para cada hipótesis, se determinaron las posibles causas-raíz del problema con objeto de proponer alternativas de solución para cada una de ellas.

1.7 Planteamiento y estudio de las alternativas de solución a la causa raíz

Identificadas las causas-raíz se procedió a generar posibles alternativas de solución para cada una de ellas, atacándolas de manera directa o indirecta. Luego de su respectivo estudio en un debate con el equipo núcleo de la planta, se descartaron y validaron las alternativas de solución más convenientes.

1.8 Evaluación de la matriz de criterios de las alternativas elegidas

Consecutivamente, se procedió a generar una matriz de criterios con la valoración porcentual de cada ítem que se podría ver implicado con la implementación de la alternativa, con el fin de determinar la alternativa que arrojara un mejor porcentaje de evaluación a partir de la apreciación de cada uno de los factores que se podrían ver implicados.

1.9 Acciones a implementar y recomendaciones

Al concluir el análisis de la matriz de criterios, y luego de su posterior debate con el grupo de ingenieros de la planta, finalmente se determinó cuál sería la alternativa más viable a llevar a cabo, así como también se generaron algunas recomendaciones y acciones a implementar para mitigar la tasa de falla existente y aumentar la vida útil de los equipos.

1.10 Actualización de los datasheets de los intercambiadores de calor de las plantas Demex, Unibón, Generación de hidrógeno y Viscorreductora

Se realizó la actualización de los datasheets correspondientes a los intercambiadores de calor de las plantas Demex, Unibón, Generación de Hidrógeno y Viscorreductora II que en su totalidad sumaron 65 datasheets. Estos documentos no son anexados dentro de este trabajo debido a que es información confidencial de la empresa ECOPETROL, sin embargo, cabe resaltar que hacen parte del cumplimiento de los objetivos de la práctica empresarial.

2. RESULTADOS

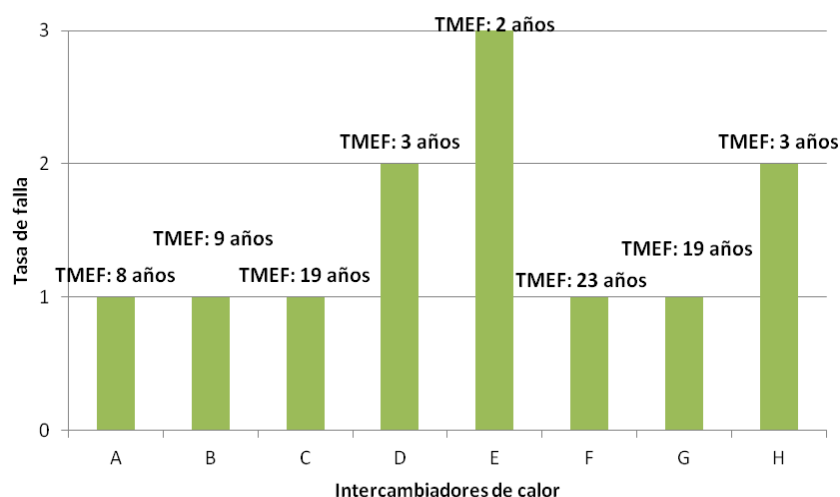
2.1 Recopilación de datos históricos. Análisis de variables relevantes

En la Tabla 1 se expone el número y el tipo de modificaciones que ha sufrido cada intercambiador con el paso del tiempo entre 1979 y 2012. Se puede observar que todos los intercambiadores han requerido de uno o múltiples cambios de haz o reentube a lo largo de su vida de servicio.

Tabla 1. Fechas de modificación de los haces de los intercambiadores E-2505A-H.

Equipo	Año de instalación	Haz de tubos nuevo	Reentube	Cambio por haz recuperado
E-2505A	1979	2000		
E-2505B	1979	1989	2012	
E-2505C	1979	2005/2011		
E-2505D	1979	2005		2012
E-2505E	1979	2005		2012
E-2505F	1979	2012		
E-2505G	1992			
E-2505H	1992			2002

Figura 4. Tasa media entre falla (TMEF) y tasa de falla de los intercambiadores de calor.



Así mismo, la Figura 4 ilustra el valor de tiempo promedio aproximado entre una falla y otra (TMEF) de cada uno de los intercambiadores desde su instalación y su tasa de falla (número de eventos de falla en un tiempo determinado) en los últimos 6 años (2007-2013). Es posible observar que, en general, los intercambiadores que tienen un valor de TMEF menor son los que cumplen la función de enfriar, es decir, los inferiores (D, E y H). La descripción de los eventos y la tasa de falla ocurridos en dicho periodo de tiempo es reflejado en el Anexo G.

2.2 Simulación del caso real y el caso diseño

En las Tablas 2 y 3 se muestran los datos de diseño tomados de los “datasheets” generados por la firma diseñadora *Foster Wheeler USA Corporation*, y los datos generados en planta el día 21 de marzo de 2013 respectivamente, con el objeto de identificar posibles errores en el funcionamiento de los equipos, con base en las condiciones y los rangos óptimos de operación del sistema (Anexo H), y realizar las simulaciones necesarias para determinar el factor de ensuciamiento teórico y llevar a cabo el análisis de carga térmica actual de cada intercambiador

Tabla 2. Datos establecidos por diseño del agua de enfriamiento y solvente.

	Agua enfriamiento	Solvente
Flujo cada intercambiador	2300 GPM	66600 BPD
Temperatura entrada (Tin) (°F)	88-90	270
Temperatura salida (Tout) (°F)	115	150
Presión entrada (psi)	60	264
Presión salida (psi)	55	254

Tabla 3. Datos reales tomados en planta del agua de enfriamiento y solvente (21/03/2013).

Equipo	Agua de Enfriamiento			Solvente		
	Flujo (GPM)	T _{in} (°F)	T _{out} (°F)	Flujo (BPD)	T _{in} (°F)	T _{out} (°F)
E-2505A	1203	88	145	68400	264	196
E-2505B	1377	88	166	68400	260	191
E-2505C	2316	90	159	68400	264	187
E-2505D	2047	86	130	68400	196	182
E-2505E	1719	86	123	68400	191	149
E-2505F	1318	80	134	68400	187	149
E-2505G	2280	90	124	18000	247	159
E-2505H	-	90	130	18000	-	143

Como se puede observar, todos los intercambiadores de calor presentan problemas en la temperatura de salida del agua de enfriamiento que se encuentra muy por encima (entre 10 y 50°F) de la temperatura definida por diseño (115°F). Así mismo, el flujo de entrada de agua de enfriamiento en la mayoría de los casos es muy inferior (de 25 a 45% menor) al establecido también por diseño. Con respecto al solvente se aprecia que, para los intercambiadores A-F, el flujo real supera el límite aconsejado. Además, el intercambiador D enfría el solvente en apenas 14°F, hasta 182°F, muy por encima de 150°F, temperatura final exigida en el proceso. En cuanto al intercambiador H no se tienen datos de flujo de agua de enfriamiento ya que la válvula de entrada se encuentra prácticamente cerrada, pues el intercambiador G logra cumplir con el objetivo de enfriar el solvente hasta la temperatura final exigida en el proceso.

A continuación se llevó a cabo la simulación en PRO II (Anexo I) del caso diseño, a partir de los datos de diseño, y del caso real, a partir de los datos obtenidos en planta. Los resultados de dicha simulación se muestran en las tablas 4 y 5.

En la simulación del caso diseño se evidencia que cada pareja de intercambiador está planteada para retirar más calor que el requerido por el proceso, lo que hace

inminente realizar restricciones operacionales en el flujo de agua de enfriamiento para mantener la temperatura de salida de solvente dentro del rango determinado. Así mismo, cabe resaltar que aunque el flujo de agua sea el de diseño, la temperatura de ésta superará el límite permitido.

Tabla 4. Resultados de la simulación del caso diseño.

Caso diseño		A-B-C	D-E-F	G	H
SOLVENTE	Flujo (BPD)	67500	67500	18000	18000
	T in (°F)	280	192,3	290	183
	Tout (°F)	192,3	122,19	125	112
AGUA ENFRIAMIENTO	Flujo (GPM)	2500	2500	2500	2500
	Tin (°F)	88	88	88	88
	Tout (°F)	150,8	117,85	147,13	107,2
Duty (MBTU/HR)		78,48	35,88	73,77	23,84

Tabla 5. Resultados de la simulación del caso real.

Caso real		A	B	C	D	E	F	G	H
SOLVENTE	Flujo BPD	67500	67500	67500	67500	67500	67500	18000	18000
	T. In (°F)	260	260	260	206,4	205,9	202,6	270	160
	T. Out (°F)	198,7	195,2	191,6	187,7	151,4	150,4	-	160
AGUA ENFRIAMIENTO	Flujo GPM	1203	1377	2316	2047	1719	1318	2280	-
	T. In (°F)	88	88	88	88	88	88	88	-
	T. Out (°F)	153	172,4	150,3	127	130	132,1	107,2	-
Duty MBTU/HR		40,2	74,5	77,8	12,7	37,2	29,9	26,8	-
Factor de ensuciamiento HR-FT²/BTU		0,006	0,001	0,001	0,005	0,003	0,001	0,015	-

El cálculo de los factores de ensuciamiento son el ajuste de la simulación del caso real para obtener los valores de salida de éste. Es importante resaltar que los factores de ensuciamiento más elevados corresponden a intercambiadores de la misma pareja (A y D), lo que genera que la transferencia de calor en dichos intercambiadores sea deficiente. Adicionalmente, se debe aclarar que el modelo utilizado para la simulación fue el de Soave-Redlich-Kwong (SRK) [19].

2.3 Análisis de causa-raíz (RCA)

Para determinar los factores involucrados en esta serie de eventos se realizó un estudio RCA con base en tres hipótesis inicialmente planteadas, las cuales se describen a continuación.

2.3.1 Diseño inadecuado del sistema de enfriamiento:

Inicialmente fueron estudiados ítems como: las limitaciones por la hidráulica de la red de agua de enfriamiento de la Unidad de Balance, el ensuciamiento o rotura de la línea de agua de enfriamiento, la cantidad de celdas de la torre de agua de enfriamiento T-2945, la presión y la cantidad de bombas de descarga de la T-2945. Luego de su estudio pertinente (Anexo J), fueron descartadas como causa raíz, aunque algunas de ellas podrían afectar de manera indirecta al buen funcionamiento del sistema, por lo cual son denominadas “causas probables”.

La causa-raíz más relevante que fue observada está relacionada con la inadecuada distribución de cargas térmicas en el sistema ya que esta modifica tanto la velocidad como la temperatura de salida del agua de enfriamiento. Basados en las simulaciones realizadas y los diagramas de entalpía (fase envolvente) de los componentes del solvente (Anexo K), se pudo concluir que, la temperatura de salida de agua de enfriamiento siempre superará el límite, aunque el flujo de agua sea el óptimo. Este comportamiento se debe a que el calor a retirar para lograr la condensación en el solvente a la presión dada (230-240 psi) está muy por encima de la que el agua podría retirar sin afectar su incremento de temperatura, que bajo condiciones normales no debe superar los 25°F. La única manera de alcanzar esta condición es desplazarse en el diagrama de entalpía a una temperatura de condensación menor, lo que implicaría un punto de operación inviable, dado que la torre T-2501 no puede trabajar a una menor temperatura.

Debido a lo anterior, se realizó el cálculo de la carga calórica (duty) para cada pareja de intercambiadores de calor, observándose que los intercambiadores superiores (A, B y C) retiran aproximadamente 70-80 MBtu/h, mientras que los inferiores (D, E y F) 17-22 MBtu/h, a pesar de que están diseñados con la misma capacidad. Se concluye que los intercambiadores superiores requieren retirar menos duty para trabajar sin tanta carga térmica y los inferiores se encuentran sobredimensionados, por lo que se han visto obligados a trabajar de manera restringida durante mucho tiempo, lo que afecta de manera considerable la velocidad y temperatura de salida del agua de enfriamiento y por consiguiente el estado de la metalurgia. Es por ello que existe una necesidad urgente de realizar una distribución de cargas térmicas más equitativa en todo el sistema.

En cuanto a la pareja G-H, como se indicó en la introducción, maneja un flujo mucho menor que sus gemelos A-F, por lo tanto, el duty a retirar es más bajo (26-29 MBtu/h), siendo suficiente operar con sólo el intercambiador superior (G) para lograr la temperatura de salida de solvente deseada. Es por ello que el intercambiador inferior (H) trabaja, por lo general, con la válvula de entrada de agua de enfriamiento parcial o totalmente restringida, teniendo uno de los mayores índices de falla en el sistema. En la Tabla 6 se muestra la causa-raíz del problema haciendo énfasis en la problemática de la consecuencia que éste causa y la ubicación de cada una en el sistema.

2.3.2 Metalurgia inapropiada de la tubería:

En cuanto a la metalurgia, se analizaron muestras de tubería para determinar la procedencia de la rotura de los intercambiadores de calor. Un informe generado por el Instituto Colombiano de Petróleo (ICP) [20] descartó la rotura de tubería por el lado externo de ésta, comprobando que los agujeros pasantes se generan desde el lado interno de la tubería hacia el externo (Anexo L). Con base en un estudio detallado de las muestras, realizado por el ICP, se determinó que el motivo

Tabla 6. Causa raíz y problemática de sus consecuencias.

CAUSA RAÍZ: DISEÑO INADECUADO DEL SISTEMA		
CONSECUENCIA	PROBLEMÁTICA	UBICACIÓN
Elevada temperatura de salida del agua de enfriamiento	El aumento de temperatura incrementa la tendencia al ensuciamiento. Muchas de las sales que comúnmente forman incrustaciones muestran solubilidad inversa, es decir, que su solubilidad disminuye con la temperatura (especialmente el carbonato y el fosfato de calcio, los cuales se forman más rápidamente en las zonas de alta transferencia de calor). A temperaturas mayores a 115°F se pueden presentar temperaturas de piel de 140°F lo cual puede ocasionar evaporaciones súbitas en las superficies de los tubos formando cristales. Igualmente a estas temperaturas se presenta degradación del polímero dispersante (tratamiento químico del agua de enfriamiento).	Ocurre principalmente en los intercambiadores superiores debido a que el duty a retirar por cada intercambiador se encuentra mal distribuido en el sistema. De esta forma, el agua de enfriamiento debe retirar una excesiva cantidad de calor para lograr la condensación del solvente.
Baja velocidad de flujo del agua de enfriamiento	La baja velocidad de flujo lineal del agua en el interior de la tubería promueve la incrustación de sales sobre toda la superficie de los tubos en contacto con el agua. El resultado es la restricción del área para la entrada de flujo de agua de enfriamiento y la reducción o pérdida de su capacidad de intercambio de calor. A bajas velocidades del flujo de agua (<2ft/s) ocurre ensuciamiento debido al asentamiento natural del material en suspensión y se pueden formar celdas de corrosión localizada. A velocidades de flujo de agua un poco más altas (entre 2 – 3ft/s) puede ocurrir ensuciamiento pero usualmente es menos severo. A velocidades entre 3 – 5 ft/s se puede evitar la deposición de sólidos suspendidos. Finalmente, elevadas velocidades de flujo (> 5ft/s) pueden causar erosión de las películas protectoras y óxidos superficiales.	Ocurre principalmente en los intercambiadores inferiores debido a que el duty a retirar es mucho menor que el establecida por diseño, por lo que se hace necesario restringir las válvulas de entrada de agua de enfriamiento para evitar temperaturas de salida de solvente muy bajas.

9

de la rotura de la tubería era la pérdida de la aleación del material, fenómeno conocido como descincificación, el cual provoca que un alto porcentaje del zinc de la aleación (elemento más activo) se lixivie con el agua induciendo la formación de grandes cúmulos de cobre en el interior de la tubería. Este hecho origina la fácil acumulación de material suspendido y crea un medio corrosivo en el interior, que induce el deterioro de las propiedades mecánicas del material. En el Anexo M se enumeran los principales factores que llevan a este tipo de corrosión desaleante.

Se estudió la probabilidad de que la selección del material de la tubería no fuera la adecuada. Según los datos arrojados por el estudio del ICP los valores de composición están dentro de la norma (Anexo N) para el latón Admiralty ASTM B111-443 (UNS C44300) y además, este es uno de los materiales más usados en tuberías para los sistemas de intercambio de calor en la industria del petróleo, debido a su alto coeficiente de transferencia y resistencia a la corrosión, por lo tanto esta alternativa es descartada. Sin embargo, la descincificación es un fenómeno común en los latones (aleaciones Cu-Zn) tipo Admiralty, que ocurre cuando el material se encuentra expuesto por un tiempo prolongado a condiciones operacionales que afecten seriamente su integridad [21], hecho que se ve evidenciado en los resultados del estudio del sistema.

Para evitar este problema se suele modificar la composición del latón en dos elementos importantes: arsénico y zinc. La descincificación podría reducirse adicionando a la aleación pequeñas cantidades de arsénico (0,04-0,06%), ya que éste actúa como protector y ofrece resistencia al fenómeno de descincado [22]. Sin embargo, para el caso en estudio el porcentaje de As está muy por debajo del óptimo (0,024%). En cuanto al porcentaje de Zn, se ha demostrado que composiciones mayores al 15% favorecen el proceso de descincificación a causa la lixiviación con el líquido circundante [23]. Para el caso en estudio, la tubería presenta una composición aproximada de 23-24% de Zn, lo cual indica una elevada tendencia a sufrir este tipo de corrosión. Cabe mencionar que a pesar de

la elevada susceptibilidad del material a la corrosión, que contribuye de forma notoria al deterioro de la tubería y la reducción de su vida útil, no se consideran causa-raíz del problema, por lo que es tomado como “causa probable”.

2.3.3 Parámetros de calidad del agua de enfriamiento deficientes:

Finalmente, con relación a cómo afecta la calidad del agua de enfriamiento en la problemática estudiada se pidió un informe a la firma contratista encargada del tratamiento químico CLARIANT S.A. y al ingeniero de procesos de la planta de SIBA [24], donde se abordaran los siguientes parámetros (Anexo O): pH del agua de enfriamiento, residual de cloro, conteo microbiológico, turbiedad o concentración de sólidos en suspensión y el porcentaje de dispersión del zinc, siendo estos dos últimos tomados como “causas probables”, quedando los demás descartados luego de su respectivo análisis.

Debido a que las “causas probables” se ven afectadas por factores externos al proceso de tratamiento que no se pueden controlar ni prever, se concluye entonces que, no son la causa raíz del problema, a pesar de que los valores se encuentren fuera del rango óptimo de calidad de agua de enfriamiento y contribuyan a que éste se incremente.

2.4 Planteamiento y estudio de las alternativas de solución a la causa raíz

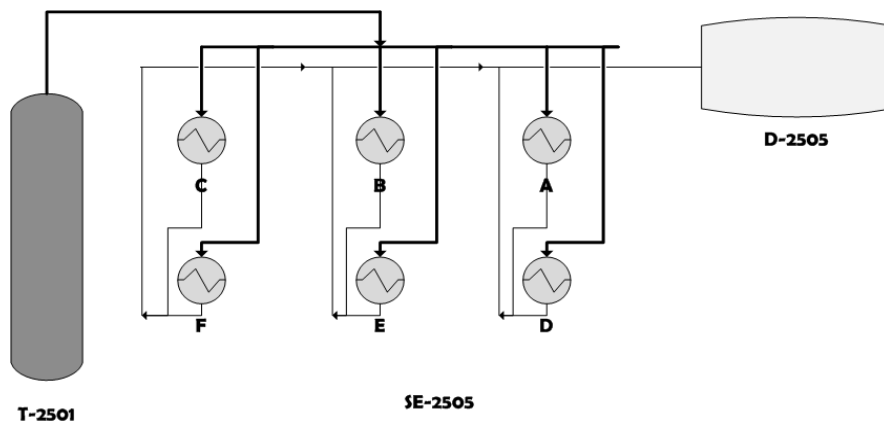
A continuación se presentan las alternativas de solución (directas o indirectas) a la causa raíz del problema.

2.4.1 Rediseño del sistema SE-2505 A-F en paralelo

La causa raíz del problema es el mal diseño del sistema debido a la descompensada distribución de las cargas térmicas que debe soportar cada

intercambiador, por lo tanto una de las alternativas consiste en distribuir todo el flujo proveniente de la torre T-2501 en los seis intercambiadores A-F y que estos trabajen en paralelo. De este modo, se repartirían uniformemente las cargas térmicas y cada intercambiador de calor retiraría un duty de 51,4 MBtu/h aproximadamente, y trabajaría como condensador y enfriador al mismo tiempo. En la Figura 5 se puede observar la posible distribución de las líneas de solvente.

Figura 5. Configuración del sistema SE-2505 A-F en paralelo.



Bajo esta nueva configuración se determinó que el solvente puede ser distribuido en sólo cinco intercambiadores, pues estos tienen la capacidad suficiente de condensar y enfriar el solvente a la temperatura deseada sin requerir de un sexto intercambiador. En este sentido, esta configuración ofrece la posibilidad de darle flexibilidad al sistema, ya que al no requerir los seis intercambiadores, uno de ellos puede entrar en stand-by para ser llevado a mantenimiento preventivo, o reemplazar a alguno que pueda entrar en falla y necesite salir de operación sin la obligación de realizar bajas de carga, evitando así pérdidas por lucro cesante.

Teniendo en cuenta esto, el retiro de duty por cada intercambiador sería de 59,2 MBtu/h. Se debe mencionar que la alternativa fue simulada en PROII teniendo en cuenta la carga máxima de la planta (225.000BPD solvente) y con base en el flujo

de agua que entra a la planta Demex actualmente, que se estima oscila entre 13.000-14.000 GPM (2.100-2.300 GPM para cada intercambiador de calor). De este modo, el flujo de agua de enfriamiento se encontrará dentro del rango permitido para una adecuada velocidad dentro de la tubería. Esta alternativa ataca de manera directa una de las consecuencias de la causa raíz, evitando bajas velocidades en el flujo de agua de enfriamiento y proporcionando mejores condiciones de integridad a la tubería.

Por otro lado, se debe indicar que, dentro de las recomendaciones para esta alternativa se encuentra mantener el intercambiador en stand-by preservado con nitrógeno, y para conservar la misma disposición de los intercambiadores, se requiere hacer un cálculo hidráulico de la distribución de las tuberías en el sistema, logrando una repartición uniforme del flujo de solvente en cada intercambiador. En este sentido, el sistema requiere la compra de válvulas “orbit” para las nuevas líneas de distribución de flujo de solvente.

2.4.2 Reducir el área total de transferencia del sistema SE-2505 A-F

El área total de transferencia actual es de 36.288 ft² para los intercambiadores A-F. Para garantizar que se retire la carga calórica requerida por el sistema, el área se debería reducir a 27.216 ft² (reducción del 25%). Para ello se debe asegurar que la velocidad del agua de enfriamiento en la tubería sea la apropiada evitando restricciones operacionales. Esta alternativa ataca de forma directa una de las consecuencias de la causa raíz (baja velocidad de flujo de agua de enfriamiento).

Adicionalmente, al reducir el área total de transferencia se busca reducir a un 82,5%, el flujo de agua necesario que por diseño, es de aproximadamente 13.800GPM. Para ejecutar esta alternativa existen dos opciones: la primera es reducir el área de transferencia de 6048 ft² (1581 tubos) a 3422 ft² (900 tubos) para cada intercambiador inferior (D, E y F), dejando intactos los intercambiadores superiores (A, B y C); la segunda opción es realizar una distribución equitativa del

área a reducir de 6048 ft² (1581 tubos) a 4536 ft² (1200 tubos) para cada intercambiador, logrando el retiro adecuado de duty sin afectar la temperatura de salida del solvente (estos cálculos fueron simulados en PRO II).

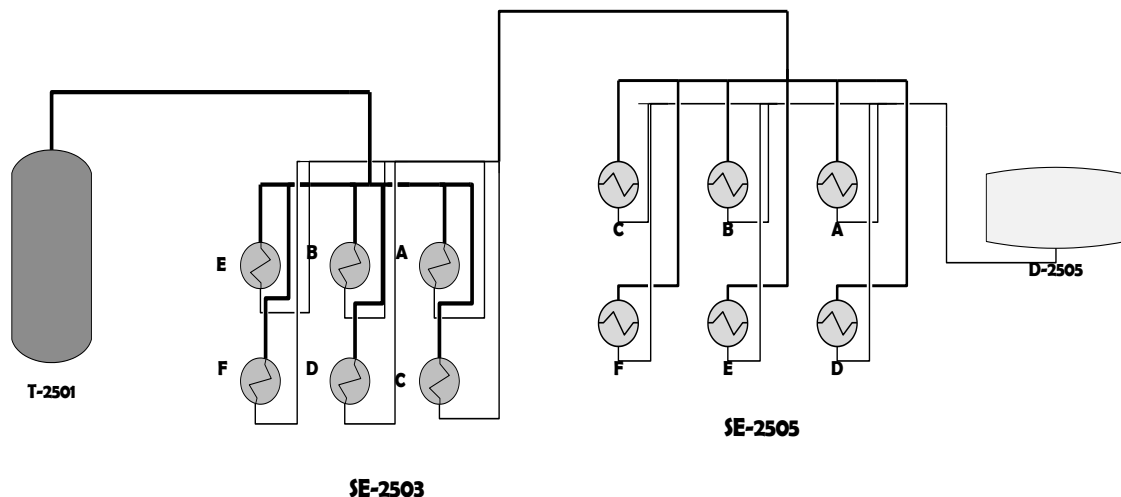
Bajo esta alternativa se presenta la ventaja de no ser necesario ningún cambio en la configuración del sistema, solamente en la cantidad de tubos en el haz; sin embargo, no permite la posibilidad de dejar en stand-by uno de los intercambiadores, por lo que en caso de emergencia se hace inminente un slowdown en la planta.

2.4.3 Realizar una Integración térmica con el sistema SE-2503

Otra manera de lograr una mejor distribución de las cargas térmicas es haciendo transferencia con otro sistema que requiera de este duty para calentar su corriente efluente; a esto se le llama Integración térmica [25-26]. Esta alternativa consiste en precalentar la corriente efluente, solvente-DMO, proveniente de los sedimentadores (lado casco), con la corriente de solvente despojado de la T-2501 (lado tubos) en el sistema de calentamiento SE-2503, evitando el consumo de vapor de 50lbs con el cual actualmente se realiza dicho calentamiento (90.000 lb/hr de vapor). Esta configuración, la cual está representada en la Figura 6, tiene como fin ceder parte del duty del solvente despojado para hacer menos crítico el intercambio en el SE-2505. Una vez cedida la carga térmica en el SE-2503 se requieren sólo 4 de los 6 intercambiadores del sistema SE-2505.

La selección de esta alternativa permite alcanzar una flexibilidad superior en el sistema comparada con las anteriores y presenta una ventaja adicional en el ahorro de agua de enfriamiento y vapor para calentar. Sin embargo, tiene algunas desventajas como la necesidad de realizar una adecuación de los dos sistemas SE-2505 y SE-2503, así como también de una evaluación técnico-económica para la nueva redistribución del vapor de 50 lbs en el cabezal de vapor de servicios industriales. Es por ello que esta alternativa es la que requiere de mayor inversión y análisis.

Figura 6. Integración térmica con el sistema de intercambiadores SE-2503.



2.4.4 Realizar cambio de metalurgia por una aleación más resistente

La metalurgia es una de las causas probables del problema y, aunque el cambio por una metalurgia más resistente no sea la solución raíz, puede de manera efectiva alargar la vida útil del haz de tubos y, por lo tanto, aumentar tanto la tasa media entre falla (TMEF) como la eficiencia operativa sin requerir una modificación en el sistema. Las severas condiciones a las que están expuestos los intercambiadores de calor en la actualidad dictan el uso de un material más resistente a la corrosión para el haz de tubos, con el fin, no sólo de prevenir costos por mantenimiento, sino también por contaminación con la corriente de intercambio.

Luego de un análisis y del estudio de las posibles metalurgias, se determinó que la más adecuada es la aleación Dúplex SAF 2507 (UNS-32750), la cual es una aleación de acero inoxidable austenítico-ferrítico, que contiene un excelente porcentaje de cromo en su composición química (Anexo P), elemento clave para la formación de la capa protectora de óxido en la metalurgia [27-28]. En este sentido, el acero inoxidable Dúplex SAF 2507 es uno de los aceros con mayor resistencia a la corrosión por picadura, fenómeno de corrosión crítico en los aceros inoxidables [29]. No obstante, es de aclarar que este aumento de resistencia a la corrosión va

acompañado por un mayor costo debido a los elevados porcentajes en níquel (6-8%) y por una reducción de su conductividad térmica, por lo que, aunque las variables operacionales no se verían afectadas, siempre es recomendado emplear una tubería de menor grosor. Por otro lado, una ventaja adicional, es que los haces en acero inoxidable tienen valor comercial luego del fin de su vida útil.

Durante esta etapa de análisis también se generaron varias alternativas tales como: emplear inhibidores de corrosión en el agua de enfriamiento, realizar un bypass de solvente, o emplear uno de los intercambiadores enfriadores para condensación. Dichas alternativas, después de ser evaluadas dentro del equipo núcleo, fueron descartadas (Anexo Q). En el Anexo R se resume el análisis PRO-CONTRA de las alternativas aceptadas.

2.5 Evaluación de las alternativas en una matriz de criterios

La Tabla 7 muestra la evaluación económica estimada, que permite tener una orientación de la inversión inicial que requeriría cada una de las alternativas propuestas.

Tabla 7. Evaluación económica estimada de las alternativas.

ALTERNATIVA	INVERSION INICIAL (USD\$)	VPN
5.3.1. Rediseño del sistema en paralelo	1.922.100	880.933
5.3.2. Reducción del área total de transferencia	1.210.500	1.592.533
5.3.3. Integración térmica con los SE2503	14.912.250	5.164.027
5.3.4. Cambio de metalurgia	1.965.000	838.033

El cálculo del VPN (valor presente neto) representa los flujos de caja positivos (beneficio por operación estable de las unidades) y negativos (gastos por mantenimiento en parada general) de cada alternativa teniendo en cuenta la

inversión inicial del proyecto (Anexo S). Es de aclarar que para efectos finales, se debe realizar un análisis económico con mayor profundidad.

Por otro lado, para la evaluación de la viabilidad de las alternativas fueron tomados en cuenta nueve criterios, seleccionados en base a las variables relevantes implicadas en el caso, considerando los siguientes factores: económico, ambiental, de seguridad y practicidad. Dichos criterios poseen una puntuación de acuerdo a la especificación de cada ítem y un porcentaje de importancia (Tabla 8). Estos porcentajes fueron acordados y aprobados en una reunión con los ingenieros de proceso y estático de la planta, de acuerdo a la afectación y relevancia en el sistema.

Tabla 8. Puntuación de los criterios establecidos para la valoración de cada alternativa.

CRITERIOS	%	PUNTUACIÓN		
		1	2	3
VPN (10 AÑOS)(USD\$)	15%	0-1'000000	1-5'000000	5'000000- más
Inversión(USD\$)	20%	10'000000-más	5-10'000000	0-5'000000
Seguridad del proceso	10%	Paso de HC hacia el ambiente	Paso de HC interno	No hay contaminación
Solución a la raíz	20%	NO	-	SI
Fácil Implementación	10%	Días de parada no programados	En parada programada	Cambio en operación
Afectación a otros equipos en caso de falla	5%	Daño grave	Daño leve	Sin daño
Operación dentro de los parámetros de diseño o GC	10%	NO	-	SI
Disponibilidad de equipos	5%	NO	-	SI
Emergencia por falla de equipos alternos	5%	Muy frecuente	Poco frecuente	No sucede

Teniendo como soporte la Tabla 8 se evaluó cada alternativa y cada valor se multiplicó por el porcentaje, dando lugar finalmente a una puntuación, que indica,

que aquella de mayor valoración es la mejor evaluada respecto a dichos criterios (Tabla 9).

Tabla 9. Matriz de criterios empleada en la valoración de cada alternativa.

CRITERIOS	%	ALTERNATIVA			
		3.4.1	3.4.2	3.4.3	3.4.4
VPN (10 AÑOS)	15%	1	2	3	1
Inversión	20%	3	3	1	3
Seguridad del proceso	10%	2	2	2	3
Solución a la raíz	20%	3	3	3	1
Fácil Implementación	10%	2	2	1	2
Afectación a otros equipos en caso de falla	5%	2	2	1	2
Operación dentro de los parámetros de diseño o GC	10%	3	3	3	1
Disponibilidad de equipos	5%	3	1	3	1
Emergencia por falla de equipos alternos	5%	2	2	2	2
TOTAL	100%	2,40	2,45	2,15	1,80

De acuerdo a los resultados de la Tabla 9 se puede notar que las alternativas más viables son: el rediseño del sistema A-F en paralelo (5.3.1) y reducción total del área de transferencia del sistema SE-2505 A-F (5.3.2). En la reunión de entrega de resultados se presentó esta conclusión siendo la primera alternativa la más llamativa para el equipo núcleo de la planta debido a la flexibilidad operativa ofrecida por ésta.

3. CONCLUSIONES

- ✓ Se identificó como causa raíz del problema de la pérdida de confiabilidad del sistema de enfriamiento SE-2505, la incorrecta distribución de las cargas térmicas debido al diseño inadecuado del sistema, que modifica tanto la temperatura como la velocidad de salida del agua de enfriamiento, afectando de manera directa la integridad de la tubería.
 - Con base en las simulaciones realizadas y los diagramas de entalpía se evidenció que, aunque el flujo de agua de enfriamiento sea el óptimo, la temperatura de salida de ésta siempre superará el límite.
 - La baja velocidad de agua de enfriamiento por los tubos de los intercambiadores inferiores, es debida a que las válvulas de entrada se deben restringir para evitar que el enfriamiento del solvente sobrepase la guía de control con la que debe ingresar al D-2505 de recirculación, debido a que el duty a retirar es muy bajo comparado con el de diseño.

- ✓ Se identificaron como causas probables:
 - La pérdida de la aleación del material a causa de la corrosión por descincificación cuando el material (latón Admiralty) se encuentra bajo condiciones sub-estándar, causado por la baja velocidad y alta temperatura de salida de agua de enfriamiento.
 - La calidad del agua de enfriamiento deficiente, sobre todo con relación a la turbiedad y el porcentaje de dispersión del zinc fuera del rango óptimo.

- ✓ Se analizaron varias alternativas de solución tanto indirectas como directas de las cuales se concluyó que la mejor manera de mitigar la tasa de falla del sistema de enfriamiento es llevar a cabo una correcta distribución de la carga térmica en los intercambiadores de calor del sistema, siendo la alternativa más viable y llamativa, la de rediseñar el sistema de tal forma que reparta el flujo de solvente en todos los intercambiadores en paralelo.

4. RECOMENDACIONES

Basado en el estudio del sistema y la evaluación de cada una de las alternativas planteadas, a continuación se enumeran las diferentes acciones y recomendaciones que se proponen para atacar o minimizar de manera directa o indirecta la problemática del presente trabajo.

Acciones a implementar

- ✓ Reducir el área total de transferencia en los intercambiadores inferiores.
- ✓ Reducir la cantidad de flujo de solvente para los condensadores.
- ✓ Sacar de servicio el intercambiador E-2505H, ya que el E-2505G es suficiente para condensar y enfriar el solvente a la temperatura requerida y preservar el E-2505H en nitrógeno para evitar daños en la metalurgia y el equipo.
- ✓ Realizar un estudio del estado de la tubería y del cabezal de agua de enfriamiento.
- ✓ Aumentar el porcentaje de arsénico en la composición de la tubería de los intercambiadores a un 0,04% para aumentar la protección de la metalurgia.

Recomendaciones

- ✓ Instalar cupones de corrosión por el lado tubos para tener un mejor control y estudio del estado de la tubería y poder determinar mantenimientos preventivos de manera más eficaz.
- ✓ Instalar termopozos a la salida de agua de enfriamiento de cada intercambiador para llevar un seguimiento de la temperatura de salida de ésta y poder mantenerla dentro del rango óptimo de operación.

- ✓ Realizar chequeos periódicos de la medición de flujo de agua de enfriamiento para asegurar que esté dentro de las premisas y así garantizar el correcto desempeño del intercambiador de calor.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FOSTER WHEELER USA CORPORATION. Demex Unit Revamp. Barrancabermeja. 1988. 136p.
- [2] GILLIS, D y VAN TINE, F. What's new in solvent deasphalting? UOP & Foster Wheeler team up in solvent deasphalting. 1998. 13p.
- [3] ECOPETROL S.A. Informe investigación incidente falla de agua de enfriamiento. Barrancabermeja. 2011. 15p.
- [4] ECOPETROL S.A. Informe investigación incidente SE-2505. Barrancabermeja. 2013. 17p.
- [5] ECOPETROL S.A. Informe investigación de incidentes operacionales y ambientales en el sistema de agua de enfriamiento Unidad Demex. Barrancabermeja. 2009. 9p.
- [6] ECOPETROL S.A. Informe final RCA SE-2505. Barrancabermeja. 2011. 29p.
- [7] ECOPETROL S.A. Formato para recomendaciones SE-2505. Barrancabermeja. 2011. 5p.
- [8] ECOPETROL S.A. MANUAL DEMEX 2007_rev0. Barrancabermeja. 2008. 370 p.
- [9] ECOPETROL S.A. P&D UNIDAD DEMEX. Barrancabermeja. 2003.
- [10] MUKHERJEE, R. Effectively Design Shell-and-Tube Heat Exchangers. En: Chemical Engineering Progress. 1998. 17p.
- [11] ECOPETROL S.A. Proceso de eliminación de defectos RCA Sistema de enfriamiento Unidad de Balance. Barrancabermeja. 2008. 34p.
- [12] ECOPETROL S.A. RCA contaminación condensados de la Unidad de Balance. Barrancabermeja. 2011. 23p.
- [13] ECOPETROL S.A. Seguimiento y recomendaciones de equipo estático de la Planta Demex. Barrancabermeja. 1979. 30p.
- [14] ECOPETROL S.A. Record inspección Demex 2011. Barrancabermeja. 2011. 10 p.

- [15] ECOPETROL S.A. Hoja de vida del indicador. Tasa de falla equipo estático. Barrancabermeja. 2010. 8p.
- [16] ECOPETROL S.A. Formato de investigación del operador. Modos de falla del equipo estático. Barrancabermeja. 2012. 2p.
- [17] TECHNIPETROL. DATA SHEET TUBE BUNDLE HEAT EXCHANGER E-2505 A-F. Barrancabermeja. 1979. 1p.
- [18] ECOPETROL S.A. HEAT EXCHANGER SPECIFICATION SHEET E-2505 A-H. Barrancabermeja. 2001. 1p.
- [19] INVENSYS SYSTEM. PRO II Academic manual. Student edition. United States. 2007. 69 p.
- [20] INSTITUTO COLOMBIANO DE PETROLEOS. Informe final del análisis de falla cañuelas intercambiador SE-2505e planta Demex, GRB. Piedecuesta. 2011. 38p.
- [21] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Damage mechanisms affecting fixed equipment in the Refining Industry. 2003. 270p.
- [22] ASM INTERNATIONAL. Handbook of corrosion data. Corrosion of Copper and Copper alloys. 2 ed. United States. 1995. 31p.
- [23] LAWRENCE, J. Metal Handbook. Corrosión ASM international 9 ed. Vol 13. United States. 1987. 40 p.
- [24] CLARIANT S.A. Tratamiento químico TE-2945. Barrancabermeja. 2013. 9p.
- [25] BENITEZ, Agustín; MARTÍNEZ, Yamilé y DOMÍNGUEZ, Félix. Tecnología Pinch: Una introducción a la integración Energética. Cuba, Matanzas. 2007. 28p.
- [26] MACÍAS, José. El análisis Pinch: Integración y optimización de la recuperación energética en procesos industriales. Refinería Tenerife CEPESA. Barrancabermeja. 2007. 49p.
- [27] SANDVIK. The role of duplex stainless steels in oil refinery heat exchanger applications. 2008. 24p.
- [28] SANDVIK. Seamless heat exchanger tubing. 20p.
- [29] SANDVIK. SAF 2507 Datasheet. 2012. 14p

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Damage mechanisms affecting fixed equipment in the Refining Industry. 2003. 270p.

CLARIANT. Tratamiento químico TE-2945. Barrancabermeja: ECOPETROL: GRB, 2013. 9p.

EMPRESA COLOMBIANA DE PETROLEOS. Heat Exchanger Specification Sheet E-2505 A-H. Barrancabermeja: ECOPETROL: GRB, 2001. 1p.

-----Informe final RCA SE-2505. Barrancabermeja: ECOPETROL: GRB, 2011. 29p.

-----Manual Demex 2007_rev0. Barrancabermeja: ECOPETROL: GRB, 2008. 370 p.

-----Record inspección Demex 2011. Barrancabermeja: ECOPETROL: GRB, 2011. 10 p.

-----Seguimiento y recomendaciones de equipo estático de la Planta Demex. Barrancabermeja: ECOPETROL: GRB, 1979. 30p.

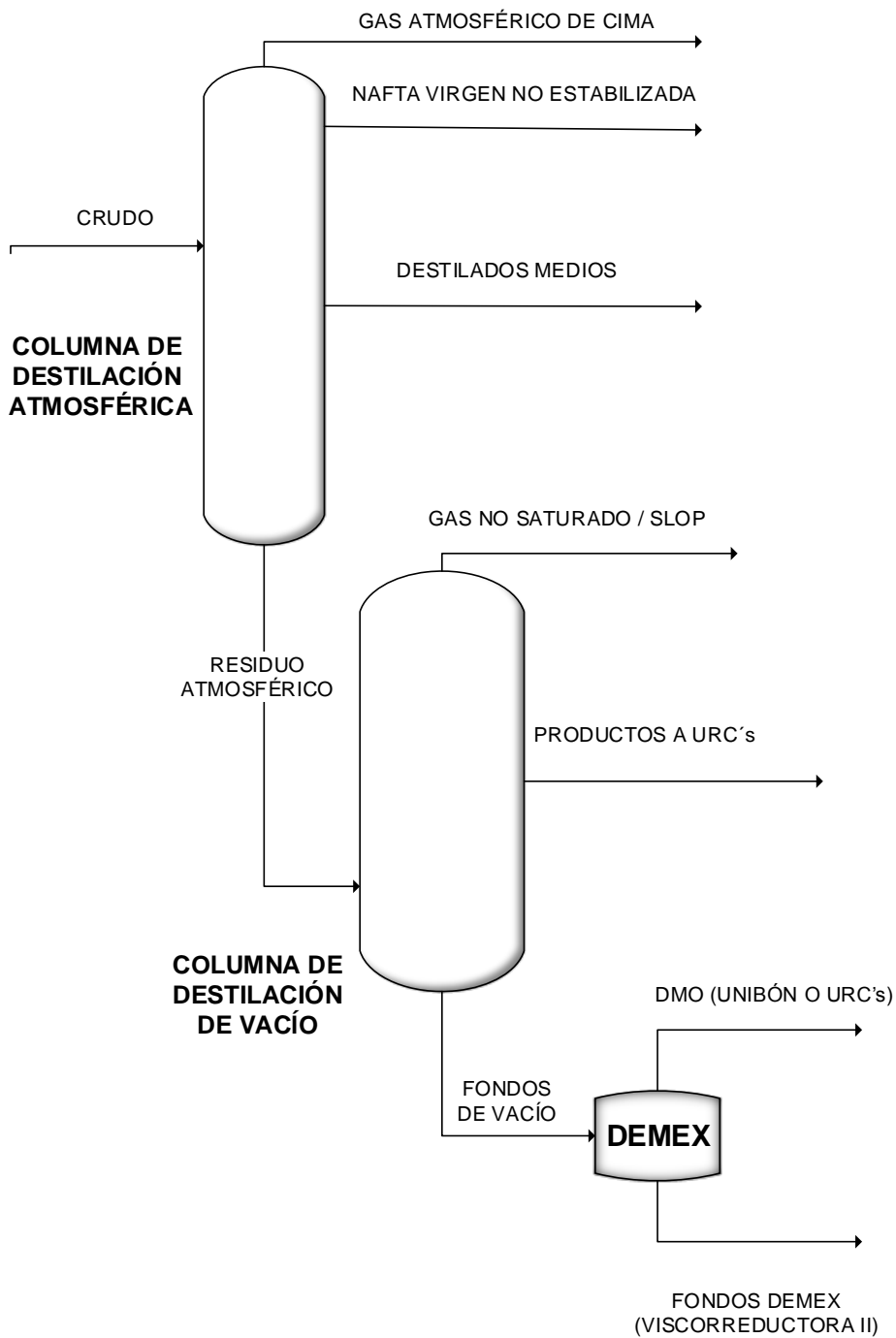
FOSTER WHEELER USA CORPORATION. Demex Unit Revamp. Barrancabermeja: ECOPETROL: GRB, 1988. 136p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE PETROLEOS. Informe final del análisis de falla cañuelas intercambiador SE-2505e planta Demex, GRB. Piedecuesta: ICP, 2011. 38p.

TECHNIPETROL. DATA SHEET TUBE BUNDLE HEAT EXCHANGER E-2505 A-F. Barrancabermeja: ECOPETROL: GRB, 1979. 1p.

ANEXOS

Anexo A. Columna de destilación atmosférica y de vacío.



Anexo B. Composición del solvente empleado en el proceso de extracción líquido-líquido en la Unidad Demex.

COMPONENTE	COMPOSICIÓN (mL/100mL)
Etano	1.09
Etileno	0.04
Propano	12.08
Propileno	0.22
Iso-butano	37.69
N-butano	47.29
1-Buteno	0.13
Iso-butileno	0.13
Trans-2-buteno	0.12
Cis-2-buteno	0.18
C5 y más pesados	1.02

Anexo C. Imagen intercambiadores SE-2505 A-F y Torre T-2501.

Intercambiadores de calor SE-2505 A-F.



T-2501 y SE-2505 A-F



Anexo D. Imagen intercambiadores SE-2505 G-H y Torre T-2521.

Intercambiadores de calor SE-2505 G-H.

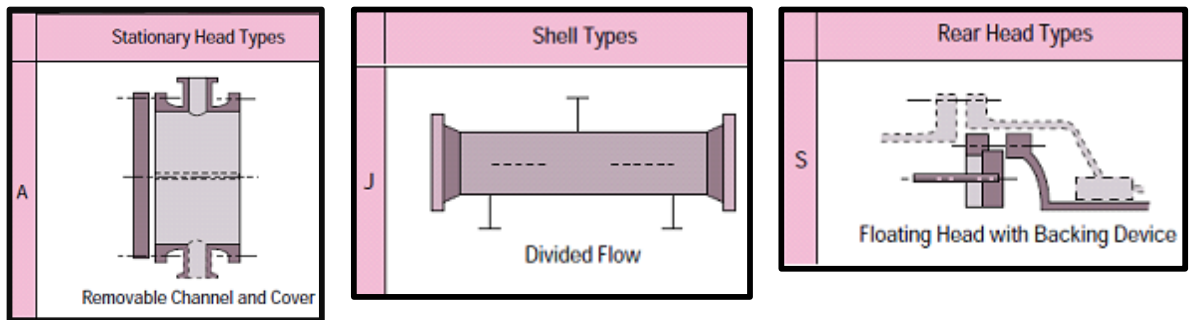


SE-2505 G-H y T-2521.



Anexo E. Intercambiadores de calor tipo AJS.

TEMA



Anexo F. Valoración de la matriz RAM

Personas: Durante el manejo de la problemática de gases en el sistema de agua de enfriamiento por rotura de tubería se han presentado las siguientes situaciones:

- Atmósfera explosiva en la torre enfriadora TE 2945 por alto nivel de gases de hidrocarburo.
- Riesgo de gases en áreas de proceso durante los procedimientos de drenaje y retrolavado de los intercambiadores y de las líneas de suministro.
- Riesgo de quemaduras leves (1° grado) por derrame de agua caliente en el área de válvulas durante los retrolavados.
- Riesgo de quemadura e incendio por fuga de solvente.

Valoración: 3C: M

Económico: Durante el periodo de análisis se han presentado las siguientes pérdidas asociadas al sistema de enfriamiento:

- 2009: se reportaron pérdidas de (\$USD) 141.000.
- 2011: se reportaron pérdidas de (\$USD) 2'970.988.
- Mantenimiento de equipos que han presentado rotura y/o que han sido inspeccionados (\$USD) 320.000.
- Intercambiadores nuevos C, F, G y H (\$USD) 914.000.
- Costo de lucro cesante en Demex para reparación de los E-2505 durante los últimos años 2.3 MUSD\$
- Degradación de propano y butano hacia la red de gas combustible y a la TEA. (\$USD) 120.000
- Pérdida por la no recuperación de 50 Barriles/día de solvente: (\$USD) 60.000.

Total real a la fecha: 6'825.988 USD\$

Valoración: 4D: H

Imagen: La problemática de Demex puede llegar a generar una parada no programada y esto afectaría la imagen a nivel nacional de la empresa dependiendo del nivel de inventarios, debido a que causaría una reducción de

carga de crudo a la refinería y por lo tanto una baja de producción, además de la pérdida de confiabilidad en el sistema de enfriamiento de Demex.


Esta es una de las plantas más costosas en cuanto a lucro cesante.

Valoración: 4C: M

Ambiente: Para el manejo de la problemática de presencia de gases en el sistema de agua de enfriamiento se han presentado los siguientes eventos:

- Incremento en los efluentes hacia PTAR por el manejo de las contingencias en el tratamiento químico.
- Incremento en el calentamiento ambiental en el área de la torre enfriadora por aumento en la temperatura de retorno y mayor condensación en el área.
- Emisiones a la TEA por construcción de dos facilidades para ventear el solvente presente en el agua de enfriamiento de los E-2505 A/H.

Valoración: 2E: M

		DIRECCIÓN DE RESPONSABILIDAD INTEGRAL				ECP-DRI-F-045				
		MATRIZ DE VALORACIÓN DE RIESGOS - RAM				ACT: 2	1/1			
Para mayor información sobre el uso y manejo de este formato consulte instructivo ECP-DRI-I-007										
CONSECUENCIAS					PROBABILIDAD					
Personas	Económica	Ambiental	Clientes	Imagen de la Empresa		A	B	C	D	E
						No ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Unidad, Superintendencia o Departamento
Una o mas fatalidades	Catastrófica > \$10M	Contaminación Irreparable	Veto como proveedor	Internacional	5	M	M	H	H	VH
Incapacidad permanente (parcial o total)	Grave \$1M a \$10M	Contaminación Mayor	Pérdida de participación en el mercado	Nacional	4	L	M	M	H	H
Incapacidad temporal (>1 día)	Severo \$100k a \$1M	Contaminación Localizada	Pérdida de clientes y/o desabastecimiento	Regional	3	N	L	M	M	H
Lesión menor (sin incapacidad)	Importante \$10k a \$100k	Efecto Menor	Quejas y/o reclamos	Local	2	N	N	L	L	M
Lesión leve (primeros auxilios)	Marginal <\$10k	Efecto Leve	Incumplir especificaciones	Interna	1	N	N	N	L	L
Ninguna lesión	Ninguna	Ningún efecto	Ningún impacto	Ningún impacto	0	N	N	N	N	N

Anexo G. Eventos de falla de cada intercambiador de calor

Eventos de falla: Cuando ocurre una pérdida total o parcial de la función de un equipo.

Tasa de falla: Se define como la cantidad de eventos de falla que le ocurre a un equipo en un determinado tiempo. La nomenclatura que se usa es:

OP= operando

SB= stand by

EF= en falla

OF= operando en falla

SF= stand by falla.

Tiempo medio entre fallas

Es el tiempo promedio entre los eventos de falla de un equipo en un intervalo de tiempo determinado.

Para un tiempo evaluado de seis años de **2007-2013** se tienen los siguientes indicadores.

E-2505A

Date	Code	Description	OBSERVACIONES
25/04/2011	OP	ENTRA EN OPERACIÓN	
17/04/2011	SB	STAND BY	
04/04/2009	OP	ENTRA EN OPERACIÓN	
03/03/2009	MT	EN MTTO EN TALLERES	
12/06/2008	OP	ENTRA EN OPERACIÓN	
07/04/2008	SB	STAND BY	T.T=38
22/02/2008	EF	EN FALLA	
01/01/2007	OP	ENTRA EN OPERACIÓN	

E-2505B

Date	Code	Description	OBSERVACIONES
28/01/2013	OP	ENTRA EN OPERACION	
04/01/2013	SB	STAND BY	REENTUBE
17/04/2011	OP	ENTRA EN OPERACIÓN	
01/04/2011	MT	EN MTTO EN TALLERES	T.T= 25
31/03/2011	SB	STAND BY	
16/05/2010	OP	ENTRA EN OPERACIÓN	
27/04/2010	MT	EN MMTO EN TALLERES	
15/07/2008	OF	OPERA EN FALLA	
08/07/2008	EF	EN FALLA OUT	
12/06/2008	OP	ENTRA EN OPERACIÓN	
07/04/2008	SB	STAND BY	
01/01/2008	OP	ENTRA EN OPERACIÓN	
01/05/2007	SB	STAND BY	

E-2505C

Date	Code	Description	OBSERVACIONES
10/2013	OP	ENTRA EN OPERACION	
10/2013	MT	MTTO EN TALLERES	HAZ NUEVO
27/09/2011	OF	OPERA EN FALLA	
12/06/2008	OP	ENTRA EN OPERA	
02/06/2008	SB	EN STAND-BY	
01/01/2007	OP	ENTRA EN OPERA	

E-2505D

Date	Code	Description	OBSERVACIONES
02/2012	SB	STAND BY	Haz recuperado en Parada General 2012 T.T =12
25/04/2011	OP	ENTRA EN OPERA	
17/04/2011	MT	EN MTTO EN TAL	T.T= 15
13/04/2011	OF	OPERA EN FALLA	
04/04/2009	OP	ENTRA EN OPERA	
03/03/2009	MT	EN MTTO EN TAL	CAMBIO DE 18 TUBOS
10/02/2009	EF	EN FALLA OUT	
12/06/2008	OP	ENTRA EN OPERA	

07/04/2008	SB	EN STAND-BY	
01/01/2007	OP	ENTRA EN OPERA	

E-2505E

Date	Code	Description	OBSERVACIONES
28/01/2013	OP	ENTRA EN OP.	
04/01/2013	MT	MTTO EN TALLERES	
31/12/2012	EF	EN FALLA	
26/12/2012	OF	OPERA EN FALLA	
17/04/2011	OP	ENTRA EN OPERA	
01/04/2011	MT	EN MTTO EN TAL	T.T =12
31/03/2011	EF	EN FALLA OUT	
20/03/2011	OF	OPERA EN FALLA	
16/05/2010	OP	ENTRA EN OPERA	
27/04/2010	MT	EN MTTO EN TAL	
15/07/2008	OF	OPERA EN FALLA	
08/07/2008	EF	EN FALLA OUT	
12/06/2008	OP	ENTRA EN OPERA	
02/06/2008	SB	EN STAND-BY	

E-2505F

Date	Code	Description
11/2011	OP	ENTRA EN OP.
10/2011	MT	MTTO EN TALLERES
26/10/2011	EF	EN FALLA
12/06/2008	OP	ENTRA EN OPERA
02/06/2008	SB	EN STAND-BY
01/01/2008	OP	ENTRA EN OPERA

E-2505G

Date	Code	Description	OBSERVACIONES
18/04/2011	SB	EN STAND-BY	
06/04/2011	OF	OPERA EN FALLA	
28/03/2011	MT	EN MTTO EN TAL	T.T= 28
27/03/2011	SF	STANDBY EN FAL	T.R=2
02/03/2011	SB	EN STAND-BY	

17/02/2011	OP	ENTRA EN OPERA	
22/09/2010	MT	EN MTTO EN TAL	T.T=26
13/04/2009	EF	EN FALLA OUT	
27/11/2008	OF	OPERA EN FALLA	
02/06/2008	SB	EN STAND-BY	

E-2505H

Date	Code	Description	OBSERVACIONES
18/04/2011	SB	EN STAND-BY	
31/03/2011	OF	OPERA EN FALLA	
28/03/2011	MT	EN MTTO EN TAL	T.T=47
01/03/2011	EF	EN FALLA OUT	
17/02/2011	OP	ENTRA EN OPERA	
22/09/2010	MT	EN MTTO EN TAL	T.T=48
13/04/2009	EF	EN FALLA OUT	
12/2008	OP	ENTRA EN OPERACION	
12/2008	MT	EN MTTO EN TALLERES	T.T=5
27/11/2008	OF	OPERA EN FALLA	T.R= 3
02/06/2008	SB	EN STAND-BY	
01/01/2007	OP	ENTRA EN OPERA	

Anexo H. Condiciones del sistema y rangos óptimos de operación.

Condiciones del sistema.

Condiciones de diseño de los intercambiadores.

Variable	Unidad	Lado carcasa	Lado tubo
Flujo	lb/h	1.864.860	10.185.000
	GPM	6.539	20.361
	BPD	224.209	698.078
Temperatura	°F	350-505	250
Presión	PSI	325	100
Metalurgia		Acero al carbono	Admiralty

Condiciones de operación del sistema.

En esta tabla se exponen las variables que se ven involucradas directa e indirectamente en el proceso. VO: Ventana Operativa / GP: Guías del Proceso de integridad.

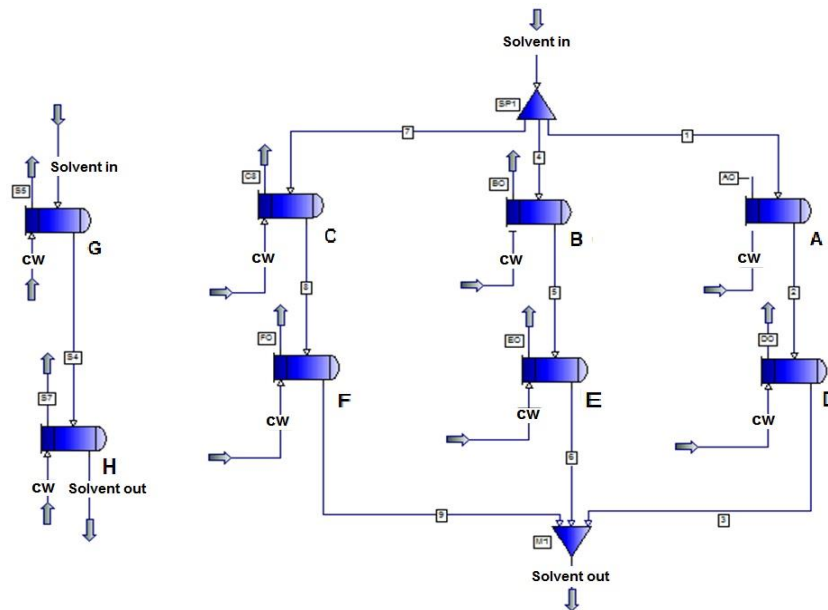
Equipo	Variable	Condiciones	Superior	Inferior
T-2501	Temperatura °F	VO	320	240
		GC	280	260
D-2505	Temperatura °F	VO	190	130
		GC	175	150
	Presión PSIG	VO	295	218
		GC	255	225
D-2501	Temperatura °F	VO	250	170
		GC	210	195
	Presión PSI	VO	420	370
		GC	400	390
P-2503 A/C	Flujo mínimo BPD		30000	

Rangos óptimos de operación

Esta tabla representa los rangos óptimos de operación del sistema de enfriamiento de los intercambiadores de calor SE-2505.

Variable	Unidades	Entrada	Salida
Temperatura agua de enfriamiento	°F	88-90	115 máx.
Temperatura del solvente	°F	270-260	150-170
Presión agua de enfriamiento	PSI	45	40
Flujo máximo de agua de enfriamiento	GPM	3.700	
Flujo mínimo de agua de enfriamiento	GPM	2.249	
Flujo de solvente alta carga	BPD	228.000	
Flujo de solvente baja carga	BPD	170.000	

Anexo I. Diagrama de flujo obtenido de los intercambiadores de calor en PROII



Para las simulaciones fue necesario incluir el TEMA, las especificaciones de diseño como BWG, tipo de arreglo de los tubos, numero de bafles, entre otras características del diseño de los intercambiadores de calor, datos encontrados en los planos y datasheets de cada uno.

Anexo J. RCA diseño inadecuado del sistema: Causas probables y descartadas.

a) Limitaciones por la hidráulica de la red de agua de enfriamiento de la Unidad (PROBABLE): Un informe sobre el flujo de agua de diseño de cada unidad vs el actual arrojó la información en la siguiente tabla.

Planta	Flujo total actual, GPM	Flujo total por diseño, GPM	Porcentaje
UOPI	31000	34000	90%
Unibón e Hidrogeno	4400	7700	57%
Demex	20600	27800	69.4%
Viscorreductora	2300	2800	82%
Total de todas las plantas	57000	72300	78.8%

Cada bomba de la Unidad de Servicios Industriales tiene aproximadamente una capacidad de 23.000 GPM cada una. Por diseño el sistema de bombas de envío de flujo de agua de enfriamiento (3 bombas) tienen capacidad de 70.800 GPM donde actualmente tienen una eficiencia aproximada del 88.9 % con un flujo de 62.000-64.000 GPM a toda la Unidad de Balance. En el año 2011 entró en funcionamiento la planta HDT en Balance, no se hizo necesario el revamping del sistema de agua de enfriamiento debido a que los requerimientos de agua de la unidad no eran considerables para realizarlo, sin embargo puede ser un aportante a la falta de flujo de agua en la Unidad.

b) Ensuciamiento del haz y de línea de agua enfriamiento (PROBABLE):
De esta causa no se tiene evidencia para descartar o aceptar, sin embargo se tiene en cuenta que esta línea de agua de enfriamiento lleva aproximadamente 34 años de servicio sin mantenimiento alguno, por lo que se supone que ha venido perdiendo diámetro en la tubería debido a

incrustaciones o depósitos a causa de la calidad del agua de enfriamiento, generando restricción en el paso del flujo.

c) Rotura de la línea de agua de enfriamiento (PROBABLE): No se tiene evidencia para descartar ni para comprobar esta alternativa, pues desde su inicio de funcionamiento no se registra ningún estudio del estado de la tubería del cabezal de agua de enfriamiento, y en caso de tener pequeñas fugas por toda la Unidad de Balance la sumatoria de estas podría generar considerables pérdidas de flujo y presión.

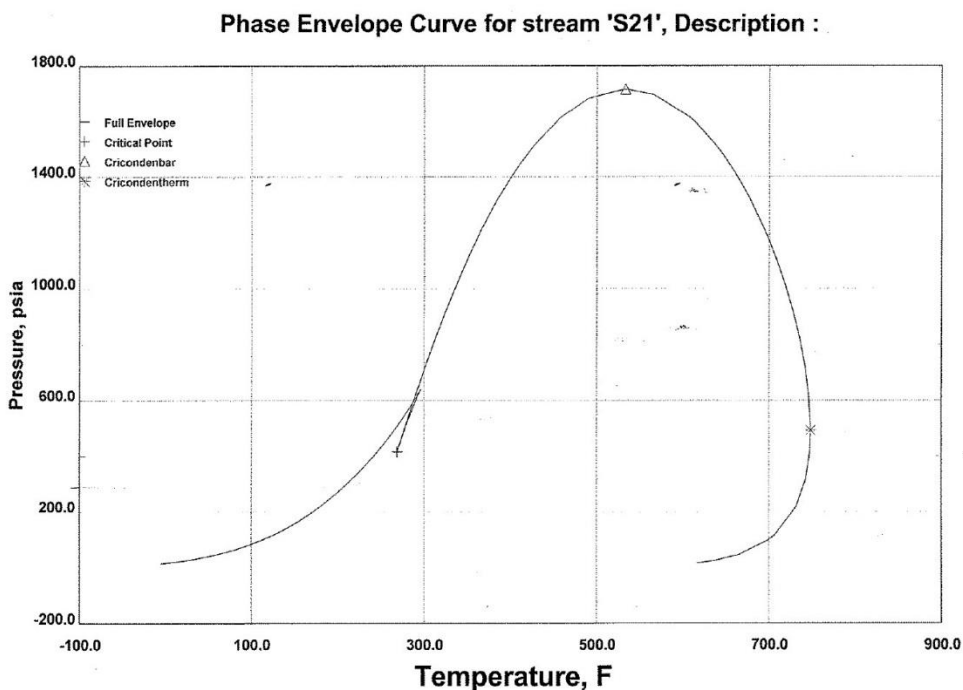
d) Celdas de la torre de agua de enfriamiento (DESCARTADA): Actualmente las celdas del sistema de agua de enfriamiento STE2945 operan adecuadamente y registran una eficiencia global aproximada de 50% lo cual es excelente teniendo en cuenta que eficiencias superiores al 30% en torres de enfriamiento son buenas, esto es el resultado de las limpiezas y mantenimientos programados que se han realizado a estos sistemas de enfriamiento. Según el último informe de corrida de eficiencia térmica realizada a la torre (diciembre de 2012), se recomienda la operación de seis (6) celdas en lugar de siete (7), esto con el propósito de asegurar ahorros energéticos y por concepto de mantenimiento. A causa del excelente desempeño del Sistema de enfriamiento del agua ésta llega a la Unidad Demex y por consiguiente a los intercambiadores con la temperatura óptima para realizar el intercambio de calor.

e) Baja presión de descarga de las bombas de la TE-2945 (DESCARTADA): Las bombas SP2945 tienen una capacidad de diseño de 23.000 GPM cada una. Se cuenta con 5 bombas A-B-D-E-F (la bomba SP2945C fue sacada de servicio el 04/05/2011) de las cuales se mantienen

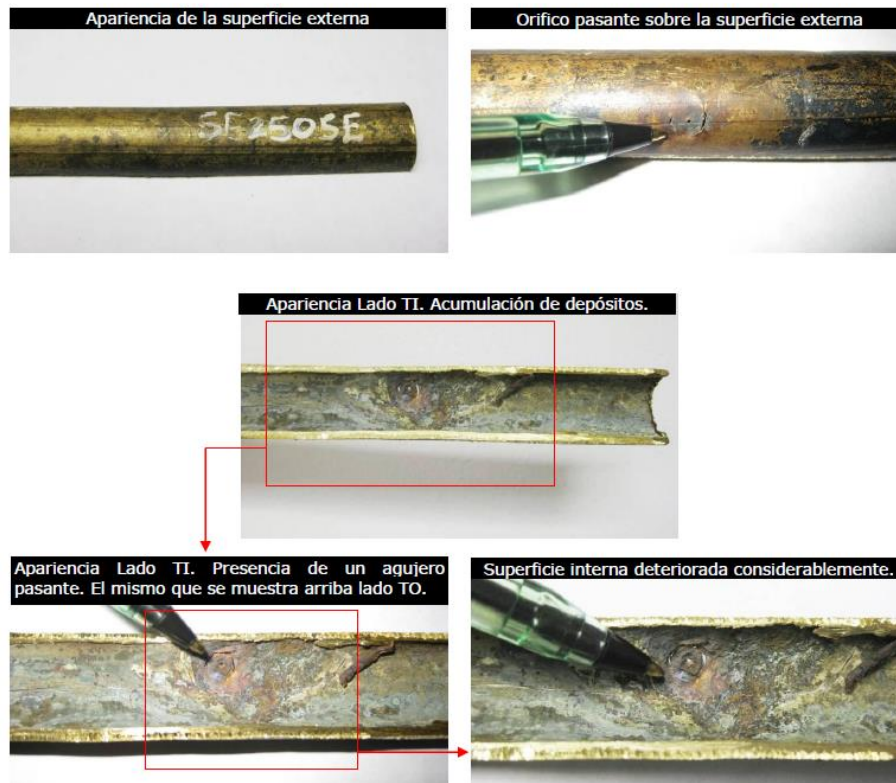
operando 3 en condiciones normales, las otras dos se encuentran en SB para el caso en el que sean necesarias. Cada una tiene una presión de descarga de aproximadamente 50-55 psi y ésta se ha mantenido dentro de su rango de diseño teniendo una alta eficiencia de operación, pero debido a las caídas de presión en la línea durante su transcurso hasta el Bloque I, donde se encuentra Demex, esta llega con una presión aproximada entre 40-38 psi actualmente.

- f) **Reducción del número de bombas de envío de agua de enfriamiento de la TE-2945 (DESCARTADA):** La cantidad de bombas que suministran el envío de agua de enfriamiento a Balance siempre ha sido la misma (3) por lo tanto esta opción es descartada.

Anexo K. Fase envolvente del solvente



Anexo L. Muestra de las cañuelas del haz de tubos estudiado



Anexo M. Factores principales que generan el fenómeno de corrosión por descincificación.

Dentro de los principales factores que generan este fenómeno están:

- ✓ Temperaturas superiores a los 140°F produce ensuciamiento.
- ✓ El ataque se puede dar con o sin presencia de oxígeno, pero si hay presencia el ataque aumenta exponencialmente.
- ✓ Contenidos de bacterias, CO₂, S, cloruros, carbonatos y bicarbonatos, facilita la acumulación de depósitos.
- ✓ Formación de óxidos de zinc.
- ✓ Alta concentración de sólidos suspendidos >100PPM

- ✓ Velocidades de flujo fuera del rango 3-5 ft/s. Velocidades bajas pueden causar deposición o en el caso de velocidades muy altas remoción de las capas protectoras e inducir un ataque localizado.
- ✓ Disminución del pH que no sólo genera descincificación si no también agrietamiento, lo cual no aplica para este caso.
- ✓ Zonas de pérdida localizada de material, rayones y discontinuidades.
- ✓ Baja concentración de arsénico en la composición del material el cual ayuda a hacer menos sensible el material al proceso de descincificación en los latones tipo alfa, el rango óptimo está entre 0.04-0.06% en nuestro caso tenemos solo un máximo de 0.025%.

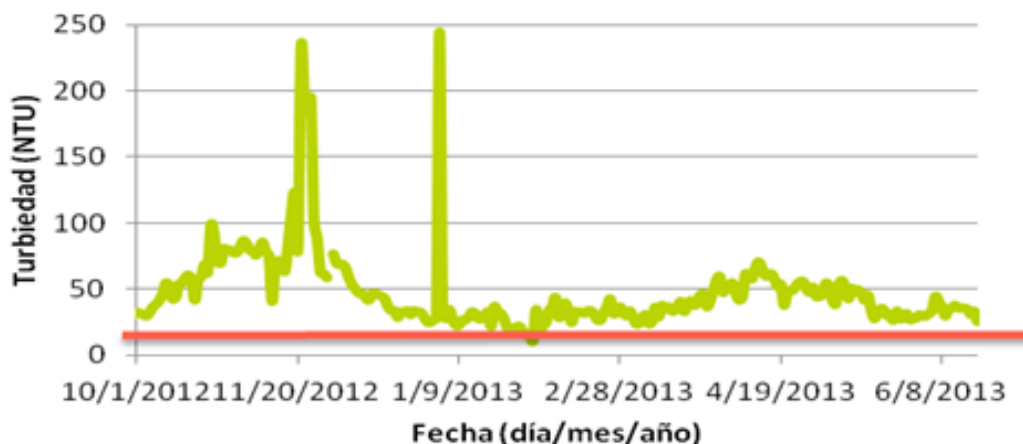
Anexo N. Composición química de la tubería Admiralty en el sistema.

Elemento %	Muestra M1	Muestra M2	ASTM B-111 (UNS C44300)
Cu	75.106 ± 0.167	75.233 ± 0.080	70.0 – 73.0
Sn	0.870 ± 0.025	0.866 ± 0.006	0.90-1.20
Pb	0.089 ± 0.000	0.089 ± 0.000	0.07 max
Fe	0.039 ± 0.001	0.042 ± 0.001	0.06 máx.
As	0.024 ± 0.000	0.024 ± 0.000	0.02 – 0.06
Si	0.005 ± 0.000	0.005 ± 0.000	---
Mn	0.001 ± 0.000	0.001 ± 0.000	---
Al	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	---
Zn	23.850 ± 0.192	23.726 ± 0.086	Balance

Anexo O. RCA parámetros de calidad del agua de enfriamiento deficientes: causas probables y descartadas.

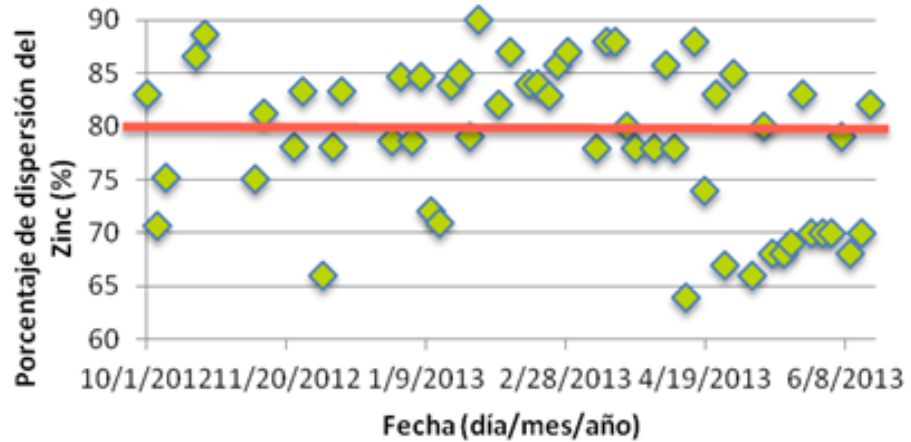
- a) **Turbiedad (PROBABLE):** El valor máximo permisible de turbiedad en este tipo de aplicaciones es de 30 NTU para una óptima calidad de agua de enfriamiento. Sin embargo, el agua empleada en planta supera dicho valor frecuentemente, alcanzándose valores superiores a 200 NTU en ciertas ocasiones. Esta condición en el sistema de reciclo de agua de enfriamiento se debe a que el agua de sustitución está ingresando con alta turbiedad a la torre enfriadora, pues los equipos clarificadores no pueden cumplir con las

especificaciones requeridas, a causa de que el agua que ingresa a la planta puede encontrarse perturbada por las constantes lluvias o algún otro factor ajeno al proceso. Sin embargo, aunque es un factor determinante en el ensuciamiento de la tubería y aporta en gran parte al agravamiento del problema, no es una causa-raíz de la rotura de la tubería.



- b) **Porcentaje de dispersión del Zinc (PROBABLE):** El porcentaje de dispersión de zinc es una medida de relación entre el zinc soluble y el zinc total. Entre más grande sea esta relación, mayor es el porcentaje de película protectora que permite evitar la descincificación en latones Admiralty principalmente. Para que esta relación se encuentre dentro de los parámetros de calidad debe ser mayor al 80%. Como se puede observar en la Figura, el porcentaje de dispersión se desvía un poco del parámetro de calidad. Esto es debido a que el zinc total reacciona con elementos impropios al proceso que ocurre en las torres enfriadoras, es decir, con hidrocarburos contaminantes provenientes del circuito de las plantas del Área de Balance, causando que el zinc disperso en el agua disminuya su porcentaje y, por lo tanto, su capacidad de protección. Por lo tanto, se concluye que aunque los valores se encuentren fuera del rango óptimo de

calidad de agua de enfriamiento, no es la causa raíz del problema, aunque sí contribuye a que éste se incremente.

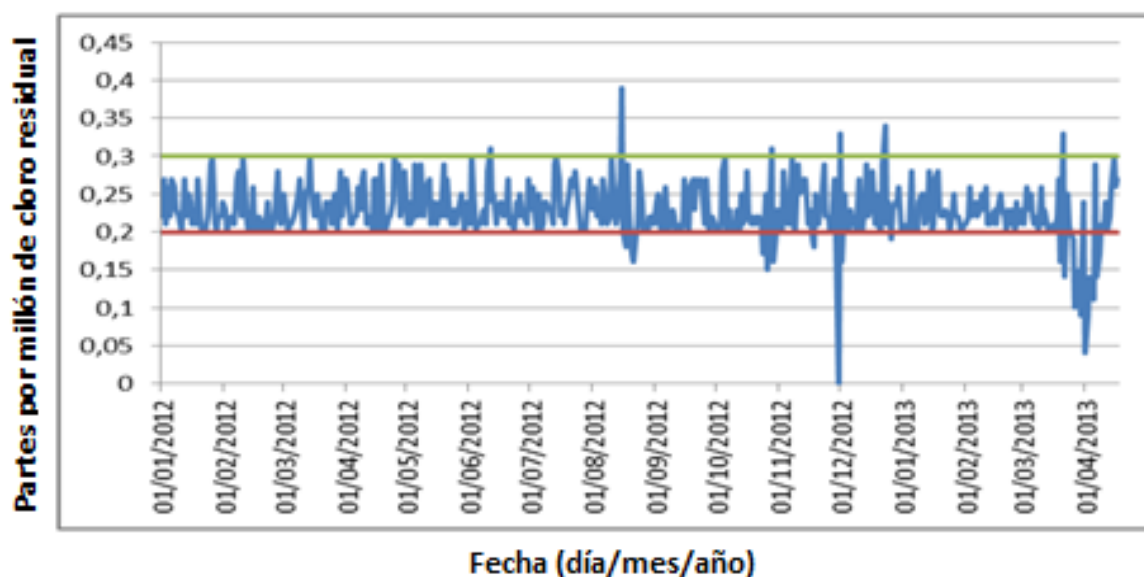


- c) **pH (DESCARTADO):** El valor de pH para el agua de recirculación debe estar controlado dentro del siguiente parámetro 7-7.6, como se muestra en la gráfica este parámetro se encuentra controlado.

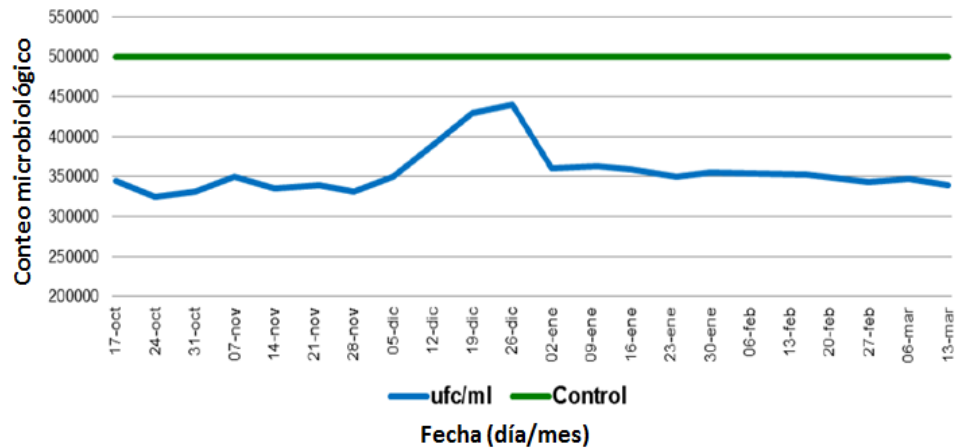


- d) **Residual de cloro (DESCARTADO):** El informe generado por Clariant muestra la cantidad de residual de cloro, el cual indica que se encuentra bajo control dentro de los parámetros establecidos de 0.2-0.3 ppm ya que

una dosis superior a 1 ppm provocaría deterioro en la película de azol que protege la metalurgia. Este residual de cloro se ve afectado por la contaminación con hidrocarburos o H₂S por lo que se le aplica un biocida no oxidante para mantener la población microbológica dentro del límite exigido.



e) **Conteo microbiológico (DESCARTADO):** La gráfica a continuación indica que el conteo microbiológico se encuentra dentro los parámetros permitidos, así que se hace evidente que al llevar un control del residual de cloro y del conteo microbiológico se evita el dezincado por acción oxidante del cloro y por colonias bacterianas a causa del agua de enfriamiento, lo que descarta el deficiente tratamiento químico del agua de enfriamiento como una causa raíz del problema en el equipo de estudio.



Anexo P. Composición química del Dúplex SAF 2507.

Cr	Ni	Mo	C	N	Mn
24,0-26,0	6,0-8,0	3,0-5,0	0,030 Max	0,24-0.32	1,20 Max
Si	Cu	P	S	Fe	
0,80 Max	0,50 Max	0,035 Max	0,020 Max	Balance	

Anexo Q. Alternativas de solución descartadas.

- a) **Inyectar un químico anticorrosivo especial al agua de ingreso a los intercambiadores:** Esta alternativa resulta inviable pues no se cuenta con un sistema de agua de enfriamiento en circuito cerrado en la planta. El circuito de agua de enfriamiento en la que se encuentra Demex es compartido con 5 plantas más y es enviado a la Unidad de Servicios Industriales Balance en donde es tratada, por ello se debería hacer una constante inyección de químico anticorrosivo especial (para tolerar temperaturas superiores a 120 °F) que no podría ser recuperado en este

sistema de circulación abierto generando una gran pérdida económica y adicionalmente una posible afectación ambiental.

- b) Realizar un By-pass de solvente para compensar la baja temperatura de salida de los intercambiadores:** Esta alternativa consiste en crear una facilidad para dejar pasar una fracción de solvente sin condensar a 280°F por una línea que luego se uniría a la corriente de salida de los intercambiadores de calor que al trabajar con válvulas alineadas, es decir con todo el flujo de agua de enfriamiento, alcanzaría una temperatura aproximada de 130°F (por debajo de la guía de control). Con la mezcla de estas corrientes se pretendería alcanzar la temperatura adecuada a la entrada al Drum (D-2505). Al no contar con un tiempo conveniente de mezcla en las líneas no se podría asegurar la condensación completa del solvente y tampoco la temperatura adecuada, esto generaría una condición insegura para el proceso.
- c) Utilizar 4 intercambiadores para condensación y 2 para enfriamiento:** Esta alternativa fue descartada pues luego de un análisis de riesgos del sistema se concluyó que era inviable ya que en caso de falla del intercambiador con la función de enfriar (inferior) el sistema se vería seriamente afectado al superar la temperatura máxima a la entrada del D-2505 de recirculación de solvente, y bajo estas condiciones podría generar un sobrepresionamiento del sistema y por ende la activación del sistema de alta integridad de la planta Demex. Además bajo esta nueva situación se superaría la caída de presión permisible entre el Drum (D-2505) y la Torre despojadora (T-2501) que no debe superar los 10 psi, esto sucede a causa de que el flujo a entrar por los intercambiadores inferiores aumentaría generando una caída de presión mucho mayor (15 psi aprox.) que la permisible en el sistema de enfriamiento.

Anexo R. Análisis de los PRO-CONTRA de las alternativas aceptadas

- INTERCAMBIADORES EN PARALELO

PRO	CONTRA
<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la disponibilidad del sistema. • No se hace necesario hacer bajas de carga en caso de falla de algún equipo. • Opera con válvulas alineadas. • Ahorro en consumo de agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Rediseño de las líneas de tubería. • Compra de válvulas orbit.

- REDUCCIÓN DEL ÁREA DE INTERCAMBIO

PRO	CONTRA
<ul style="list-style-type: none"> • Se ataca la causa raíz haciendo una distribución del Duty a restirar respecto al área requerida. • Velocidad del agua de enfriamiento por los tubos dentro de los parámetros correctos. • No requiere restricciones operacionales. • Requiere intercambiadores con menos cantidad de tubos. • No necesita cambios de configuración del sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> • No hay flexibilidad en el sistema. • Requiere baja de carga en caso de daño en alguna pareja.

- INTEGRACIÓN TÉRMICA CON LOS E-2503

PRO	CONTRA
<ul style="list-style-type: none"> • Aprovechamiento de una línea caliente para calentar una fría. • Ahorro en el consumo de vapor para calentar. • Reducción del Duty a retirar en los E-2505. • Menor consumo de agua por reducción del número de intercambiadores E-2505 a utilizar. • Se tendrían 2 intercambiadores E-2505 en SB. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se necesitan nuevas líneas de tubería. • Se requieren intercambiadores E-2503 nuevos. • Requiere adecuar el sistema SE-2505 de modo que puedan funcionar 4 intercambiadores de forma paralela. • Compra de válvulas orbit. • Evaluación técnico-económica de la ubicación del vapor de 50psi.

- CAMBIO DE METALURGIA

PRO	CONTRA
<ul style="list-style-type: none"> • Disminución en la frecuencia de los eventos de rotura de tubería. TMEF > TMEF actual. • No se necesita modificar el sistema. • Mayor vida útil. • Tiene valor comercial luego de finalizar su vida útil. 	<ul style="list-style-type: none"> • No se ataca la causa raíz. • Menor conductividad térmica. • Pérdida de eficiencia a causa de la deposición por altas temperaturas de salida del agua de enfriamiento. • Alto costo de tubería. • Se necesita taponar tubos de los intercambiadores inferiores.

Anexo S. Cálculos económicos estimativos de las alternativas

- INTERCAMBIADORES EN PARALELO

Inversion inicial		1.922.100	
	Flujos de caja negativos	Flujos de caja positivos	
Año	Gastos por mtto en parada gral	Beneficio por operación estable	Flujos de caja (+)
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	1.768.500	1.768.500
4	0	0	0
5	120.000	0	-120.000
6	0	1.768.500	1.768.500
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	1.768.500	1.768.500
10	120.000	0	-120.000
TASA	10%		11%
VPN			880.933

- REDUCCIÓN DEL ÁREA DE INTERCAMBIO

Inversion inicial		1.210.500	
	Flujos de caja negativos	Flujos de caja positivos	
Año	Gastos por mtto en parada gral	Beneficio por operación estable de las unidades	Flujos de caja (+)
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	1.768.500	1.768.500
4	0	0	0
5	120.000	0	-120.000
6	0	1.768.500	1.768.500
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	1.768.500	1.768.500
10	120.000	0	-120.000
TASA	10%		11%
VPN			1.592.533

- INTEGRACIÓN TÉRMICA CON LOS E-2503

Inversion inicial			14.912.250	
	Flujos de caja negativos	Flujos de caja positivos	Flujos de caja positivos	
Año	Gastos por mtto en parada gral	Ahorro de agua y vapor	Beneficio por operación estable	Flujos de caja (+)
1	0	2.945.331	0	2.945.331
2	0	2.945.331	0	2.945.331
3	0	2.945.331	1.768.500	4.713.831
4	0	2.945.331	0	2.945.331
5	120.000	2.945.331	0	2.825.331
6	0	2.945.331	1.768.500	4.713.831
7	0	2.945.331	0	2.945.331
8	0	2.945.331	0	2.945.331
9	0	2.945.331	1.768.500	4.713.831
10	120.000	2.945.331	0	2.825.331
TASA	10%			11%
VPN				5.164.027

- CAMBIO DE METALURGIA

Inversion inicial		1.965.000	
	Flujos de caja negativos	Flujos de caja positivos	
Año	Gastos por mtto en parada gral	Beneficio por operación estable de las unidades	Flujos de caja (+)
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	1.768.500	1.768.500
4	0	0	0
5	120.000	0	-120.000
6	0	1.768.500	1.768.500
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	1.768.500	1.768.500
10	120.000	0	-120.000
TASA	10%		11%
VPN			838.033