

**Diagnóstico integral para el mejoramiento del desempeño operacional de los tanques *Gun*
Barrel K-22 y K-3065 de la refinería de Barrancabermeja**

Dayana María Harris Vanegas

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Química

Directora

Debora Alcida Nabarlatz

Ingeniera Química, PhD.

Tutor

Nicolás González Galvis

Ingeniero Ambiental, MSc.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2020

Agradecimientos

Al Ser Supremo, por permitirme alcanzar este logro.

A ECOPETROL S.A. por darme la oportunidad de realizar mi práctica empresarial en sus instalaciones y brindarme herramientas para desarrollar mi trabajo de grado.

Al equipo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Refinería de Barrancabermeja por su colaboración y amabilidad.

A mis compañeros de prácticas por hacer de esta, una experiencia inolvidable.

A la profesora Débora Nabarlatz por su apoyo y orientación durante la escritura de este documento.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Química por ser mi hogar durante todo este tiempo y brindarme la formación necesaria para desempeñarme como una profesional integral.

A mis amigos de la carrera, en especial Natis, Juli y Cami porque juntos construimos una bonita amistad y logramos vencer los obstáculos para cumplir nuestros objetivos.

Dedicatoria

A Rose, por su amor infinito y su incansable apoyo, porque nunca dudó de mis capacidades.

A mi familia y a Las Divinas, por darme ánimos y llenarme de motivos cuando quise renunciar.

A Mayo, porque ya no está aquí para verlo.

Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Marco teórico	16
2. Objetivos	21
2.1 Objetivo general	21
2.2 Objetivos específicos	21
3. Alcance	22
4. Descripción metodológica	22
4.1 Primera etapa: Revisión bibliográfica y documentación teórica	23
4.2 Segunda etapa: Determinación del desempeño operacional de los tanques	23
4.2.1 Levantamiento de información en campo	23
4.2.2 Prueba de diagnóstico y análisis de las muestras	23
4.2.3 Verificación teórica de la capacidad de procesamiento de slop.	24
4.3 Tercera etapa: Definición de las condiciones recomendadas de operación	25
4.4 Cuarta etapa: Formulación de recomendaciones técnicas para el mejoramiento del desempeño operacional	26
5. Análisis de resultados	27
5.1 Análisis del desempeño operacional de los sistemas	27
5.1.1 Calidad de la carga y estado actual del sistema	27

5.1.1.1 Histórico del tipo de slop tratado.....	27
5.1.1.2 Resultados de la inspección del estado actual de los gun barrels	28
5.1.2 Prueba de diagnóstico.....	30
5.1.3 Verificación teórica de la capacidad de tratamiento del slop.....	34
5.2 Análisis causa raíz de los altos inventarios de slop	37
5.3 Condiciones de operación recomendadas para los tanques gun barrel	39
6. Estrategias para el mejoramiento del desempeño operacional de las facilidades	44
7. Conclusiones	47
8. Recomendaciones	48
Referencias Bibliográficas	49
Apéndices.....	51

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Potencial económico en el aprovechamiento de slop	15
Tabla 2. Datos de diseño de los tanques K-22 y K-3065 y su sistema de calentamiento	18
Tabla 3. Condiciones de operación consideradas en la evaluación teórica.	25
Tabla 4. Calor requerido para el tratamiento en los tanques, $\times 10^5$ BTU/h	43
Tabla 5. Condiciones de operación recomendadas para los sistemas.	44

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Esquema general de los trenes de tratamiento de slop en la GRB.....	17
<i>Figura 2.</i> Esquema general de un tanque gun barrel con pierna de gas interna y controlador de nivel externo.....	19
<i>Figura 3.</i> Diagrama de la metodología para el desarrollo de este trabajo.	22
<i>Figura 4.</i> Caracterización del slop (gravedad API del efluente) del tanque a) K-22 y b) K-3065 durante el último año.	27
<i>Figura 5.</i> Comportamiento del valor de BS&W en los gun barrels a) K-22 y b) K-3065.	30
<i>Figura 6.</i> Composición del BS&W en a) K-22, b) SE-3050, c) K-3065 y d) SE-3060.	32
<i>Figura 7.</i> Comportamiento de las grasas y aceites en el agua de lavado de los sistemas.....	33
<i>Figura 8.</i> Comportamiento de la temperatura de tratamiento en a) K-22 y b) K-3065.....	34
<i>Figura 9.</i> Comportamiento del tiempo de retención versus la altura de calibración del controlador de nivel con diferentes temperaturas para un slop de a)10,9 °API, b)17,25 °API y c)25,9 °API en el tanque K-22 y d) 20,4 °API, e)23,28 °API y f) 28,8 °API en el tanque K-3065.....	36
<i>Figura 10.</i> Diagrama de Ishikawa para los altos inventarios de slop en PTAR.	38
<i>Figura 11.</i> Efecto de la temperatura sobre el BS&W en el K-3065.	40
<i>Figura 12.</i> Efecto de la temperatura sobre crudos de a) alta, b) intermedia y c) baja gravedad °API como los tratados en el K-22.	40

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Inventario de Slop en la GRB durante el 2019.	51
Apéndice B. Evidencia fotográfica de las muestras analizadas	52
Apéndice C. Procedimiento para verificación teórica de capacidad de procesamiento de slop en sedimentadores verticales	55
Apéndice D. Consideraciones para el cálculo del calor requerido para desestabilizar la emulsión al interior del tanque	60
Apéndice E. Detalles de los distribuidores de flujo de los tanques	61

Resumen

Título: Diagnóstico integral para el mejoramiento del desempeño operacional de los tanques Gun Barrel K-22 y K-3065 de la refinería de Barrancabermeja*

Autora: Dayana María Harris Vanegas**

Palabras Claves: SLOP, Gun Barrel, Emulsión, BS&W

Descripción:

El slop es uno de los desechos de las petroleras más costosos de tratar y su gestión constituye uno de los mayores desafíos que estas deben enfrentar debido al recrudescimiento de las legislaciones ambientales frente a la calidad de los vertimientos industriales, por esta razón la Refinería de Barrancabermeja de Ecopetrol ha adoptado estrategias para su aprovechamiento. Sin embargo, debido a la composición y los requerimientos de calidad que debe cumplir el hidrocarburo para ser procesado, el slop necesita ser tratado para reducir su cantidad de agua y sedimentos (BS&W). Para este propósito usualmente son utilizadas facilidades de superficie como los tanques gun barrel que permiten obtener slop deshidratado mediante la separación gravitacional del agua y los sólidos. Pese a esto, actualmente no se logra la calidad de tratamiento, lo que ha incrementado sus niveles de inventario, por esta razón, en este proyecto se realizó una evaluación del desempeño de estos tratadores a través de una prueba diagnóstica de operación y verificación teórica de su capacidad de tratamiento a partir de las cuales se encontró que es necesario ajustar prácticas operacionales y realizar adecuaciones en la instrumentación, planes de mantenimiento y verificación de la calidad del vapor de acuerdo a los esquemas operacionales actuales. Por lo tanto, se emitieron una serie de recomendaciones que permitan mejorar su desempeño operacional y reducir niveles de inventarios de esta sustancia.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: Debora Alcida Nabarlantz, Ingeniería Química, PhD.

Abstract

Title: Comprehensive diagnosis for the improvement of the operational performance of the K-22 and K-3065 Gun Barrel tanks in Barrancabermeja's refinery*

Author: Dayana María Harris Vanegas**

Keywords: Slop, Gun Barrel, Emulsion, BS&W

Description:

The slop is one of the most expensive waste from the oil companies to treat and its management constitutes one of the greatest challenges that they must face due to the intensification of environmental legislation regarding the quality of industrial dumping, for this reason, the Barrancabermeja Refinery Ecopetrol has adopted strategies for its use. However, due to the composition and quality requirements that the hydrocarbon must meet to be processed, the slop needs to be treated to reduce its quantity of water and sediments (BS&W). For this purpose, surface facilities such as gun barrel tanks are usually used to obtain dewatered slop by gravitational separation of water and solids. Despite this, the quality of treatment is currently not achieved, which has increased their inventory levels, for this reason, in this project, an evaluation of the performance of these treaters was carried out through a diagnostic operation test and theoretical verification of its treatment capacity, from which it was found that it is necessary to adjust operational practices and make adjustments in instrumentation, maintenance plans and verification of steam quality according to current operational schemes. Therefore, a series of recommendations were issued to improve its operational performance and reduce inventory levels of this substance.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: Debora Alcida Nabarlantz, Ingeniería Química, PhD.

Introducción

Presentación de la empresa

Ecopetrol S.A. es la empresa más grande de Colombia y su principal petrolera. Gracias a su tamaño, se encuentra entre las 39 empresas de petróleo y gas más importantes del mundo y es una de las 5 principales en Latinoamérica (Ecopetrol S.A., 2020). Realiza actividades de exploración, extracción, refinación, transporte y comercialización de petróleo, gas y refinados. Cuenta con campos de extracción de crudo en el norte, sur, oriente y centro de Colombia, cuatro refinerías (Barrancabermeja, Cartagena, Orito y Apiay), puertos para exportación e importación de crudo y combustibles en la costa atlántica y pacífica además de una red de 8.500 kilómetros de oleoductos y poliductos a lo largo del país que comunican a los centros de producción con los terminales marítimos y centros de consumo.

La Refinería de Barrancabermeja (GRB) es la más grande del país y maneja una carga de crudo promedio de 230.000 barriles por día con un porcentaje de conversión entre el 85-88%. Este complejo posee un total de 52 unidades entre las que se encuentra la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales - U-4000 (PTAR) que trata los efluentes de aguas químicas y aceitosas y soda cáustica gastada provenientes del pretratamiento y refinación del crudo, así como post-tratamiento de sus derivados

Planteamiento y descripción del problema

En la GRB se utilizan separadores API para segregar la fase oleosa de los vertimientos aceitosos antes de tratar el agua residual en PTAR. El hidrocarburo recuperado (conocido como slop) está constituido principalmente por grasas y aceites provenientes de los vertimientos de las unidades de destilación atmosférica, hidrotratamiento y craqueo catalítico. Este es considerado un desecho contaminante cuya gestión es costosa y es producido en una cantidad equivalente al 0,1-1,5 % del total del crudo cargado a las unidades de destilación (Gutzeit, 2016), cantidad que puede incrementarse por fallas en equipos y generación de productos fuera de especificación. Debido a esto, tradicionalmente el slop es almacenado y su gestión es frecuentemente realizada en pequeñas cantidades. Sin embargo, la identificación de oportunidades de valorización conllevó a la implementación de un proceso de acondicionamiento. Así, el slop debe ser tratado hasta alcanzar un bajo contenido de agua y sedimentos (BS&W) ya que una elevada concentración de sólidos genera ensuciamiento y taponamiento de tuberías y equipos, mientras que una gran proporción de agua en la mezcla puede ocasionar daños en los hornos de precalentamiento del crudo además de incrementar el requerimiento energético (Enap, 2020).

Pese a los esfuerzos realizados en la planta, actualmente se presentan inventarios de esta sustancia que superan los 33.000 barriles frente a un ideal de 21.000, cantidad mínima que garantiza el funcionamiento de los sistemas de bombeo (Apéndice A). Este inconveniente es usualmente asociado a los largos periodos de tiempo que toma alcanzar las especificaciones de calidad para aprovechamiento de slop que demandan una composición final de 0,1% vol de BS&W para comercializar o tratar el slop en las unidades de craqueo y destilación primaria y 4 % vol para

ser utilizado en la preparación de combustóleo, cuyo precio de venta al momento de la realización de este trabajo se encontraba en 34,7 USD/barril versus 17 USD/barril para el slop¹.

La información consignada en la Tabla 1 permite vislumbrar el impacto económico del desaprovechamiento de slop en el negocio. Se muestra que mensualmente existe la necesidad de garantizar la calidad de al menos 7.290 barriles para alcanzar el ideal de almacenamiento antes mencionado y que su aprovechamiento implica que la Refinería podría recibir ingresos por hasta 151.777.800 USD cada año, considerando que con una composición habitual del 2 % vol se pueden preparar aproximadamente 364.500 barriles de combustóleo mensuales².

Tabla 1.

Potencial económico en el aprovechamiento de slop

Inventario promedio de slop en 2019 (bbls/mes)	Cantidad neta de slop aprovechable (bbls/mes)	Ingresos potenciales por venta de slop (USD/año)	Ingresos potenciales por venta de combustóleo (USD/año)
28.290	7.290	1.487.160	151.777.800

Por otro lado, dada su naturaleza contaminante, en la gestión del slop no se considera solo el impacto económico por desaprovechamiento, sino que, un agotamiento en la capacidad de almacenamiento afecta el esquema de recuperación del aceite del agua residual, lo que implica disminución de la calidad de la carga en PTAR que a su vez se traduce en un disturbio operacional que obliga al reajuste de las variables claves en el tratamiento y pone el riesgo la calidad del vertimiento. Así entonces la afectación al medio ambiente puede conducir a sanciones ambientales

¹ Departamento de Blending y Materias Primas de la GRB. Enero de 2020.

² Debido a que no se posee información sobre el rendimiento del slop a productos en las unidades de refinación, no es posible determinar el beneficio económico en esta área. Sin embargo, se espera que fuese mayor.

que según la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible pueden alcanzar los 5000 SMMLV por día de incumplimiento, cierre temporal o definitivo, revocatoria o caducidad de la licencia ambiental entre otros, establecidos en la ley 1333 de 2009.

La dificultad en el cumplimiento de calidad de este residuo se encuentra fuertemente relacionada con la operación de los llamados *gun barrels*, principales equipos en los trenes de tratamiento que permiten reducir la concentración de BS&W en el hidrocarburo. Sin embargo, no se evidenció la existencia de un plan de monitoreo para estos sistemas por lo que no se posee información sobre su desempeño real. De esta manera, para avanzar en la resolución del problema de la gestión de slop se ha identificado que es de vital importancia preguntarse ¿cuál es el desempeño operacional actual de estos equipos y qué estrategias se pueden implementar para mejorar el tratamiento del slop?

1. Marco teórico

La Coordinación de Control y Gestión Ambiental de la GRB cuenta con tres trenes de tratamiento de slop cuya representación general se muestra en la Figura 1 (Ecopetrol S.A. , s.f.). El tratamiento comienza cuando la corriente de vertimiento llega a los separadores API donde el hidrocarburo es separado del agua por gravedad a medida que la corriente recorre los canales. El flujo de agua continúa su curso hacia la piscina de carga de PTAR, mientras que el slop recuperado se transfiere a un lugar de almacenamiento subterráneo conocido como caja de slop desde donde se bombea por baches hacia los tanques *gun barrels* donde la emulsión se somete a un tratamiento térmico y

gravitacional para reducir su porcentaje BS&W. Posteriormente se realiza una nueva carga y el hidrocarburo deshidratado se transfiere por rebose hacia los tanques de decantación donde se continúa la separación del agua remanente por gravedad, la cual es eliminada a través del drenaje periódico del tanque; en lo que respecta al slop, se transfiere una vez más por rebose hacia tanques de almacenamiento de producto intermedio donde se determina regularmente el porcentaje de BS&W. Si en este punto se alcanza el requerimiento de calidad, el slop es bombeado al tanque de almacenamiento de producto final desde donde se realiza la transferencia a las unidades de proceso. De lo contrario, es recirculado a través de un sistema auxiliar de tuberías al tanque de decantación (Ecopetrol S.A. , s.f.).

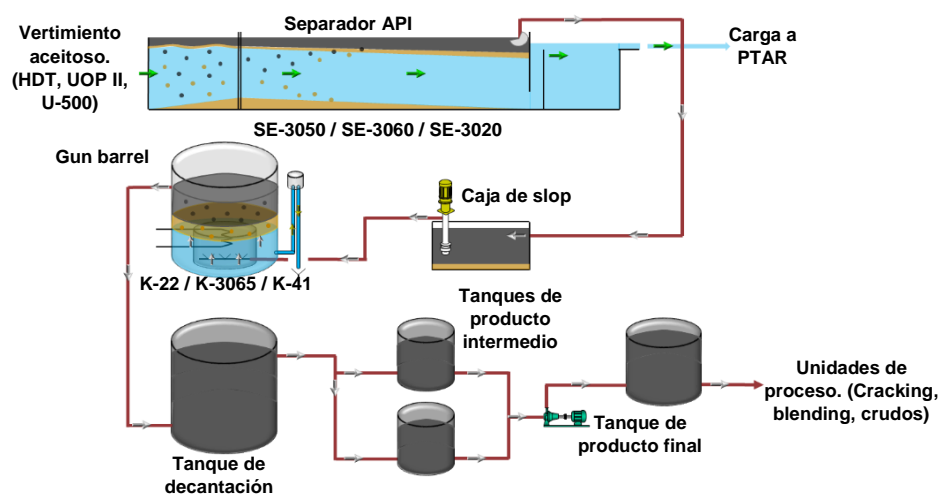


Figura 1. Esquema general de los trenes de tratamiento de slop en la GRB.

Los gun barrels K-22, K-3065 y K-41 están ubicados en las áreas de PTAR, Balance y Refinería, respectivamente. Los tanques estudiados³, K-22 y K-3065, tienen techo cónico

³ Durante el momento de ejecución de este trabajo, el tanque K-41 se encontraba en mantenimiento general por parada de planta en el separador SE-3020 por lo cual no se consideró objeto de estudio.

remachado, medidor diferencial de presión y poseen internamente distribuidores de flujo y serpentines de vapor. Los detalles de diseño los tratadores se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.

Datos de diseño de los tanques K-22 y K-3065 y su sistema de calentamiento

Parámetro	Información sobre los tanques	
	K-22	K-3065
Altura (mm)	9229	6100
Diámetro (mm)	9163	3505
Tipo de sistema de distribución	Flauta con orificios	Flauta con orificios
Sistema de calentamiento	Serpentín helicoidal	Serpentín tipo parrilla
Temperatura de operación (°F)	180	170
Presión operación (psig)	14,7	14,7
Capacidad (bbls)		360
Volumen de carga (BPDO)	300	200
Información sobre el vapor suministrado a los serpentines		
	Operación	Diseño
Temperatura (°F)	400	450
Presión (psig)	50	75

Estos tratadores hacen parte de las facilidades de superficie más antiguas en los campos de extracción (Gutzeit, 2016) y se utilizan para separar el agua producida en los yacimientos junto con el crudo mediante la inyección de la mezcla en un volumen de agua limpia, cuyo nivel se regula mediante un balance de presiones hidrostáticas entre el interior y el exterior del tanque; debido a la liberación de pequeñas cantidades de gas, usualmente estos tanques cuentan con un sistema de liberación de vapores. A pesar de que los detalles de diseño cambian de acuerdo a la

empresa, la Figura 2 (Stewart & Arnold, 2008) muestra el esquema general de un gun barrel con pierna de gas interna, distribuidores de flujo y controlador de nivel por diferencial de presión, donde es posible distinguir cuatro zonas: gas, hidrocarburo deshidratado, interfase o zona de emulsión y agua de lavado.

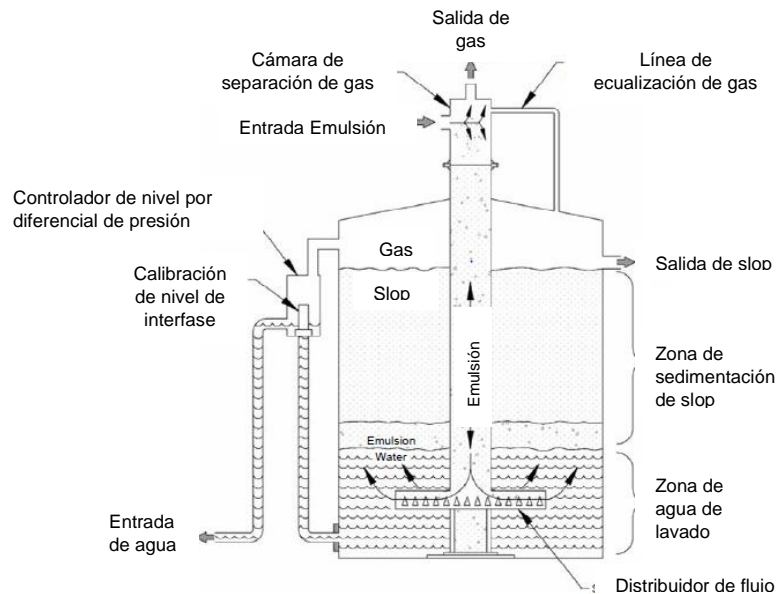


Figura 2. Esquema general de un tanque gun barrel con pierna de gas interna y controlador de nivel externo. Nota. Tomado de: Stewart, M.; Arnold, K. (2008) Emulsions and oil treating equipment: Selection, sizing and troubleshooting, 1st ed. Amsterdam: Elsevier Gulf Professional Publishing

El éxito de la separación se debe principalmente a dos fenómenos que ocurren simultáneamente: coalescencia y sedimentación. El primero corresponde a la dinámica que se lleva a cabo cuando varias gotas pequeñas se juntan progresivamente hasta formar otras de mayor tamaño. Una elevada relación de volumen favorece dicho fenómeno por lo que es necesario garantizar una trayectoria de flujo tipo pistón que asegure un factor de corto circuito con valor cercano a 1 para evitar la distribución desigual de la mezcla y desaprovechar la capacidad neta del

tratador (Forero, Ortíz, Nariño, Díaz, & Peña, 2008). El segundo fenómeno obedece a la Ley de Stokes (Ec. 1) cuya expresión permite concluir que un mayor tamaño de gota y una mayor diferencia de densidad entre las fases son claves para lograr una más rápida separación. Pese a sus restricciones (Delgado-Linares, y otros, 2012), es una buena aproximación al comportamiento real de los fluidos si se garantiza un tiempo de decantación lo suficientemente largo.

$$V = \frac{2(\rho_p - \rho_f)gR^2}{9\eta} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde R: radio de la partícula, ρ_p : densidad de la partícula, ρ_f : densidad del fluido, η :

viscosidad del fluido, g : gravedad, V : velocidad terminal de sedimentación

Aunque originalmente los gun barrels fueron concebidos para deshidratar crudos de gravedades específicas entre 20 y 35 °API (Stewart & Arnold, 2008), es común manejar hidrocarburos pesados en lugares como Indonesia y California (Gutzeit, 2016). Sin embargo, debido a su origen y composición se produce la formación de emulsiones W/O (del inglés *Water in Oil*) muy fuertes y difíciles de romper que pueden separarse sólo parcialmente en cuestión de días o incluso semanas con velocidades de sedimentación inferiores a 1 m/día (Gutzeit, 2016) (Stewart & Arnold, 2008), haciendo necesaria la implementación de tratamientos complementarios. De la misma manera, las emulsiones, cuyo porcentaje de agua varía entre 1-60 % vol, causan una mayor caída de presión en las tuberías, incrementan el consumo de químicos para generar productos en especificación y estimulan los procesos de corrosión en los equipos, lo que aumenta los costos de mantenimiento (Forero, Ortíz, Nariño, Díaz, & Peña, 2008).

Así entonces, es crucial garantizar la desestabilización de las micelas lograr la segregación de las fases. Es por eso que se debe tener control sobre las variables cuyo incremento tiene un efecto positivo en su desestabilización como son la temperatura, la tensión superficial, la diferencia entre la densidad de los fluidos, el tamaño de gota de la fase dispersa, la relación de volumen entre las

fases y la salinidad, mientras que otras como la edad de la emulsión o la presencia de cationes en la mezcla, promueven su estabilización (Forero, Ortíz, Nariño, Díaz, & Peña, 2008). Siendo la temperatura, la relación volumétrica de las fases y la edad de la emulsión las variables más simples y económicas de manipular. Sin embargo, dependiendo la naturaleza de la emulsión, puede existir una fracción de agua que permanece suspendida a pesar de los largos tiempos de sedimentación.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Diagnosticar y formular recomendaciones técnicas que permitan mejorar la separación de las fases hidrocarburo/agua en los sistemas *gun barrel* de la Refinería de Barrancabermeja.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar fallas en la operación de los tanques K-22 y K-3065 de la GRB que afectan actualmente su desempeño.
- Determinar las condiciones teóricas de operación más adecuadas mediante la definición de la temperatura de tratamiento y altura del empaque de agua.
- Formular recomendaciones técnicas que permitan mejorar el desempeño de los tanques *gun barrel*.

3. Alcance

Diagnosticar el desempeño operacional de los tanques K-22 y K-3065 de la GRB por medio de una prueba diagnóstica y validación teórica de su capacidad de tratamiento y a partir de los resultados obtenidos definir acciones estratégicas que permitan mejorar la separación de las fases agua-aceite para mejorar la calidad del slop tratado y reducir sus inventarios de almacenamiento.

4. Descripción metodológica

Este proyecto se desarrolló durante la práctica empresarial entre julio de 2019 y enero de 2020 a partir de la ejecución de las cuatro etapas metodológicas de la Figura 3.

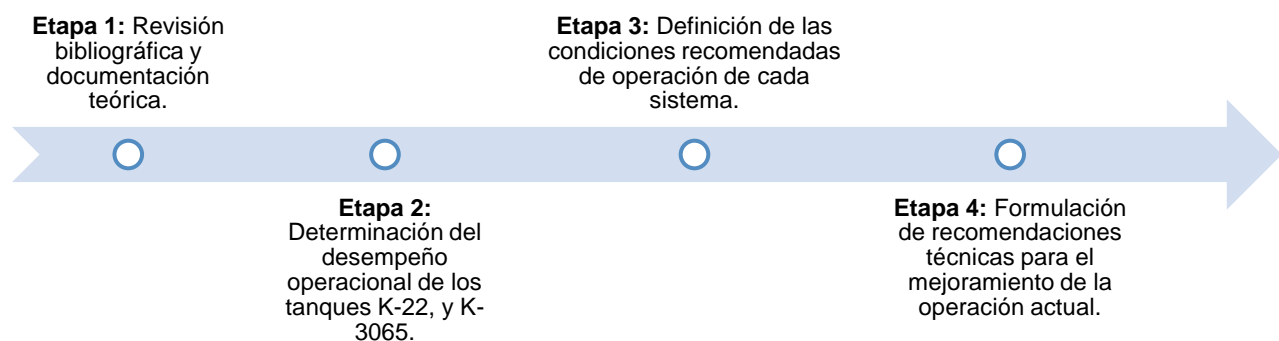


Figura 3. Diagrama de la metodología para el desarrollo de este trabajo.

4.1 Primera etapa: Revisión bibliográfica y documentación teórica

Durante la documentación se consultó bibliografía especializada sobre sistemas de separación agua-aceite, historial de reportes operacionales de los últimos 3 años y planos mecánicos y condiciones de diseño y operación de los tanques desde su puesta en funcionamiento en 1983. Adicionalmente se recopiló información sobre los históricos de recolección y entrega de slop de enero a diciembre de 2019; de la misma manera se compiló la información disponible en el sistema de datos de laboratorio de la Refinería, LabView, sobre las características del slop tratado en los tanques K-22 y K-3065 de diciembre de 2018 a diciembre de 2019. Debido a la migración reciente a esta herramienta, no se encontró disponible información previa a esta fecha.

4.2 Segunda etapa: Determinación del desempeño operacional de los tanques

4.2.1 Levantamiento de información en campo. Se realizó inspección visual en cada uno de los tanques en compañía de operadores e ingenieros de operaciones de la planta. Por medio de estas entrevistas y las visitas de campo se recopiló información cualitativa sobre el estado del funcionamiento, durante el periodo mencionado en la etapa anterior, de los sistemas de suministro de calor, instrumentación local para medición de temperatura y sistema de control de nivel de la columna de agua a partir la medición del diferencial de las presiones externas e internas.

4.2.2 Prueba de diagnóstico y análisis de las muestras. Debido al hecho de que a los tanques no se les realiza ningún tipo de monitoreo, se llevó a cabo una prueba de diagnóstico por 5 días. Las muestras de slop fueron tomadas de la caja de slop que recolecta el aceite proveniente del

separador API y la zona de rebose de los tanques mediante toma-muestras de petróleo tipo botella (Ecopetrol S.A., s.f.), mientras que el agua se sustrajo del fondo de los mismos a través de la boquilla toma-muestras inferior de cada tanque; el horario de muestreo fue entre las 7:00 y 9:00 a.m. Se recolectaron tres muestras en botellas ámbar de 500 ml por día en cada sistema para un total de 30 muestras durante la prueba. Las muestras de agua se acidificaron agregando 2 gotas aproximadamente de H_2SO_4 a $pH < 2$ (IDEAM, 2007) para su conservación antes del análisis.

Todos los análisis se realizaron por parte de la autora en el laboratorio de crudos de la GRB y el laboratorio de monitoreo de la calidad del agua en PTAR. En el slop recolectado se determinó el contenido de BS&W de acuerdo con la metodología descrita en la norma ASTM D-4006 sin embargo previa validación del método se reemplazó al tolueno por varsol como solvente por ser este menos tóxico. En el caso del agua de lavado se determinó la cantidad de grasas y aceites por medio de extracción con varsol y análisis por espectrofotometría cuyo documento con procedimiento de calibración se entrega como archivo anexo a este trabajo (Ver Apéndice B).

4.2.3 Verificación teórica de la capacidad de procesamiento de slop. La verificación teórica se realizó de acuerdo con las teorías de sedimentación de gotas y tiempo de retención del aceite (Reina, Vargas, Romo, Venegas, & Delgado, 2015) considerando que el primero debe ser menor o igual al segundo para garantizar la separación efectiva. Ambos tanques fueron evaluados para obtener un contenido final de agua de 1% en volumen⁴ que es usualmente el porcentaje requerido para el transporte y tratamiento del crudo (Gutzeit, 2016). La Tabla 3 resume las condiciones evaluadas.

⁴ Se considera que el agua restante se separará en los tanques de producto intermedio del tren de tratamiento hasta alcanzar un valor de 0,1 % vol o 0,5% vol de BS&W según el proceso que sea objetivo de transferencia.

Tabla 3.

Condiciones de operación consideradas en la evaluación teórica.

		Temperaturas			
Tanque K-22		180 °F	185 °F	190 °F	195 °F
		Gravedades API del slop			
		10,9 °API	17,25 °API	25,9 °API	
		Alturas calibración del controlador de nivel			
	28,28 ft	27,29 ft	26,14 ft	25,13 ft	
		Temperaturas			
Tanque K-3065		170 °F	175 °F	180 °F	185 °F
		Gravedades API del slop			
		20,4 °API	23,28 °API	28,8 °API	
		Alturas calibración del controlador de nivel			
	18,9 ft	17,3 ft	16,5 ft	15,3 ft	

La elección de temperatura se realizó a partir de valores de diseño (180 °F y 170 °F para el tanque K-22 y K-3065 respectivamente), para las gravedades específicas se consideraron los valores máximos, mínimos y el promedio de los datos del último año y las alturas de calibración del controlador de nivel fueron medidas en campo para el tanque K-22 y supuestas a partir de la existente para el K-3065. El procedimiento utilizado se especifica en el Apéndice C

4.3 Tercera etapa: Definición de las condiciones recomendadas de operación

Se evaluaron 4 temperaturas diferentes (86, 160, 180 y 200 °F) en el tanque K-3065 determinando el valor de BS&W del efluente con el objetivo de establecer un rango operacional de temperatura adecuado. La gravedad del slop tratado se determinó experimentalmente en 22,35 °API según resultados de los análisis realizados por la GRB. En el caso del tanque K-22 se realizó una

aproximación de la temperatura recomendada de acuerdo a la literatura (Gutzeit, 2016). Por otro lado, se determinó la cantidad de calor requerida para la desestabilización de las emulsiones de acuerdo con el rango de temperatura seleccionado y se escogieron las alturas convenientes de calibración de los controladores de nivel según las relaciones volumétricas de las fases agua-aceite recomendadas por bibliografía, el diseño de los tanques y la verificación teórica del funcionamiento. El Apéndice D muestra la expresión y las consideraciones utilizadas para el cálculo del calor.

4.4 Cuarta etapa: Formulación de recomendaciones técnicas para el mejoramiento del desempeño operacional

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo y la revisión bibliográfica realizada, se realizó un análisis de causa raíz de los altos inventarios de slop mediante la elaboración de un diagrama de Ishikawa (Meyer, Cannon, & Kent, 1996). De esta manera, se identificaron las causas reales y potenciales de este suceso y con base en esto se formularon recomendaciones técnicas, que permitan mejorar el desempeño operacional de los sistemas, logrando un mejor tratamiento para obtener slop con menor valor de BS&W. Se consideraron acciones preventivas y reactivas como inclusión de prácticas operacionales, implementación de acciones de mantenimiento y modificaciones al proceso.

5. Análisis de resultados

5.1 Análisis del desempeño operacional de los sistemas

5.1.1 Calidad de la carga y estado actual del sistema

5.1.1.1 Histórico del tipo de slop tratado. Las figuras 4a y 4b muestran el histórico de gravedad API de efluente en el K-22 y K-3065, respectivamente. En el primer caso, es posible observar que la composición del hidrocarburo fue ampliamente variable, con una desviación estándar de 6,5 °API y que la gravedad API del slop oscila entre intermedia (20°-30° API) y pesada (<20°API) con un valor promedio de 17,25 °API. Lo anterior permite identificar que en este sistema las condiciones de operación efectivas son más difíciles de determinar y por ende el slop es propenso a presentar más inconvenientes a la hora del cumplimiento del plan de calidad.

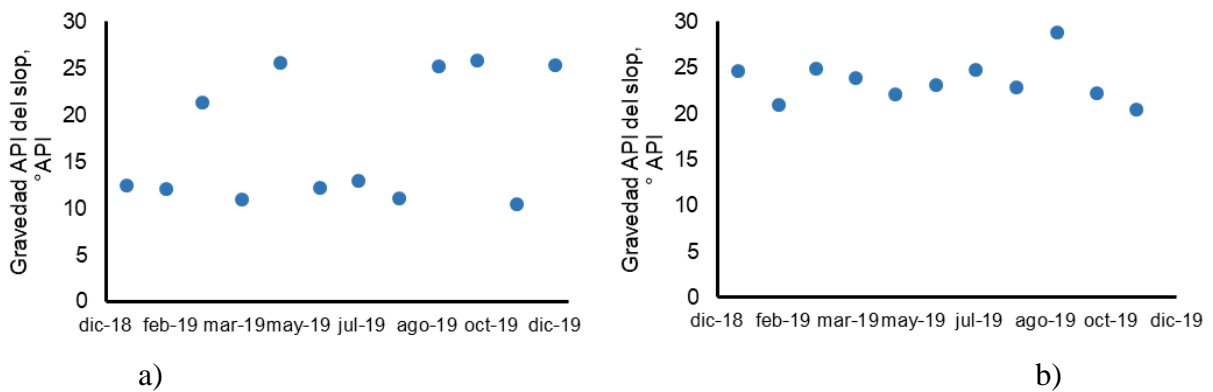


Figura 4. Caracterización del slop (gravedad API del efluente) del tanque a) K-22 y b) K-3065 durante el último año.

En el caso del tanque K-3065, a lo largo del año la distribución de °API fue más uniforme con una desviación estándar de 2,4 °API con un promedio de 23,28 °API por lo que puede ser clasificado como un tratador de hidrocarburo de gravedad intermedia. Contrario a su homólogo, en este tanque las condiciones adecuadas pueden ser determinadas con mayor exactitud y se puede obtener un slop de mejor calidad en menor tiempo ya que debido a que el vertimiento aceitoso proviene en su mayoría de las unidades de cracking, la presencia de livianos permite aprovechar la mayor diferencia de densidad con el agua de lavado para conseguir una mejor separación de fases. Pese a esto, en ambos casos la composición de la carga no es una variable controlable y depende entre otras, de la dieta de cargue de la refinería y del origen de los vertimientos que llegan a los separadores.

5.1.1.2 Resultados de la inspección del estado actual de los gun barrels

- **Sistema de medición de altura de la interfase:**

No es posible conocer con certeza el nivel de la interfase agua-slop en los tanques. La inspección del agua se realiza a través de los toma-muestras de los tanques y en ambos casos la interfase se controla a través de un diferencial de presión entre el interior y exterior. En el caso del tanque K-22 el mecanismo de control cuenta con cuatro opciones de calibración (28,28; 27,29; 26,14; 25,13 todos en ft) mientras que en el K-3065 el sistema trabaja con una altura única (16,5 ft).

- **Sistema de distribución interno de la emulsión:**

Ambos tanques se encuentran equipados con un sistema de distribución interno con 4 brazos en forma de flauta de 2" de diámetro y 6 m de largo con orificios en el cuerpo de la tubería,

separados por ángulos entre 50° y 90° donde cada brazo cuenta con un total de 79 orificios distribuidos en dos tramos. El primer tramo cuenta con 11 agujeros de ½” y 43 agujeros de ¼” con una distancia total de 3500 mm, mientras que el segundo tramo posee una longitud de 2500 mm, 20 agujeros de ¼” y 5 de ½”. Detalles de los planos mecánicos se muestran en el Apéndice E.

A pesar de que los diseños varían según la empresa, distintas pruebas piloto realizadas en tanques de lavado de crudo de la compañía Shell en 1953 concluyeron que 3/8” es considerado el tamaño mínimo de los agujeros para prevenir el taponamiento por arena y parafinas (Williams, 1953). De acuerdo con esto, podría decirse que el diseño actual es poco conveniente ya que la mayoría de orificios podrían ser demasiado pequeños y en lugar de permitir lograr una buena distribución del slop en el interior, pudiesen estar actualmente taponados, causando que se alcance un factor de corto circuito mayor a 1, lo cual significa una distribución no uniforme de la emulsión en el agua de lavado.

- **Sistema de control de temperatura de tratamiento:**

Ninguno de los tanques cuenta con un lazo de control automático que mantenga la temperatura en el valor de operación y ambos cuentan con indicadores locales en buen estado. Sin embargo, sólo en el K-22 es posible monitorear esta variable desde el sistema de control distribuido en el cuarto de control de PTAR.

- **Sistema de suministro de calor:**

El tratamiento térmico se realiza gracias al calor suministrado por el vapor de media presión (150 psi y 400 °F) proporcionado por las unidades de Servicios Industriales Refinería y Servicios Industriales Balance para el tanque K-22 y K-3065, respectivamente. El serpentín instalado en el primero tiene forma helicoidal con seis giros y tubería de 2”, mientras que el segundo es tipo parrilla con 11 tramos rectos de tubos de 5 ft de longitud y 1 ½” de diámetro (Apéndice E). En

ambos casos el vapor se inyecta por medio de una tubería cuyo aislamiento se encuentra en buenas condiciones y cuyo flujo solo puede ser regulado mediante una válvula manual ya que no cuenta con instrumento de medición, por lo que no es posible cuantificar la rata suministrada.

5.1.2 Prueba de diagnóstico. Las Figuras 5a y 5b muestran los valores de BS&W en la entrada y salida de los sistemas frente a los requisitos de calidad. Es posible observar que la calidad del slop tratado en el tanque K-22 (Figura 5a) es significativamente menor a la del K-3065 (Figura 5b) ya que, en el primer caso, tanto en la carga como el efluente se encontraron composiciones de impurezas superiores a las aceptadas. Así mismo, se advierte a partir de la figura 5b que desde el tren de tratamiento del tanque K-3065 usualmente sería posible transferir slop hacia el área de blending, pero se necesita incrementar esfuerzos para cumplir con la calidad exigida para refinación⁵. Adicionalmente se muestra que se obtienen con frecuencia mayores valores de BS&W en el efluente frente a la carga en ambos tratadores, lo cual es prueba de que en esta etapa del tren el slop reduce su calidad.

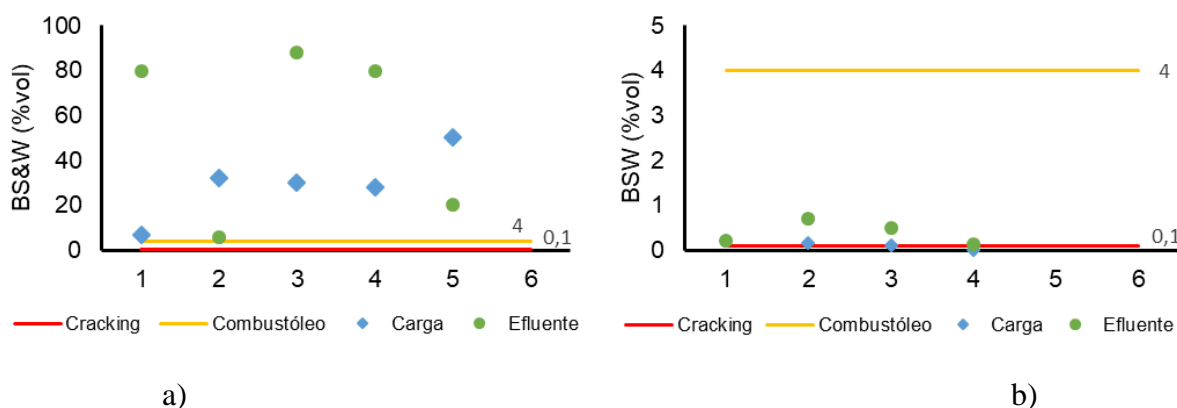


Figura 5. Comportamiento del valor de BS&W en los gun barrels a) K-22 y b) K-3065.

⁵ Se hace mención de manera general al área de refinación ya que la calidad exigida en la unidad de craqueo y destilación atmosférica es la misma.

Así entonces si se analiza la composición porcentual del BS&W en las muestras analizadas, se concluye que en lo que concierne al tanque K-22, las Figuras 6a y 6b presentan la variabilidad diaria que existe en la composición de la carga y el efluente respectivamente, mostrando que no existe una sola causa de la baja calidad del slop tratado en este gun barrel ya que en una corrida esta puede deberse a una incompleta deshidratación producto de un insuficiente tiempo de decantación y/o una contaminación del slop con los lodos que se encuentran acumulados al interior del tanque.

Es preciso mencionar a demás que, según las observaciones realizadas a las muestras centrifugadas (Figura B-1), estos se pudieron clasificar en dos tipos: sobrenadantes (de densidad intermedia entre el agua y el aceite) o sedimentados (densidad mayor al agua), lo cual indica que al interior de tratador pueden coexistir no sólo tres sino hasta cuatro fases diferentes y que para la eliminación de cada uno de estos sólidos se deben adoptar estrategias diferentes, debido a que los primeros producen un aumento del espesor de la interfase de emulsión y son capaces de bloquear la trayectoria del flujo de aceite hacia la superficie, promoviendo la formación de emulsiones inversas en el agua de lavado mientras que los segundos son los responsables de los taponamientos en los sistemas de distribución; de la misma manera, ambos pueden provocar incrustaciones en la superficie de los serpentines, afectando la transferencia de calor en el interior.

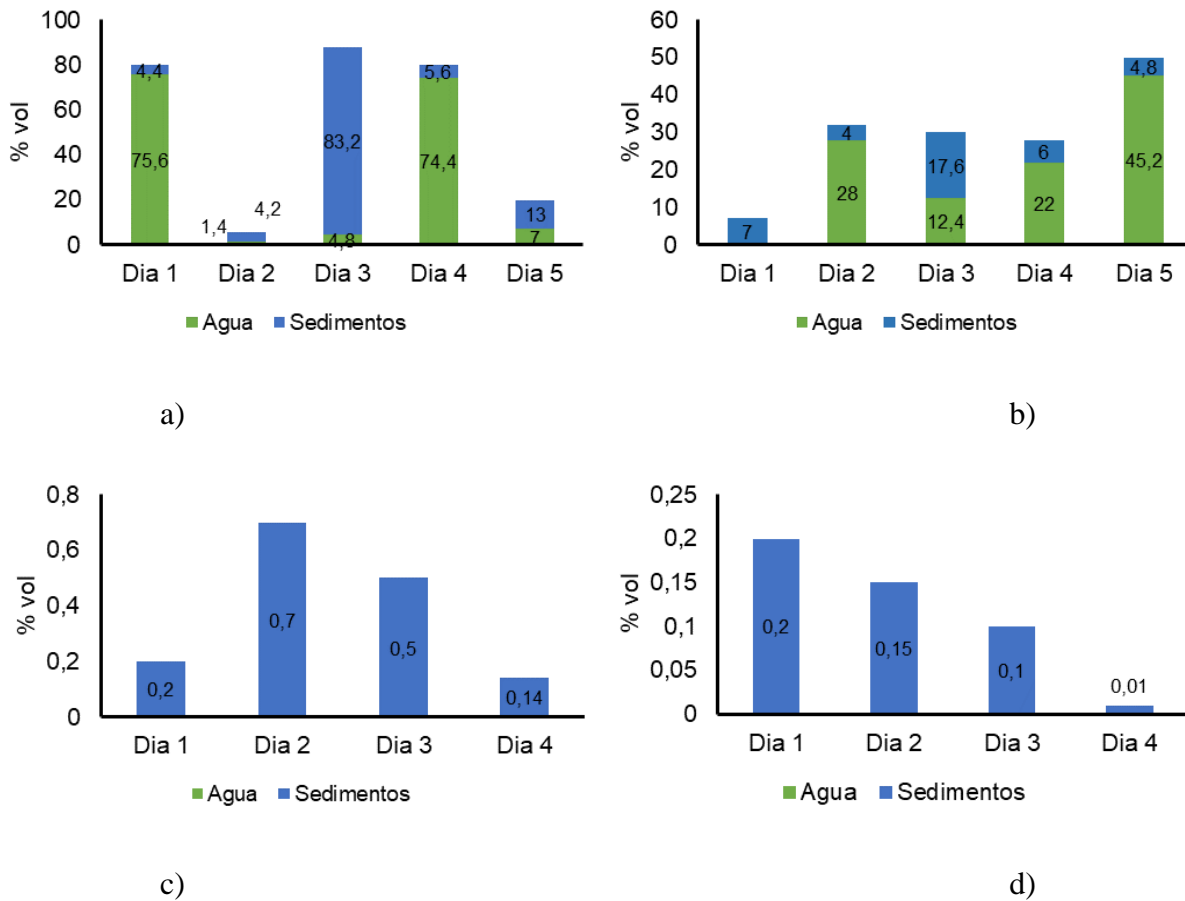


Figura 6. Composición del BS&W en a) K-22, b) SE-3050, c) K-3065 y d) SE-3060.

Por otro lado, la situación en el tanque K-3065 indica que en el separador SE-3060 se segrega de manera más eficiente el agua del aceite (Figura 6d) comparado con el SE-3050 (Figura 6b), por lo que el porcentaje de BS&W en este caso se debió exclusivamente al contenido de sólidos en la mezcla (Figura 6c), los cuales identificaron como sedimentables en todos los casos. Por su parte, a pesar de que la literatura (Stewart & Arnold, 2008) (Forero, Ortíz, Nariño, Díaz, & Peña, 2008) indica que un gran contenido de agua en la emulsión tratada favorece la separación de las fases ya que implica una mayor relación de volumen, los resultados obtenidos no son concluyentes en este aspecto. No obstante, el incremento en la composición de los sólidos en el efluente, tal como se vio antes en el tanque K-22, evidencia que, en ambos trenes tanto los separadores como los tanques

de tratamiento, presentan acumulación de lodos aceitosos que van siendo arrastrados hacia las etapas posteriores del proceso generando ensuciamiento en las baterías de tanques de producto.

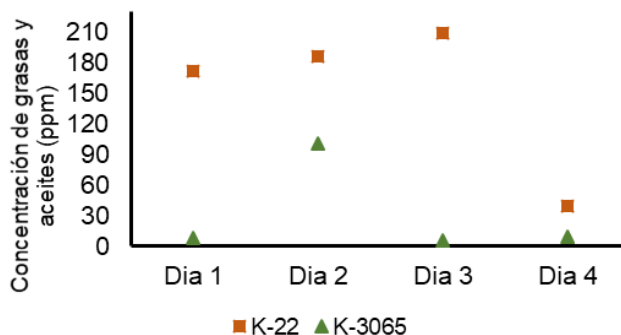


Figura 7. Comportamiento de las grasas y aceites en el agua de lavado de los sistemas.

La determinación de la concentración de grasas y aceites en el agua de lavado es especialmente importante ya que una alta proporción de sustancias orgánicas propicia la formación de emulsiones inversas O/W en esta zona, conduciendo a una disminución de la eficiencia de separación de las fases por la disminución de la relación volumétrica entre las mismas. Durante el muestreo se encontró que las muestras recolectadas tenían aspecto muy turbio y contaban con una capa superficial de hidrocarburo (Figura B-3), en especial las recolectadas en el tanque K-22. Esta observación se confirmó con los resultados presentados en la Figura 7, los cuales se pueden relacionar con el hecho de que a partir de entrevistas se conoció que la frecuencia de reemplazo actual en el tanque K-22 es de aproximadamente dos meses mientras que en el K-3065 se realiza cada una o dos semanas, razón por la cual se observan mayores concentraciones en el primero. Así, es importante asegurar el cumplimiento de la excelencia operacional ya que los operadores deben llevar a cabo el drenaje periódico del agua para evitar afectar la separación y el tratamiento de agua en PTAR.

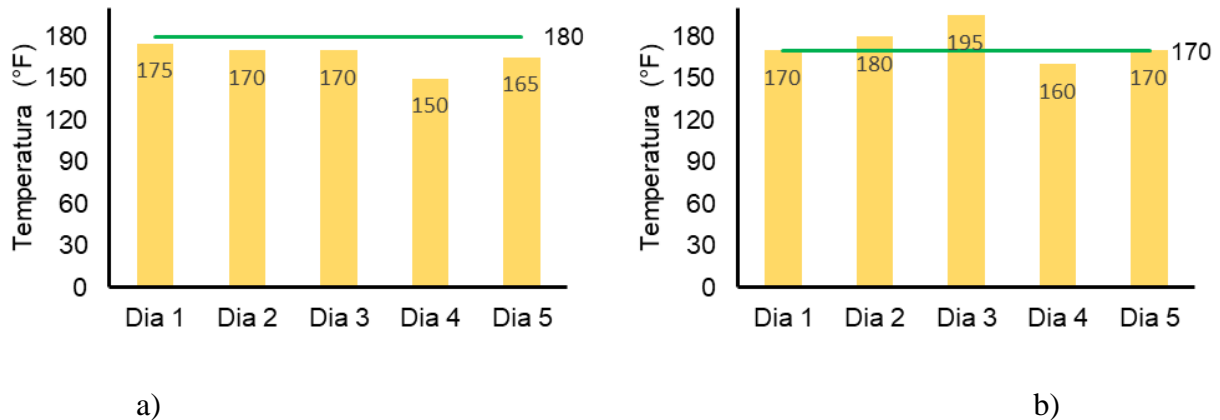


Figura 8. Comportamiento de la temperatura de tratamiento en a) K-22 y b) K-3065.

Con referencia a la temperatura de tratamiento, la Figura 8 muestra el resultado del monitoreo durante la prueba. Durante el monitoreo se encontró que en el interior del tanque K-22 no se alcanza la temperatura de diseño (Figura 8a) bajo las condiciones actuales de operación, mientras que el tratamiento térmico realizado en el K-3065 es más estable (Figura 8b). Estas desviaciones pueden ser explicadas por fluctuaciones en el flujo de vapor, la descalibración del indicador local de temperatura o la distribución no homogénea del calor al interior de los gun barrels. Sin embargo, adicionalmente en el tanque K-22 estas variaciones de hasta 30 °F pueden presentarse además a raíz de la resistencia a la transferencia de calor ocasionada por los lodos sobrenadantes antes mencionados.

5.1.3 Verificación teórica de la capacidad de tratamiento del slop. La verificación se realizó con base en las estimaciones de viscosidad para diferentes °API y temperaturas (Tabla C-1). El tamaño mínimo de gota que es posible precipitar para lograr un contenido de agua de 1 % vol se calculó entre 285 y 816 μm para el tanque K-22 y 265 y 401 μm para el tanque K-3065 siendo menor cuanto más liviano es el slop y más elevada la temperatura, lo cual permite una más rápida

sedimentación porque no es necesaria la formación de gotas tan grandes gracias a la reducción de la viscosidad del slop que facilita la movilidad de las mismas a través del hidrocarburo (Tablas C-2 y C-3).

En lo que respecta a los tiempos de sedimentación, se encontró que estos no son menores a los tiempos de retención del aceite en los tanques (Tablas C-2 y C-3) por lo que no se alcanza una separación completa durante la operación. Para los casos de estudio del tanque K-22 (Figuras 9a-9c), la Figura 9a permite evidenciar que estos tiempos son operativamente inconvenientes cuando se tratan slops de muy baja gravedad API a pesar del tratamiento térmico, ya que son necesarios miles de días para lograr la segregación; lo cual se explica por la poca diferencia entre la densidad del hidrocarburo y el agua de lavado. Adicionalmente se observa que una vez la gravedad específica se va incrementando, no sólo se disminuye el tiempo de sedimentación, sino también el efecto del incremento de la temperatura sobre el mismo, tal como se observa en el rango entre 185-195 °F en las Figuras 9b y 9c. Este mismo efecto se presenta más claramente en las Figuras 9d-9f con el progresivo aumento de los °API.

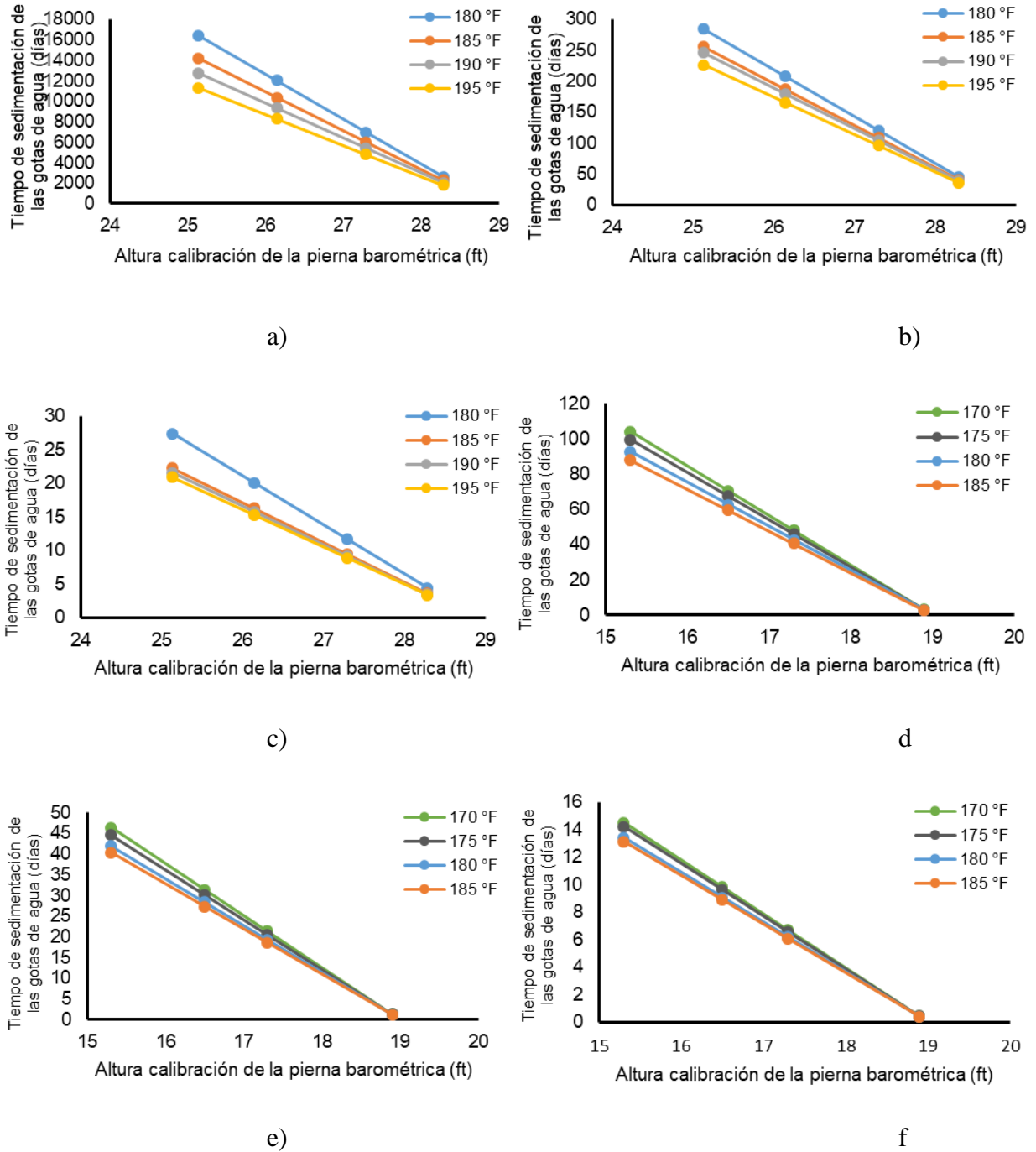


Figura 9. Comportamiento del tiempo de retención versus la altura de calibración del controlador de nivel con diferentes temperaturas para un slop de a)10,9 °API, b)17,25 °API y c)25,9 °API en el tanque K-22 y d) 20,4 °API, e)23,28 °API y f) 28,8 °API en el tanque K-3065.

Por otro lado, en lo que respecta a la altura de la interfase de la emulsión, cuyo nivel es regulado a partir de la altura del controlador de nivel, se encontró en todos los casos que un mayor volumen de agua al interior del gun barrel favorece el fenómeno de coalescencia (Forero, Ortíz, Nariño, Díaz, & Peña, 2008), lo que disminuye significativamente el tiempo de precipitación de las gotas.

5.2 Análisis causa raíz de los altos inventarios de slop

Los altos inventarios de slop tienen distintas causas, sin embargo, es el incumplimiento del plan de calidad el principal inconveniente para su reducción. A partir de los resultados obtenidos en este trabajo e investigación cualitativa realizada a través de reportes operativos se elaboró la Figura 10 en la cual se presenta el panorama general de las causas, relacionadas con el hacer de las personas y la operación, los equipos de tratamiento y la naturaleza de los vertimientos. Esto permitió identificar como razones fundamentales el limitado conocimiento de los operadores sobre los principios de funcionamiento de los sistemas debido a la poca capacitación e integración del conocimiento y la existencia de un plan de mantenimiento inadecuado para los tanques.

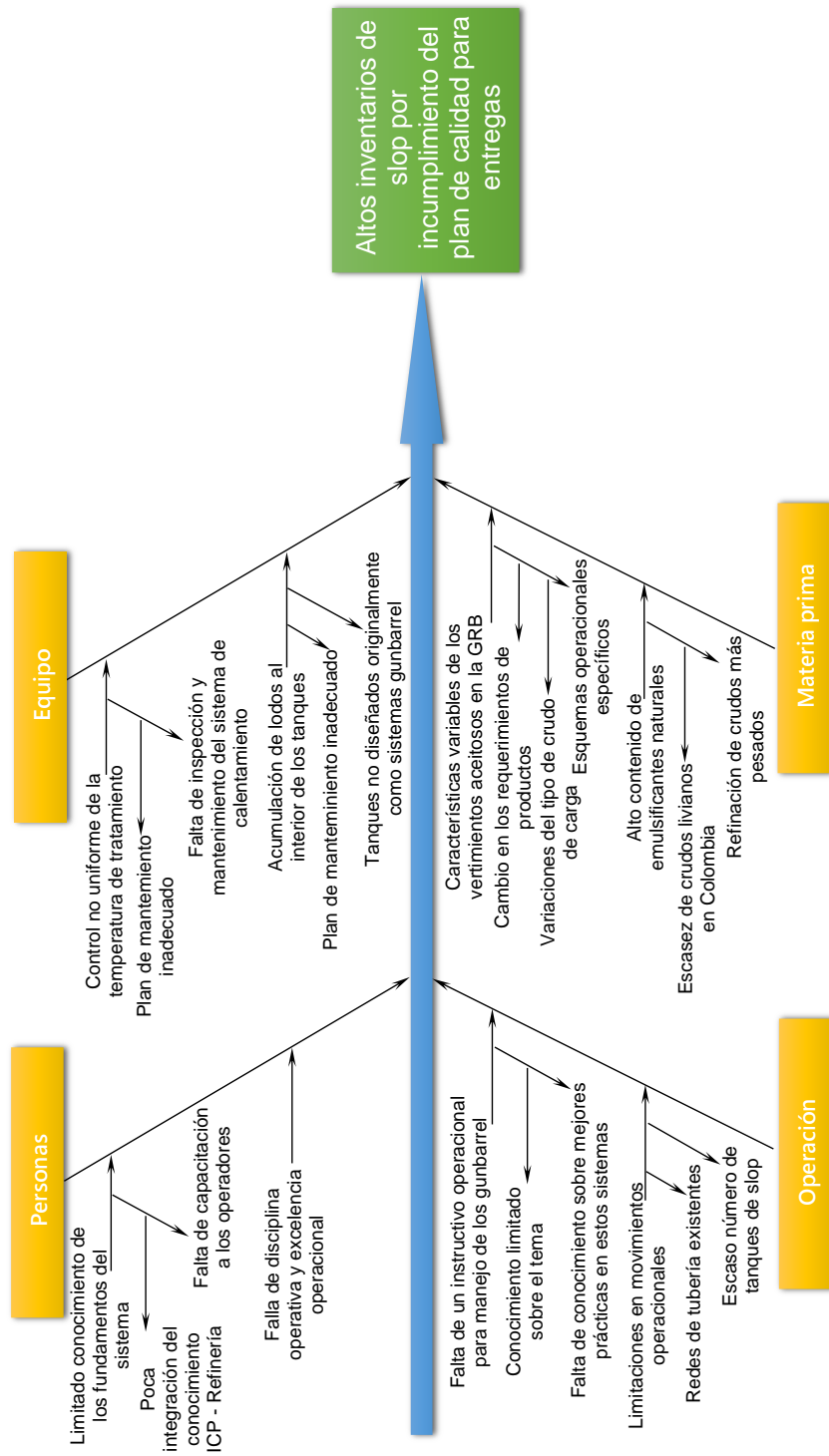


Figura 10. Diagrama de Ishikawa para los altos inventarios de slop en PTAR.

Sin embargo, las limitaciones en el diseño de los equipos discutidas previamente y la imposibilidad de controlar la característica de la carga que entra al sistema, la cual se espera que sea progresivamente más pesada o con mayor contenido de químicos adicionados en los procesos de refinación que dificultan su procesamiento, son claves para determinar la evaluación de sistemas alternativos de tratamiento. Adicionalmente, desde el punto de vista operacional se encontraron limitaciones en la capacidad de almacenamiento de slop y en la cantidad de tanques decantadores disponibles para aumentar el tiempo de decantación de la emulsión.

5.3 Condiciones de operación recomendadas para los tanques gun barrel

- **Temperatura de tratamiento**

A pesar de que una alta temperatura acelera la dinámica del fenómeno de coalescencia, su incremento en el tratamiento se ve limitado por el punto de burbuja de los componentes del hidrocarburo debido a la pérdida de livianos (Gutzeit, 2016) (Reina, Vargas, Romo, Venegas, & Delgado, 2015). La Figura 11 muestra los resultados obtenidos al variar la temperatura sobre el contenido de BS&W para un slop de 22,35 °API en el tanque K-3065. Se observa que, si bien es posible establecer un rango de operación con cierto margen de tolerancia frente al contenido total de agua, una temperatura de 180°F parece ser adecuada para alcanzar la deshidratación completa en un slop de estas características, lo cual significa un aumento en 10°F sobre la temperatura de operación recomendada en el diseño original. Este resultado se corresponde con la recomendación realizada en (Reina, Vargas, Romo, Venegas, & Delgado, 2015) de mantener 175°F como temperatura límite en el tratamiento de crudos intermedios de hasta 26 °API. Adicionalmente, las tendencias encontradas en literatura (Stewart & Arnold, 2008) del comportamiento de la densidad

de los crudos versus la temperatura, confirman un mayor delta de densidades alrededor de los 180 °F (Figuras 12a y 12b)

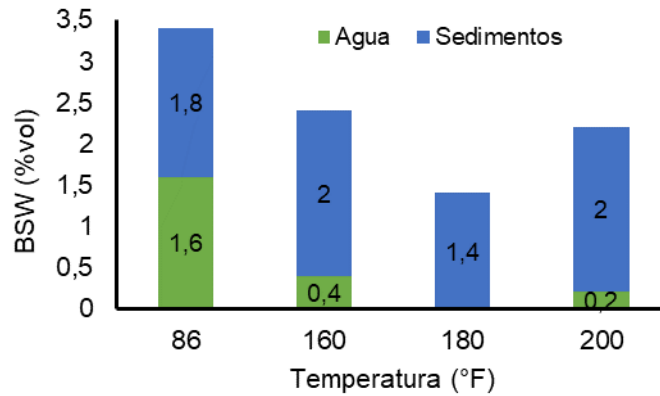


Figura 11. Efecto de la temperatura sobre el BS&W en el K-3065.

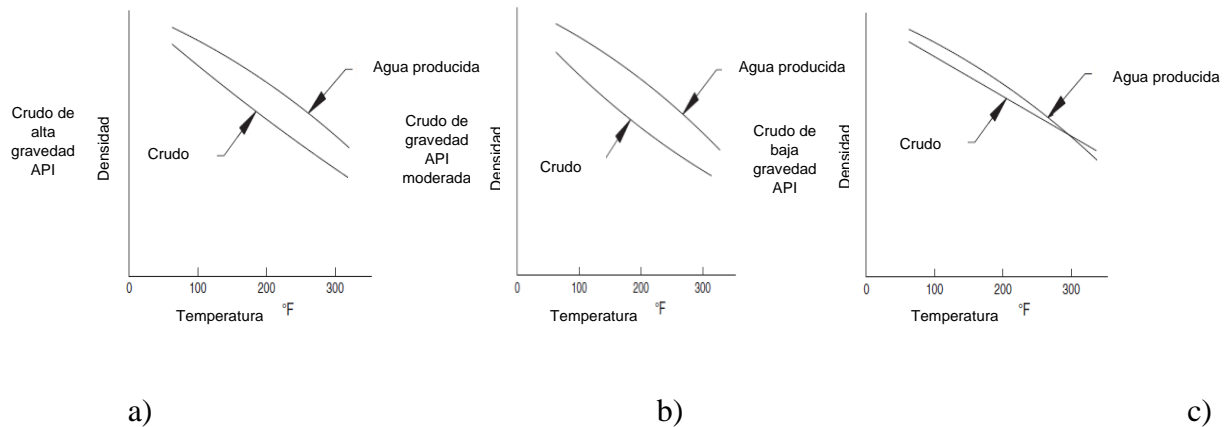


Figura 12. Efecto de la temperatura sobre crudos de a) alta, b) intermedia y c) baja gravedad °API como los tratados en el K-22. Nota. Tomado de: Stewart, M.; Arnold, K. (2008) Emulsions and oil treating equipment: Selection, sizing and troubleshooting, 1st ed. Amsterdam: Elsevier Gulf Professional Publishing

Adicionalmente el resultado a 200°F podría deberse a que, debido a un calentamiento no homogéneo del sistema, en algunas zonas se alcanzó una temperatura igual o superior a 212°F (punto de ebullición del agua) lo que causó que las burbujas de vapor arrastraran las gotas de agua

hasta la zona de aceite libre. Este hecho impacta directamente la temperatura recomendada del tanque K-22, pues supone una limitación operacional ya que además de la documentada incapacidad del sistema para alcanzar temperaturas mayores a 180°F, la información suministrada por la Figura 12c (Stewart & Arnold, 2008) muestra que, por debajo de los 200°F se obtienen las mayores diferencias de densidad en crudos de bajo °API. Así, es recomendable trabajar en este tanque con una temperatura de tratamiento de máximo 190-195 °F para garantizar que la diferencia entre las densidades específicas sea de 0,001 o más para facilitar la separación de las fases. De la misma manera, se deben evitar temperaturas de tratamiento por debajo de 100°F para evitar la cristalización de compuestos parafínicos que generen obstrucción de los distribuidores e incrustaciones en los sistemas de suministro de calor.

- **Calor requerido para romper la emulsión**

Los valores resumidos en la

Tabla 4 muestran el requerimiento energético para tratar emulsiones características en los tanques K-22 y K-3065, respectivamente. En el primer caso el suministro de calor para alcanzar la temperatura cercana a 195 °F, hace necesario garantizar un incremento en el suministro de energía del 16% frente al necesario para alcanzar 180 °F mientras que en el tanque K-3065 para alcanzar 180 °F se necesita un 12% más que si se quisiera trabajar con 170 °F. De esta manera es necesario evaluar eventualmente si el flujo suministrado es suficiente para alcanzar estos requerimientos ya que actualmente no existen sistemas de medición en las tuberías de vapor, aunque el monitoreo de temperatura indica que podrían existir inconvenientes en el tanque K-22.

Tabla 4.

Calor requerido para el tratamiento en los tanques, $\times 10^5$ BTU/h

Gravedad API en el tanque K-22, °API	Temperatura, °F				Gravedad API en el tanque K-3065, °API	Temperatura, °F			
	180	185	190	195		170	175	180	185
10,9	3,44	3,63	3,82	4,01	20,4	1,45	1,54	1,63	1,72
17,25	3,32	3,5	3,68	3,87	23,28	1,43	1,52	1,6	1,69
25,9	3,17	3,34	3,52	3,69	28,8	1,39	1,47	1,56	1,65

Frente a esto, desde el punto de vista económico sería conveniente evaluar un sistema de tratamiento que requiera menor suministro de energía y/o brinde mayor eficacia en la separación con un gasto equivalente al actual.

- **Altura de la interfase agua-aceite**

No existe un método determinado para el cálculo exacto del nivel adecuado de la interfase en los sistemas gun barrel. Usualmente se reportan valores efectivos de volumen de agua equivalentes al 20-50 % de la capacidad total del tratador (Moreno, 2006) (Ball, 2014). Los resultados de la verificación (Tablas C-2 y C-3) permiten concluir que es conveniente calibrar los medidores de diferencial de presión en 27,29 ft en el tanque K-22 y 17,3 ft en el K-3065 con el objetivo de siempre mantener un nivel de agua favorable ya que debido a las variaciones de gravedad del slop, el balance de presiones a través del cual funciona el controlador de nivel, puede mantener más o menos volumen de agua al interior del tanque con un equivalente de porcentaje entre el rango antes mencionado.

6. Estrategias para el mejoramiento del desempeño operacional de las facilidades

- **Mantenimiento:**

I. Realizar una intervención inmediata a los tanques para retirar lodos e inspeccionar y asegurar el estado de los internos.

II. Disminuir el tiempo medio entre mantenimiento general actual de 10 a 5 años, frecuencia en la cual se realiza parada de planta en los separadores API, para controlar la acumulación de sedimentos y asegurar confiabilidad de los internos.

- **Operación:**

I. Elaborar un instructivo operacional donde se indique la toma y análisis de muestras para determinar el contenido de grasas y aceites en el agua de lavado al menos tres veces por semana, estableciendo el drenaje y cambio del volumen de agua preferiblemente una vez se alcance un valor superior a 100 ppm o la línea base de concentración de grasas y aceites de carga a PTAR.

II. Ajustar y evaluar los sistemas a las condiciones de operación de la Tabla 5.

Tabla 5.

Condiciones de operación recomendadas para los sistemas.

Parámetro	Valor recomendado	
	K-22	K-3065
Temperatura de tratamiento	190 °F	180 °F
Guía de operación	170-200 °F	170-200 °F
Calibración del medidor de presión	27,29 ft	17,3 ft

III. Establecer un plan de monitoreo frecuente en los trenes de tratamiento para documentar la efectividad del mismo, identificar cuellos de botella del proceso y tomar medidas tempranas.

IV. Realizar drenajes periódicos en las baterías de tanques aguas debajo de proceso para evitar la acumulación de sólidos que afecten la calidad final del slop.

- **Modificaciones al proceso:**

I. Adicionar de químicos desestabilizadores de emulsiones al tratamiento actual en ambas facilidades y/o reemplazar del gun barrel K-22 por un sistema de separación electrostática. Para esto es necesario llevar a cabo un estudio de caracterización y estabilidad de las emulsiones de slop para determinar el tipo de químico y su dosificación adecuada mediante pruebas de jarras o, en el caso de la separación electrostática, la intensidad del campo eléctrico requerido para lograr la coalescencia de las gotas mediante pruebas estacionarias en laboratorio que establezcan la fuerza necesaria para su rompimiento.

II. Modificar el sistema de control de nivel de la interfase reemplazando la tecnología actual por una válvula de presión diferencial o un controlador automático de interfase en el tanque K-22 debido a que el sistema actual no es especialmente útil en tratadores que manejan hidrocarburos con gravedad API menor a 15 °API (Ball, 2014) (Douglas, 2014).

III. Considerar un nuevo diseño de los distribuidores de flujo con tamaños de orificios y geometría apta según las características del proceso, teniendo en cuenta que una altura por encima de 24-36 in por encima del fondo del tanque, ayuda a prevenir su taponamiento (Williams, 1953).

IV. Realizar la instalación de analizadores de BS&W para proceso en las líneas de entrada y salida del tratador, los cuales miden la capacidad dieléctrica del fluido relacionando esta con cambios en el contenido de agua.

V. Instalar un medidor digital de temperatura en el tanque K-3065 y conectar dicha señal a PI System, sistema de gestión de datos de proceso de la refinería para monitorear en tiempo real esta variable, así como realizar la calibración y sincronización de los medidores locales en ambos tratadores.

VI. Evaluar la viabilidad económica de adicionar solventes orgánicos o subproductos livianos de bajo costo para disminuir la gravedad API del slop en casos en los que se deban tratar mezclas muy pesadas.

7. Conclusiones

- Entre las fallas identificadas se determinó que los sistemas están operando con un control de nivel y calidad del agua de lavado inadecuados, además de que en su esquema de operación no se sigue un plan de revisión periódica para establecer el retiro de lodos sobrenadantes acumulados en la interfase. De la misma manera, se encontraron en mal funcionamiento los sistemas de medición de temperatura e inyección de vapor.
- El ajuste de las condiciones de recomendadas de operación se ve seriamente afectado por la variabilidad en las características del slop recuperado. Se propone operar el tanque K-22 a 190°F y un calibre de controlador de nivel de interfase en 27 ft así como el K-3065 a 180 °F y una altura de calibración cercana a 17,3 ft para mejorar la separación al interior de los sistemas.
- Es necesario realizar modificaciones al proceso y asegurar la existencia de un adecuado plan de mantenimiento y un instructivo operacional para garantizar el funcionamiento de los gun barrels bajo su límite de diseño y alcanzar los requerimientos de calidad.

8. Recomendaciones

- Realizar un estudio experimental que permita obtener un modelo matemático para determinar la viscosidad real del hidrocarburo tratado en los sistemas y la distribución de tamaño de las gotas para así mejorar la exactitud de los resultados de la verificación teórica del procesamiento de slop.
- Realizar la evaluación técnico-económica de la adición de rompedores de emulsiones o el reemplazo de la tecnología por un equipo de separación electrostática.

Referencias Bibliográficas

- Ball, B. (2014). *Separation in 2014 oilfield operations. "Gunbarrels: Myths versus Realities.* High-Tech Consultants, Inc. Technical paper.
- Delgado-Linares, J. G., Gutierrez, C., Salazar, F., Guevara, M., Mercado, R., & Pereira, J. (2012). Aplicación de conceptos clásicos de la Física en la práctica ingenieril. La ley de Stokes como herramienta conceptual en el análisis de procesos de deshidratación del petróleo. *Educ. quím. vol. 24, no. 1 diciembre* , 57-62.
- Douglas, E. (2014). *Industrial Chemical Process Design, 2da ed. Oil and Gas Production Surface Facility Design and Rating, Chapter 4.* New York: McGraw-Hill Education.
- Ecopetrol. (2020). *Lo que Hacemos.* Obtenido de <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos/lo-que-hacemos-informacion>.
- Ecopetrol S.A. . (s.f.). *Manual de operaciones de PTAR y Separadores API. Capítulo 3: Descripción del proceso.* Barrancabermeja.
- Ecopetrol S.A. (s.f.). *Instructivo operacional para toma de muestras de slop y aguas en PTAR.* Barrancabermeja.
- Enap. (2020). *A – C – Glosario - ENAP.* Obtenido de <https://www.enap.cl/pag/232/1012>.
- Forero, J. F., Ortíz, O. P., Nariño, F. A., Díaz, J., & Peña, H. (2008). Design and Development Of a High Efficiency Tank For Crude Oil Dehydration (I). *Ciencia, Tecnología y Futuro, vol. 3, no. 4, diciembre*, 185-199.
- Gutzeit, J. (2016). *Crude Unit Corrosion Guide. 3rd ed.* Houston, TX: NACE International.

IDEAM. (2007). *Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales*.

Meyer, R. A., Cannon, D. F., & Kent, W. E. (1996). *The Fishbone (Ishikawa) Diagram: A Dynamic Learning Tool*. *Hospitality & Tourism Educator*.

Moreno, M. J. (2006). *Optimización del sistema de deshidratación de la estación Flujo Muri, de PDVSA, Distrito Norte, E.P. Oriente*. Caracas, Venezuela: Tesis de Especialización, Especialización en Ingeniería Mecánica de Plantas de Proceso, Universidad Simón Bolívar.

Reina, E., Vargas, L., Romo, N., Venegas, H., & Delgado, P. (2015). *Fast Wash Tank Design Algorithm for Early Production Facilities (EPF)*. Quito, Ecuador: SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference.

Stewart, M., & Arnold, K. (2008). *Emulsions and oil treating equipment: Selection, sizing and troubleshooting, 1st ed.*. Amsterdam : Elsevier Gulf Professional Publishing.

Williams, A. R. (1953). *A Wash-tank Design*. Los Angeles, USA: Spring meeting of the Pacific Coast District, Division of Production.

Apéndices

Apéndice A. Inventario de Slop en la GRB durante el 2019.

Gerencia Refinería Barrancabermeja Coordinación Gestión y Control Ambiental SLOP													
FECHA	Promedio			Total Entregado				Total Recuperado por Separador y Plantas					
	Recuperado	Inventario	Cracking	Blending	Crudo	Sur	Notre	Balance	K-3012	HDT	UOP2	U500	
31 de diciembre de 2019	0	27963	0	1017	0	0	0	0	232	0	0	21	
ENERO	182	33174	4122	5306	0	4053	2500	-923	684	1113	91	396	
FEBRERO	179	32855	7293	0	0	4217	2159	-481	938	314	0	298	
MARZO	58	29522	13720	0	0	2484	657	-1332	1001	162	0	171	
ABRIL	183	25352	7974	0	0	2188	2034	1255	1454	114	0	1551	
MAYO	365	27611	11085	0	0	5660	4686	979	1006	40	0	1671	
JUNIO	308	34825	2535	2912	145	2889	4054	2304	1276	156	0	1586	
JULIO	222	31768	9297	8074	0	2349	2782	1750	1734	60	0	2344	
AGOSTO	111	26097	10006	8385	0	2366	1147	-70	1418	141	0	2440	
SEPTIEMBRE	238	22971	3391	2016	0	2833	3391	913	1178	109	0	1158	
OCTUBRE	110	24549	2018	10843	0	65	2547	811	1955	0	0	21	
NOVIEMBRE	153	23591	0	4304	0	2332	1077	1180	856	271	0	786	
DICIEMBRE	114	27162	2665	1793	0	1462	830	1241	1316	129	219	1617	
Promedio Año	185	28290	6176	3636	2742	2742	2322	636	1235	217	26	1170	

Apéndice B. Evidencia fotográfica de las muestras analizadas

- **Análisis de BS&W en muestras de Slop.**

Para el análisis de las muestras de slop bajo la norma ASTM 4007 se utilizaron tubos para centrifuga de cono corto de 100 ml los cuales fueron llenados con 50 ml de la muestra de slop y se completó el volumen con solvente orgánico varsol. Acto seguido se agitó la mezcla para homogeneizar y se llevó a un baño de agua a 60 °C por 10 minutos hasta alcanzar dicha temperatura. Una vez transcurrido este tiempo, se realizó nuevamente la agitación y se llevó a la centrifuga por 15 minutos a una velocidad de 1600 rpm y 60 °C. Para cada muestra se prepararon dos tubos a los cuales se les realizó el análisis y al momento de leer los resultados, el valor total de BS&W reportado fue la suma del porcentaje leído en cada uno. Se muestran a continuación los dos tipos de lodos encontrados.

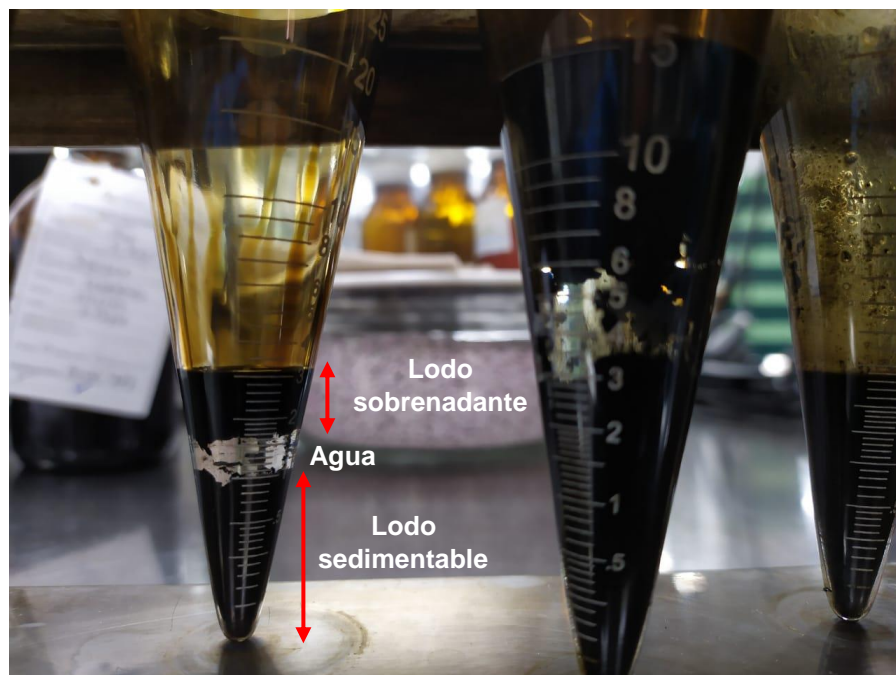


Figura B-1. Tipos de lodos encontrados en las muestras de slop en el tanque K-22.

- **Análisis de grasas y aceites en muestras de agua.**

El contenido de agua y aceite se determinó mediante extracción de la fase orgánica utilizando varsol. Se agregaron cada vez 80 ml de la muestra de agua junto con 20 ml de solvente en una probeta de 100ml, posteriormente la mezcla fue transferida hacia una erlenmeyer de mayor capacidad donde se agitaba vigorosamente durante algunos minutos hasta lograr su homogenización y se dejaba reposar hasta que se observara una clara diferenciación de las fases (Figura B-2). Después de esto, con ayuda de una pipeta se extraían 10 ml de muestra orgánica la cual se introducía en el interior del espectrofotómetro previamente calibrado en 0 con solvente varsol. Finalmente, se registraba el valor arrojado.

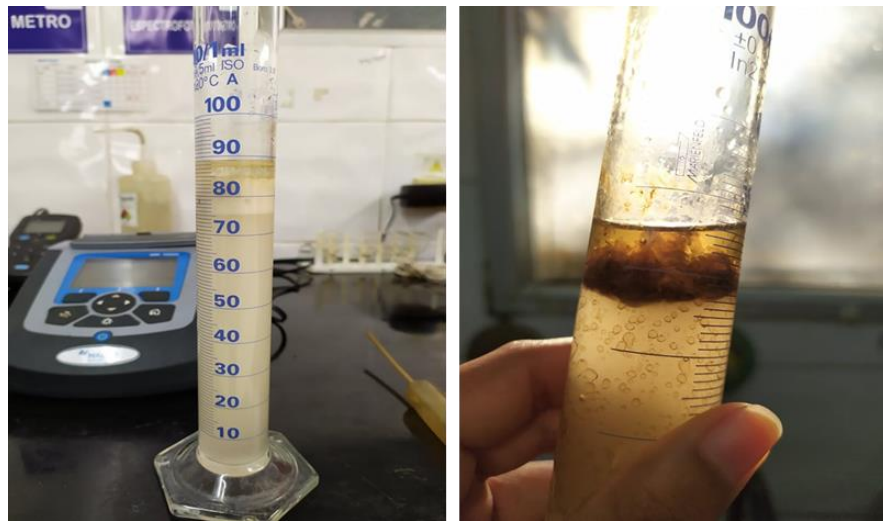


Figura B-2. Extracción de las grasas y aceites del agua de lavado.



Figura B-3. Calidad de las muestras de agua recolectadas en el tanque K-22.

Apéndice C. Procedimiento para verificación teórica de capacidad de procesamiento de slop en sedimentadores verticales

En este apartado se describe la metodología propuesta para el diseño de separadores verticales la cual se basa en la aplicación de dos teorías: la teoría de sedimentación de gotas y la del tiempo de retención. La primera se basa en la aplicación de la ley de Stokes para predecir la velocidad terminal y el tiempo de sedimentación de las gotas mientras que la segunda calcula la velocidad de flujo y determina el tiempo de retención del hidrocarburo en el tanque. El algoritmo planteado se muestra a continuación.

I. Calcular la velocidad terminal

$$V_t = 1,78 \times 10^{-6} \frac{(\Delta SG)d_m^2}{\mu} \quad \text{Ec. 2}$$

El cálculo de la velocidad terminal requiere que se cuente con información sobre la viscosidad del slop a las temperaturas seleccionadas, sin embargo, no fue posible determinarla a partir de las muestras de manera experimental debido al elevado contenido de sólidos que estas poseían. Así entonces, como una aproximación al valor real de viscosidad, se utilizó la Figura B-1 para determinar las viscosidades cinemáticas y a partir de la gravedad específica se calcularon las viscosidades dinámicas que se muestran en la Tabla B-1.

Tabla C-1.

Viscosidades dinámicas del slop, cP

Graveda	Temperatura, °F				Graveda	Temperatura, °F			
d API, °API	180	185	190	195	d API, °API	170	175	180	185
10,9	278,23	228,54	198,73	168,92	20,4	16,30	15,37	13,97	13,04
	0	6	6	6		2	0	3	1
17,25	32,343	28,062	26,635	23,782	23,28	8,685	8,228	7,588	7,222
25,9	5,933	4,495	4,315	4,135	28,8	3,531	3,443	3,178	3,090

Para el caso de la determinación del diámetro de las gotas de agua, se utilizó la Ec. 3, la cual es una regresión desarrollada para tratadores verticales de hidrocarburo a partir de datos experimentales para determinar el diámetro de gota estimado que es necesario separar para alcanzar una composición de 1 %vol de agua en el efluente (Reina, Vargas, Romo, Venegas, & Delgado, 2015).

$$d_{m1\%} = 200\mu_o^{0,25} \tag{Ec. 3}$$

II. Calcular tiempo de asentamiento de las gotas de agua

El tiempo de asentamiento de las gotas t_{sw} se calculó a partir de la Ec. 4 donde h_o corresponde a la altura de la zona de aceite en el tanque, calculada como la diferencia entre la altura de la salida de slop y la interfase de la emulsión

$$t_{sw} = \frac{h_o}{V_t} \tag{Ec. 4}$$

La altura de la zona de aceite es determinada a partir del balance de presiones que permite la calibración del mecanismo de control de nivel, tal como se muestra en la Ec. 5.

$$h_{wd} = (h_{oo} - h_{ww}) \frac{\gamma_o}{\gamma_w} + h_{ww} \tag{Ec. 5}$$

Donde h_{wa} : altura del desbordamiento de slop, ft; h_{oo} : altura de la salida de slop, ft; γ_o : gravedad específica del slop con respecto al agua; γ_w : gravedad específica del agua y h_{ww} : altura de la interfase de la emulsión en el tanque.

III. Calcular de la velocidad de flujo

Por otro lado, para el tiempo de retención es necesario calcular la velocidad de flujo de entrada mediante la Ec. 6 utilizando el flujo volumétrico de entrada en bpd y el área transversal del tratador.

$$V_o = 6,4984 \times 10^{-5} \frac{Q_o}{A} \quad \text{Ec. 6}$$

IV. Calcular de tiempo de retención del hidrocarburo

En este caso se calcula el tiempo teórico que el hidrocarburo permanece dentro del tanque, considerando altura de la zona de aceite y la velocidad de flujo.

$$t_{ro} = \frac{h_o}{V_o} \quad \text{Ec. 7}$$

V. Verificar que $t_{ro} > t_{sw}$

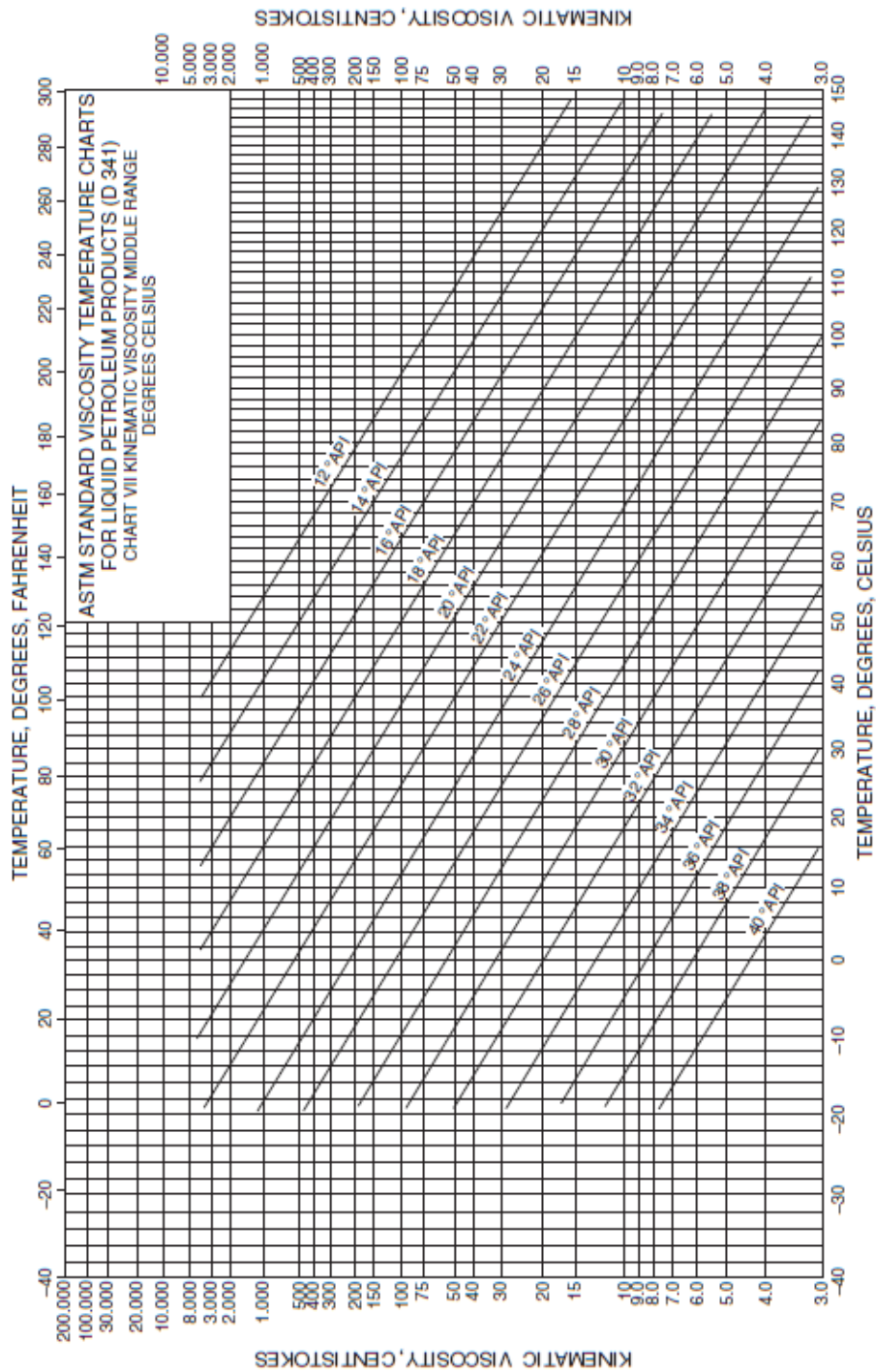


Figura C-1. Viscosidad versus temperatura para varios crudos (Cortesía de ASTM D-341). Imagen tomada de: J. Gutzeit, Crude Unit Corrosion Guide. 3ra ed. Houston, TX: NACE International, 2016 pp. 52

Tabla C-2.

Verificación de la capacidad de separación agua-aceite en el tanque K-22 a varias temperaturas.

Gravedad API del slop	Altura controlador de nivel (ft)	dm _{1%} (µm)				V _{iw} (ft/s)				t _{ws} (d)				t _{ro} (d)
		180 °F	185 °F	190 °F	195 °F	180 °F	185 °F	190 °F	195 °F	180 °F	185 °F	190 °F	195 °F	
10,90	28,28									2.631,77	2.270,78	2.044,80	1.810,15	2,37
	27,29	816,83	777,63	750,93	721,03	3,30x10 ⁻⁸	3,83x10 ⁻⁸	4,25x10 ⁻⁸	4,80x10 ⁻⁸	6.971,20	6014,99	5416,41	4.794,86	6,29
	26,14									12.013,60	10.365,75	9.334,20	8.263,07	10,83
	25,13									16.442,40	14.187,06	12.775,24	11.309,24	14,83
17,25	28,28									45,51	40,91	39,34	36,13	1,59
	27,29	476,95	460,32	454,35	441,66	1,28x10 ⁻⁶	1,42x10 ⁻⁶	1,48x10 ⁻⁶	1,61x10 ⁻⁶	120,68	108,49	104,33	95,83	4,22
	26,14									207,94	186,94	179,77	165,12	7,26
	25,13									284,60	255,85	246,03	225,99	9,94
25,90	28,28									4,38	3,56	3,45	3,34	1,13
	27,29	312,14	291,21	288,26	285,21	9,46x10 ⁻⁶	1,17x10 ⁻⁵	1,20x10 ⁻⁵	1,24x10 ⁻⁵	11,61	9,43	9,14	8,86	3,00
	26,14									20,01	16,24	15,76	15,26	5,17
	25,13									27,38	22,23	21,56	20,88	7,07

Tabla C-3.

Verificación de la capacidad de separación agua-aceite en el tanque K-3065 a varias temperaturas.

Gravedad API del slop	Altura controlador de nivel (ft)	dm _{1%} (µm)				V _{iw} (ft/s)				t _{ws} (d)				t _{ro} (d)
		170 °F	175 °F	180 °F	185 °F	170 °F	175 °F	180 °F	185 °F	170 °F	175 °F	180 °F	185 °F	
20,40	18,90									3,08	2,95	2,75	2,61	0,07
	17,30					3,00x10 ⁻⁶	3,14x10 ⁻⁶	3,37x10 ⁻⁶	3,55x10 ⁻⁶	47,92	45,85	42,69	40,54	1,15
	16,50	401,87	396,00	386,68	380,07					70,34	67,30	62,66	59,50	1,69
	15,30									103,97	99,48	92,62	87,95	2,50
23,28	18,90									1,38	1,33	1,25	1,20	0,07
	17,30					6,04x10 ⁻⁶	6,29x10 ⁻⁶	6,68x10 ⁻⁶	6,93x10 ⁻⁶	21,35	20,51	19,30	18,60	1,03
	16,50	343,34	338,73	331,94	327,87					31,34	30,10	28,32	27,29	1,51
	15,30									46,33	44,49	41,87	40,34	2,24
28,80	18,90									0,43	0,42	0,40	0,39	0,06
	17,30					1,62x10 ⁻⁵	1,65x10 ⁻⁵	1,75x10 ⁻⁵	1,79x10 ⁻⁵	6,68	6,56	6,18	6,05	0,87
	16,50	274,16	272,43	267,03	265,16					9,81	9,63	9,07	8,88	1,27
	15,30									14,50	14,23	13,40	13,12	1,88

Apéndice D. Consideraciones para el cálculo del calor requerido para desestabilizar la emulsión al interior del tanque

La cantidad de energía necesaria para romper la emulsión se estimó a partir de la Ec. 8 bajo la suposición de que la composición del agua en la emulsión es de alrededor de 10 % (Stewart & Arnold, 2008) y no se consideran las pérdidas de calor en el tanque.

$$q = 16Q_o\Delta T[0,5(SG)_o + 0,1] \quad \text{Ec. 8}$$

Donde q : calor requerido, BTU/h; Q_o : flujo de aceite, BPDO; ΔT : diferencia entre la temperatura de tratamiento y temperatura de la carga, °F; $(SG)_o$: gravedad específica del aceite.

Apéndice E. Detalles de los distribuidores de flujo de los tanques

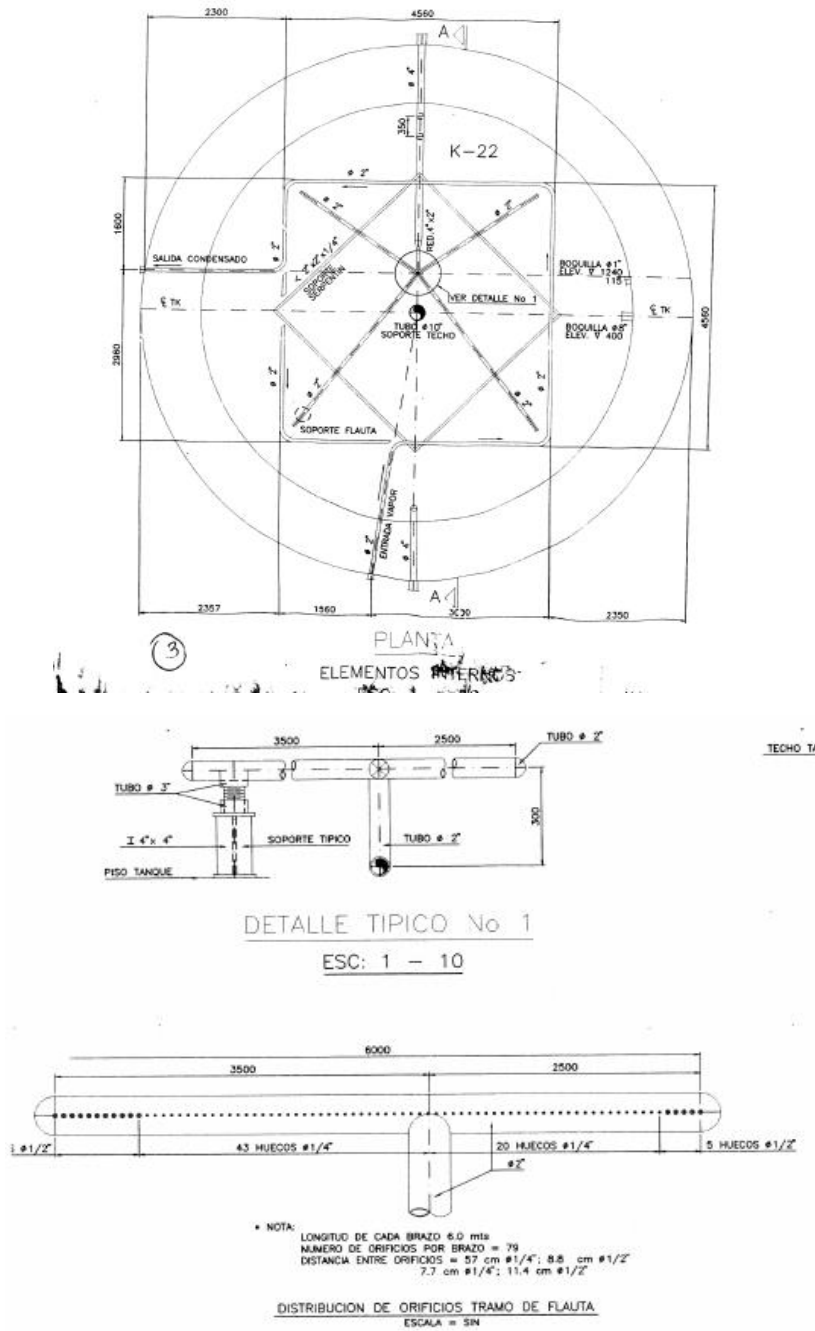


Figura E-1. Detalles de los distribuidores de flujo de los tanques. Fuente: Plano mecánico tanque K-3065.

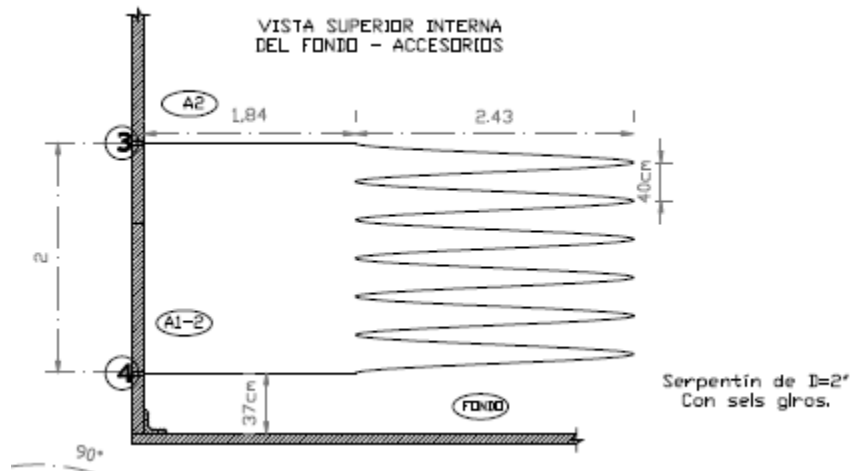


Figura E-2. Detalle del serpentín de calentamiento helicoidal en el tanque K-22. Fuente: Plano mecánico tanque K-22.