

**Evaluación de la factibilidad del uso de un tambor para el rompimiento de la emulsión
generada en el tratamiento del turbo combustible jeta1.**

Juan Carlos Espinosa Rey

**Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero de Procesos de Refinación y
Petroquímica**

Director

Julio Andrés Pedraza Avella

PhD. En Ingeniería Química

Codirector

Ricardo Cortés Camargo

Ing. Químico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Ingeniería de Procesos de Refinación y Petroquímicos

Bucaramanga

2022

Tabla de contenido

Introducción	9
1. Objetivos	11
1.1 Objetivo General	11
1.2 Objetivos Específicos	11
2. Estado del arte	12
2.1 Método de Desemulsificación Mecánica	13
2.2 Método Térmico	13
2.3 Método Electrostático	14
2.4 Método Químico	14
2.5 Método de Membranas	15
2.6 Método de Desemulsificación Biológica	15
3. Metodología	16
3.1 Caracterización fisicoquímica de la emulsión	16
3.1.1 <i>Determinación de las características fisicoquímicas de la fase JETA1</i>	16
3.1.2 <i>Determinación de las propiedades de la solución de soda</i>	17
3.2 Medición del tiempo de estabilización de la emulsión	18
3.3 <i>Medición del rompimiento de la emulsión con un desmulsificante</i>	19
3.4 Determinación de la fase continua y la fase dispersa de la emulsión	20
3.5 Determinación del método más conveniente para la separación de la emulsión	21
3.6 Evaluación técnica del tambor D4603	22
4. Resultados	25

4.1 Resultados de la caracterización fisicoquímica de la emulsión	25
4.1.1 Resultados de la caracterización fisicoquímica de la fase JETA1	25
4.1.2 Resultados de la caracterización fisicoquímica de la solución de SODA.	30
4.2 Resultados de la medición de estabilidad de la emulsión	31
4.2.1 Medición de la estabilidad de la muestra in-situ.	31
4.2.2 Resultados de estabilidad de la emulsión en laboratorio especializado	33
4.3 Resultados de la aplicación de rompedores de emulsión en la solución SODA/JETA1 del drum D-4601	37
4.4 Resultados de la determinación de la fase continua y fase dispersa de la emulsión	40
4.5 Selección del método más conveniente para la separación de la emulsión	42
4.5.1 Diferencia de densidades entre las fases a separar	43
4.5.2 Tipo de Separación	43
4.5.3 Volumen de separación y Tiempo de Residencia	44
4.6 Estudio de viabilidad técnica del Drum D.4603	45
4.6.1 Cálculos volumétricos para la operación del D-4603.	45
4.6.2 Tamaño de Gota y Velocidad de Descenso	47
4.6.3 Propuesta de modificaciones de diseño para el D-4603	49
4.6.4 Inspección mecánica y de integridad del Drum 4603	51
5. Conclusiones	57
6. Recomendaciones	58
Referencias Bibliográficas	59
Apéndices	60

Lista de figuras

Figura 1. <i>Muestreador de nivel variable de la emulsión del Drum D4601.</i>	19
Figura 2. <i>Diagrama de flujo de la metodología utilizada.</i>	24
Figura 3. <i>Perfiles de destilación del JetA1, antes del Drum D-4601 y después del filtro F4605/F4606</i>	26
Figura 4. <i>Estabilidad del perfil de destilación, parte I</i>	27
Figura 5. <i>Estabilidad del perfil de destilación, parte II</i>	28
Figura 6. <i>Curvas del perfil de destilación resultantes del análisis de estabilidad</i>	29
Figura 7. <i>Secuencia fotográfica de la separación de la emulsión en campo</i>	32
Figura 8. <i>Estabilidad de la emulsión en el laboratorio especializado (45% JetA1, 5 min de mezcla).</i>	35
Figura 9. <i>Estabilidad de la emulsión en el laboratorio especializado (60% JetA1, 5 min de mezcla).</i>	36
Figura 10. <i>Estabilidad de la emulsión en el laboratorio especializado (75% JetA1, 5 min de mezcla).</i>	36
Figura 11. <i>Muestras de la emulsión del Drum 4601, desestabilizadas</i>	38
Figura 12. <i>Medición del pH en la emulsión</i>	39
Figura 13. <i>Resultados de los agentes rompedores de emulsión</i>	40
Figura 14. <i>Diagrama de fases presentes en el D-4601 en condiciones normales de operación</i>	45
Figura 15. <i>Modificaciones de diseño propuestas para el D-4603</i>	50
Figura 16. <i>Diagrama de puntos de inspección del D4603.</i>	51

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Tabla de puntajes para la matriz de decisión</i>	21
Tabla 2. <i>Resultados de caracterización fisicoquímica del JetA1, en diferentes puntos de la planta</i>	25
Tabla 3. <i>Datos del perfil de destilación resultantes del análisis de estabilidad</i>	28
Tabla 4. <i>Propiedades fisicoquímicas adicionales simuladas del JetA1.</i>	29
Tabla 5. <i>Caracterización fisicoquímica Simulada de la fase Agua-Soda</i>	31
Tabla 6. <i>Tiempos de separación de las muestras de emulsión in-situ</i>	32
Tabla 7. <i>Resultados de estabilidad de emulsión en laboratorio especializada (5 min. de mezcla).</i>	34
Tabla 8. <i>Resultados de estabilidad de emulsión en laboratorio especializado (15 min. de mezcla).</i>	35
Tabla 9. <i>Cálculo del X factor para la determinación de la fase dispersa</i>	41
Tabla 10. <i>Resultados de fase en función del X factor</i>	41
Tabla 11. <i>Matriz de evaluación de alternativas de separación de la emulsión</i>	42
Tabla 12. <i>Cálculo económico de la cantidad de JetA1 contenido en la emulsión</i>	46
Tabla 13. <i>Cálculos velocidad de partícula y tiempo de residencia.</i>	48
Tabla 14. <i>Cálculo de volumen de separación en el D-4603.</i>	49
Tabla 15. <i>Listado de observaciones inspección primaria del D-4603</i>	52
Tabla 16. <i>Espesores Lámina Casco (milésimas de pulgadas)</i>	53
Tabla 17. <i>Espesores Lámina de los CAPs (milésima de pulgadas)</i>	54
Tabla 18. <i>Espesores Lámina de las Boquillas del Drum 4603 (milésima de pulgadas).</i>	54

Lista de apéndices

Apéndice A. Diagrama de proceso, Sección de lavado de JETA1	61
Apéndice B. Paquetes termodinámicos recomendados en función del tipo de proceso	62
Apéndice C. Gravedad específica- Concentración para soluciones de Soda Cáustica a 60°F	63
Apéndice D. Plano mecánico del D-4601	64
Apéndice E. Plano mecánico del D-4603	65

Resumen

Título: Evaluación de la factibilidad del uso de un tambor para el rompimiento de la emulsión generada en el tratamiento del turbo combustible JET A1.*

Autor: Juan Carlos Espinosa Rey**

Palabras clave: Emulsión, Caracterización fisicoquímica, Tratamiento, Estabilidad, JetA1, Soda.

Descripción

En la Refinería de Barrancabermeja se produce el turbo combustible JetA1, que es uno de los productos de mayor valor en la industria de refinación, este se utiliza como combustible para aviones con turbina tipo propulsión o JetA1, para un óptimo funcionamiento de los motores, este debe cumplir con características fisicoquímicas rigurosas y estándares internacionales de calidad como la acidez, el punto de congelamiento, la separación de agua (MSEP) y partículas sólidas en suspensión entre otras. La presencia de ácidos nafténicos, genera diversos problemas en los componentes metálicos de las turbinas que usan este combustible, disminuyendo su vida útil. Debido a lo anterior se realiza un lavado al combustible con una solución de soda fresca a 5° Baumé para neutralizar y disminuir la acidez. Este proceso es realizado en el tanque lavador D4601, allí debido al contacto y turbulencia de mezcla entre las fases se genera una emulsión que debe ser controlada y retirada para evitar arrastre de soda, daños y contaminación en el proceso de filtrado y calidad del JetA1.

Durante muchos años, el control de la emulsión se ha realizado por medio de drenajes al sistema de aguas aceitosas, lo anterior representa una pérdida económica por la cantidad de combustible presente en la emulsión que es desechado como slop de la refinería a muy bajo precio y con un impacto ambiental significativo, puesto que los drenajes llegan al sistema de tratamiento de aguas residuales PTAR. En el presente proyecto, se evalúa la factibilidad de utilizar un tambor que se encuentra fuera de servicio en la planta, para separar las dos fases de la emulsión y poder enviarlas a sistemas cerrados; la soda a un sistema de tratamiento y el JetA1 hacia un producto terminado de mayor valor comercial como es el Aceite liviano de ciclo (ALC), o al mismo proceso de Jet A1.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director. Julio Andrés Pedraza Avella. PhD. En Ingeniería Química. Codirector. Ricardo Cortés Camargo. Ing. Químico

Abstract

Title: Evaluation of the feasibility of using a drum to break the emulsion generated in the treatment of turbo fuel JET A1.*

Author: Juan Carlos Espinosa Rey**

Key words: Emulsion, physicochemical characterization, Treatment, Stability, JetA1, Soda.

Description

The Barrancabermeja Refinery produces JetA1 turbo fuel, one of the most valuable products in the refining industry, which is used as fuel for turbine propulsion type aircraft or JetA1. For optimum engine performance, this fuel must comply with rigorous physicochemical characteristics and international quality standards such as acidity, freezing point, water separation (MSEP) and suspended solid particles, among others. The presence of naphthenic acids generates various problems in the metallic components of the turbines that use this fuel, reducing their useful life. Due to the above, the fuel is washed with a fresh soda solution at 5° Baumé to neutralize and reduce the acidity. This process is carried out in the washing tank D4601, where, due to the contact and turbulence of mixing between the phases, an emulsion is generated that must be controlled and removed to avoid soda carryover, damage, and contamination in the filtering process and quality of JetA1.

For many years, the control of the emulsion has been done using drains to the oily water system, which represents an economic loss due to the amount of fuel present in the emulsion that is disposed of as slop from the refinery at a very low price and with a significant environmental impact, since the drains reach the wastewater treatment system WWTP. This project evaluates the feasibility of using a drum that is out of service in the plant to separate the two phases of the emulsion and send them to closed systems; the soda to a treatment system and the Jet A1 to a finished product of higher commercial value such as Light Cycle Oil (LCO), or to the Jet A1 process itself.

* Grade Work

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director. Julio Andrés Pedraza Avella. PhD. En Ingeniería Química. Codirector. Ricardo Cortés Camargo. Ing. Químico.

Introducción

El turbo combustible (Jet A1) proveniente de las Unidades de destilación de crudos se ingresa a la unidad de tratamiento con sodas en el tambor D4601 (soda-jetA1) y en el tambor D4602 (agua-JetA1) con el fin de remover ácidos nafténicos y sulfhídricos (*napfining*) presentes en el turbo combustible JetA1. También se remueve el sodio aportado en los lavados cáusticos (*aquafining*), se seca con sal y se remueven otros contaminantes como sólidos, surfactantes y jabones. En el *Apéndice A* se encuentra un diagrama de proceso de la planta donde se especifican cada una de las unidades mencionadas anteriormente.

El turbo combustible y la solución de soda se ponen en contacto en un lecho empacado y posteriormente entran en el tambor D4601, donde debido al contacto y la mezcla dada en el lecho se generan tres fases en el tanque. Una fase acuosa que se presenta de forma libre, otra fase que corresponde al turbo combustible y por último una fase emulsionada de combustible y la solución de soda. La presencia de la emulsión entre el turbo combustible y la fase acuosa dependerá de algunos factores como la temperatura, el perfil de compuestos químicos acumulados y arrastrados de otras unidades de proceso entre otros. Estos factores afectan directamente una variable llamada Tensión Interfacial o IFT (Interfacial Tension), que es la unidad de energía por unidad de área que existe entre dos fases para poder separarla y que típicamente en muchos casos es inversamente proporcional a la estabilidad de la emulsión. Por lo tanto, a menor tensión interfacial entre las fases, mayor es la estabilidad de la emulsión, haciéndola más fuerte y por ende difícil de separar (visualmente el JetA1 se ve opaco). Algunos estudios han mostrado que, a mayor alcalinidad residual en una corriente, menor será la tensión interfacial entre las fases, haciendo más estable la emulsión (Ahmed B. Laben, 2021). En este punto es importante tener presente que en el tambor

D-4601 se controla la relación que se alimenta al tambor de flujo de JetA1 y de solución cáustica de 5° Baumé (NaOH), establecida entre 10 a 20 (Relación de Carga = gpm de JetA1 / gpm de Solución Cáustica). Por experiencia operativa, se ha observado que a menor relación (tendiendo hacia 10), mayor es la formación de la emulsión. Esto se debe a que, al tener mayor fase o flujo de solución cáustica, se tendrá mayor disponibilidad de NaOH y una mayor neutralización de los ácidos (nafténicos y sulfhídricos) presentes en el JetA1, lo cual forma más compuestos neutralizados que son de naturaleza “jabonosa” que tienen un efecto emulsificante, lo cual sumado a un mayor ambiente alcalino luego del proceso de tratamiento (mayor NaOH residual), incrementan la formación de más emulsión en el tambor. Por lo tanto, una relación entre 15 -17 se ha establecido operativamente como la más adecuada para reducir en lo posible la formación de la emulsión y cumplir con la acidez residual en el JetA1 (menor de 0.1 mg KOH/g).

La emulsión formada entre las dos fases (orgánica y acuosa), se le denomina comúnmente como “*rag layer*”, normalmente debe ser removida a través de boquillas diseñadas e instaladas en los equipos de separación para evitar su acumulación y afectación del proceso de separación (Rousseau, 1987). En la operación se drena la emulsión al sistema de aguas aceitosas (SE3030) y de allí a PTAR lo que genera un impacto ambiental. Además, se produce una pérdida económica ya que en la emulsión se encuentra una cantidad de combustible y solución de soda que no se aprovechan porque que no son reincorporados al proceso. Para solucionar la problemática anteriormente expuesta, se propone utilizar el tambor D4603 para almacenar la emulsión de soda agua y jetA1 y evaluar alternativas de separación de la emulsión con el objetivo de recuperar el combustible presente para retornarlo al proceso en los tanques de ciclo y recuperarlo como producto terminado. Por otro lado, el agua-soda iría hacia el sistema del K4605 para su debido tratamiento.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la factibilidad del uso de un tambor acumulador para la recuperación de las fases presentes en la emulsión generada en el tratamiento del turbo combustible.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar las características fisicoquímicas de la emulsión generada en el tratamiento del turbo combustible JETA1.

Seleccionar el método más conveniente y de menor complejidad para la separación de la emulsión con base en su caracterización fisicoquímica.

Evaluar la factibilidad técnica del uso del tambor D4603 para la separación de la emulsión empleando el método seleccionado.

2. Estado del arte

A través de la historia, las emulsiones han estado presentes en los diferentes procesos que se desarrollan en las industrias. En los diferentes procesos, las emulsiones pueden ser benéficas o no a los procesos dependiendo de la naturaleza de la operación que se lleva a cabo. Por ejemplo, en muchos de los procesos de la industria de alimentos, la emulsificación tiende a ser benéficos ya que les dan consistencia a los productos como la mayonesa y las margarinas. Por otro lado, en los procesos de producción de petróleo o petroquímicos, las emulsiones suelen ser un problema ya que dificultan los procesos de separación del producto de valor respecto al agua lo cual a su vez disminuye la eficiencia de los procesos de separación y dificulta el control del proceso (Ken Arnold, 1999).

En los procesos de producción y refinado de petróleo, las emulsiones se forman gracias a la condición de turbulencia al momento de fluir por las tuberías de transporte o en las diferentes operaciones. Debido a lo anterior, en la interfase (*Oil-water*) se forman gotas de agua (fase continua) que son envueltas por una película de aceite (Fase dispersa) formando la fase de emulsión. Básicamente en el tratamiento de las emulsiones se busca romper la película que envuelve las gotas de la fase dispersa. Lo anterior se puede lograr:

- Incrementando los tiempos de residencia en las operaciones de separación y retención de sólidos para disminuir agentes que ayuden a la formación de la emulsión.
- Aplicando campos electromagnéticos y electrostáticos que produzcan fuerzas que promuevan la ruptura de la película de la fase dispersa desestabilizando la emulsión.
- Adicionando agentes que ayuden a controlar la formación de la emulsión.

- Provocando un incremento de la temperatura de la emulsión, de esta manera, la fase dispersa disminuye su viscosidad provocando que la resistencia de la película de la fase dispersa disminuya y así se desestabilice la emulsión.

- Disminuyendo la condición de flujo turbulento en el transporte y en el paso de las fases por las operaciones de procesos (Maurice Stewart, 2008).

2.1 Método de Desemulsificación Mecánica

En este método de separación se utilizan fuerzas mecánicas para romper las barreras de diferencia de densidad entre las capas del aceite y el agua (fases de la emulsión). Este tipo de separación se puede lograr gracias a equipos como: separadores centrífugos, tanques de sedimentación por gravedad, ciclones y otros. En términos generales, esta técnica permite la separación de gotas de emulsión de diferentes tamaños por medio de flujos dinámicos y de esta manera favorece la coalescencia, permitiendo la separación de las fases que conforman la emulsión (Ahmed Abdulrazzaq Hadi a, 2022).

2.2 Método Térmico

El tratamiento térmico de las emulsiones, ya sea por medio de convección o microondas, se basa en aumentar la temperatura de la emulsión antes de pasar por un tanque de separación horizontal. Este incremento en la temperatura hace que la viscosidad y la rigidez de la interfase disminuyan significativamente, permitiendo con mayor facilidad la coalescencia de las gotas que conforman la emulsión. Al usar este método de tratamiento, hay que tener en cuenta que al tratar

emulsiones que contengan componentes livianos, se puede iniciar una separación no deseada y aumentar la densidad (Mohammed Kamil, 2019).

2.3 Método Electrostático

Esta técnica, se basa en que las gotas de agua poseen una carga asociada las cuales al ser atravesadas por campos eléctricos y electrostáticos se mueven rápidamente, lo cual provoca un ordenamiento de las gotas que conforman la emulsión, y a su vez genera una mayor interacción y colisión entre las burbujas, facilitando el rompimiento de las capas de interfase dando lugar a la coalescencia. Tradicionalmente, este método es usado de manera conjunta con el método térmico y químico, ya que, al favorecer la separación de la emulsión, disminuye el uso de energía y el uso del agente desemulsificante (Sunil Kokal, 2005).

2.4 Método Químico

El tratamiento de emulsiones por medio de agentes químicos desemulsificantes es sin duda el método más utilizado en las industrias, estos agentes, están diseñados para desestabilizar el agente emulsificante ya que atacan la interfase generando el rompimiento de la película interfacial de la fase dispersa. Entre las condiciones óptimas para el tratamiento de emulsiones por medio del método químico tenemos: El agente adecuado para la mezcla a tratar, la cantidad de agente a utilizar, adecuada agitación de la emulsión, Tiempo de retención suficiente en el desemulsificador (Sunil Kokal, 2005).

2.5 Método de Membranas

El método de desemulsificación por membranas es una tecnología de trabajo relativamente nueva, la cual ha estado tomando fuerza recientemente. Consiste en usar la diferencia de viscosidad y la tendencia de la fase dispersa de migrar hacia la menor presión. Las principales ventajas de esta tecnología es el bajo costo de operación, la alta eficiencia y la operación en continuo que se puede lograr con la misma, en adición un problema que comúnmente se presenta en las membranas es que son muy susceptibles al ensuciamiento, que provoca problemas de operación y eleva el costo del proceso ya que disminuye la vida útil de la membrana. Diferentes autores están apostando al desarrollo de membranas con superficies superhidrofílicas y superoleofóbicas entre otras ya que presentan resistencia en condiciones de acidez y salinidad superiores (Mohammed Kamil, 2019).

2.6 Método de Desemulsificación Biológica

La desemulsificación biológica consiste en usar microorganismos o segregado biológico que actúa sobre la superficie de la película de la interfase que compone la emulsión, de esta manera, desestabiliza el agente emulsificante favoreciendo la separación de las fases. Este tipo de tratamiento posee algunas ventajas como: Ser amigable con el medio ambiente ya que no genera ningún tipo de residuo y, además, pueden ser efectivos en algunas condiciones extremas donde por ejemplo la desemulsificación química disminuye su efectividad (Mohammed Kamil, 2019).

3. Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo, se desarrolló una constante búsqueda bibliográfica que permitiera que la información planteada en este documento este acorde con las diferentes teorías aplicadas en la actualidad. Con el fin de cumplir con todos los objetivos de este proyecto, se planteó la siguiente metodología de trabajo.

3.1 Caracterización fisicoquímica de la emulsión

La caracterización fisicoquímica de la emulsión se realizó analizando cada una de las fases que la conforman de manera independiente, y realizando estudios específicos a la emulsión que conforman ambas fases. Estas muestras fueron tomadas en días específicos y enviadas a los laboratorios para el análisis correspondiente. Es importante resaltar que en el Apéndice A se encuentra el diagrama de flujo de la planta con el fin de facilitar el entendimiento del presente documento.

3.1.1 Determinación de las características fisicoquímicas de la fase JETA1

Esta etapa consistió en determinar las características fisicoquímicas de la fase Jet-A1 presente en emulsión, las características fisicoquímicas básicas consideradas en la caracterización fueron la viscosidad, tensión superficial de las fases, tensión interfacial, acidez, gravedad específica, composición, tamaño de las gotas, las cuales fueron analizadas en laboratorio y por medio de un simulador.

Para determinar las características fisicoquímicas del JetA1, se realizó un estudio especial (Por fuera de los controles de calidad rutinarios) con el fin de evaluar el comportamiento de las variables fisicoquímicas y de calidad del producto en mención a través de la planta. Para tal fin, se realizó una toma simultánea de muestras en dos puntos específicos de la planta, los cuales fueron en la toma muestras antes del D4601 (antes del lavado) y a la salida de los filtros F-4605/F-4606 (producto final). Además, se realizaron análisis a las curvas de destilación del Jet-A1 antes y después del lavado con el fin de analizar los cambios en las propiedades del turbo combustible en el proceso. Por último, se llevó a cabo un análisis de estabilidad del alimento de la planta analizando el comportamiento de la curva de destilación durante un periodo de tiempo para determinar una curva de destilación baja, promedio y alta del alimento, para así determinar las propiedades que no son analizadas rutinariamente en los escenarios mencionados. El simulador usado fue Aspen Hysys en el cual se simuló la fase a condiciones de operación (74 psig, 106 °F y un flujo de 23048 BPD).

3.1.2 Determinación de las propiedades de la solución de soda

Estas propiedades fueron determinadas por medio del simulador Aspen Hysys a condiciones de operación (106 °F, 74 psig y 45 USGPM) ya que rutinariamente no se le realizan monitoreos a esta fase, para esta simulación se tuvieron en cuenta las especificaciones de preparación de la solución dadas por el fabricante de la planta MERICHEM. Entre las propiedades analizadas se encuentran la viscosidad, tensión superficial, entalpía entre otras.

3.2 Medición del tiempo de estabilización de la emulsión

La medición del tiempo de estabilización se desarrolló con dos métodos. El primero consistía en medir la estabilidad de la emulsión *in-situ* tomando una muestra en una probeta y registrando los tiempos a medida que se producía la separación de las fases. Este muestreo consistía en realizar la medición en el muestreador de nivel variable del Drum D4601 el cual permite encontrar la emulsión para su drenaje y muestreo respectivo (ver figura 1. La toma de las muestras fue realizada teniendo en cuenta el siguiente procedimiento.

1. Identificar la altura a la cual se encuentra la fase Jet-A1 (15' o más) y la fase soda (12' o menos) por medio del medidor, la diferencia entre los niveles medidos nos da como resultado la interfase y dentro de esta se encuentra la emulsión.

2. Si la altura de la interfase es mayor a $\frac{3}{4}$ ' esta debe ser drenada; para ello, se alinea la toma muestra del medidor con la altura inferior de la interfaz.

3. Se abre la válvula y se realiza una breve purga del saliente, esta se drena al sistema de desocupación de aguas aceitosa.

4. Se realiza la toma de la muestra de la emulsión en una probeta de 100 ml, al momento del llenado se inicia el cronometro y se detiene en el momento en el que se logra la separación total de la muestra.

Figura 1.

Muestreador de nivel variable de la emulsión del Drum D4601.



El otro método consistió en enviar muestras representativas de la emulsión al laboratorio del ICP, donde se realizaron los análisis especializados que presta el laboratorio. Cabe mencionar que los métodos de análisis realizados fueron los métodos propios de la compañía para este tipo de sustancias.

3.3 Medición del rompimiento de la emulsión con un desmulsificante

El uso de agentes químicos desmulsificantes que promueven el rompimiento de una emulsión es una práctica frecuente en la industria. La selección de un químico desmulsificantes conlleva la realización de pruebas de botella, simuladores dinámicos y pruebas reales en campo. La cantidad de químico desmulsificante a aplicar es también importante, debido a que muy poco dejará la emulsión sin romper, sin embargo, una dosis muy alta (sobre tratamiento) puede ser

adverso para el proceso de tratamiento debido a que los desemulsificantes también son surfactantes tal como los emulsificantes. Los desemulsificantes generalmente son específicos para una emulsión dada y puede ser completamente inefectivos para otra emulsión. Debido a la gran variedad de componentes presentes en una emulsión no es sorprendente que la efectividad de un desemulsificante dado sea sensible al tipo de hidrocarburo, al proceso de adsorción y desplazamiento, así como también sea dependiente del pH, contenido de sólidos, temperatura y hasta de cuál de las fases, orgánica o acuosa, sea la fase dispersa. Las muestras de emulsión fueron tomadas directamente del Drum-4601, a las cuales se les realizaron pruebas con diferentes agentes rompedores de emulsión de la compañía *ECOLAB* (Empresa contratista para el tratamiento de emulsiones), para analizar el comportamiento de la misma ante los agentes desemulsificantes.

3.4 Determinación de la fase continua y la fase dispersa de la emulsión

En los ensayos de separación a las muestras reales tomadas del tambor D-4601, se observó que, en algunas muestras al iniciarse la separación, la formación de la fase acuosa (solución cáustica) se fue presentando desde abajo hacia arriba, denotando la decantación de las gotas de solución cáustica y por ende que esta fase acuosa es típicamente la fase dispersa. Para confirmar esto, se utilizó la correlación de *Selker y Sleicher* (Rousseau, 1987), que permite predecir cual será la fase dispersa en función de la relación de volumen o flujo de las fases y de sus densidades y viscosidades.

3.5 Determinación del método más conveniente para la separación de la emulsión

Para llevar a cabo la selección del método más conveniente se usó una matriz de decisión con diferentes puntajes para cada una de las siguientes características, los puntajes asociados a cada uno de los diferentes aspectos de evaluación son mostrados en la Tabla 1, criterios de evaluación seleccionados fueron el costo de la alternativa, la funcionalidad y la complejidad y lo que se busca es evaluar cada método de separación de la emulsión con los criterios seleccionados y escoger el de mejor puntaje como la alternativa más viable.

Tabla 1.

Tabla de puntajes para la matriz de decisión

		SCORE
COSTO USD	<10.000	10
	10.000 – 20.000	5
	> 20.000	3
FUNCIONALIDAD	Cumple	5
	No Cumple	0
COMPLEJIDAD	Alta	3
	Media	5
	Baja	10

3.6 Evaluación técnica del tambor D4603

Por último, la tercera etapa es la evaluación del tambor D4603 para la recuperación y separación de la emulsión generada en el tratamiento de JetA1. Para lograr lo anterior se plantearon los siguientes pasos.

- Calcular el flujo volumétrico aproximado de emulsión por día de operación de la unidad. Para determinar si el tanque tiene la capacidad para recibir y almacenar por el tiempo necesario la emulsión, se hace necesario calcular la cantidad aproximada de emulsión generada en condiciones normales de operación. El manual de operación dado por *Merichem* especifica que el drum 4601 debe ser operado con un nivel de la fase soda a 12” desde el fondo del tanque, en este punto inicia el nivel de la emulsión el cual va hasta una altura de 13,5” desde fondo e inicia la fase Jet. El operador debe drenar la emulsión si se encuentra por encima de 1,5” y así evitar que pase aguas abajo en el proceso. Usualmente, los operadores de planta drenan la emulsión dos veces por turno de 12 horas ya que se alcanza el nivel crítico. Por otro lado, por medio de modelamiento de datos y basado en los planos, se simularon las curvaturas y geometría del tanque, para con ello realizar el posterior cálculo del volumen de emulsión usando el cálculo multivariados (integración múltiple).

- Búsqueda de información técnica del D4603. Específicamente las *datasheets* del equipo y los planos de diseño para con estos poder visualizar sus dimensiones y hacer las posteriores modificaciones de diseño para su operación.

- Planteamiento de mejoras de la configuración interna del equipo para asegurar la eficiencia de separación de las fases por el método seleccionado. Considerando que la fase dispersa siempre será la fase acuosa, con los tiempos de separación medidos en los ensayos, se

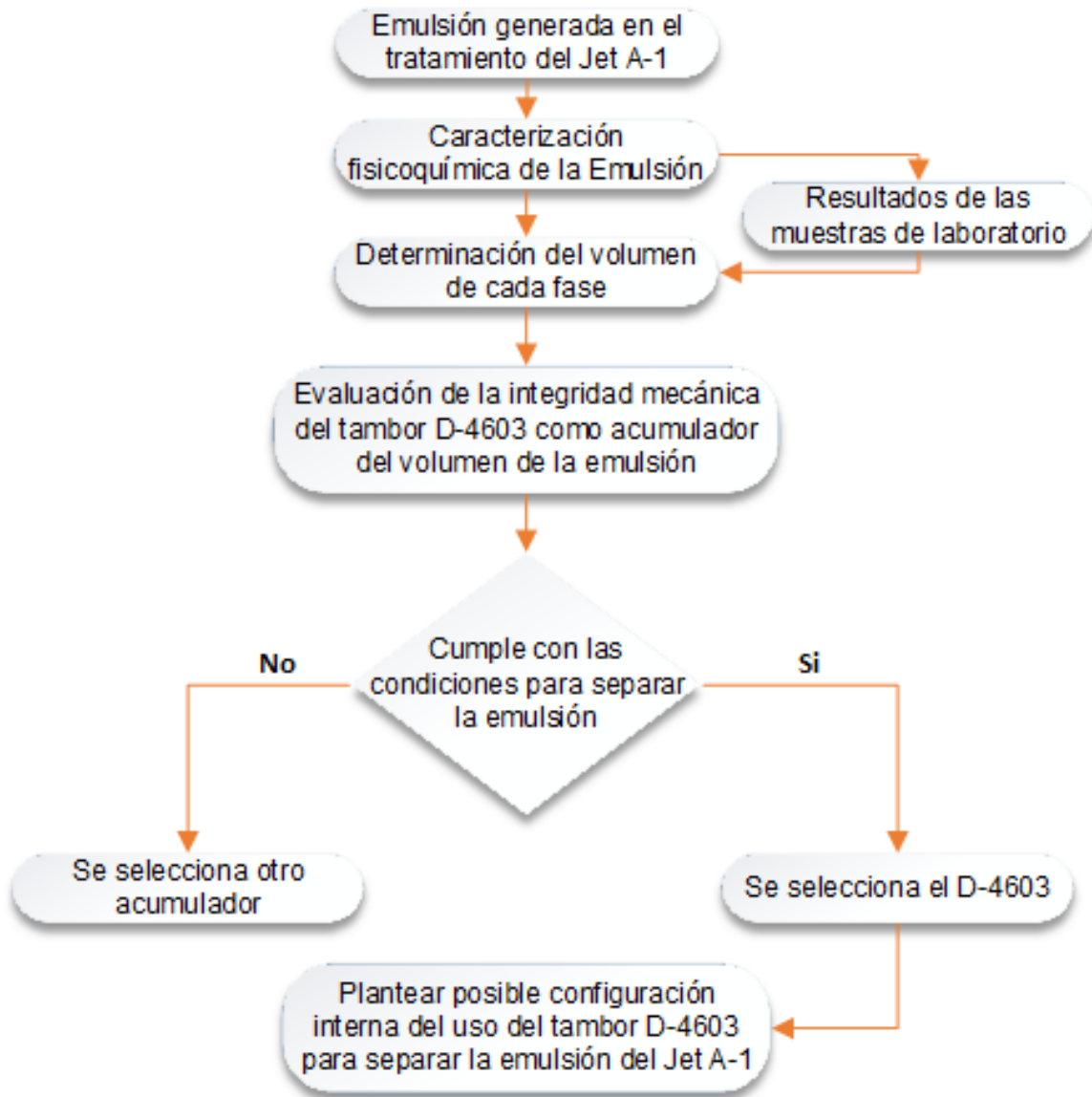
estimó el tamaño de gota esperado en cada situación para validar el volumen de separación. Para la velocidad de descenso de la gota se utilizó la ecuación de la ley de Stokes (Rousseau, 1987), con esta, se determina posteriormente el tiempo de residencia para luego diseñar la configuración interna que permita asegurar la separación.

- Inspección de la integridad mecánica del tambor D4603 para establecer su confiabilidad y operatividad mediante análisis de espesores de lámina, *caps*, juntas y soldaduras. La inspección mecánica se llevó a cabo con los lineamientos establecidos en la norma API 510 *Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration* (Institute, 2006) la cual establece las condiciones y requerimientos aplicables a la inspección y el mantenimiento de recipientes a presión construidos de acuerdo a la Sección VIII del Código ASME y otros Códigos de fabricación reconocidos, una vez que han sido puestos en servicio. La toma de espesores se realizó por ultrasonido de acuerdo a lo contemplado en la norma SNT-TC-1A de la ASNT (Testing, 2020) con equipo DMS Go+, el cual que permite realizar la detección ultrasónica de defectos y mediciones de espesor. Además, proporciona datos de inspección precisos, fiables y completos en una amplia gama de aplicaciones y entornos con registro de datos completos.

Para cumplir con los objetivos de este trabajo, se presenta en el un diagrama de flujo con lo planteado en la metodología (ver figura 2).

Figura 2.

Diagrama de flujo de la metodología utilizada.



4. Resultados

4.1 Resultados de la caracterización fisicoquímica de la emulsión

4.1.1 Resultados de la caracterización fisicoquímica de la fase JETA1

Los resultados de las muestras analizadas se relacionan en la

Tabla 2, el análisis muestra que en el transcurso del JetA1 a través de la planta, todas sus variables se mantienen constantes excepto la acidez y el color Saybolt. Para el caso de la acidez, esta baja drásticamente después del lavado con soda, como es de esperarse ya que es la funcionalidad de la etapa. Por otro lado, el color Saybolt, este se mantiene estable durante el lavado y aumenta después del proceso de filtrado, esto se debe a que, en el proceso, la presencia de agua en el JetA1 es la causante de color y turbiedad, y después de pasar por los procesos de filtrado, toda el agua es removida y como consecuencia mejora la calidad del color.

Tabla 2.

Resultados de caracterización fisicoquímica del JetA1, en diferentes puntos de la planta

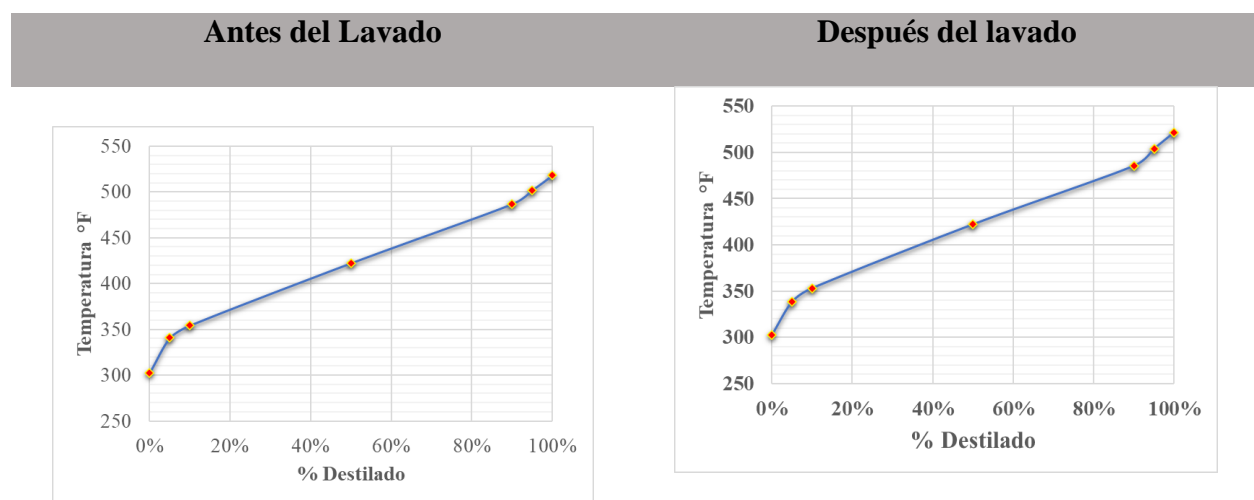
COMPONENTE	UNIDAD	RESULTADO		
		Antes del D-4601	Salida del D-4601	Producto final
Acidez total	mg KOH/g	0,25	0,002	0,006
Color Saybolt	N/A	+13	+12	+24
Densidad a 15 °C	kg/m ³	821,6	821,7	823,1

COMPONENTE	UNIDAD	RESULTADO		
		Antes del D-4601	Salida del D-4601	Producto final
Densidad a 60 °F	kg/m ³	821,2	821,3	822,7
Densidad relativa a 15,6°C	N/A	0,822	0,822	0,824
Gravedad API	Grados API	40,6	40,6	40,3
Punto de inflamación	°F	---	112	112

El en análisis realizado al JetA1 en el perfil de destilación, las muestras se tomaron antes de la entrada al Drum D-4601 y a la salida de la planta después de los filtros F-4605/F-4606. Los perfiles de las curvas de destilación se muestran en la *Figura 3*. Se puede apreciar, que dicho perfil no cambia, por lo tanto, se puede inferir que el JetA1 que compone la emulsión es el mismo JetA1 de salida de la planta con la excepción de la disminución de la acidez y el cambio de color.

Figura 3.

Perfiles de destilación del JetA1, antes del Drum D-4601 y después del filtro F4605/F4606



Con el fin de determinar otras propiedades al JetA1 que no son realizadas rutinariamente, se realizó un estudio de estabilidad evaluando su perfil de destilación durante 60 días, para así establecer los rangos de perfil bajo, promedio y alto en los que suele estar el turbo combustible y de esta manera mediante un simulador poder modelar otras variables fisicoquímicas como lo son la viscosidad, tensión superficial, calor específico entre otras. Para este análisis de estabilidad, se tuvieron en cuenta los resultados de laboratorio del producto final de la planta durante el mes de mayo y junio de 2022, los comportamientos de los puntos de la curva de destilación se muestran en la figura 4 y figura 5. Es de aclarar que para el cálculo de los valores inferior y superior de cada punto de destilación se usó un intervalo de confianza del 99% para estimación de la desviación estándar tomando el valor máximo del intervalo como referencia, el cual fue sumado y restado al valor promedio para establecer dichos límites (Murray R. Spiegel, 2006). Estos valores calculados para cada punto de la curva de destilación se muestran en la tabla 3 y son graficados en la figura 6

Figura 4.

Estabilidad del perfil de destilación, parte 1

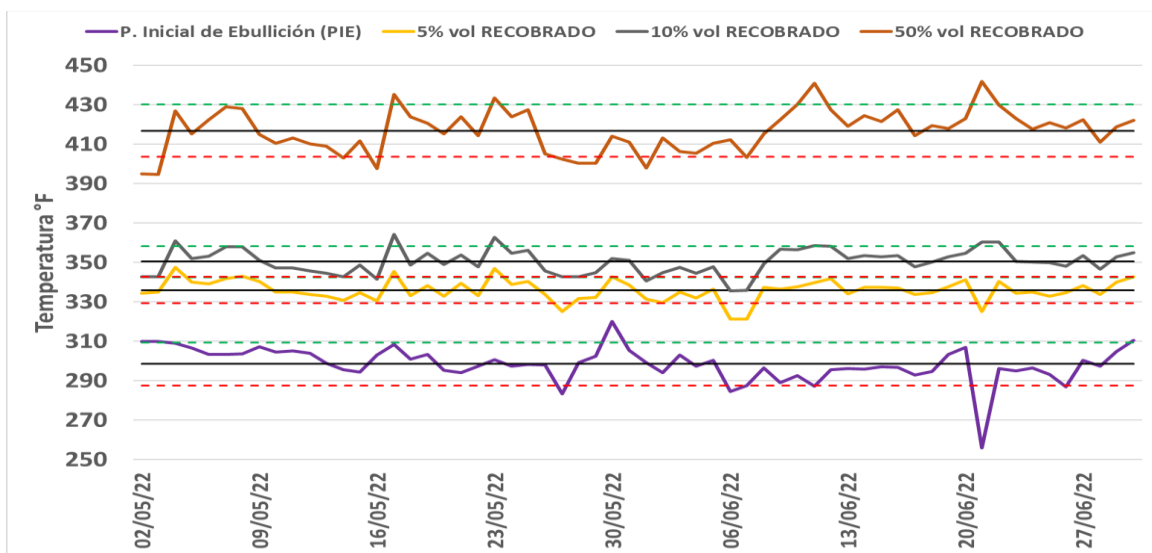
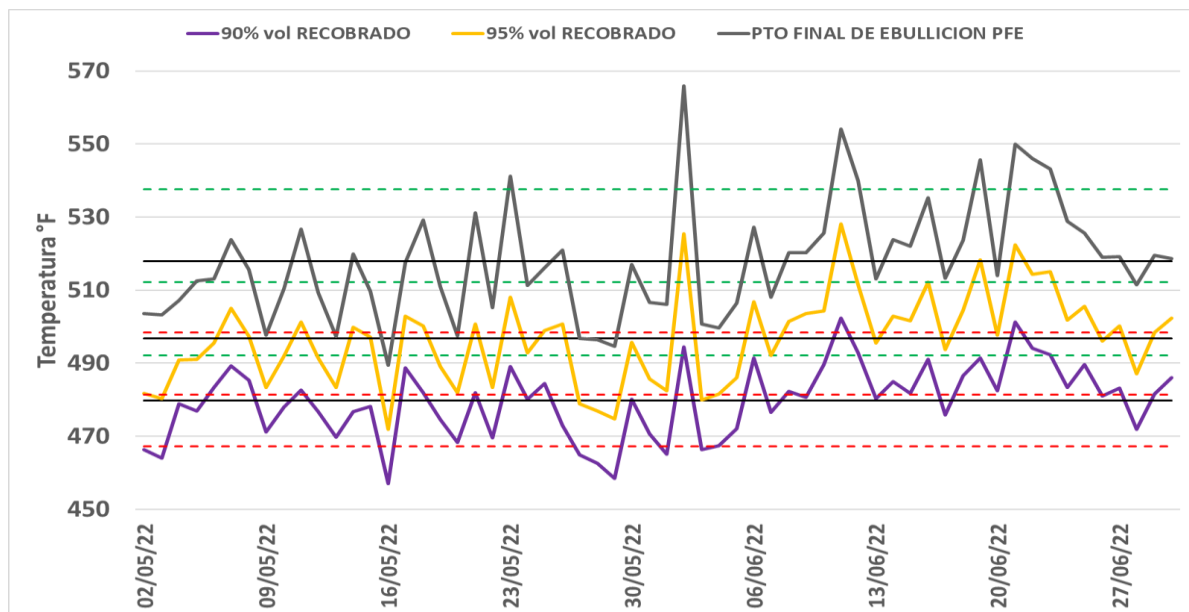
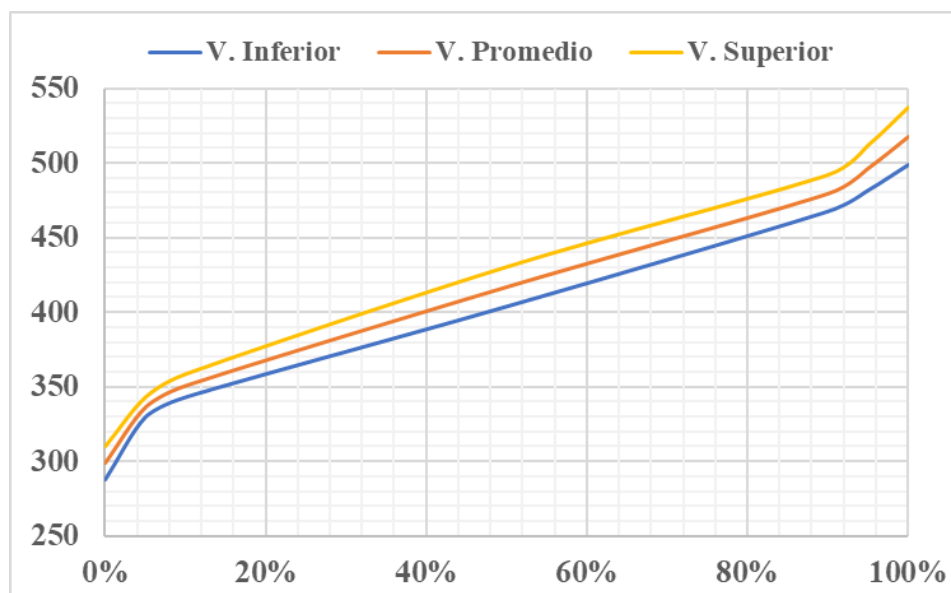


Figura 5.*Estabilidad del perfil de destilación, parte II***Tabla 3.***Datos del perfil de destilación resultantes del análisis de estabilidad*

% Destilado	V. Inferior °F	V. Promedio °F	V. Superior °F
PIE	287,6	298,6	309,5
5% Recobrado	329,4	336,0	342,6
10% Recobrado	342,8	350,5	358,2
50% Recobrado	403,5	416,9	430,3
90% Recobrado	467,2	479,7	492,2
95% Recobrado	481,4	496,8	512,2
PFE	498,4	518,0	537,5

Figura 6.

Curvas del perfil de destilación resultantes del análisis de estabilidad



Con las curvas de destilación resultantes, se usó el software de simulación de procesos *Aspen Hysys*, para realizar la simulación del turbo combustible y determinar las características que no son realizadas rutinariamente tales como la entalpía, viscosidad entre otras. En el simulador se usó el paquete de fluidos Peng-Robinson, este fue seleccionado teniendo los criterios de selección de *AspenTech* (Ver apéndice B). Asimismo, se usó la herramienta *Stream análisis* para determinar las características adicionales. Los resultados son mostrados en la *Tabla 4*.

Tabla 4.

Propiedades fisicoquímicas adicionales simuladas del JetA1.

Componente	Unidad	Valor Inferior	Valor Promedio	Valor Superior
Viscosidad	cP	1,045	1,126	1,221
Tensión Superficial	Dinas/cm	24,05	24,26	24,49

Componente	Unidad	Valor Inferior	Valor Promedio	Valor Superior
Calor Especifico	Btu/lb-F	0,4633	0,4630	0,4621
Entalpía	Btu/lb	-912,2	-911,8	-910,8
Peso Molecular	N/A	162,7	167,3	172,8
Densidad	Lb/ft ³	48,82	48,93	49,17
API	N/A	45,12	44,74	43,92
Punto de Inflamación	°F	126,9	128,5	131,9

4.1.2 Resultados de la caracterización fisicoquímica de la solución de SODA.

Para la caracterización fisicoquímica de la solución de Soda, se tuvieron en cuenta los manuales de operación de la planta dados por *Merichem Company* (fabricante), En los cuales se especifica que la solución de soda con la cual se debe operar la planta debe contener una concentración de 5°Be (Grados Baumé) ver la(Ec. 1. Esto da como resultado que la densidad resultante de la solución de soda con la que opera la unidad sea de $\rho = 1,0357 \text{ kg/L}$, Este valor de densidad arroja como resultado una concentración de 3,1558 % NaOH (Ver Apéndice C).

$$^{\circ}\text{Be} = 145 - \frac{145}{\rho} \quad (\text{Ec. 1})$$

Debido a que, en campo, a la fase acuosa de lavado no se le hacen monitoreos de propiedades fisicoquímicas entonces, estas fueron calculadas por medio del simulador *Aspen Hysys*, para este tipo de solución el paquete termodinámico usado fue *Sour PR* (ver Apéndice B) a las condiciones de operación. Los resultados obtenidos son mostrados en la *Tabla 5*.

Tabla 5.*Caracterización fisicoquímica Simulada de la fase Agua-Soda*

Componente	Unidad	Valor
Viscosidad	cP	0,9767
Tensión Superficial	Dinas/cm	1275
Calor Especifico	Btu/lb-F	1,122
Entalpía	Btu/lb	-6691
Peso Molecular	N/A	18,33
Densidad	Lb/ft ³	64,74
API	N/A	4,84
Punto de Inflamación	°F	112,7

4.2 Resultados de la medición de estabilidad de la emulsión

4.2.1 Medición de la estabilidad de la muestra in-situ.

Las pruebas de estabilidad de la emulsión en campo se realizaron en diferentes días del mes de abril y mayo de 2022 con el fin de tener en cuenta diferentes condiciones de operación y alimento de la planta.

En la *¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.* se exponen las secuencias fotográficas de separación de las algunas muestras tomadas y la

Tabla 6 se relacionan los tiempos totales de separación obtenidos para cada una de las muestras.

Figura 2.

Secuencia fotográfica de la separación de la emulsión en campo











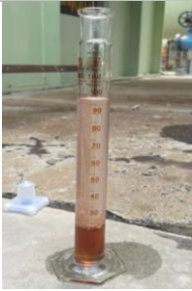

Fecha	Secuencia fotográfica de la separación en campo			
	1	2	3	4
21-04-2022				
29-04-2022				
07-05-2022				

Tabla 6.

Tiempos de separación de las muestras de emulsión in-situ

N° de Muestra	Fecha	Hora	Volumen [ml]	Tiempo de separación [min]	Volumen fase JetA1 [ml]	Volumen fase soda [ml]
1	21/04/2022	9:53	100	15	45	55
2	22/04/2022	9:47	100	15	44	56
3	23/04/2022	9:39	100	18	43	57
4	29/04/2022	9:19	100	20	35	65
5	6/05/2022	9:59	100	19	60	40
6	7/05/2022	11:59	98	46	78,6	21,4
7	8/05/2022	9:36	100	41	81	19
8	9/05/2022	9:41	100	10	43	57
9	11/05/2022	10:00	100	24	56	44
10	12/05/2022	10:21	100	17	51	49

Las mediciones de las muestras realizadas *in-situ*, mostraron que el tiempo de separación en general varía de 15 a 46 minutos, con un tiempo promedio de 22,5 minutos. Lo anterior indica de manera general que la emulsión se separa rápidamente y sin dejar remanente solo con la fuerza de la gravedad y el reposo.

4.2.2 Resultados de estabilidad de la emulsión en laboratorio especializado

Los resultados de estabilidad *in-situ* mostraron que la emulsión presenta separación rápida de las fases que la conforman. Por lo tanto, los especialistas del laboratorio solicitaron muestras de cada una de las fases tomadas por separado (JetA1 y Soda) para simular en el laboratorio la formación de la emulsión por medio de agitación mecánica automatizada tipo Ultra-Turrax, para

la posterior determinación de las propiedades de la emulsión tales como tamaño de gota, factor z, entre otros.

Las pruebas de laboratorio se realizaron con base a un *beaker* de 250 ml variando la cantidad de JetA1 y soda en proporciones de 55/45, 60/40 y 75/25 respectivamente. Asimismo, se realizaron variaciones en la velocidad de agitación (entre 1000 y 20000 RPM) y el tiempo de mezclado (5 y 15 min). Después las muestras fueron transvasadas a una probeta de 100 ml donde se toman las mediciones de tiempo y cantidad de soda decantada. Los resultados de obtenidos se relacionan en la *Tabla 7, tabla 8, figura 3, figura 4* y *figura 5*

Tabla 7.

Resultados de estabilidad de emulsión en laboratorio especializada (5 min. de mezcla).

Tiempo (s)	1000 RPM		2000 RPM		3000 RPM	
	V. Soda (mL)	$\frac{\%Soda L}{\%Soda T}$	V. Soda (mL)	$\frac{\%Soda L}{\%Soda T}$	V. Soda (mL)	$\frac{\%Soda L}{\%Soda T}$
5	8	15	6	11	3	6
10	15	28	10	19	12	22
20	20	37	23	44	19	36
30	30	56	33	63	27	51
60	46	85	40	77	42	79
120	54	100	52	100	53	99
240	54	100	52	100	53	99

Tabla 8.

Resultados de estabilidad de emulsión en laboratorio especializado (15 min. de mezcla).

Tiempo (s)	5000 RPM		20000 RPM	
	V. Soda (mL)	$\frac{\%Soda L}{\%Soda T}$	V. Soda (mL)	$\frac{\%Soda L}{\%Soda T}$
5	5	9	25	46
10	8	15	40	74
20	14	26	48	89
30	20	37	51	95
50	37	68	53	98
60	46	84	54	100
120	54	99	54	100
240	54	99	54	100

Figura 3.

Estabilidad de la emulsión en el laboratorio especializado (45% JetA1, 5 min de mezcla).

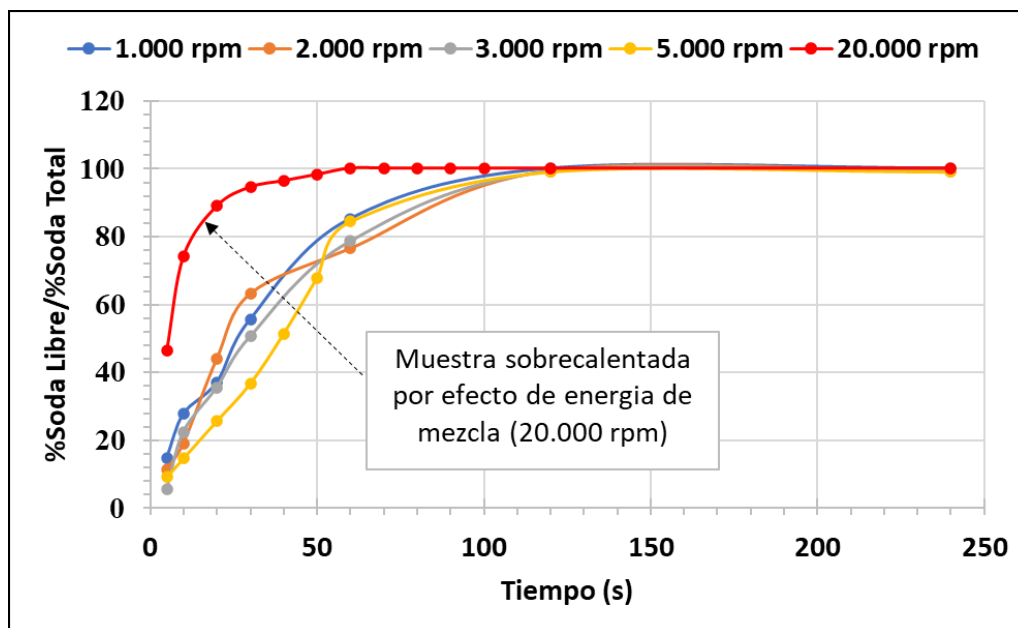
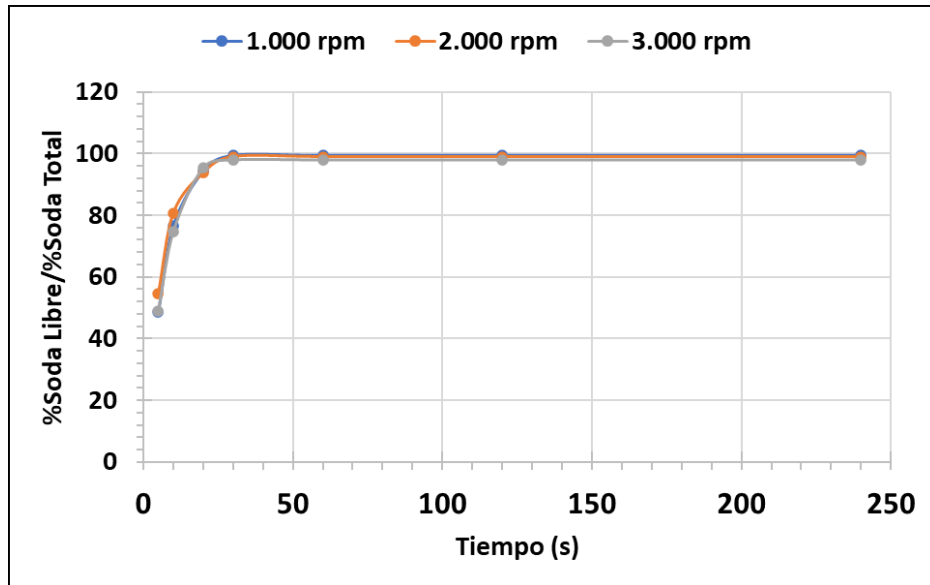
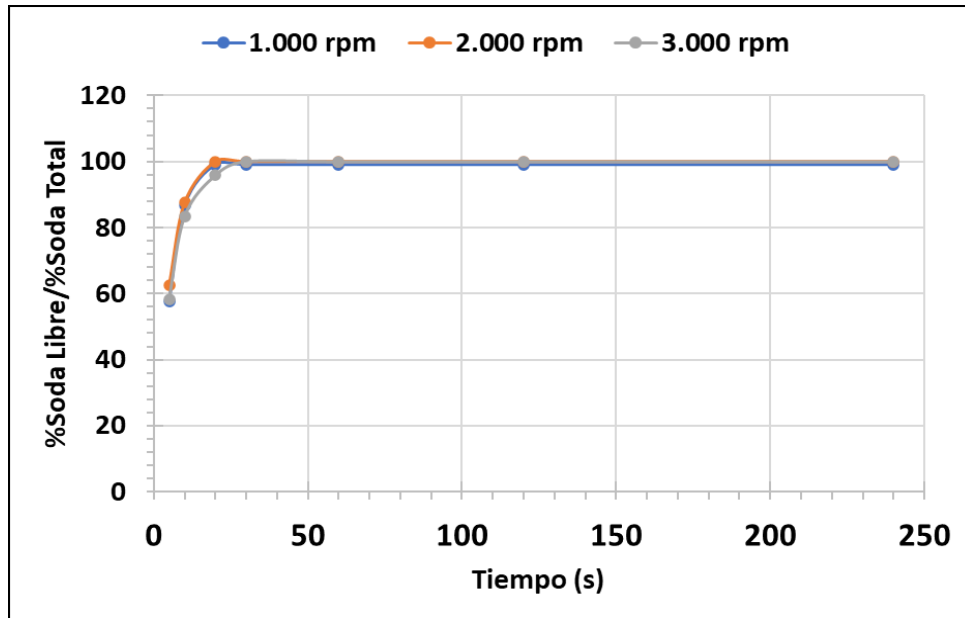


Figura 4.

Estabilidad de la emulsión en el laboratorio especializado (60% JetA1, 5 min de mezcla).

**Figura 5.**

Estabilidad de la emulsión en el laboratorio especializado (75% JetA1, 5 min de mezcla).



Los resultados del laboratorio especializado arrojaron que a mayor cantidad de JetA1 se produce un menor tiempo de estabilidad de la emulsion, siendo la relación de 45% JetA1 y 55% Soda la de mayor estabilidad con un tiempo de decantación promedio de 120 segundos. Por consiguiente se puede inferir que en el conjunto de la mezcla no se observan emulsiones rigidamente estables; estos fenómenos son característicos en mezclas donde el agente emulsificante se encuentra en baja concentración o se encuentra cercano a la concentración miscelar crítica, que es la concentración mínima a la que se debe encontrar un surfactante para que sea capaz de emulsionar una gota de la fase dispersa. Por lo anterior, no fue posible determinar las características de la emulsión tales como el potencial Z, tamaño de gota, el tipo de emulsión y otras; ya que la mezcla no se comportó como una emulsión físicamente estable, de manera que, no permitió realizar los montajes para determinar las características arriba mencionadas.

4.3 Resultados de la aplicación de rompedores de emulsión en la solución SODA/JETA1 del drum D-4601

Las muestras de la solución fueron tomadas directamente del drum D-4601 en donde se aloja esta emulsión. Se tomaron dos muestras por parte de operaciones de Ecopetrol, cada una de 500ml para un total de 1 litro. La emulsión era bastante inestable por lo cual su separación se daba de forma relativamente rápida y conseguir una muestra homogénea era bastante complejo, por más que se sometía a alta agitación por un periodo prolongado de tiempo y aumento de temperatura no se conseguía volver a estabilizar y la capa soda/jet se observaba de manera clara tal como se observa en la

Figura 6.

Con el fin de evaluar la efectividad de los rompedores de emulsión, se realizaría un test de botella en donde principalmente se analizaría el pH, el hidrocarburo y los sólidos suspendidos en antes y después de la aplicación.

Figura 6.

Muestras de la emulsión del Drum 4601, desestabilizadas



El pH se midió con un medidor previamente calibrado, el contenido de hidrocarburo y los sólidos suspendidos se iban a realizar por medio de un espectrofotómetro. Las muestras tomadas para realizar los análisis después de la dosificación de los productos iban a ser tomadas con pipeta por debajo del 70% de las botellas aforadas. Desafortunadamente la muestra nunca se pudo homogeneizar para poder tener muestras representativas y los pH eran demasiado altos, cercanos al 14 (Ver *Figura 7*) por lo que desde un principio se suponía que los productos no iban a trabajar de forma adecuada en estas condiciones.

Figura 7.

Medición del pH en la emulsión



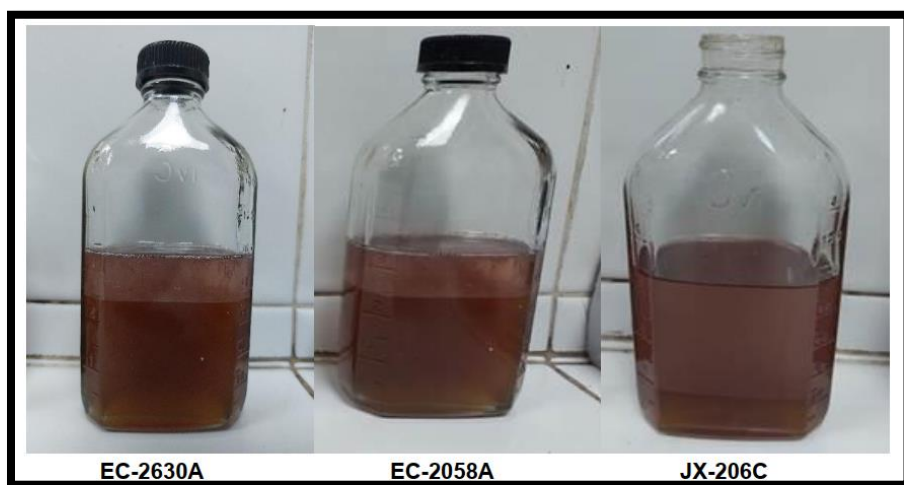
A pesar de conocer que con este pH los productos no iban a resolver la emulsión de manera adecuada pues se iban a descomponer y que la emulsión no era estable, se realizaron los test de botella de la siguiente manera. Se hicieron pruebas con 3 rompedores de emulsión EC-2630A, EC-2058A y JX-206C que son los tres rompedores usados en la refinería. Los primeros dos a base de agua y el último base hidrocarburo. Aplicando dosis de 2ppm a cada una de las botellas se encontró que ninguno trabajó de forma adecuada, debido a que el alto pH degradaba los rompedores y los convertía en grumos (ver *Figura 8*). Además, como la emulsión no era homogénea, obtener muestras con la misma cantidad agua hidrocarburo fue complejo. La idea del test de botella era primero encontrar el rompedor con el mejor desempeño a una dosis de 2 ppm y posteriormente probar el de mejor desempeño a diferentes dosificaciones para poder encontrar la concentración

óptima. Desafortunadamente no pudo continuar con el ensayo pues no se tenían las condiciones adecuadas para la prueba.

Teniendo en cuenta los resultados y observaciones anteriormente expuestas y debido a las condiciones químicas de la muestra, no se recomienda usar rompedores de emulsión en este tipo de soluciones considerando su fácil precipitación por gravedad y su alto pH.

Figura 8.

Resultados de los agentes rompedores de emulsión



4.4 Resultados de la determinación de la fase continua y fase dispersa de la emulsión

Usando la correlación de *Selker* y *Sleicher* (Rousseau, 1987) se procede a hacer el cálculo de X para la determinación de la fase dispersa, donde Q está en unidades de flujo, viscosidad en unidades de lb/ft^3 y viscosidad en Cp.

$$X = \frac{Q_L}{Q_H} * \left(\frac{\rho_L * \mu_L}{\rho_H * \mu_L} \right)^{0,3} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde, el subíndice L y H hacen referencia a la fase liviana y la fase pesada respectivamente, Q representa el Volumen, ρ hace referencia a la densidad y μ a la viscosidad. Con la correlación anterior se estimó X (factor de fase dispersa) con diferentes relaciones de fases (ver Tabla 9) y fue comparado con los criterios establecidos por *Selker* y *Sleicher* (ver **Tabla 10**)

Tabla 9.

Cálculo del X factor para la determinación de la fase dispersa

% Vol. De fase liviana (Orgánica)	81	78	60	55	50	45	40	35
% Vol. De la fase pesada (Soda)	19	22	40	45	50	55	60	65
X (factor de fase dispersa)	3,75	3,12	1,32	1,08	0,88	0,72	0,59	0,47

Tabla 10.

Resultados de fase en función del X factor

X	Resultado
< 0,3	Fase liviana siempre dispersa
0,3 – 0,5	Fase liviana probablemente dispersa
0,5 – 2,0	Posible inversión de fase, Diseño para el peor caso
2,0 – 3,3	Fase pesada probablemente dispersa
> 3,3	Fase pesada siempre dispersa

Nota: Tomado de: (Rousseau, 1987).

Como se puede observar en la tabla anterior, y con base en lo establecido arriba por Selker y Sleicher, a medida que la relación o porcentaje de las fases se hace similar (cerca del 50/50) se corre el riesgo de obtener una emulsión con inversión de fase, lo cual afecta el proceso de separación, ya que la fase orgánica se convierte en la fase dispersa y la coalescencia de sus gotas (ascenso) entre la fase acuosa (fase continua) se hace más difícil por su viscosidad y tensión superficial. Debido a lo anterior, la relación de carga mayormente usada por los operadores es de 15 a 17 (Jet/soda) en el tambor D-4601 para obtener una emulsión no tan estable o difícil de separar, esta relación está sujeta a los resultados de la acidez del producto final, la cual debe ser inferior a 0,1.

4.5 Selección del método más conveniente para la separación de la emulsión

Con base en la información recolectada en la caracterización fisicoquímica de la emulsión, en los estudios de estabilización y de agentes desemulsificantes una breve consulta con la división de ingeniería de la refinería, se realizó el análisis de las alternativas para la separación de la emulsión por medio de la matriz de decisión planteada en la metodología, los resultados de la evaluación de estas estrategias de separación son mostradas en la tabla 11

Tabla 11.

Matriz de evaluación de alternativas de separación de la emulsión

ALTERNATIVA	COSTO	COMPLEJIDAD	FUNCIONALIDAD	SCORE
Método mecánico	10	10	5	25
Método químico	5	5	0	10
Método electrostático	3	3	5	11

Método térmico	10	5	5	20
Método de membranas	3	3	5	11
Método biológico	3	3	5	11

Se puede concluir que el método más conveniente para separar las fases de la emulsión es usar la gravedad y el reposo, ya que permite para lograr la separación y posterior recuperación de sus componentes con bajo costo, poca complejidad y buena funcionalidad. Es importante resaltar que, debido a la baja estabilidad de la emulsión y rápida separación de la misma bajo la gravedad y el reposo, entonces no se hizo necesario seguir con el estudio de las alternativas más complejas, pero aun así se puntuaron con la funcionalidad en 5.

4.5.1 Diferencia de densidades entre las fases a separar

Típicamente para separadores por gravedad, se recomienda que la diferencia entre las densidades de los componentes sea mayor a 0,1 g/cc. Dado que la densidad de la solución cáustica es 1,037 g/cc y la densidad del JetA1 es 0,784 g/cc, la diferencia entre estas fases es de 0,253, lo cual está muy por encima del valor recomendado, validando así el método de separación por gravedad sobre este aspecto.

4.5.2 Tipo de Separación

Un proceso de separación líquido-líquido entre fluidos inmiscibles puede ser continuo o discontinuo, en donde el diseño de cada uno tiene consideraciones muy diferentes, como lo es el régimen de flujo o número de Reynolds que se imponga dentro del decantador. Dado que la

remoción de la emulsión del tambor D-4601 se realiza en forma discontinua, es recomendable que el separador a utilizar opere de la misma forma. Dado que la remoción de la emulsión del tambor D-4601 se realiza en forma discontinua, es recomendable que el separador a utilizar se opere de la misma forma. Para procesos de separación discontinuo, las situaciones de turbulencia son evitadas y el diseño se debe basar principalmente en el tiempo de residencia o separación observado durante los ensayos de separación “*bacth*” aplicados. Teniendo en cuenta que las gotas viajaran desde el punto más lejano hasta la interfase que se forma entre las fases separadas, se debe considerar la utilización baffles internos de distribución y aplicar bajas velocidades en la tubería de alimentación ($< 2,0$ pies/seg). Además, se debe establecer un volumen mínimo de separación con relación al tiempo de residencia de 3 veces (Rousseau, 1987).

4.5.3 Volumen de separación y Tiempo de Residencia

Como se mencionó anteriormente, el tiempo de residencia medido durante los ensayos de separación de muestras tuvo una variación alta, entre 15 a 46 minutos, lo cual se puede deber a que existe una dinámica bastante variable en la relación de fases y en el tamaño de gota que se forma cuando la mezcla pasa por la bomba SP-4601A/B. Por lo tanto, el tiempo de residencia mínimo a considerar deberá ser de 46 minutos y el volumen para la separación deberá ser equivalente a hasta 3 veces el tiempo de residencia (regla básica para separadores discontinuos). Como resultado de esta selección, se continúa con los estudios del Drum 4603 como tambor para la separación y posterior recuperación de la fase de valor. Donde se permitirá el suficiente tiempo de reposo para la separación y luego, el JetA1 recuperado retornaría al proceso y la soda iría al sistema de sodas gastadas, disminuyendo así las pérdidas y la contaminación ambiental.

4.6 Estudio de viabilidad técnica del Drum D.4603

En la unidad 4600 se encuentra el Drum 4603, el cual inicialmente fue instalado en 1999 para el tratamiento de kerosene. Debido a cambios de producción y disminución del mercado se dejó de producir para maximizar el Diesel y el Jet-A1 en las unidades de destilación atmosférica, por consiguiente, el equipo se encuentra fuera de línea de producción. Por esta razón se considera la utilización de este equipo para la separación de la emulsión.

4.6.1 Cálculos volumétricos para la operación del D-4603.

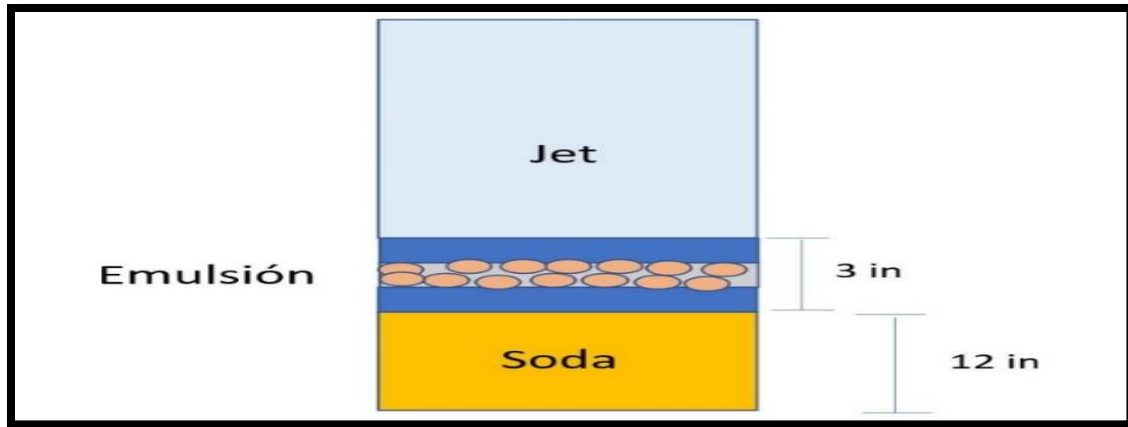
Para el cálculo del volumen de emulsión a tratar, se consideraron los manuales de operación de la planta dados por *Merichem* en donde se especifican las condiciones normales de operación.

En la

Figura 9 se muestra las fases a los niveles normales de operación.

Figura 9.

Diagrama de fases presentes en el D-4601 en condiciones normales de operación



Para el cálculo del volumen total de la emulsión, se debe tener en cuenta que el tanque se encuentra reposando de manera horizontal, por lo tanto, no se puede calcular el volumen de forma convencional y es necesario usar la integración múltiple. Para calcular dicho volumen se dividió el tanque en dos secciones, la primera es la sección central la cual tiene forma de cilindro y la segunda corresponde a los CAPs. En la primera sección se usaron las medidas en milímetros con la ecuación de un círculo en plano cartesiano con el punto de origen en la parte inferior (ver (Ec. 3)), en el caso de los CAPs, se usó una función de regresión logarítmica con el fin modelar la curvatura y la ecuación del círculo de la sección anterior con un desplazamiento en el origen en $x=1$ y $y=10$, para poder usar la función logaritmo (ver (Ec. 4)).

$$VES_1 = \int_{304,8}^{342,9} 7924 * \sqrt{1524^2 - (y - 1524)^2} dy \quad (\text{Ec. 3})$$

$$VES_2 = 2 * \int_{304,8}^{342,9} \int_1^{172,52 \ln(y) - 448,15} 2 * \int_0^{\sqrt{1524^2 - (y-1514)^2}} dz dx dy \quad (\text{Ec. 4})$$

Usando las anteriores ecuaciones, y teniendo en cuenta la cantidad de veces al día que los operadores drenan la emulsión (4 veces por día) y el porcentaje promedio de JetA1 presente en la emulsión, se determinó el volumen de JetA1 desechado y cuánto dinero representa (ver *Tabla 12*).

Tabla 12.

Cálculo económico de la cantidad de JetA1 contenido en la emulsión

Descripción	Unidad	cantidad
Volumen diario de emulsión	[Barriles]	16,27
Volumen Anual de emulsión	[Barriles]	5.937,8
Volumen neto de JetA1 anual en la emulsión 55%	[Barriles]	3.265,8
Valor del JetA1 a recuperar (170 USD/Barril)	[USD]	555.181,3
Valor del JetA1 a recuperar	[COP]	2.331.761.520,3

4.6.2 Tamaño de Gota y Velocidad de Descenso

Considerando los tiempos de separación medidos en los ensayos, se estimó el tamaño de gota esperado en cada situación para validar el volumen de separación. Para la velocidad de descenso de la gota se utilizó la ecuación de la ley de Stokes (Rousseau, 1987):

$$U_t = \frac{gd^2(\rho_D - \rho_C)}{18\mu_C} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde d es el tamaño de gota, g la aceleración de la gravedad ρ_D y ρ_C son las densidades de la fase continua y dispersa respectivamente, y μ_C es la viscosidad de la fase continua. Con la velocidad y tamaño de gota (entre 20 y 300 micras, típico recomendado) y teniendo en cuenta que

el diámetro del separador propuesto a utilizar (D-4603) es de 6 pies (ver Apéndice E), se propone que la interfase se controle máximo en 2 pies, se estimó el tiempo de residencia con la ecuación básica para separadores discontinuos (ver (Ec. 6) donde Θ es el tiempo de separación, H es la distancia desde el punto más lejano a la interfase y U_t la velocidad de descenso de gota.

$$\theta = \frac{H}{U_t} \quad (\text{Ec. 6})$$

Teniendo en cuenta todo lo mencionado anteriormente se realizó el cálculo de diferentes escenarios para determinar el tamaño de gota. Los cálculos son mostrados en la tabla 13.

Tabla 13.

Cálculos velocidad de partícula y tiempo de residencia.

Gravedad	[Cm/seg ²]	981,0						
Altura máx. a recorrer	[ft]	2,0						
	[cm]	61,0						
Tamaño de gota	[micras]	20	50	80	100	150	200	300
	[cm]	0,002	0,005	0,008	0,010	0,015	0,020	0,030
U_t (Vel. de partícula)	[cm/seg]	0,005	0,031	0,078	0,123	0,276	0,490	1,103
Tiempo de residencia	[seg]	12433	1989	777	497	221	124	55
	[min]	207,2	33,2	13,0	8,3	3,7	2,1	0,9

Lo anterior, muestra que, con los tiempos medidos en los ensayos realizados, se estima que el tamaño de gota estuvo entre 50 y 80 micras, lo cual es un valor muy bajo, y confirma una parte de la razón de formación del “rag layer” o capa de emulsión en el tambor D4601, ya que

típicamente este tipo de separadores están diseñados para tamaños de gotas de mínimo 150 micras y tamaño promedio de hasta 300 micras. Este análisis revalida la necesidad de establecer un volumen de residencia mayor a 3 veces el tiempo de residencia medido en los ensayos. Con todo lo anterior, se procedió a estimar el volumen mínimo requerido para la separación de las fases (ver

Tabla 14).

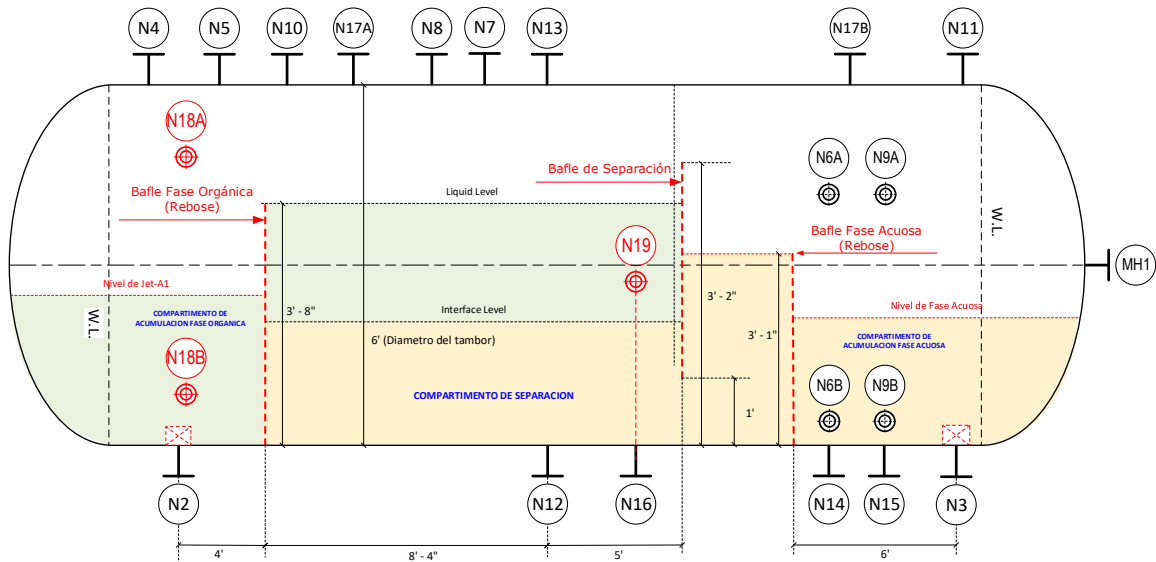
Tabla 14.*Cálculo de volumen de separación en el D-4603.*

Volumen removido por turno	8,2	barriles
Tiempo de remoción mínimo	1,0	horas
Flujo de remoción	8,170	barriles/hora
	0,136	barriles/min
Tiempo de residencia mínimo	46,0	minutos
Volumen Min. de separación	15,7	barriles

4.6.3 Propuesta de modificaciones de diseño para el D-4603

Para cumplir con el volumen mínimo, se proponen las siguientes modificaciones en el tambor D-4603 mostradas en la figura 10, en la cual con color rojo se muestran las modificaciones o adiciones al equipo. Este diseño se basó en el plano mecánico original del equipo el cual se encuentra en el Apéndice E.

En el diseño propuesto, el compartimento de separación, tiene un volumen aproximado de 98 pies cúbicos que equivalente 17,64 barriles, valor que cumple con el volumen mínimo de separación estimado arriba (15,7 barriles) y la alimentación de la emulsión se realizará por la boquilla N12, ubicada en la parte baja del separador, lo cual ayudará con el proceso de coalescencia de las gotas de fase acuosa.

Figura 10.*Modificaciones de diseño propuestas para el D-4603*

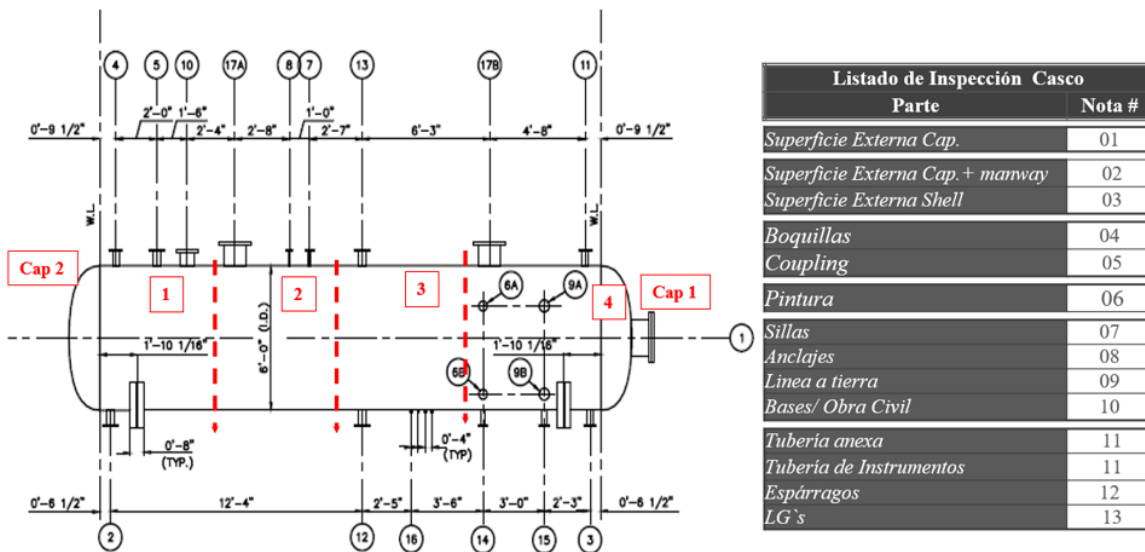
Este diseño considera la operación de un separador discontinuo, por lo que se hace necesario la instalación de baffles de rebose y compartimentos de acumulación para cada fase y un baffle de separación de las dos fases. También se requiere la reutilización de boquillas actuales e instalación de boquillas nuevas para monitorear la interfase y el nivel de cada fase separada, así como la instalación de rompe-vortex en cada compartimento para no afectar la operación de las bombas que se utilicen para retirar las fases separadas. Por otro lado, debido al tiempo que se ha encontrado fuera de uso, se hace imperativo una validación del estado mecánico del equipo con una inspección detallada de las condiciones del activo, para determinar si se encuentra apto para su uso sin poner en riesgo la integridad de los procesos asociados.

4.6.4 Inspección mecánica y de integridad del Drum 4603

Teniendo en cuenta la normativa de inspección de integridad para recipientes mencionada en la metodología, se realizaron las pruebas al Drum-4601 por medio de profesionales en el campo. En la figura 11 se muestran las subdivisiones y partes establecidas para la verificación detallada de las superficies y accesorios de la vasija.

Figura 11.

Diagrama de puntos de inspección del D4603.



Las notas resultantes de la inspección primaria de cada una de las secciones mostradas en la figura anterior se enlistan en la tabla 15.

Tabla 15.*Listado de observaciones inspección primaria del D-4603*

N° Nota	Observación
01	Superficie se observó sin daños por corrosión o mecánicos, forma y contornos de fabricación.
02	Cap. no se observó deformaciones ni corrosión severa.
03	Externamente en buenas condiciones no se evidenció afectaciones mecánicas ni, por corrosión severa, zonas puntuales con oxidación leve.
04	Las boquillas se observaron en buenas condiciones externas, se observó corrosión en las bridas y tornillería, no se encontró evidencia de fugas por las uniones, sin embargo, se aprecia en los empaques alto grado de corrosión en la parte visible, como resaltante se tiene que las bridas instaladas en su mayoría son Slip on (SO) y LWN no coincidente con el plano.
05	Los coupling existentes directamente en el casco se observaron externamente sin daños, y los mismos están unidos con soldadura a la tubería anexa. Se observó accesorios que se conectan a las boquillas 17A y 17B coupling con tuberías roscadas sin embargo no se observó corrosión severa ni fugas.
06	El equipo, boquillas y bases recubierto con pintura, la misma se observó degradada, permitiendo corrosión localizada del metal base.
07	Las sillas se observaron en posición sin evidencia de deformación, se observó corrosión localizada leve.
08	Los anclajes se observaron instalados y ajustados, se evidenciaron afectaciones por corrosión leve.
09	Se observaron sin daños sujetas a la silla del recipiente.
10	Daños en el grauting de nivel hacia el norte, el resto sin daños
11	No se observó afectaciones por corrosión severa, solo se observó oxidación el tramo que llega al recipiente.
12	Oxidación leve no se observa faltantes.
13	Externamente sin daños los cristales sucios no se aprecia su estado, las válvulas externamente en buenas condiciones.

Adicionalmente, se realizó una inspección de los espesores de la lámina del casco, de la vasija y los CAPs los cuales tienen en el diseño un espesor nominal de 0,540” y 0,580” respectivamente. Para ello, cada una de las secciones del casco visualizadas. En la figura 11 se subdividió verticalmente en 4 partes y los CAPs se subdividieron en 5 partes. Los resultados son mostrados en la tabla 16 y para el caso de los CAPs, en la *tabla 17*

Tabla 16.

Espesores Lámina Casco (milésimas de pulgadas)

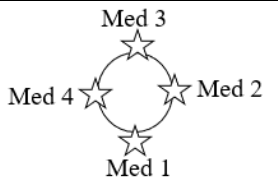
Sección Vertical	Punto A	Punto B	Punto C	Punto D	Diagrama de medida
1.1	545	564	573	564	
1.2	546	566	550	563	
1.3	540	560	567	564	
1.4	544	566	565	560	
2.1	576	557	575	569	
2.2	580	550	549	542	
2.3	584	543	548	545	
2.4	557	540	548	545	
3.1	532	570	531	541	
3.2	536	569	555	543	
3.3	533	545	530	545	
3.4	538	547	532	558	
4.1	542	539	535	539	
4.2	543	537	533	540	
4.3	535	535	531	544	
4.4	538	537	533	540	

Tabla 17.*Espesores Lámina de los CAPs (milésima de pulgadas)*

	# Medida	Punto A	Punto B	Punto C	Punto D	Punto E	Diagrama de medida
CAP 1	1	591	591	578	573	NA	
	2	591	564	575	573	NA	
	3	598	593	576	561	NA	
	4	583	563	570	563	NA	
CAP 2	1	630	576	578	574	613	
	2	624	581	580	577	614	
	3	633	581	579	597	612	
	4	622	580	579	583	617	

Por último, se realizó la inspección de las boquillas que se encuentran en el Drum 4603, a cada una de ellas se le realizaron 4 medidas por cuadruplicado con el mismo diagrama de medición que se muestra en la tabla 16.

Los resultados de esta inspección se relacionan en la *Tabla 18*.

Tabla 18.*Espesores Lámina de las Boquillas del Drum 4603 (milésima de pulgadas).*

Información de Boquillas						Espesores Medidos			
<i>No.</i>	<i>Servicio</i>	\emptyset	<i>Schedule</i>	<i>Espesor nominal</i>	<i>Tipo Brida</i>	<i>Med. 1</i>	<i>Med. 2</i>	<i>Med. 3</i>	<i>Med. 4</i>
1	MH	18"	40	0,562	SO 150	491	489	482	485

LB

Información de Boquillas					Espesores Medidos				
2	Drenaje	4"	120	0,438	LWN	765	768	762	762
					150LB				
3	Succión	3"	160	0,438	LWN	640	611	629	629
					150LB				
4	Entrada	3"	160	0,438	LWN	623	627	630	652
					150LB				
5	---	4"	120	0,438	LWN	771	747	767	748
					150LB				
6A	---	1,5"	XXS	0,400	SO	182	166	183	188
					150LB				
6B	---	1,5"	XXS	0,400	SO	184	174	162	170
					150LB				
7	---	1,5"	XXS	0,400	LWN	606	599	606	609
					150LB				
8	SIN	ACCESO	---	---	---	---	---	---	---
9A	---	2"	160	0,344	LWN	660	663	652	668
					150LB				
9B	---	2"	160	0,344	SO	288	319	281	295
					150LB				
10	---	8"	XXS	0,500	SO	457	433	506	478
					150LB				
11	---	3"	160		LWN	587	593	629	639
					150LB				
12	---	4"	120	0,438	SO	386	361	376	387
13	---	4"	120	0,438	SO 150	404	401	406	396
14	---	1,5"	XXS	0,400	SO	252	253	249	252
15	---	2"	160	0,344	SO	327	333	328	332

Información de Boquillas					Espesores Medidos				
16A	---	¾"	XS	0,154	NA	163	145	147	154
16B	---	¾"	XS	0,154	NA	154	153	152	151
16C	---	¾"	XS	0,154	NA	158	149	158	154
16D	---	¾"	XS	0,154	NA	162	143	155	150
17A	---	12"	60	0,562	SO	382	352	374	317
					150LB				
17B	---	12"	60	0,562	SO	349	381	302	350
					150LB				

En general, después de la inspección mecánica y de integridad realizada al D-4603 se puede determinar que no se halló un deterioro significativo a pesar de tantos años de estar fuera de servicio. Además, se pudo evidenciar que los grosores de las láminas que lo conforman se encuentran muy cercanos a los diámetros de diseño lo cual manifiesta que no ha presentado problemas serios de corrosión. Por último, se puede deducir que el tanque presenta una gran viabilidad para el uso como recipiente de acumulación y separación de la emulsión generada en el tratamiento de JetA1 siempre y cuando se le realicen las modificaciones de diseño propuestas en el numeral **4.6.4 Inspección mecánica y de integridad del Drum 4603**

5. Conclusiones

Con la caracterización fisicoquímica realizada *in-situ*, y en el laboratorio especializado, se logró determinar que la emulsión no es rígidamente estable, ya que los tiempos de separación en la caracterización simulada no pasaron de 2 minutos y en el caso de las pruebas de campo se observó un tiempo de separación promedio de 22 minutos. Esta diferencia de tiempos se debe a que en las pruebas simuladas no se pueden replicar las condiciones exactas de operación en planta.

En la industria petroquímica encontramos muchos métodos de separación de emulsiones que fueron considerados como alternativas en este proyecto, sin embargo, con los resultados de la caracterización de la emulsión se determinó que la separación por el método de gravedad era el método más conveniente a escoger, debido a los tiempos máximos de separación, costo de implementación, simplicidad del proceso y características de la emulsión.

Los estudios de confiabilidad e integridad mecánica del Drum D-4603, demostraron que la vasija se encuentra en condiciones óptimas para ser usada en la operación. Por otro lado, comparando la capacidad volumétrica de la vasija con el volumen de emulsión generados en la planta, se determinó que el D4603 necesita modificaciones internas tales como baffles separadores que permitan la eficiente separación y recuperación de las fases.

Con la implementación del sistema de separación de la emulsión con el método de gravedad y usando el D4603, se logra separar y recuperar las fases acuosa y orgánica de la emulsión generada en el lavado del JetA1. En adición, se calculó que con la reintegración al proceso del JetA1 presente en la emulsión se puede lograr un beneficio económico aproximado en 500 mil dólares al año y a su vez disminuir el impacto ambiental por drenajes de hidrocarburos a la planta de tratamiento de aguas residuales.

6. Recomendaciones

En el caso de la implementación del sistema de acumulación y recuperación de las fases de la emulsión objeto de estudio en este proyecto, se debe tener en cuenta las consideraciones hidráulicas pertinente para el adecuado de drenaje de la emulsión del D-4601 hacia el D-4603, con el fin de controlar la velocidad de flujo y disminuir el régimen turbulento a la entrada del taque.

Es importante resaltar, que, con la implementación de la configuración recomendada por este proyecto, se debe analizar detalladamente los factores de calidad e impacto ambiental asociados al JetA1 y la soda recuperada, para así poder decidir adecuadamente el destino de estos subproductos y su posterior aprovechamiento.

Referencias Bibliográficas

Ahmed Abdulrazzaq Hadi a, A. A. (2022). A review of petroleum emulsification types, formation factors, and demulsification methods. *MaterialsToday*, 2-7.

Ahmed B. Laben, H. H.-k. (7 de Septiembre de 2021). Experimental study on the performance of emulsions produced during ASP flooding. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*.

Institute, A. P. (2006). *Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteratio*. American Petroleum Institute.

Ken Arnold, M. S. (1999). *Surface Production Operations, Design of Oil-Handling Systems and Facilities*. Woburn MA: Butterworth-Heinemann.

Maurice Stewart, K. A. (2008). *Emulsions and Oil Treating Equipment, Selection, Sizing and troubleshooting*. Oxford, UK: Elsevier Inc.

Mohammed Kamil, N. H. (2019). An Overview of Recent Advances in State-of-the-Art Techniques in the Demulsification of Crude Oil Emulsions. *Processes MDPI*, 14-16.

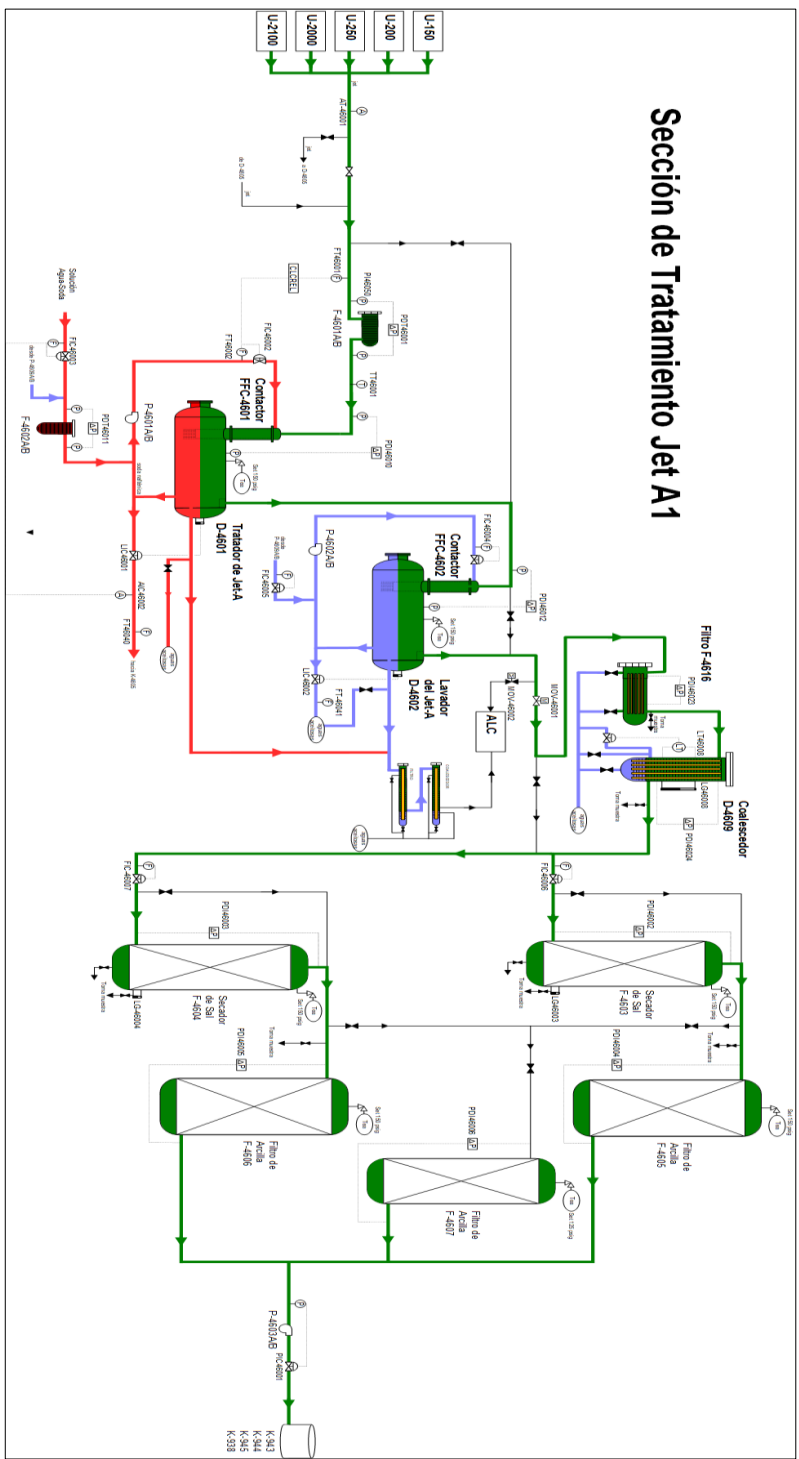
Murray R. Spiegel, J. J. (2006). *Teoría y Problemas de Probabilidad y Estadística*. McGraw-Hill Interamericana.

Rousseau, R. W. (1987). *Handbook of Separation Process Technology*. Wiley-Interscience.

Sunil Kokal, S. S. (2005). Crude-Oil Emulsions: A State-Of-The-Art Review. 10-11.
Testing, A. S. (2020). SNT-TC-1A.

APÉNDICES

Apéndice A. Diagrama de proceso, Sección de lavado de JETA1



Apéndice B. Paquetes termodinámicos recomendados en función del tipo de proceso

Tipo de Proceso	Paquete Termodinámico recomendado
Deshidratación de TEG	PR
Acuoso ácido	Sour PR
Procesamiento de gas criogénico	PR, PRSV
Separación de aire	PR, PRSV
Torres atmosféricas de crudo	PR y sus variantes, Grayson Streed (GS)
Torres a vacío	PR y sus variantes, GS, Braun K10, Esso
Torres de etileno	Lee Kesler Plocker
Sistemas con alto contenido de H₂	PR, Zudkevitch-Joffee (ZJ), GS
Reservorios	PR y sus variantes
Sistemas de vapor	ASME Steam, Chao Seader, GS
Inhibición de hidratos	PR
Productos químicos	Modelos de actividad, PRSV
Alquilación de HF	PRSV, NRTL
Hidrocarburos-agua (alta solubilidad del agua en HC)	Kabadi Danner
Separaciones de hidrocarburos	PR, SRK
Aromáticos	Wilson, NRTL, UNIQUAC
Hidrocarburos sustituidos (cloruro de vinilo, acrilonitrilo)	PR, SRK
Producción de éter (MTBE, ETBE, ter-amil metil eter TAME)	Wilson, NRTL, UNIQUAC
Plantas de etilbenceno / estireno	PR, SRK o Wilson, NRTL, UNIQUAC (según la tecnología de producción)
Producción de ácido tereftálico	Wilson, NRTL, UNIQUAC
Planta de amoníaco	PR, SRK

Nota: Honeywell/Aspentech.

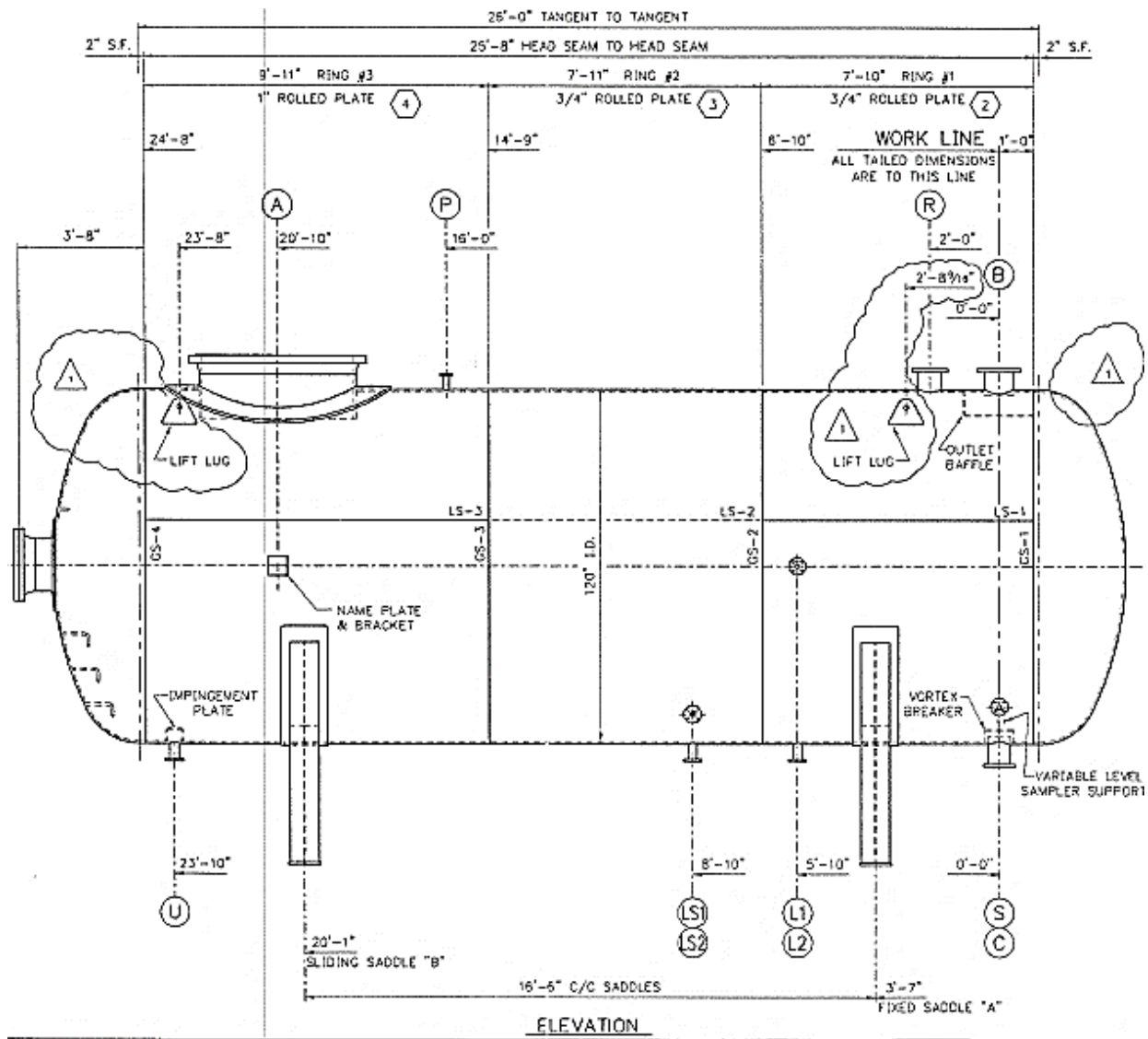
Apéndice C. Gravedad específica- Concentración para soluciones de Soda Cáustica a 60°F

% NaOH	% Na ₂ O	Específico Gravedad 60/60°F	Baume Am. Std.	Grado Twaddell 60°F	NaOH lb/gal	Peso Total Solución ⁽¹⁾ lb/gal	NaOH lb/IG ⁽²⁾	Peso total Solución ⁽²⁾ lb/IG ⁽³⁾	Peso Total NaOH g/litro	Peso Total Solución ⁽²⁾ g/litro	NaOH lb/p ³	Peso Total Solución ⁽¹⁾ lb/p ³
1	0.78	1.012	1.72	2.4	0.08	8.44	0.10	10.14	10.11	1011.36	0.63	63.14
2	1.55	1.023	3.26	4.6	0.17	8.53	0.20	10.24	20.44	1022.14	1.28	63.81
3	2.32	1.034	4.77	6.8	0.26	8.62	0.31	10.35	30.99	1032.93	1.93	64.49
4	3.10	1.045	6.25	9.0	0.35	8.72	0.42	10.47	41.77	1044.91	2.61	65.23
5	3.87	1.056	7.69	11.2	0.44	8.81	0.48	10.57	52.77	1055.69	3.29	65.91
6	4.65	1.067	9.10	13.4	0.53	8.90	0.64	10.69	63.99	1066.48	3.99	66.58
7	5.42	1.079	10.65	15.8	0.63	9.00	0.76	10.80	75.44	1078.46	4.71	67.33
8	6.20	1.090	11.97	18.0	0.73	9.09	0.88	10.92	87.10	1089.25	5.44	68.00
9	6.98	1.101	13.30	20.2	0.83	9.18	1.00	11.02	98.99	1100.03	6.18	68.68
10	7.75	1.112	14.40	22.4	0.93	9.27	1.12	11.13	111.1	1110.81	6.94	69.35
11	8.52	1.123	15.88	24.6	1.03	9.36	1.23	11.24	123.5	1121.60	7.70	70.02
12	9.30	1.134	17.13	26.8	1.13	9.46	1.36	11.36	135.9	1133.58	8.49	70.77
13	10.08	1.145	18.36	29.0	1.24	9.55	1.49	11.47	148.9	1144.37	9.30	71.44
14	10.85	1.156	19.57	31.2	1.34	9.64	1.62	11.58	161.7	1155.15	10.10	72.12
15	11.62	1.167	20.75	33.4	1.46	9.73	1.75	11.68	175.0	1165.94	10.92	72.79
16	12.40	1.178	21.91	35.6	1.57	9.82	1.89	11.80	188.4	1176.72	11.76	73.46
17	13.17	1.190	23.15	38.0	1.69	9.92	2.03	11.91	202.1	1188.70	12.61	74.21
18	13.95	1.201	24.27	40.2	1.80	10.02	2.16	12.03	215.9	1200.69	13.47	74.96
19	14.73	1.212	25.36	42.4	1.91	10.11	2.30	12.14	229.1	1211.47	14.31	75.63
20	15.50	1.223	26.45	44.6	2.04	10.20	2.45	12.25	244.3	1222.26	15.26	76.31
21	16.28	1.234	27.50	46.8	2.16	10.29	2.59	12.36	258.9	1233.04	16.15	76.98
22	17.05	1.245	28.53	49.0	2.28	10.38	2.74	12.47	273.6	1243.83	17.08	77.65
23	17.83	1.256	29.55	51.2	2.41	10.48	2.90	12.59	288.6	1255.81	18.01	78.40
24	18.60	1.267	30.56	53.4	2.53	10.57	3.04	12.70	303.7	1266.59	18.96	79.07
25	19.38	1.278	31.57	55.6	2.66	10.66	3.20	12.80	319.2	1277.38	19.93	79.75
26	20.15	1.289	32.51	57.8	2.79	10.75	3.35	12.91	334.8	1288.16	20.90	80.42
27	20.92	1.300	33.46	60.0	2.93	10.85	3.52	13.03	350.7	1300.14	21.88	81.17
28	21.70	1.310	34.31	62.0	3.06	10.93	3.67	13.13	366.6	1309.76	22.89	81.77
29	22.48	1.321	35.23	64.2	3.19	11.02	3.83	13.23	382.8	1320.52	23.90	82.44
30	23.25	1.332	36.14	66.4	3.33	11.11	4.00	13.34	399.2	1331.30	24.92	83.11
31	24.02	1.343	37.03	68.6	3.47	11.20	4.17	13.46	416.0	1342.08	25.97	83.79
32	24.80	1.353	37.83	70.6	3.61	11.29	4.34	13.56	432.6	1352.87	27.00	84.46
33	25.58	1.363	38.62	72.6	3.75	11.37	4.50	13.65	449.7	1362.46	28.08	85.06
34	26.35	1.374	39.47	74.8	3.89	11.46	4.67	13.76	466.7	1373.24	29.13	85.73
35	27.12	1.384	40.23	76.8	4.04	11.54	4.85	13.86	484.4	1382.83	30.23	86.33
36	27.90	1.394	40.98	78.8	4.20	11.62	5.04	13.95	501.5	1392.41	31.30	86.93
37	28.68	1.404	41.72	80.8	4.33	11.71	5.20	14.06	519.4	1403.20	32.41	87.60
38	29.45	1.415	42.53	83.0	4.48	11.80	5.38	14.17	537.1	1413.98	33.52	88.28
39	30.22	1.425	43.24	85.0	4.63	11.88	5.56	14.27	553.3	1423.57	34.66	88.88
40	31.00	1.434	43.88	86.8	4.78	11.96	5.74	14.36	573.3	1433.15	35.79	89.47
41	31.78	1.444	44.58	88.8	4.93	12.04	5.92	14.46	591.6	1442.74	36.92	90.07
42	32.55	1.454	45.28	90.8	5.09	12.12	6.11	14.55	610.2	1452.33	38.10	90.67
43	33.32	1.463	45.89	92.6	5.25	12.20	6.30	14.66	629.5	1461.91	39.29	91.27
44	34.10	1.473	46.56	94.6	5.40	12.28	6.48	14.75	647.6	1471.50	40.41	92.87
45	34.88	1.483	47.22	96.6	5.54	12.37	6.65	14.86	667.8	1482.28	41.68	92.54
46	35.65	1.492	47.82	98.4	5.72	12.45	6.87	14.96	685.9	1491.87	42.80	93.14
47	36.42	1.502	48.46	100.4	5.89	12.53	7.07	15.05	705.9	1501.46	44.05	93.74
48	37.20	1.511	49.04	102.2	6.05	12.60	7.27	15.13	724.8	1509.85	45.27	94.26
49	37.98	1.521	49.67	104.2	6.22	12.68	7.47	15.23	744.8	1519.43	46.50	94.86
50	38.75	1.530	50.23	106.0	6.38	12.76	7.66	15.32	764.5	1529.02	47.73	95.46
51	39.52	1.540	50.84	106.0	6.55	12.84	7.87	15.42	784.3	1536.60	48.98	96.06
52	40.30	1.549	51.39	109.8	6.72	12.92	8.07	15.52	804.4	1548.19	50.23	96.65

⁽¹⁾Basado en agua a 8.329 lb/gal
⁽²⁾Galón Imperial
⁽³⁾Basado en agua a 998.05 g/litro

Nota: https://www.academia.edu/8169598/Manual_De_Soluci%C3%B3n_De_Soda_C%C3%A1ustica_Contentos

Apéndice D. Plano mecánico del D-4601



Apéndice E. Plano mecánico del D-4603

