

Estudio Técnico para la Recirculación de Agua Efluente de los Separadores CPI SE-2001A/B de
la Refinería de Barrancabermeja

Jonathan Alexander Cagua Toledo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero en Procesos de Refinación y Petroquímica

Directora

Débora Alcida Nabarlatz

Doctora en Ingeniería Química y de Procesos

Codirector

Ronald Alfonso Mercado Ojeda

Doctor en Ingeniería Química y de Procesos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	8
1. Objetivos.....	10
1.1 Objetivo General.....	10
1.2 Objetivos Específicos.....	10
2. Marco Referencial.....	11
2.1 Marco Conceptual.....	11
2.1.1 Temperatura del Desalador	12
2.1.2 Fuente de Agua de Lavado	12
2.1.3 Separador CPI	13
2.2 Estado del Arte.....	14
2.2.1 Reutilización de Agua Captada.....	15
2.2.2 Reutilización de Aguas de Producción	15
3. Metodología	17
3.1 Diagnóstico	17
3.2 Caracterización Físicoquímica.....	18
3.3 Evaluación de Alternativas	19
3.3.1 Definir las Características o Criterios	19
3.3.2 Clasificar las Características	19
3.3.3 Ponderación de Criterios de Decisión para las Características Deseables y Obligatorias ...	20
3.3.4 Selección de la Tecnología	20
4. Resultados.....	20

4.1 Diagnóstico de la Condición Actual de los Equipos de Desalados en las Topping de la Refinería Barrancabermeja y Separador CPI.....	20
4.1.1 Equipos de Desalado en Unidades de Destilación de la Refinería de Barrancabermeja	20
4.1.2 Separador CPI	22
4.2 Caracterización Físicoquímica del Agua de Lavado en los Desaladores y el Agua Efluente del Separador CPI.....	23
4.3 Evaluación y Selección de Tecnologías para Tratamiento Agua Efluente Separador CPI.....	25
4.3.1 Tecnología SOWS	26
4.3.2 Tecnología RAMGUZ	28
4.3.3 New Gas and Oil S.A.S.....	29
4.4 Evaluación de la Puntuación para la Decisión de la Tecnología	31
5. Conclusiones	33
6. Recomendaciones	33
Referencias Bibliográficas	35

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Monitoreo de desaladores	21
Tabla 2. Parámetros medidos para el agua de lavado	23
Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de la corriente efluente “aguas aceitosas” proveniente del separador CPI SE-2001A/B	25
Tabla 4. Características deseables y obligatorias- Método de Ponderación Lineal (<i>scoring</i>).	26
Tabla 5. Tecnología SOWS según remoción de parámetros para 100 kbbl/d	27
Tabla 6. Valores de parámetros tecnología RAMGUZ	28
Tabla 7. Valores de parámetros tecnología New Gas and Oil S.A.S.....	29
Tabla 8. Puntuación en escala del 0 al 10 para diferentes tecnologías de tratamiento de agua	32
Tabla 9. Puntuación en escala porcentual para tecnologías	32

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Sistema de separación CPI	14
Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología del proyecto	18
Figura 3. Esquema general de los desaladores de las unidades Topping a unidad separadores CPI SE-2001A/B	23
Figura 4. Esquema tecnología SOWS.....	27
Figura 5. Esquema de solución tecnología RAMGUZ	28
Figura 6. Esquema de solución tecnología New Gas and Oil S.A.S	29
Figura 7. Esquema de filtro de lecho vegetal tecnología New Gas and Oil S.A.S	30

Resumen

Título: Estudio Técnico para la Recirculación de Agua Efluente de los Separadores CPI SE-2001A/B de la Refinería de Barrancabermeja*

Autor: Jonathan Alexander Cacia Toledo**

Palabras Clave: Aguas aceitosas, recirculación, desaladores.

Descripción: La investigación que se realizó estuvo orientada hacia la selección de una tecnología para el tratamiento de agua efluente proveniente del separador CPI ubicado en las unidades Topping de la refinería de Barrancabermeja. El tratamiento de este efluente se planteó con el propósito de realizar la recirculación a las unidades de desalado. En este sentido, se propuso una metodología en tres etapas secuenciales que incluyó el diagnóstico de la unidad en donde se pudieron establecer condiciones de operación, corrientes de entrada y salida y rendimientos. Luego, se propuso una caracterización fisicoquímica y se identificaron los sólidos suspendidos e hidrocarburos en agua como las sustancias restrictivas para la recirculación. Con esta información se realizó una búsqueda de tecnologías de tratamiento escalables a nivel industrial, que hicieran la remoción de los compuestos identificados. De esta manera, se seleccionó la tecnología Ramguz, la cual se caracteriza por la remoción de las sustancias restrictivas para la recirculación en un valor menor a 2ppm.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: Débora Alcida Nabarlantz. Doctora en Ingeniería Química y de Procesos. Codirector: Ronald Alfonso Mercado Ojeda. Doctor en Ingeniería Química y de Procesos.

Abstract

Title: Technical Study for the Recirculation of Effluent Water from the CPI SE-2001A/B Separators of the Barrancabermeja Refinery*

Author: Jonathan Alexander Cagua Toledo**

Keywords: Oily water, recirculation, desalters.

Description: This research was oriented towards the selection of a technology for the treatment of effluent water from the CPI separator located in the Topping units at Barrancabermeja refinery. The treatment of this effluent was considered with the purpose of recirculating it to the desalination units. In this sense, a methodology was proposed in three sequential stages that included the unit diagnosis where operating conditions, input and output currents, as well as yields could be established. Then, a physicochemical characterization was proposed and suspended solids and hydrocarbons in water were identified as the restrictive substances for recirculation. With this information, a search was made for scalable treatment technologies at an industrial level, which would remove the identified compounds. In this way, the Ramguz technology was selected, which is characterized by the removal of restrictive substances for recirculation in a value less than 2ppm.

* Degree Work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Supervisor: Débora Alcida Nabarlatz. PhD. Chemical and Process Engineering. Co-supervisor: Ronald Alfonso Mercado Ojeda. PhD. Chemical and Process Engineering.

Introducción

Tomando en cuenta la importancia del agua como un recurso natural esencial para los seres vivos y para los procesos industriales, se creó la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, incluyendo las Aguas Subterráneas. En ella, se establecen los objetivos y estrategias del país para el uso y aprovechamiento eficiente del agua; el manejo del recurso por parte de autoridades y usuarios, los objetivos para la prevención de la contaminación hídrica, considerando la armonización de los aspectos sociales, económicos y ambientales; y el desarrollo de los respectivos instrumentos económicos y normativos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010).

Actualmente, la refinería de Barrancabermeja emplea en sus procesos industriales agua captada de dos fuentes principales (Ciénaga San Silvestre y Río Magdalena) que en promedio suman 12000 gal/min (Manual de operación U-2900); agua que es utilizada para la generación de vapor, restitución en las torres de enfriamiento, agua de servicios, agua de lavado, entre otras.

En las unidades de destilación Topping se emplean en promedio 110 gal/min de agua clarificada que es utilizada como agua de lavado en el proceso de desalado en cada una de ellas, que sumado al agua de proceso recolectada en los tambores de cima de las torres de destilación, producto de la condensación del vapor, representan el total de agua necesaria para realizar la remoción de sales y lodos en los equipos de desalado. Posterior al lavado del crudo en los desaladores de las unidades de proceso del Departamento de Refinación de Crudos de la refinería, el agua efluente conteniendo hidrocarburos suspendidos, sales, minerales, metales y lodos es conducida hacia los separadores CPI (Corrugated Plate Interceptor) SE-2001A/B con el fin de separar el agua de proceso en tres corrientes: por la parte superior de las tolvas de separación se

recupera el crudo con un volumen promedio de 40 bbl/d, en la parte inferior se colectan los lodos para su posterior tratamiento y disposición, y finalmente por la parte media del SE-2001A/B fluye el agua de proceso aun con contenido de lodos en suspensión y aceites. Esta agua es direccionada hacia el sistema de aguas aceitosas en la Planta de tratamiento de agua industrial de la refinería, donde se adecúan las condiciones necesarias para el cumplimiento de la legislación actual mediante tratamientos físicos y químicos (Resolución 631 de 2015); y poder disponer el agua tratada en los cuerpos de agua cercanos (Río Magdalena) culminando así el ciclo del agua.

En búsqueda del equilibrio entre el medio ambiente y los procesos industriales, así como cumplir con la normatividad ambiental vigente (Resolución 1256 de 2021), Ecopetrol propende por continuar mejorando el entorno donde la Refinería de Barrancabermeja opera.

En este sentido, el presente proyecto busca seleccionar una tecnología de tratamiento para el efluente del separador CPI denominado Aguas Aceitosas con el propósito de que pueda recircularse como agua de lavado a los desaladores y así disminuir la cantidad de agua clarificada requerida en esta unidad. Este análisis inicia con el diagnóstico a la unidad de desalado, bajo el enfoque de volumen de control, revisando corrientes de entrada y salida, así como mecanismos de transferencia de energía, condiciones de operación, rendimiento, entre otros.

A continuación, se planteó la caracterización fisicoquímica del efluente denominado Aguas Aceitosas del separador CPI, y el agua actual de inyección a los desaladores, permitiendo obtener las características del agua disponible para la recirculación, así como las requeridas para la reutilización como agua de lavado.

Por último, se realizó la selección de una tecnología escalable a nivel industrial que permita la remoción o disminución en la concentración de sustancias restrictivas como el hidrocarburo; dicha selección se llevó a cabo utilizando el método de Ponderación lineal *scoring*.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar un estudio técnico para la recirculación de agua efluente de los separadores CPI SE-2001A/B de la refinería de Barrancabermeja.

1.2 Objetivos Específicos

Establecer un diagnóstico sobre la condición actual del proceso de desalado en las Unidades Topping, teniendo en cuenta condiciones de operación, caracterización de corrientes y rendimiento.

Caracterizar la corriente de aguas aceitosas efluente del separador CPI 2001 A/B, teniendo en cuenta parámetros fisicoquímicos.

Evaluar alternativas para el acondicionamiento del agua efluente del separador CPI SE-2001A/B para su reutilización en los desaladores de las unidades Topping de la Refinería de Barrancabermeja.

2. Marco Referencial

2.1 Marco Conceptual

Los procesos de refinación se direccionan hacia la transformación del crudo en productos derivados que son utilizados como combustible para transporte, calefacción, pavimentación de carreteras, generación de electricidad, materia prima para fabricación de productos químicos, entre otros (Energy Information Administration [EIA], 2022). En la refinación, el crudo se descompone en diversos componentes que luego se reconfiguran selectivamente en nuevos productos. Los procesos de refinación siguen tres pasos básicos: separación, conversión y tratamiento (Shah et al., 2011).

Generalmente, la separación del crudo se lleva a cabo en dos etapas secuenciales, debido a que se tiene mayor eficiencia y costos más bajos. La primera etapa se realiza a presión atmosférica con temperaturas relativamente bajas (370-380°C) para evitar la descomposición del crudo. Las torres se componen de 30 a 50 platos de fraccionamiento en donde el crudo se vaporiza y las fracciones más ligeras se condensan y acumulan en la parte superior de la columna y las fracciones más pesadas que pueden representar entre el 32 y 57% del crudo inicial, quedan en el fondo.

Las fracciones obtenidas de la columna atmosférica incluyen nafta, gasolina, queroseno, fuel oil liviano, diesel oil, gas oil, destilado de lubricantes y fondos pesados. La mayoría de estos pueden venderse como productos terminados o mezclados con productos derivados de procesos posteriores (Yang et al., 2020).

La segunda etapa opera al vacío y es alimentada por la fracción de los residuos de punto de ebullición más alto de la columna atmosférica.

La corriente de crudo que se alimenta a la torre atmosférica debe ser tratada previamente debido a la presencia de agua, sales inorgánicas, sólidos suspendidos, trazas de metales, entre otros,

los cuales son precursores de eventos como corrosión, taponamiento y ensuciamiento de equipos; este pretratamiento se conoce como desalado (Hasan et al., 2020).

Para el desalado, actualmente, se identifican dos métodos: separación química y electrostática, los cuales utilizan agua como agente de extracción.

En el desalado químico, se agrega un surfactante al crudo y se calienta, con el propósito de que las sales y otras impurezas se disuelvan en el agua y luego se envían a un tanque para su sedimentación. En el desalado eléctrico, se aplican cargas electrostáticas de alto voltaje para concentrar glóbulos de agua en suspensión en el fondo del tambor de sedimentación. Los surfactantes se agregan solo cuando el crudo tiene una gran cantidad de sólidos en suspensión.

El correcto funcionamiento del desalado depende de diversos factores como: voltaje aplicado, temperatura en el desalador, relación de agua de lavado/crudo, nivel de agua en el desalador, punto de inyección del agua de lavado, tipo de agua de lavado, inyección de agente desemulsionante, pérdida de carga en la válvula de mezcla y presión en el desalador (Ecolab, comunicación personal, 2006).

A continuación, se describen las variables involucradas:

2.1.1 Temperatura del Desalador

La temperatura óptima de los desaladores oscila entre 250-320°F dependiendo del tipo de crudo y de la gravedad específica API principalmente.

2.1.2 Fuente de Agua de Lavado

Se considera que los condensados o agua de alimentación de calderas son excelentes fuentes de agua de lavado, pero la desventaja es su costo y el hecho de que al usarlos aumenta la carga hidráulica en el sistema de aguas residuales. Para fines de desalinización, el agua de cabeza de torre de crudo (OVHD) y el agua agria despojada son a menudo la fuente de agua de elección

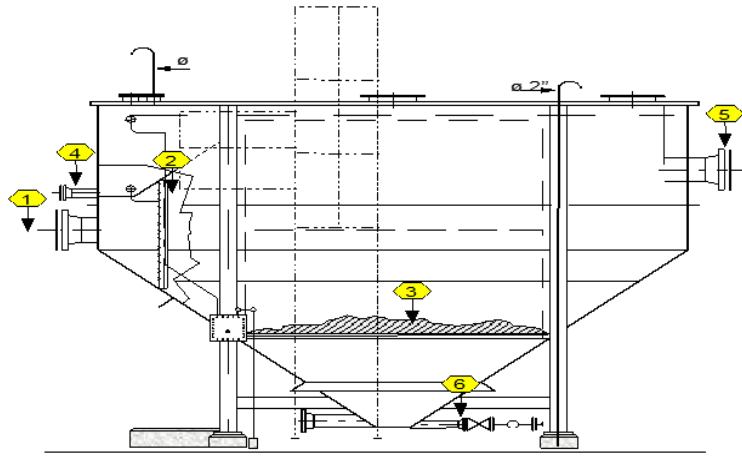
para la refinación. Las fuentes de agua que a veces pueden crear problemas son las provenientes de VDU (Unidad de Destilación al Vacío), FCCU (Catalizador de Fluidos de la Unidad de Craqueo) y VBU (Unidad de Visbreaking), OVHD agua, agua agria sin despojar, agua del río Magdalena y flujos de residuos reciclados como soda cáustica gastada (neutralizada o no), amina gastada de unidades de endulzamiento de gas y agua agria de coquizador con partículas de coque (Nalco, comunicación personal, 2007a, 2007b).

La mejor manera de identificar si una fuente de agua puede agregarse al agua de lavado del desalinizador es analizar los contaminantes críticos y evaluar el efecto sobre la calidad total del agua de lavado y proceso de desalinización, teniendo en cuenta parámetros tales como el contenido de sales, pH y sólidos.

2.1.3 Separador CPI

En la refinería de Barrancabermeja, se utiliza un separador CPI (Corrugated Plate Interceptor) para tratar el agua efluente de los desaladores. En este equipo se realizan procesos de separación primaria con el propósito de recuperar partículas de hidrocarburos libres cuyo tamaño no sea menor de 40 a 60 micrómetros, además de minimizar el contenido de sólidos presentes en el agua tratada. El principio de operación está basado en la diferencia existente entre las gravedades específicas del agua, aceite y los sólidos. Para que haya una buena separación es indispensable que el flujo sea laminar, por lo cual la velocidad del agua dentro del separador no debe exceder los 3 ft/min.

En la Figura 1, se presenta un esquema del separador CPI utilizado el cual tiene seis elementos principales.

Figura 1*Sistema de separación CPI*

Nota. 1. Entrada de aguas aceitosas. 2. Placas coalescedoras primarias. 3. Placas onduladas de separación. 4. Salida de aceite recuperado. 5. Salida de agua tratada y 6. Salida de lodos y sedimentos.

2.2 Estado del Arte

El proceso de producción y refinación de petróleo se caracteriza por sus altos requerimientos de agua; en el año 2021, el volumen total requerido fue de 151,4 millones de metros cúbicos aproximadamente (Ecopetrol, 2022), de los cuales el 74% corresponden a la reutilización de efluentes y el 26% fue captado de fuentes naturales.

El concepto de reutilización, según la Resolución 1256 de 2021:

Está orientado al uso de aguas residuales en operaciones y procesos unitarios dentro de la misma actividad económica que las genera y por parte del mismo usuario generador, sin que exista contacto con el suelo al momento de su uso, salvo cuando se trate de suelo de soporte de infraestructura (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

A nivel corporativo se han establecido estrategias como:

2.2.1 Reutilización de Agua Captada

En 2021, Ecopetrol reutilizó y recirculó un total de 16,9 millones de m³ de efluentes provenientes del uso de aguas captadas. El porcentaje de reutilización, calculado como la relación entre el volumen de agua reutilizada-recirculada y el volumen total captado, fue del 42%, mostrando un aumento de 15 puntos porcentuales con respecto al 2020; debido a un aumento en la reutilización en Refinería de Barrancabermeja, por la identificación de corrientes de reutilización que no se venían reportando, así como un aumento en la reutilización de la Refinería de Cartagena. Por otro lado, en actividades de perforación se reutilizan aguas residuales domésticas e industriales que después de pasar por tratamientos terciarios (ósmosis inversa y desmineralización), se utilizan nuevamente en la elaboración de lodo de perforación, lavado de equipos, agua de refrigeración para las bombas y usos industriales (Ecopetrol, 2022).

2.2.2 Reutilización de Aguas de Producción

En los procesos del Upstream se reutilizaron 94,4 millones de m³ de aguas de producción, que representa un aumento del 18% con respecto al 2020, principalmente ocasionado por un mejor desempeño en la reinyección para recobro en los campos Castilla, Apiay, Suria y Chichimene. El porcentaje de reutilización de aguas de producción de Ecopetrol, calculado como la relación entre el volumen de aguas de producción reutilizadas y el total de aguas de producción generadas, fue de 24%, 3 puntos porcentuales por encima con respecto a 2020 (Ecopetrol, 2022).

En el contexto internacional, también se identifica que las refinerías han incluido estrategias de reutilización para disminuir la captación de fuentes naturales y los vertimientos. Flores et al. (2017) proponen una estrategia para el reúso de agua en la refinería Francisco I. Madero, de México, la cual fue inyectada como agua de reposición en torres de enfriamiento y

para generación de vapor. La estrategia consistió en la ampliación de los procesos existentes en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales y fue seleccionada teniendo en cuenta criterios económicos y sociales. Las unidades involucradas fueron microfiltración, ultrafiltración, ósmosis inversa y generación de hipoclorito de sodio en sitio. La inclusión de la tecnología permitió reducir hasta el 95% del consumo de agua fresca en los sitios de inyección y ayudó a la disminución de los vertimientos.

Park et al. (2022) presentaron una estrategia para la reutilización de aguas agrias tratadas en una refinería de petróleo ubicada en el medio oriente. El tratamiento consiste en direccionar la corriente a un separador trifásico para separar hidrocarburos ligeros en fase gaseosa, hidrocarburos pesados en fase líquida y agua. El agua del separador trifásico se inyecta en una columna de extracción para eliminar materiales livianos como H_2S , NH_3 e hidrocarburos livianos del agua. El gas ácido se envía a una unidad de recuperación de azufre (SRU), mientras que el agua amarga depurada es direccionada como agua de lavado en los procesos de hidroprocesamiento, y en los requerimientos de calderas. Esta iniciativa permitió reutilizar el 33% del agua depurada que solía enviarse a la planta de tratamiento de aguas residuales.

Otro efluente importante en las refinerías son las aguas aceitosas que tienen como mayores contaminantes: sólidos suspendidos, grasas y aceites, para los cuales se han estudiado tratamientos como un sistema de flotación por aire el cual es un proceso de separación física que remueve grasas, aceites y sólidos suspendidos. El diseño utiliza características combinadas de otras técnicas y está basado en una modificación de un sistema de flotación por aire inducido para que opere como un sistema de flotación por aire disuelto, lo cual permite mejorar su desempeño a más bajo costo y reducir problemas operacionales asociados a mantenimiento de equipos (Forero et al., 1999).

El sistema desarrollado tiene varias características que mejoran su funcionamiento, incluido el uso de boquillas para inyección y dispersión del gas en la fase líquida. Frente a los sistemas convencionales, se elimina la necesidad de utilizar equipos motorizados generadores de burbujas para cada celda de flotación, y así disminuir los requerimientos energéticos.

A su vez, para la remoción o disminución de niveles elevados de contaminantes de aguas aceitosas de la industria petrolera, también se evalúa la tecnología de biofiltración en lecho fijo con diferentes materiales naturales. En el tratamiento de aguas de producción de dicha actividad, se evaluaron dos biofiltros empacados con materiales adsorbentes y se realizó la recirculación en discontinuo durante 7 días de experimentación. La ecotoxicidad del residuo de cada columna fue analizada al final del experimento para la evaluación de su disposición final. Los biofiltros operaron de forma estable garantizando una reducción notable de DQO, sulfuros, grasas y aceites (Díaz et al., 2022).

3. Metodología

La metodología del trabajo se dividió en cuatro etapas, descritas en la Figura 2.

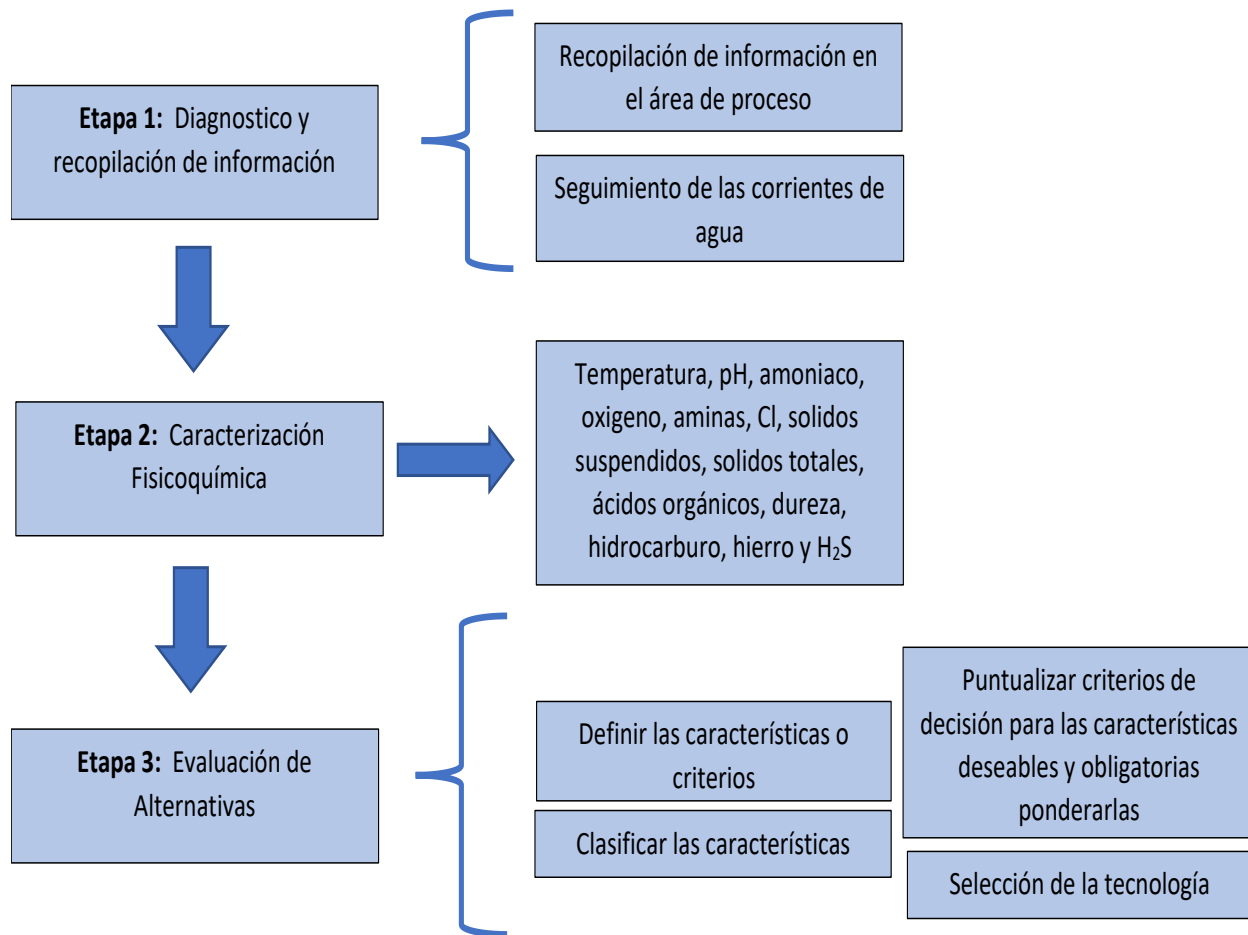
3.1 Diagnóstico

En esta fase se planteó la recolección de información de campo, incluyendo condiciones de operación, flujos, características de equipos y rendimiento; teniendo en cuenta especificaciones de diseño y operacionales. Para esto se revisarán data sheets, diagrama grande de control, PID, PFD de los equipos. El proceso de desalado inicia con la entrada de crudo que viene desde el tanque TK-822 y el crudo que viene directo de la línea (exclusivo para la Unidad Topping 150). Este crudo entra a los desaladores D-152, D-222, D-253/53A, D-2001/01A y D-2101/01A, donde el agua de efluente del desalado va a los separadores CPI SE-2001A/B. De los separadores SE-

2001A/B se tienen tres corrientes efluentes: crudo recuperado que ingresa al tanque TK-41, aguas aceitosas direccionadas a PTAR y lodos.

Figura 2

Diagrama de flujo de la metodología del proyecto



3.2 Caracterización Físicoquímica

De acuerdo con los resultados del diagnóstico, se escogieron dos corrientes de proceso: (Agua de Lavado y Agua Efluente del Separador CPI SE-2001A/B), para realizar la caracterización físicoquímica. Para el agua de lavado se tomaron y analizaron muestras a lo largo de dos años, desde enero de 2020 hasta febrero de 2022, realizando los siguientes análisis: pH tomado con pHmetro, cloruros mediante titulación con set de reactivos en campo con el Método

Hach 8206 (Nitrato de mercurio), oxígeno disuelto en agua mediante kit CheMets basado en la Norma ASTM O 888-87 y sólidos suspendidos mediante método Hach 8006 con espectrofotómetro portátil DR1900; todas estas muestras se realizaron en campo. La caracterización del agua efluente del separador SE-2001A/B se realizó con una muestra puntual tomada el 16 de septiembre de 2021 y los parámetros medidos fueron alcalinidad, cloruros, conductividad, contenido de fenol en agua, calcio, dureza total, magnesio, grasas y aceites, aluminio, hierro, pH, sólidos en suspensión y sólidos totales. Estos análisis fueron realizados en el laboratorio de Ecopetrol en la Refinería de Barrancabermeja.

3.3 Evaluación de Alternativas

Teniendo en cuenta los parámetros seleccionados y las condiciones de operación, en primera instancia se seleccionaron 3 alternativas para el tratamiento del agua efluente del separador SE-2001A/B, las cuales fueron evaluadas mediante una metodología de ponderación de acuerdo con el método de Ponderación lineal Scoring (Rojas, 2016) que propone los siguientes pasos:

3.3.1 Definir las Características o Criterios

Se elaboró una lista de características y condiciones o criterios que deben cumplir las distintas opciones de tecnologías para ser evaluadas.

3.3.2 Clasificar las Características

En esta etapa se clasifican las características en dos grupos: “obligatorias” y “deseables”. Las características “obligatorias” servirán para descartar las opciones tecnológicas y las características “deseables” son aquellas que no necesariamente tienen que ser cumplidas por las opciones a considerar, pero se aspira que estén presentes en algunas o varias opciones de tecnologías.

3.3.3 Ponderación de Criterios de Decisión para las Características Deseables y Obligatorias

Se asigna un valor numérico a cada criterio en la escala de 0 (mínima importancia) al 10 (máxima importancia), y luego se debe realizar la conversión a porcentajes de cada una de las ponderaciones asignadas, realizando los cálculos correspondientes y verificando que la sumatoria de las ponderaciones porcentuales sea de 100.

3.3.4 Selección de la Tecnología

Conocidas las puntuaciones de cada opción, se escogerá la que haya logrado mayor puntaje como la “mejor opción”.

4. Resultados

4.1 Diagnóstico de la Condición Actual de los Equipos de Desalados en las Topping de la Refinería Barrancabermeja y Separador CPI.

4.1.1 Equipos de Desalado en Unidades de Destilación de la Refinería de Barrancabermeja

La refinería de Barrancabermeja cuenta con cinco unidades de destilación primaria o Topping denominadas U-150, U-200, U-250, U- 2000 y U-2100. Estas unidades se componen de tres secciones: atmosférica, vacío y debutanizadora. El diagnóstico se direccionó a los sistemas de desalado que se encuentran en estas unidades, y el separador CPI en donde se realiza el tratamiento para el agua efluente de los desaladores.

El análisis de los sistemas de desalado, que se presenta en la Tabla 1, corresponde a información de dos años de monitoreo, trabajo realizado desde enero del 2020 hasta febrero del 2022, en donde se establecieron condiciones de operación como eficiencia de desalado y la cantidad de agua de lavado requerida, entre otros. Informe que fue presentado por parte de la

empresa Ecolab, tal como se indica en el informe presentado el 14 de febrero de 2022 (Ecolab, comunicación personal, 2022).

Tabla 1

Monitoreo de desaladores

Unidad	Carga de Crudo (bbl/d)	Agua de lavado (bbl/d)	Eficiencia Global del proceso (%)
D-152	33978	1475	86
D-222	63196	2100	87
D-253/A	38122	3192	89
D-2001/A	47887	2198	91
D-2101/A	32827	1590	90

Nota. Bbl/d: Barriles por día. %: Porcentaje de remoción de sal al crudo.

Del análisis realizado se pudo identificar que, aunque la eficiencia en todas las unidades de desalado se encuentra por encima del 85% y cumple con las especificaciones técnicas establecidas, todas presentan oportunidad de mejora ya que sus rendimientos están por debajo de lo establecido en sus condiciones de diseño. Para el D-152, se debería tener una eficiencia de 94-96%, manejando una sola etapa de desalado y una carga de crudo liviano. Para el D-222 con una sola etapa, la eficiencia debería estar entre un 90-92%. Para la doble etapa de desalado D-253/A la eficiencia global para el API del crudo cargado en esta unidad debería ser entre 92-94%. En el sistema de desalado D-2001/A, al igual que el D-2101/A, también se debería obtener una eficiencia entre el 92-94%.

Dichas oportunidades de mejora están relacionadas con el acondicionamiento del sistema hidráulico (cambio y/o ajustes de equipos como bombas y válvulas), eléctrico y modo de operación (ajuste de nivel de flujo, temperatura y cantidad de agua de lavado).

El agua de lavado es una mezcla de agua clarificada y agua recirculada de la cima de las torres de destilación atmosférica y de vacío. La inyección de agua fresca a los desaladores debe estar en un rango de 5 a 10% del volumen de la carga crudo a las unidades (Ecolab, comunicación personal, 2022). Para el desalador D-152, la cantidad de agua de lavado inyectada equivale a un 4.4% del volumen de la carga de crudo; para el D-222 equivale al 3.4%; para el D-253/253A, corresponde a un 8.5%, en la U-2000 se tiene un 4.6% y para el D-2101/2101A el valor de agua fresca de inyección equivale a 4.5% en volumen con respecto a la carga de crudo. Lo anterior, muestra la necesidad en la mayoría de desaladores de aumentar el flujo de agua de lavado para mejorar el rendimiento.

4.1.2 Separador CPI

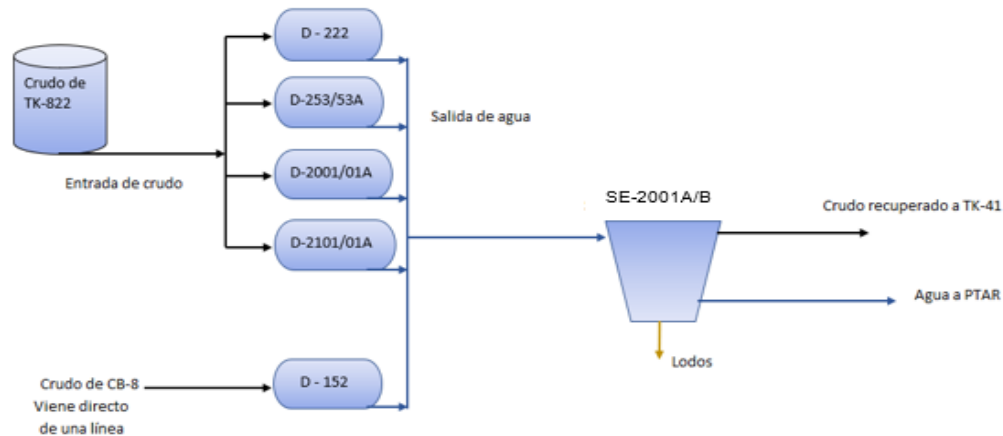
En la refinería de Barrancabermeja, se utiliza un separador CPI (Corrugated Plate Interceptor) para tratar el agua efluente de los desaladores, tal como se mencionó en el apartado del marco teórico.

Después del proceso en el separador CPI, se tienen tres corrientes efluente: el hidrocarburo recuperado, los lodos en el fondo y finalmente las aguas aceitosas. Estas últimas son direccionadas a la PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales).

El separador CPI no cuenta con un medidor de flujo, por lo tanto, el flujo de aguas aceitosas fue calculado a partir de un balance volumétrico, y su cuantificación fue de 320 gal/min aproximadamente, evidenciando el potencial para ser utilizadas como agua de lavado en los desaladores teniendo en cuenta que se encuentra en la misma unidad.

Figura 3

Esquema general de los desaladores de las unidades Topping a unidad separadores CPI SE-2001A/B



4.2 Caracterización Físicoquímica del Agua de Lavado en los Desaladores y el Agua Efluente del Separador CPI

En la Tabla 2 se presentan los parámetros medidos para el agua de lavado que está siendo utilizada actualmente en los desaladores; esta información se puede utilizar como punto de partida y también permite identificar posibles mejoras.

Tabla 2

Parámetros medidos para el agua de lavado

Parámetro	Valor promedio	Desviación
pH	6.11	0.14
Cl ⁻	16.92 ppm	6.96
O ₂	0.13 ppm	0.2
Sólidos Suspendidos	100.1 ppm	13.38

De acuerdo con el documento de buenas prácticas publicado por NALCO (Ecolab, comunicación personal, 2022), el pH para aguas de lavado se recomienda ligeramente ácido (5.5 a 6.5) ya que un valor más alto puede afectar las especies estabilizadoras de las emulsiones y un valor menor a 5 durante un periodo prolongado puede causar corrosión en el desalinizador. Con respecto a los sólidos, se menciona que pueden ensuciar los equipos aguas abajo como intercambiadores, hornos, etc. Por eso deben tener la menor concentración posible preferiblemente.

El oxígeno del agua de lavado normalmente no es un problema para el proceso de desalinización, pero puede aumentar la corrosión en el equipo. El oxígeno reacciona con el crudo en el horno por lo que puede aumentar el contenido de SO_x , así como también puede aumentar las tasas de ensuciamiento en el precalentamiento. En este sentido, se recomienda mantener el contenido de oxígeno del agua de lavado menor a 20 ppb.

En la actualidad no se realiza medición de hidrocarburos ya que la fuente de esta agua son los tambores acumuladores de las cimas de las torres de destilación que teóricamente no presentan contenido de hidrocarburos.

En la Tabla 3 se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica realizada para la corriente efluente del separador CPI denominada Aguas Aceitosas y corresponde a una muestra puntual que fue tomada y analizada el 16 de septiembre de 2021 en el laboratorio de la Refinería de Barrancabermeja de Ecopetrol SA.

Tabla 3

Caracterización fisicoquímica de la corriente efluente “aguas aceitosas” proveniente del separador CPI SE-2001A/B

Parámetro	Valor
pH	4,23
Cl ⁻ [ppm]	15,39
Dureza [ppm de CaCO ₃]	287
H ₂ S [ppm]	43
NH ₃ [ppm]	100
Sólidos Suspendidos[ppm]	426
Hidrocarburos [ppm]	1321

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede identificar que los valores de los parámetros se encuentran por encima de los rangos establecidos, lo que hace necesario establecer una etapa de tratamiento para lograr las condiciones requeridas en el desalado.

4.3 Evaluación y Selección de Tecnologías para Tratamiento de Agua Efluente del Separador CPI

De acuerdo con los resultados de la caracterización fisicoquímica de las corrientes Agua de Lavado utilizada en los desaladores y Agua Efluente del separador, y considerando factores logísticos y económicos, se establecieron las características importantes para la selección de la tecnología y se clasificaron en “obligatorias” y “deseables” tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Características deseables y obligatorias- Método de Ponderación Lineal (scoring).

Característica	Obligatorio	Deseable
Contenido de hidrocarburos por debajo de 10 ppm	X	
Contenido de sólidos suspendidos por debajo de 5 ppm	X	
Bajo costo de instalación		X
Facilidad de instalación		X
Bajo costo de operación		X

Teniendo en cuenta las características de la Tabla 4, se realizó una revisión en la literatura enfocada en empresas con reconocimiento nacional e internacional y teniendo en cuenta los desarrollos propuestos por Ecopetrol en el tema; de esta manera, se seleccionaron 3 alternativas las cuales se describen a continuación.

4.3.1 Tecnología SOWS

La tecnología SOWS (Surface Oil Water Separation) es un desarrollo tecnológico 100% Ecopetrol-ICP, que integra cerca de diez productos en un mismo paquete, los cuales se encuentran protegidos con radicaciones de patente ante la Superintendencia de Industria y Comercio.

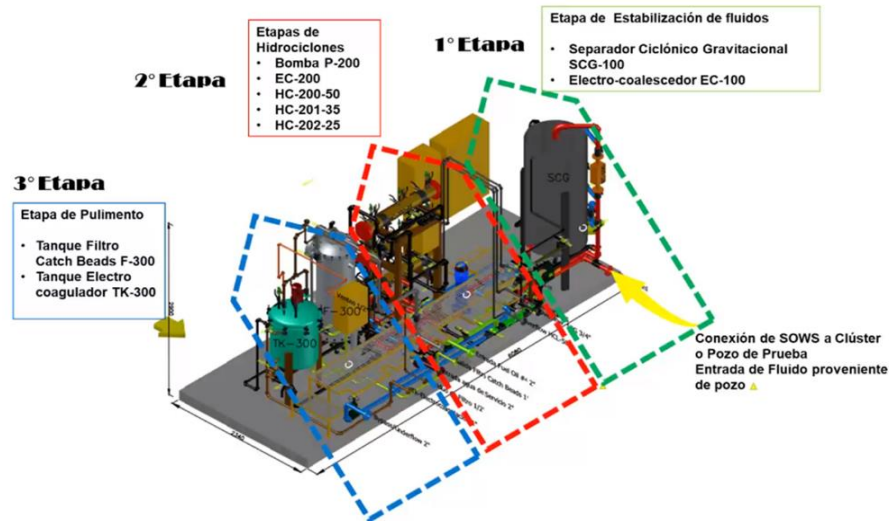
Su configuración está compuesta por tres etapas principales:

- 1) Separación primaria y estabilización del fluido.
- 2) Separación con tecnología de hidrociclones de última generación.
- 3) Electrocoagulación y filtración con materias adsorbentes.

Esta tecnología ha sido probada en el campo Rubiales CL-RB 271 en el cual se logró separar el 62% de agua libre en la segunda corrida, con un contenido de hidrocarburos menor a 8 ppm y una turbidez de 10 a 25 NTU para 1134 bbl/d.

Figura 4

Esquema tecnología SOWS



Nota. Tomado de Instituto Colombiano del Petróleo, comunicación personal (2021).

La comparación del Capex y Opex de esta tecnología con otras ya existentes en el mercado se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5

Tecnología SOWS según remoción de parámetros para 100 kbb/d

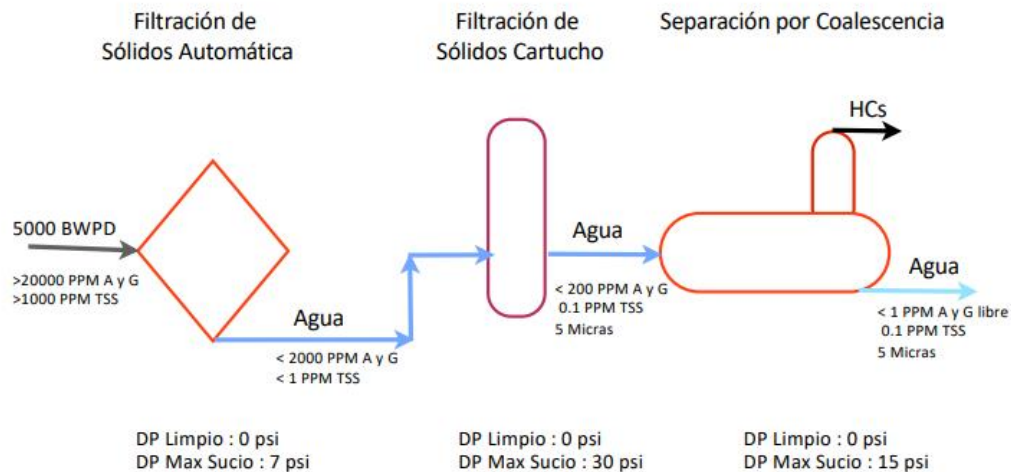
TIPO	TECNOLOGÍA	EFICIENCIA DE REMOCIÓN (%)	CAPEX (US\$)	OPEX (US\$/Bbl)	Remoción Parámetros
Físico-químico	Electrocoagulación	90%-100%	\$ 1.882.151	\$ 0,980	THP, SST, fenoles, alcoholes, AOX, NH ₃ , THM, E. Coli.
Físico-químico	Clarificador	80%-90%	\$ 800.283	\$ 0,018	SST, DBO, DQO, N ₂ , Color, Turbidez.
Físico	Membrana Polimérica (UF)	95%-100%	\$ 6.570.000	\$ 0,420	Compuestos orgánicos, fenoles, AOX, turbidez, SST, patógenos, color.
Físico	Medio Adsorbente	99%-100%	\$ 1.200.000	\$ 0,050	DBO, fenoles, Color, SST, metales.
Físico	Filtración MP + Catch Beads	95%-100%	\$ 1.200.000	\$ 0,050	THP, SST, turbidez, color.
Físico	UV-C-LED	99%-100%	\$ 350.000	\$ 0,010	Microbiológicos, fenoles.
Físico-químico	Ozono O ₃	90%	\$ 1.800.000	\$ 0,600	Fenoles, color, AOX, microbiológicos, THM.
Físico-químico	Intercambio Iónico	99%	\$ 4.600.000	\$ 0,114	Sodio, Nitrato, Boro, Arsénico, Color, Molibdeno, Mercurio, y otros aniones y cationes.
Físico	Ósmosis Inversa	99%	\$ 1.974.800	\$ 0,012	Sales, iones metálicos, dureza, patógenos, turbidez.

Nota. Tomado de Instituto Colombiano del Petróleo, comunicación personal (2021).

4.3.2 Tecnología RAMGUZ

Figura 5

Esquema de solución tecnología RAMGUZ



La tecnología RAMGUZ se compone de un prefiltro y un filtro coalescedor, el cual promete un agua de salida con los valores expresados en la Tabla 6.

Tabla 6

Valores de parámetros tecnología RAMGUZ

	Agua de Entrada	Agua de Salida
Flujo	5000 bbl/d	5000 bbl/d
Sólidos Solubles Totales TSS [ppm]	1000	<0.1
Hidrocarburos [ppm]	20000	<2
Retención [micras]	-	5

Esta tecnología comprende un medio filtrante en fibra de vidrio de 5 micrómetros con eficiencia del 99.9%, donde cada cartucho puede soportar 70 gal/min y presenta un diseño interno de cresta creciente patentado para dar mayor vida útil y menor mantenimiento. El valor de esta tecnología es de \$20.000 USD para un tratamiento de 5000 bbl/d (RAMGUZ, comunicación

personal, 2022), lo cual comprende la instalación y piloto de la tecnología, teniendo en cuenta que en operación el costo de tratamiento sería \$0,89 USD/bbl.

4.3.3 New Gas and Oil S.A.S.

Figura 6

Esquema de solución tecnología New Gas and Oil S.A.S



La tecnología de la empresa New Gas and Oil se compone de un Skim Tank, el cual es un tanque de cabeza de proceso asistido con un generador de microburbujas que son generadas por fuera del equipo y se inyecta al efluente realizando la separación por medio de flotación; el cual tiene una eficiencia de 90%-95%, lo cual se ejemplifica con la Tabla 7, para un agua a tratar con 500 ppm de grasas y aceites y 300 ppm de sólidos suspendidos.

Tabla 7

Valores de parámetros tecnología New Gas and Oil S.A.S.

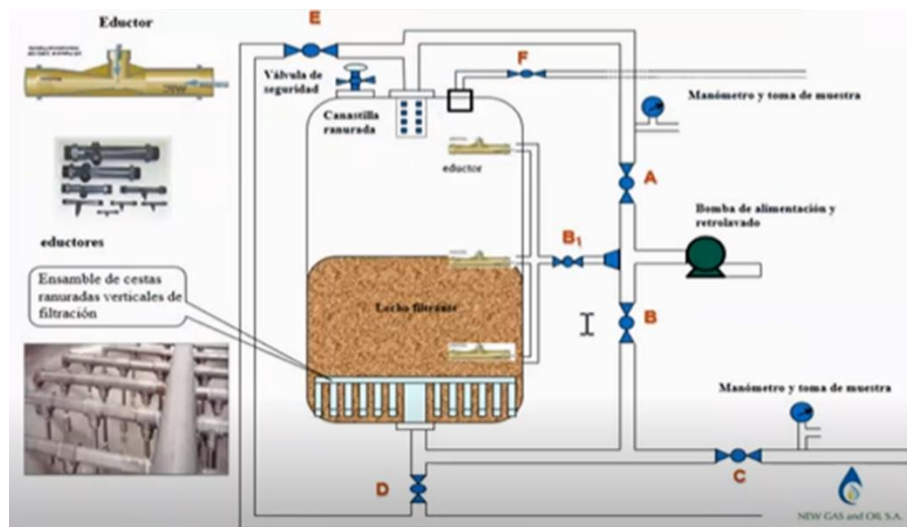
	Agua de entrada	Skim Tank	Filtro de lecho vegetal
Hidrocarburos [ppm]	500	50-25	2,5-1,25
Sólidos Solubles Totales TSS [ppm]	300	30-15	1,5-0,75

Nota. Tomado de New Gas and Oil S.A.S., comunicación personal (2022).

El filtro de lecho vegetal (ver Figura 7) se compone de un lecho de cáscara de nuez cuya innovación es que no utiliza bombas para realizar retro lavado, lo cual disminuye los costos energéticos y ayuda a que el lecho se conserve en buen estado y no sea repuesto en un tiempo considerable. Debido a que es un filtro de lecho vegetal de cáscara de nuez, en ocasiones se presentan dificultades para obtener este tipo de material.

Figura 7

Esquema de filtro de lecho vegetal tecnología New Gas and Oil S.A.S.



Una de las ventajas de esta tecnología es el mejoramiento por asistencia de micro burbujeo en facilidades instaladas como Skim Tank, donde se aumenta la capacidad de separación por flotación en barriles de agua tratados por día, disminuyendo los tiempos de residencia y sosteniendo un 90% de eficiencia en la remoción de hidrocarburo y sólidos suspendidos totales (SST). Adicionalmente, logra un ahorro de energía con la utilización filtros de última generación sin bomba de retro lavado y con ciclos más cortos que requieren decantadores de menor tamaño, así como economía en los procesos de operación y mantenimiento. Igualmente, evita la fracturación del grano lecho filtrante al no tener bomba de retro lavado y no posee rejilla inferior que acarrea grandes costos de mantenimiento y reparación. El valor de esta tecnología es de

\$40.000 US para un tratamiento de 5000 bbl/d, con un costo de operación de \$1,2 USD/bbl (New Gas and Oil S.A.S., comunicación personal, 2022).

4.4 Evaluación de la Puntuación para la Decisión de la Tecnología

Según lo anterior, se identificaron los criterios de decisión para las características deseables y obligatorias, donde se asignó un valor relativo a la importancia que tiene cada criterio en la decisión. Para el caso de las características obligatorias, se asignaron valores de: 0, no cumple; 5, cumple y 10, supera la expectativa. Para las características deseables se asignó un valor de: 0 no cumple; 3, cumple y 6, supera la expectativa. Para el agua con contenido de hidrocarburos, todas las tecnologías cumplen, pero las dos tecnologías que superan las expectativas son Ramguz y New Gas & Oil. Por ello se asignaron 5 puntos a SOWS y 10 puntos a las otras dos tecnologías. En cuanto al agua con contenido de sólidos totales, la tecnología SOWS no cumple, entregando una corriente de agua con más de 5 ppm, obteniendo una calificación de 0, mientras que la tecnología que superó las expectativas fue Ramguz con 0,1 ppm, dando una calificación de 10 y finalmente New Gas & Oil obtuvo 5 puntos. En las características deseables en el apartado de costo de instalación, el mayor costo es para SOWS, asignando un valor de 3. El sistema Ramguz tiene el menor costo de instalación, obteniendo un puntaje de 6 y, por último, la tecnología de New Gas & Oil obtuvo un valor de 3. Cuando se revisó la complejidad de la instalación, quien requiere mayor infraestructura es la tecnología New Gas & Oil, obteniendo una puntuación de 3. Por su parte, las tecnologías de Ramguz y de SOWS presentan similares facilidades para la instalación sin requerimientos mayores de infraestructura, a las cuales se les asignó un valor a cada una de 6. Por último, en cuanto a los costos de operación, el sistema SOWS presenta un menor costo dando una puntuación de 6, mientras que quien presenta el mayor costo de operación es la tecnología de New

Gas & Oil dando una puntuación de 0, y la tecnología de Ramguz se ubica en un punto medio obteniendo una puntuación de 3.

Tabla 8

Puntuación en escala del 0 al 10 para las diferentes tecnologías de tratamiento de agua

Característica	Puntos	SOWS	RAMGUZ	New Gas & Oil
Agua con contenido de hidrocarburos por debajo de 10 ppm.	10	5	10	10
Agua con contenido de sólidos suspendidos por debajo de 5ppm.	10	0	10	5
Bajo costo de instalación	6	3	6	3
Facilidad de instalación	6	6	6	3
Bajo costos de operación	6	6	3	0
Puntaje Total	38	20	35	21

Finalmente, se realizó una conversión a porcentajes de cada una de las ponderaciones asignadas, realizando los cálculos correspondientes y verificando que la sumatoria de las ponderaciones porcentuales sea de 100. El detalle se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9

Puntuación en escala porcentual para tecnologías

Característica	Puntos	SOWS	RAMGUZ	New Gas & Oil
Agua con contenido de hidrocarburos por debajo de 10ppm.	26,32	13,16	26,32	26,32
Agua con contenido de sólidos suspendidos por debajo de 5ppm.	26,32	0	26,32	13,16
Bajo costos de instalación	15,79	7,89	15,79	7,89
Facilidad de instalación	15,79	15,79	15,79	7,89
Bajo costos de operación	15,79	15,79	7,89	0
Total puntaje porcentual [%]	100,00	52,63	92,11	55,26

Según lo plasmado, se encontró que la tecnología que cumple con las características obligatorias y deseables en un mayor porcentaje y que cuenta con un ponderado mayor de 92,11% de cumplimiento es la tecnología de RAMGUZ, con respecto a un 55,26% de cumplimiento de la tecnología New Gas and Oil y 52,63% de la tecnología SOWS.

5. Conclusiones

A partir del diagnóstico que se realizó a la unidad de desalado, se pudo identificar que existe un flujo disponible de agua cuantificado en 320 gal/min, el cual puede ser recirculado como agua de lavado en la misma unidad a partir de una tecnología de tratamiento, lo cual implica una disminución en la captación de agua de las fuentes actualmente utilizadas.

De acuerdo con el análisis fisicoquímico realizado al agua efluente del separador CPI, se pudo identificar que los compuestos restrictivos para la recirculación son sólidos suspendidos y contenido de hidrocarburo en el agua, los cuales pueden causar problemas de taponamiento y corrosión, entre otros, por lo que en la unidad de desalado es necesario incluir la tecnología de tratamiento para poder hacer recirculación del agua.

Según el método de ponderación lineal (*scoring*) para la evaluación de alternativas para el acondicionamiento del agua efluente del separador CPI SE-2001A/B, se encontró que la tecnología que cumple con las características obligatorias y deseables en un mayor porcentaje y que cuenta con un ponderado mayor de 90,91% de cumplimiento es la tecnología de RAMGUZ.

6. Recomendaciones

Para la implementación de la recirculación del agua efluente del SE-2001A/B es necesario realizar ajustes de tipo hidráulico que incluyen la instalación de equipos de bombeo capaces de

inyectar el agua recirculada en el cabezal principal de agua de reposición a los tanques de agua de cada unidad de proceso.

Se debe realizar un análisis de factibilidad que incluya el montaje de los equipos de bombeo y de las facilidades hidráulicas para realizar la recirculación, costos de instalación, así como los costos operativos.

Referencias Bibliográficas

- Cortés del Pino, A. (2014). *Proceso de Refino del Petróleo para la obtención de combustibles marinos*. [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Cataluña].
<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/21742>
- Díaz, Y., Mendiola, L., González, A., Navarro, Y., Acosta, S., & Chao, C. (2022). Biofiltración de efluentes líquidos de la industria petrolera con materiales naturales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(1), 12-24.
- Ecolab. (2006). Best Practice Guide. Desalter Mud Washing.
- Ecolab. (2022). *Informe de general eficiencia de desalado unidades Topping a 01 de enero del 2020 al 07 de febrero del 2022*.
- Ecopetrol. (18 de febrero de 2022). *Eficiencia operativa en el manejo del agua*.
<https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostecnibilidad/ambiental/gestion-integral-del-agua/manejo-agua>
- Energy Information Administration. (2022). *Oil and petroleum products explained - Refining crude oil*. <https://www.eia.gov/energyexplained/oil-and-petroleum-products/refining-crude-oil-the-refining-process.php>.
- Flores, E. A, Ramos, C., Sato, Y., Vélez, R., Lasses, M., & Brena, R. M. (2017). Reúso de agua residual tratada en el sector de refinación del petróleo. *Agua y ambiente*, 163-170.
https://aguaambiente.files.wordpress.com/2017/04/9_brenagonzalez.pdf
- Forero, J. E., Díaz, J., & Blandón, V. R. (1999). Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(5), 67-75.

- Hasan, H., Nooruldeen, A., Ahmed, H. I., & Jaafer, M. J. (2020). Experimental study of desalting crude oil. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 8(2), 727-735.
- Hsu, C. S., & Robinson, P. R. (2017). Petroleum Distillation. En *Springer Handbook of Petroleum Technology* (pp. 533-550). doi:10.1007/978-3-319-49347-3_16
- Instituto Colombiano del Petróleo. (2021). *Tecnología SOWS*. Piedecuesta.
- J. E. Forero, J. Díaz, & V. R. Blandón. (1999). Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales. CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro.
- Ley 11 de 1979. Por la cual se reconoce la profesión de bibliotecólogo y se reglamenta su ejercicio. Congreso de la República de Colombia. 23 de marzo de 1979. D.O. No. 35226.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2010). *Política Nacional para la Gestión integral del Recurso Hídrico 2010-2022*. Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/politica-nacional-para-la-gestion-integral-del-recurso-hidrico/>
- Nalco. (2007a). Best Practice Guide Desalter Wash Water Quality & Source.
- Nalco. (2007b). Best Practice Guide Desalter Optimization Process.
- New Gas and Oil S.A.S. (2022). *Tratamiento de agua con nuevas tecnologías*.
- Park, S., Alanzi, J., & Alzanan, A. (19 de abril 2022). *Case Study: Water reuse at an oil refinery*. Water technology. <https://www.watertechonline.com/water-reuse/article/14262430/water-reuse-in-an-oil-refinery>
- Ramírez-Corredores, M. M., & Borole, A. P. (2007). Conventional refining processes. En *Studies in Surface Science and Catalysis*, 9–63. doi:10.1016/s0167-2991(07)80242-4
- RAMGUZ. (2022). *Propuesta tecnológica tratamiento de agua*. Barrancabermeja.

Resolución 1256 de 2021 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones (23 de noviembre de 2021). <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1256-de-2021/>

Resolución 631 de 2015 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones (17 de marzo de 2015). <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>

Rojas, C. A. (2016). *Problemas de decisión multicriterio* [Diapositiva de PowerPoint]. Programa Académico de Ingeniería Industrial UCEVA.

Shah, N. K., Li, Z., & Ierapetritou, M. G. (2011). Petroleum refining operations: key issues, advances, and opportunities. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(3), 1161-1170.

Yang, K., Liu, S., He, C., Zhang, B., Chen, Q., & Pan, M. (2020). Improving energy saving of crude oil distillation units with optimal operations. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121340.