

Evaluación de la Factibilidad del Rompimiento de Emulsiones Agua - Aceite Utilizando un
Reactor de Túneles Cuánticos de Gravedad Elemental

Juan Sebastián Camacho Camacho y Adriana Balaguera Daza

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Oscar Vanegas Angarita

Ingeniero de Petróleos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Este trabajo de investigación está dedicado con amor y gratitud principalmente a nuestras madres Luisa Marcela Camacho Peña y Rubilina Daza González, respectivamente, quienes de forma independiente fueron ese apoyo y/o fortaleza durante los años de carrera.

A la familia, por su amor incondicional, paciencia y constante aliento.

Yo, Sebastián Camacho, quiero dedicar este libro a personas especiales que aún se encuentran conmigo, a mi abuela Marlen Peña, a mi figura paterna Milton y a mi tía Antonia Camacho; y también a quienes ya partieron de este mundo terrenal, mi querido abuelo Henry Camacho Cala y a mi bisabuela Cecilia Moreno.

Y yo, Adriana Balaguera, quiero dedicar este libro a mi papá Juan Alfredo Balaguera y a todos mis hermanos, principalmente a mi hermano Edwin Castaño, quienes fueron un apoyo incondicional; además quiero dedicarle este libro a mi abuela Carmen Rosa González quien ya partió de este mundo.

A nuestros amigos, quienes han compartido risas, desafíos y momentos de celebración. Su amistad ha sido un regalo invaluable. También a quienes en su momento fueron nuestros alumnos, quienes con su energía e interés nos compartieron distintas perspectivas de la vida en el hermoso entorno del aprendizaje.

Al Ingeniero Oscar Vanegas Angarita, quien mediante su labor como educador sembró en nosotros la necesidad de aprender día con día.

Este trabajo no solo representa nuestro esfuerzo, sino también el apoyo inquebrantable de quienes nos rodean. Gracias por ser la inspiración que necesitábamos para alcanzar esta meta.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este Trabajo de Investigación.

En primer lugar, queremos agradecer a nuestro director, el Ingeniero Oscar Vanegas Angarita, cuya orientación experta y apoyo constante fueron fundamentales en cada etapa de este proyecto. Su dedicación y paciencia han sido invaluable.

En segunda instancia, deseamos expresar nuestra inmensa gratitud a Carlos Labrador, inventor del reactor prototipo, quien, con su dedicación a la investigación, puso a nuestra disposición su tiempo y su invención para el desarrollo de este estudio. También queremos agradecer a los Ingenieros Edison Odilio García Navas y Adan Yovani León Bermúdez, evaluador y calificador del plan respectivamente, quienes brindaron valiosos aportes y perspectivas que enriquecieron enormemente nuestro trabajo.

Además, es un verdadero honor agradecer a Ecopetrol y al Centro de Desarrollo Tecnológico (CDT) del gas, así como al Ing. Félix Arenas Rueda. A los dos primeros, por su colaboración en el proceso de cromatografía del gas, y al ingeniero laboratorista, por brindarnos asesoramiento integral y profesional en el manejo del laboratorio de fluidos.

Tabla de Contenido

Introducción	11
Objetivos	12
Objetivo General	12
Objetivos Específicos.....	12
1. Reactor cuántico de gravedad elemental.....	13
2. Estado de arte de la Física cuántica aplicada	16
2.1 Teoría del túnel	16
2.2 Superposición cuántica	19
3. Mecanismos de desemulsificación en la industria petrolera.....	22
3.1 Procesos Convencionales para el Rompimiento de Emulsiones en la Industria Petrolera	25
3.1.1 Tratamiento Térmico	25
3.1.2 Uso de Desemulsionantes Químicos.....	28
3.1.3 Separación Gravitacional	30
3.1.4 Centrifugación.....	32
3.1.5 Tratamiento Eléctrico.....	35
3.1.6 Filtración y Coalescencia Mecánica.....	37
4. Hidrógeno	40
5. Metodología y diseño experimental	43
6. Análisis experimental.....	49
6.1 Análisis general de resultados.....	53
6.2 Ecopetrol y CDT del gas: Cromatografías del gas de salida	59

7. Relación costo-beneficio.....	65
8. Análisis socioambiental	68
8.1 Reducción de la contaminación	69
8.2 Economía circular sostenible	70
8.3 Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.....	71
8.4 Fomento de la innovación tecnológica	72
8.5 Seguridad energética.....	72
9. Beneficios en la Industria Petrolera	72
9.1 Factibilidad del uso del reactor prototipo como facilidad de superficie	73
Conclusiones	75
Recomendaciones	76
Referencias Bibliográficas	78

Lista de Tablas

Tabla 1.	Comparación de Eficiencia y Costos	39
Tabla 2.	Condiciones operacionales.....	45
Tabla 3.	Resultados de la prueba de BSW previa al reactor prototipo	51
Tabla 4.	Planteamiento de tiempos en el reactor prototipo.....	52
Tabla 5.	Comparativa.....	52
Tabla 6.	Cálculos de media y desviación estándar del BSW % crudo liviano	54
Tabla 7.	Cálculos de media y desviación estándar del BSW % crudo mediano.....	55
Tabla 8.	Cálculos de media y desviación estándar del BSW % crudo pesado	56
Tabla 9.	Resultados cromatografía del gas de salida Ecopetrol.....	60
Tabla 10.	Resultados cromatografía del gas de salida CDT	61
Tabla 11.	Reactor prototipo 2L	65
Tabla 12.	Análisis equipo de electrólisis de 2L	66

Lista de Figuras

Figura 1.	Partes del reactor prototipo	13
Figura 2.	Reactor prototipo	47
Figura 3.	Centrifugadora	47
Figura 4.	Tubos de zanahoria	48
Figura 5.	Baño tèrmico	48
Figura 6.	Hidròmetro	49
Figura 7.	Pruebas iniciales.....	49
Figura 8.	API y centrifugadora.....	50
Figura 9.	Muestras extraídas del reactor	50
Figura 10.	Agitación de muestras extraídas	51
Figura 11.	Resultados BSW (%) en relación con el tiempo.	53
Figura 12.	Comportamiento del BSW % de las muestras de crudo liviano	55
Figura 13.	Comportamiento del BSW % de las muestras de crudo mediano	56
Figura 14.	Comportamiento del BSW % de las muestras de crudo pesado	57
Figura 15.	Resultados cromatografía del gas de salida Ecopetrol.....	61
Figura 16.	Resultados cromatografía del gas de salida con aire CDT	62
Figura 17.	Resultados cromatografía del gas de salida sin aire CDT.....	62

Glosario

Desemulsificación: Proceso de separación de los componentes de una emulsión, normalmente se elaboran por medio de métodos físicos químicos.

BSW: Corresponde al contenido de agua libre y sedimentos que hay en una muestra de hidrocarburos. La fórmula toma el volumen de agua y sedimentos, lo divide por el volumen total y luego multiplica por 100 para obtener el resultado en forma de porcentaje. Esto nos da una medida de qué parte del volumen total consiste en agua y sedimentos.

Emulsión: Mezcla de dos líquidos que normalmente no se mezclarían, como el petróleo y el agua, donde uno de ellos está disperso en forma de gotas pequeñas dentro del otro.

Hidrógeno: Elemento químico principal y el más abundante en la tierra, comúnmente se encuentra como gas incoloro e inflamable. Es importante en el ámbito industrial y energético englobando las celdas de combustible y producción de amoníaco.

Cromatografía: Técnica de separación que utiliza una fase móvil gaseosa para separar y analizar los componentes de una muestra. Se emplea ampliamente en química analítica para identificar y cuantificar compuestos orgánicos en diferentes muestras.

Resumen

Título: Evaluación de la Factibilidad del Rompimiento de Emulsiones Agua - Aceite Utilizando un Reactor de Túneles Cuánticos de Gravedad Elemental^{**}

Autor: Juan Sebastián Camacho Camacho y Adriana Balaguera Daza^{††}

Palabras Clave: Emulsiones, petróleo, desemulsificación, eficiencia, reactor.

Descripción: En el contexto energético y desafiante de la industria petrolera contemporánea, donde la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental se perfilan como imperativos estratégicos, este estudio se sumerge en una problemática de gran relevancia: el rompimiento de emulsiones agua-petróleo. Conscientes de la complejidad de este desafío y de sus implicaciones directas en la rentabilidad y el impacto ambiental de las operaciones petroleras, se propone una aproximación innovadora basada en la aplicación de un reactor prototipo. El objetivo central de esta investigación radica en la evaluación y mejora de la eficiencia en la separación de estas emulsiones, con la meta de reducir de manera significativa los costos operativos asociados y, al mismo tiempo, mitigar los efectos adversos sobre el medio ambiente que genera de manera directa e indirecta la industria del petróleo. Para alcanzar este propósito ambicioso, se ha diseñado una metodología integral que abarca una serie de pruebas experimentales meticulosamente planificadas, así como un análisis de ingeniería detallado y exhaustivo. Este enfoque no solo busca determinar la viabilidad técnica del uso de dicho reactor en la industria petrolera, sino también comprender a fondo su potencial para catalizar una transformación positiva en los procesos industriales y ambientales. Sumado a lo anterior, también se ha llevado a cabo una búsqueda y definición de los conceptos relevantes para llevar a cabo el presente estudio.

^{**} Trabajo de grado.

^{††} Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Dr. Oscar Vanegas Angarita. Especialista en Finanzas.

Abstract

Title: Evaluation of the Feasibility of Breaking Water-Oil Emulsions Using an Elemental Gravity Quantum Tunneling Reactor ^{‡‡}

Author: Juan Sebastián Camacho Camacho and Adriana Balaguera Daza^{§§}

Keywords: Emulsions, oil, demulsification, efficiency, reactor.

Description: In the energetic and challenging context of the contemporary oil industry, where operational efficiency and environmental sustainability are emerging as strategic imperatives, this study delves into a highly relevant problem: the breaking of water-oil emulsions. Aware of the complexity of this challenge and its direct implications on the profitability and environmental impact of oil operations, an innovative approach is proposed based on the application of a prototype reactor. The central objective of this research lies in the evaluation and improvement of the efficiency in the separation of these emulsions, with the goal of significantly reducing the associated operating costs and, at the same time, mitigating the adverse effects on the environment that it generates. directly and indirectly the oil industry. To achieve this ambitious goal, a comprehensive method has been designed that encompasses a series of meticulously planned experimental tests, as well as a detailed and exhaustive engineering analysis. This approach not only seeks to determine the technical feasibility of using such a reactor in the oil industry, but also to fully understand its potential to catalyze a positive transformation in industrial and environmental processes. In addition to the above, a search and definition of the relevant concepts to carry out this study has also been carried out.

^{‡‡} Degree work.

^{§§} Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Dr. Oscar Vanegas Angarita. Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Dr. Oscar Vanegas Angarita. Finance specialist.

Introducción

En el ámbito industrial contemporáneo, la optimización de procesos productivos constituye un imperativo para la eficiencia y sostenibilidad empresarial. El desafío del rompimiento de emulsiones agua-aceite se presenta como un aspecto crítico, con implicaciones directas en la recuperación de petróleo, los costos de producción y la mitigación del impacto ambiental. Este trabajo se centra en evaluar la viabilidad del rompimiento de estas emulsiones mediante un nuevo reactor prototipo.

La problemática principal radica en mejorar la eficiencia en la separación de emulsiones agua-aceite en la industria petrolera. La correcta separación de estos elementos es crucial para la calidad del producto final y para reducir costos operativos y minimizar impactos ambientales negativos. La pregunta de investigación se centra en la capacidad del reactor prototipo de hidrógeno para romper emulsiones de manera eficaz y su contribución a mejorar procedimientos industriales y reducir el impacto ambiental asociado.

Esta investigación se apoya en la importancia estratégica de mejorar los procesos de separación de emulsiones en la industria petrolera. La aplicación exitosa de un nuevo invento de generación de hidrógeno podría representar un avance significativo en la eficiencia de estos procesos, con beneficios tanto económicos como medioambientales. Este trabajo busca ampliar el conocimiento teórico y ofrecer soluciones concretas para desafíos industriales específicos.

.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar la viabilidad de implementar un sistema de rompimiento de emulsiones agua-aceite utilizando un reactor de túneles cuánticos de gravedad elemental a nivel laboratorio.

Objetivos Específicos

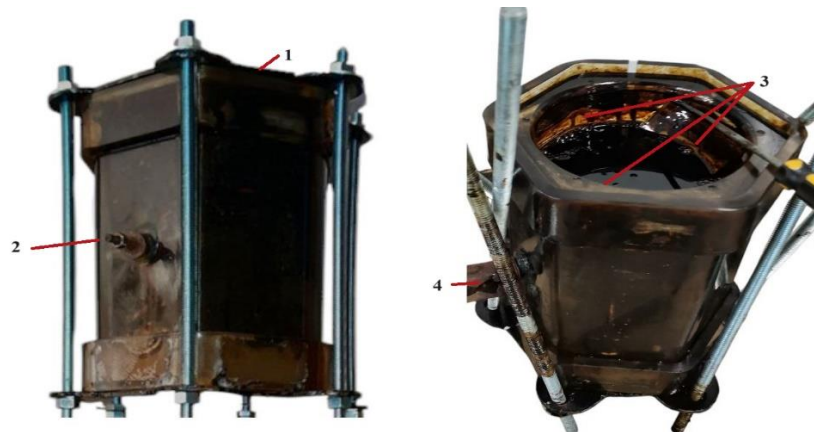
- Describir los procesos convencionales para el rompimiento de emulsiones agua - aceite en la industria petrolera.
- Medir las condiciones operativas, a nivel de laboratorio, y la relación costo - beneficio, para lograr la máxima eficiencia del reactor de túneles cuánticos de gravedad elemental en el proceso de desemulsificación.
- Establecer los beneficios ambientales, sociales e industriales que traería el uso del reactor de túneles cuánticos de gravedad elemental en el proceso de desemulsificación.

1. Reactor cuántico de gravedad elemental

El reactor cuántico de gravedad elemental representa una vanguardista tecnología en el ámbito de la desmulsificación de agua en hidrocarburos y en la producción de hidrógeno económico. Fundamentado en los principios de la física cuántica y la manipulación precisa de campos gravitacionales a nivel subatómico, este dispositivo se erige como un paradigma de eficiencia en la separación de fases dentro de emulsiones complejas, como las emulsiones de agua en crudo.

En el centro de esta innovación yace el generador de campos cuánticos, cuya operación se basa en fenómenos como el túnel cuántico y la superposición. A diferencia de las técnicas convencionales que recurren a tratamientos macroscópicos, este generador incide directamente a escala subatómica, modificando las interacciones intermoleculares que mantienen cohesionadas las moléculas de agua e hidrocarburo. Este proceso induce una disociación selectiva de las uniones moleculares, transformando el agua en hidrógeno y facilitando así su separación del crudo.

Figura 1. Partes del reactor prototipo



Tomado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024

El diseño del reactor cuántico de gravedad elemental incluye diversas partes esenciales, cada una desempeñando funciones críticas para el proceso:

- **Tapa con válvula de expulsión de gas y cavidad de entrada para fluido (1):** Esta tapa permite la entrada controlada del fluido al reactor y la expulsión segura de gases generados durante el proceso, garantizando la seguridad y eficiencia operativa. La cavidad de entrada asegura que el fluido ingrese de manera uniforme, evitando turbulencias que podrían afectar la eficacia del proceso.
- **Válvula de emergencia para expulsión de gas o fluido (2):** Actúa como un mecanismo de seguridad adicional, permitiendo la liberación de gases o fluidos acumulados de manera controlada para evitar sobrepresiones. Esta válvula es crucial para mantener la integridad del sistema durante las operaciones.
- **Sección de placas internas (3):** Las placas internas están estratégicamente posicionadas para manipular el campo gravitacional elemental. Estas placas inducen un incremento en la excitación molecular de las gotas de agua dispersas en el medio hidrocarbonado, promoviendo la formación de fases gaseosas que facilitan su separación. Las placas están diseñadas con precisión para maximizar el contacto y la interacción con las moléculas de agua, optimizando el proceso de desmulsificación. A requerimiento del creador, la correcta posición de las placas para el funcionamiento del reactor prototipo es información confidencial.
- **Alimentación eléctrica 12A; 1 kW/h (4):** Provee la energía necesaria para el funcionamiento del generador de campos cuánticos y las placas internas, asegurando que el reactor opere de manera continua y eficiente. Esta fuente de alimentación es fundamental

para mantener el campo cuántico estable y potente, necesario para la manipulación gravitacional a nivel molecular.

El reactor incorpora un coordinador de gravedad elemental (3), cuya funcionalidad depende de la posición estratégica de sus placas internas. Estas placas manipulan el campo gravitacional elemental de manera precisa, dirigida y enfocada, lo cual se traduce en un incremento notable de la excitación molecular en las gotas de agua dispersas en el medio hidrocarbonado. Ajustando cuidadosamente la configuración de las placas, se logra optimizar la excitación entre las partículas de agua, promoviendo la formación de fases gaseosas que facilitan su separación del crudo de manera eficiente y efectiva.

El uso de este reactor cuántico de gravedad elemental tiene implicaciones profundas en la industria de los hidrocarburos. Su capacidad para desemulsificar agua en crudo y producir hidrógeno de manera económica puede transformar los métodos actuales de procesamiento de hidrocarburos. Además, su enfoque en la manipulación subatómica abre nuevas fronteras en la investigación de materiales y procesos a escala nanométrica, lo cual puede derivar en aplicaciones aún más amplias en el futuro.

En suma, el reactor cuántico de gravedad elemental no solo representa un avance tecnológico significativo, sino que también abre nuevas perspectivas en el campo de la desmulsificación, al combinar los principios avanzados de la física cuántica con la ingeniería aplicada para resolver desafíos complejos en la industria del procesamiento de hidrocarburos.

2. Estado de arte de la Física cuántica aplicada

2.1 Teoría del túnel

Es un proceso instantáneo (no local en el lenguaje cuántico). Ésta es la respuesta que dan quienes creen entender la mecánica cuántica, o en palabras de Richard Feynman, quien admite que no la entienden. Los resultados experimentales confirmaron este resultado teórico. La formación de túneles se produce cuando los electrones pueden atravesar una barrera de potencial, lo cual está prohibido en la física clásica porque los electrones rebotan como pelotas de squash. Esto es posible debido a la naturaleza ondulatoria de los electrones. La mayoría de los dispositivos electrónicos se basan en el efecto túnel. El escaneo es también la base de la microscopía de barrido (STM), que toma imágenes de superficies a nivel atómico (Vitalla, 1997),

Esto puede parecer contradictorio porque la relatividad, nuestra única teoría física de intervalos de tiempo, no nos permite hablar de intervalos de tiempo cero. Ningún proceso puede ocurrir inmediatamente (Roque et al., 2023). Para hacer esto, el proceso debe ser supralumínico (ocurrir más rápido que la velocidad de la luz en el vacío). Los resultados de los experimentos ópticos (que utilizan láseres o microondas) muestran que sí (tales experimentos son difíciles de realizar utilizando electrones) (Ball, 2020).

El efecto túnel es muy simple, pero evita que las señales se envíen más rápido que la velocidad de la luz. Para que podamos "medir" la "bola cuántica" después de que haya atravesado la barrera (instantáneamente), tenemos que esperar un cierto tiempo proporcional a la inversa de la energía de la partícula (la frecuencia de la partícula). La física cuántica es así. No puede "romper" la relatividad. Este tiempo de espera no depende del tipo de esfera (partícula) y del tipo de pared (barrera) y su ancho.

Nimtz era un experto en este tipo de experimentos con fotones y postuló el tiempo necesario para que una onda propagante evanescente (no propagada) apareciera en la pared opuesta, lo que ya permitía realizar mediciones, fotón (reviviendo la teoría de la relatividad de causa y efecto). Este tiempo es proporcional a la inversa de la frecuencia del fotón, que a su vez es proporcional a su energía. Esta analogía óptica "tiene sentido" en el caso cuántico si asumimos que la función de onda es "real" (es una oscilación de "algo"). Sin embargo, la realidad de la función de onda es un tema muy debatido en la mecánica cuántica y, según la interpretación estándar, la función de onda es sólo una herramienta matemática para ayudarnos a comprender ciertos resultados experimentales (Franco, 2021).

Según el efecto túnel, las partículas subatómicas (por ejemplo, los electrones) podrán "saltar" a través de determinadas barreras energéticas, pero no habrá suficiente energía para superarlas según las leyes de la física clásica. Quizás este adjetivo sea uno de los que mejor define la cuántica, una disciplina que desafía nuestras percepciones del mundo que nos rodea, planteando interrogantes sobre lo que realmente hacemos y no entendemos. Un fenómeno muy típico en esta rama de la física -y uno de los más curiosos y atractivos por su singular naturaleza- es el efecto túnel, un método que permite a las partículas "saltar" o "atravesar" obstáculos según las leyes clásicas (Roque et al., 2024).

Sin embargo, lo más fascinante es que, aunque este efecto pueda sonar a ciencia ficción o algo que pertenezca a la historia de una nave espacial saltando de un punto a otro a través de una barrera invisible, el fenómeno no sólo es real, sino también real. El efecto túnel fue uno de los primeros conceptos de la mecánica cuántica que surgió en los años 20 a partir de las investigaciones de figuras tan importantes como Max Born, Werner Heisenberg o Erwin Schrödinger, que estudiaron la naturaleza ondulatoria de los átomos subatómicos.

El físico Friedrich Hund acuñó el término "tunelización" en 1927 para describir cómo las partículas pueden atravesar una barrera potencial si no tienen suficiente energía clásica para superarla, violando así las leyes tradicionales de la física. El efecto túnel ha sido el foco de la investigación experimental y teórica durante décadas, y experimentos clave, incluidos los experimentos de barrera potencial de Brian Josephson en la década de 1960, demostraron que los pares de electrones pueden atravesar barreras potenciales sin perder energía, lo que confirma el efecto túnel. Fue este experimento el que confirmó la existencia del efecto túnel y lo estableció como uno de los elementos fundamentales de la ciencia cuántica (Patiño, 2007).

Ahora, el estudio del efecto túnel sigue desarrollándose con el tiempo y se enriquece con las aportaciones de numerosos científicos y físicos teóricos. La construcción de túneles se considera un fenómeno ubicuo y versátil, desde la comprensión de los procesos del núcleo estelar hasta sus aplicaciones en electrónica y nanotecnología (Roque et al., 2021). Las aplicaciones prácticas son muy amplias y variadas y cubren un espectro muy amplio. Por ejemplo, una de las aplicaciones más importantes de la tunelización es el diseño de componentes electrónicos y conductores, que utilizan la tunelización cuántica para producir cambios repentinos en la corriente eléctrica que permiten una conmutación más rápida y eficiente que los dispositivos tradicionales.

Este es un fenómeno muy importante en el estudio y manipulación de estructuras a nanoescala, especialmente utilizando microscopía de efecto túnel (STM). Como resultado, STM utiliza el efecto túnel para sondear y visualizar superficies a nivel atómico, lo que ha llevado a avances significativos en la comprensión y el diseño de materiales y dispositivos a nanoescala. También es muy importante en la fabricación y manipulación de nanodispositivos como los nanotubos de carbono o los puntos cuánticos. Incluso en el ámbito médico, el efecto túnel es perceptible y se empieza a estudiar su aplicación en el diagnóstico y tratamiento. Por ejemplo, la

resonancia magnética de túneles (TQMR) es una tecnología que utiliza túneles para mejorar la sensibilidad y precisión de las imágenes médicas, lo que permite la detección temprana de enfermedades y afecciones médicas, incluso con una resolución sin precedentes.

2.2 Superposición cuántica

Es bien sabido que uno de los mayores desafíos epistemológicos y ontológicos de la mecánica cuántica es su enorme distancia de la física anterior. La descripción del mundo físico proporcionada por la teoría, así como la naturaleza de los fenómenos estudiados en ella, no se corresponde en absoluto con las condiciones lógicas y ontológicas de la física clásica, sino que, por el contrario, parece invalidar estas condiciones: El principio de identidad se asigna, entre otras cosas, al surgimiento de relaciones causales, los procesos naturales se introducen aleatoriamente en los factores de comportamiento y las condiciones de incertidumbre se vuelven ubicuas (Wilson et al., 2024).

El problema con los objetos cuánticos (y el motivo de la duda) es que la entidad no se puede describir en el marco de la física clásica, es decir, los objetos cuánticos no se comportan normalmente y no se pueden entender con la ayuda de la intuición ordinaria. Este objeto sólo puede resolverse a partir de la descripción del mundo proporcionada por la mecánica cuántica, y se vuelve no convencional al introducir dos factores ontológicamente problemáticos inherentes al formalismo de esta teoría y a la descripción de la realidad física: las relaciones de superposición y de incertidumbre. Estos dos elementos representan los dos pilares fundamentales sobre los que descansan la mayoría de las discusiones sobre las propiedades ontológicas de los objetos cuánticos.

En primer lugar, hay que entender qué significa la superposición como característica de la mecánica cuántica. Según la física clásica y el sentido común, un objeto tiene determinadas

propiedades que constituyen su esencia (no puede poseer y no poseer simultáneamente una propiedad). Dado que hablar de "objetos con propiedades" es un poco trillado, los físicos creen que es más correcto hablar de "estados". En este sentido, un objeto con sus propiedades no es más que un "sistema en un estado con ciertos valores". Pero en un sistema cuántico no hay estados definidos, sino combinaciones de estados que conforman "estados posibles". En el caso cuántico, esto se llama "superposición" (por ejemplo, en el famoso "experimento de Gerdanken" del gato de Schrödinger, el gato está en una superposición vivo/muerto) (Alfonso, 2022).

Intuitivamente, se puede ver que la condición de superposición en los sistemas cuánticos es ontológicamente problemática, ya que resulta que las entidades cuánticas tienen y no tienen propiedades. Esta pregunta plantea la cuestión de si los estados superposicionales existen en la naturaleza como un estado objetivo, aunque sea difícil de observar (lo que sería epistemológicamente equivalente a alcanzar el límite de nuestro conocimiento), o si los estados superposicionales se convierten en un estado porque carecen de los conocimientos teóricos provisionales y necesarios (Martínez et al., 2023). Los intentos de resolver este problema se ofrecen mediante algunas interpretaciones estadísticas y de variables latentes, que verían problemas epistemológicos más que ontológicos en el estado de superposición. Según estas explicaciones, la mecánica cuántica no estudia un único sistema, sino una "colección" de sistemas. Aquí, la superposición es simplemente el estado en el que existe un conjunto o conjunto de sistemas cuyos estados individuales no pueden conocerse de la misma manera que en la mecánica estadística clásica debido a las limitaciones cognitivas.

Pero una propiedad conocida como correlación cuántica, teorizada por el teorema de Cohen-Speck, plantea un fuerte obstáculo para estas explicaciones. La interpretación estadística y de variables latentes, en un sentido muy general, afirma que todos los observables (propiedades)

de un sistema determinado determinan simultáneamente valores preexistentes. Por sí sola, la situación cuántica dice que hay observables en un sistema cuántico que adoptan ciertos valores, pero sólo en ciertos contextos. En este sentido, es imposible que todas las observaciones de un sistema cuántico tengan valores definidos al mismo tiempo. De esta forma, la superposición deja de ser una limitación puramente cognitiva, sino que adquiere connotaciones ontológicas en cada sistema individual.

Según algunas interpretaciones, la superposición no es el estado actual del sistema, sino que representa la probabilidad objetiva de que el observable actualice su valor. Esto se debe a que la función de onda, que proporciona toda la información sobre un sistema cuántico, informa sobre posibilidades en el sentido de "tendencias". Las interpretaciones modales de la teoría cuántica (van Fraassen, Dieks, Lombardi y Castagnino) adoptan esta posición, asumiendo que los estados de un sistema asignan probabilidades a "propiedades posibles". Desde un punto de vista ontológico, esto significa que a nivel cuántico la realidad ya no es "real" sino posible, lo que convierte a los objetos cuánticos en "entidades posibles" (Rodríguez, 2023).

Esta idea aparentemente fantasiosa será criticada en la interpretación de "muchos mundos" de la mecánica cuántica. Aquí la función de onda tiene un campo de aplicación general, de modo que el universo se compone de varios mundos, cada uno de los cuales actualiza uno de los conceptos de superposición. Así como se dan explicaciones estadísticas o de variables ocultas, la superposición de esta explicación es una condición que se aplica sólo a todo el universo, que consta de varios mundos. En cada mundo individual y concreto los observables tienen valores definidos y la superposición desaparece. Ontológica y epistemológicamente, según esta perspectiva única, sólo podemos saber lo que ya está "actualizado" en un mundo dado y lo que existe "potencialmente" en otro u otros mundos.

Por otro lado, sin la condición de superposición cuántica, otro problema es el índice de incertidumbre. Como característica de la mecánica cuántica, el principio de incertidumbre establece que en un sistema dado hay pares de propiedades a las que no se les pueden asignar valores definidos simultáneamente. Se puede dar una descripción sistemática y completa en el marco de la física clásica. Este no es un problema ontológico, ya que es precisamente esta "descripción completa" la que nos permite definir ontológicamente el sistema. Sin embargo, en la teoría cuántica, las entidades sólo tienen propiedades "posibles", que no están determinadas clásicamente, porque su simultaneidad determinada es imposible. Según el principio de incertidumbre, un sistema tiene observables (como posición y momento lineal) que son incompatibles entre sí, y la determinación del valor de la propiedad no permite definir el valor de la propiedad en la formalización de propiedades. Las interpretaciones estadísticas y de variables latentes muestran nuevamente que las relaciones de incertidumbre plantean un problema epistémico más que ontológico. Tal familia de explicaciones argumentaría que la incapacidad de asignar valores específicos a observaciones incompatibles se debe a una total ignorancia del conocimiento del sistema.

3. Mecanismos de desemulsificación en la industria petrolera

En la producción de petróleo, la presencia de agua causa problemas porque, entre otras cosas, reduce la eficiencia del proceso de transferencia de calor. Además, la emulsión de agua en petróleo crudo contiene sales corrosivas que pueden provocar depósitos en las tuberías de transporte y las instalaciones de refinación, afectando la economía del proceso. La producción de petróleo no se puede separar de la extracción de agua, lo que afecta en gran medida el transporte de fluidos, ya que las emulsiones formadas son muy estables debido a la presencia de tensioactivos naturales como asfáltenos, resinas y naftenos (Acosta y Cristancho, 2018).

Se sabe que los asfáltenos estabilizan las emulsiones de agua en petróleo crudo formando una "piel" rígida y mecánicamente fuerte similar a un gel en la interfaz líquido-líquido, lo que dificulta la coalescencia y ralentiza el flujo de salida de las membranas existentes. Se sabe que los asfáltenos precipitan después de desemulsificarse y forman depósitos que pueden provocar obstrucciones en algunos casos. Este es quizás uno de los problemas más indeseables que enfrenta la producción de petróleo, causando problemas de flujo y por supuesto aumentando los costos operativos. La desemulsificación es el proceso de romper una emulsión separando el agua del petróleo crudo, pero a medida que aumenta el contenido de asfaltenos del petróleo crudo y disminuye el grado API, este proceso se vuelve más difícil (Utria, 2017)

Dependiendo del tipo de petróleo crudo, existen diferentes tipos de procesos de desemulsificación a saber: proceso de desemulsificación química, proceso de desemulsificación térmica, proceso de desemulsificación mecánica y proceso de desemulsificación eléctrica. Este trabajo se centra en la aplicación de la desemulsificación química, que se refiere a la adición de ciertas sustancias que pueden separar emulsiones en sus fases de formación a través de diferentes mecanismos. Estas sustancias suelen añadirse en concentraciones entre 1 y 1000 ppm para promover la separación de fases mediante un mecanismo conocido como reducción de la tensión interfacial. Actualmente, la selección del desemulsionante adecuado para cada tipo de crudo se realiza mediante los llamados tests de botella (Perez, 2020). La prueba implica determinar los efectos de separación de los productos químicos agregados a una emulsión conocida en condiciones de volumen, temperatura y mezcla controladas. Al controlar variables como la temperatura y la mezcla (que están relativamente controladas), se puede concluir que el efecto de desemulsificación (mostrado por evidencia visual) está relacionado con la desemulsión de las sustancias agregadas a la emulsión.

En la industria de los hidrocarburos, la efectividad de los desemulsificantes está directamente relacionada con el tipo de petróleo crudo y su estructura química activa. Esta última evaluación es el objetivo de este trabajo. Tradicionalmente, los desemulsificantes son tensioactivos cuya eficacia está relacionada con la propiedad del equilibrio hidrofílico-lipofílico (HLB), que caracteriza en parte su afinidad por los componentes de la emulsión (agua y aceite) y permite evaluar su desemulsión. Sin embargo, el HLB tiene varias desventajas, tales como: no tiene en cuenta los efectos de la temperatura, la salinidad, la concentración de surfactante o la naturaleza de los grupos hidrofóbicos. Además, no es exacto al evaluar diferentes grupos de tensioactivos y en realidad sólo es aplicable a tensioactivos iónicos (Amado y Mayorga, 2021).

Los desemulsificantes son formulaciones químicas especializadas que pueden incluir sustancias naturales como resinas, así como ácidos y bases orgánicos, diseñadas para desestabilizar y romper emulsiones. Los aditivos como los aditivos químicos para controlar la corrosión, incrustaciones, etc. son rupturas de emulsión en las fases de aceite y agua (Lemoine y Elaine, 2020). Desde el punto de vista del proceso, dos aspectos de la desemulsificación son de interés para los productores de petróleo crudo: la cantidad de agua que queda en el petróleo crudo después de la separación, el contenido de BS&W por mil barriles de petróleo crudo (PTB), que generalmente es limitado; 0,5% y el contenido de sal no debe exceder las 10 libras. Se requiere un bajo contenido de BS&W y sal para minimizar la corrosión y la deposición de sal.

El proceso de desemulsificación se lleva a cabo en dos etapas: la primera etapa es la floculación (o agregación, aglomeración) y la segunda etapa es la coalescencia. Cualquiera de estos pasos puede determinar la velocidad del proceso de separación. Con diferencia, el método más común para procesar emulsiones es el uso de aditivos químicos llamados desemulsionantes o desemulsionantes. Estos productos químicos están diseñados para contrarrestar los efectos

emulsionantes de los estabilizadores de emulsión (Abad, 2015). Los desemulsionantes son compuestos tensioactivos que, cuando se agregan a las emulsiones, migran a la interfaz petróleo crudo/agua, alteran o debilitan las membranas sólidas y mejoran la coalescencia de las gotas de agua.

Los procedimientos de prueba para seleccionar un desemulsionante adecuado incluyen pruebas en botellas, simuladores dinámicos y pruebas de campo reales. La dosificación de productos químicos desemulsionantes también es importante, ya que cantidades muy pequeñas mantendrán la emulsión intacta; sin embargo, dosis muy altas (tratamiento excesivo) pueden afectar negativamente al proceso de tratamiento, ya que los desemulsionantes también son tensioactivos, p.e. (Rojas y Sohira, 2021).

Cuando se trabaja con emulsiones de petróleo crudo pesado y emulsiones producidas por la extracción de petróleo terciario, especialmente con inyecciones de surfactante, las tasas de inyección a menudo alcanzan miles de ppm en casos extremos. Los desemulsionantes suelen ser específicos para una emulsión particular y pueden ser completamente ineficaces para otra emulsión. Dado que el petróleo crudo contiene muchos componentes diferentes, no es sorprendente que la efectividad de un desemulsificante en particular sea sensible al tipo de petróleo crudo, a los procesos de adsorción y transferencia, así como al pH, la salinidad y la temperatura.

3.1 Procesos Convencionales para el Rompimiento de Emulsiones en la Industria Petrolera

3.1.1 Tratamiento Térmico

El tratamiento térmico es uno de los métodos más utilizados y efectivos para romper emulsiones en la industria petrolera. Este proceso consiste en aplicar calor al crudo emulsionado, lo cual reduce la viscosidad del aceite y facilita la coalescencia de las gotas de agua. Al aumentar

la temperatura, las fuerzas de atracción entre las moléculas de agua incrementan, promoviendo la formación de gotas más grandes que pueden separarse más fácilmente de la fase oleosa.

Equipos Utilizados

- a. **Calentadores de Tanque:** Los calentadores de tanque son dispositivos que utilizan quemadores o intercambiadores de calor para elevar la temperatura del crudo en tanques de almacenamiento. Estos sistemas suelen ser empleados en instalaciones donde el crudo se almacena antes de ser procesado o transportado. El crudo se introduce en un tanque equipado con un sistema de calentamiento. Los quemadores generan calor mediante la combustión de gas o petróleo, o mediante el uso de intercambiadores de calor que transfieren calor desde una fuente externa (como vapor o aceite caliente). El calor se distribuye uniformemente en el tanque, aumentando la temperatura del crudo y reduciendo su viscosidad.
- b. **Intercambiadores de Calor de Tubería:** Los intercambiadores de calor de tubería calientan el crudo en flujo continuo, utilizando intercambiadores de calor de carcasa y tubo. Este tipo de equipo es ideal para procesos en línea donde el crudo se transporta continuamente a través de la planta de procesamiento. El crudo emulsionado se bombea a través de tubos internos de un intercambiador de calor, mientras que el fluido de calentamiento (como vapor o aceite caliente) circula por la carcasa externa. El calor se transfiere desde el fluido de calentamiento al crudo, elevando su temperatura y facilitando la separación de las fases.

Proceso convencional

- **Preparación del Crudo:** Antes del tratamiento térmico, el crudo puede ser pretratado mediante la adición de desemulsionantes químicos para mejorar la eficiencia del rompimiento de la emulsión.
- **Calentamiento Inicial:** El crudo se calienta inicialmente a una temperatura moderada para reducir su viscosidad y facilitar su bombeo a través del sistema de tratamiento.
- **Tratamiento en Calentadores de Tanque o Intercambiadores de Calor:** Dependiendo del equipo utilizado, el crudo se somete a un calentamiento más intenso. En los calentadores de tanque, el crudo se mantiene a una temperatura elevada durante un tiempo determinado. En los intercambiadores de calor, el crudo fluye continuamente mientras se calienta.
- **Separación de Fases:** Una vez calentado, el crudo emulsionado se transfiere a tanques de separación donde se permite que las gotas de agua coalescen y se separen de la fase oleosa por gravedad.
- **Enfriamiento y Almacenamiento:** El crudo tratado puede enfriarse antes de su almacenamiento o transporte para garantizar la seguridad y estabilidad del producto.

Consideraciones Operativas

- **Control de Temperatura:** Es crucial mantener la temperatura dentro de un rango óptimo para evitar la degradación térmica del crudo y garantizar una separación eficiente de las fases.

- **Mantenimiento Regular:** Los equipos de calentamiento, especialmente los intercambiadores de calor requieren mantenimiento regular para prevenir la formación de depósitos que puedan reducir la eficiencia térmica.
- **Seguridad y Medio Ambiente:** La operación segura de los sistemas de calentamiento y el control de las emisiones son esenciales para minimizar el impacto ambiental y garantizar la seguridad de los trabajadores.

Ventajas y Desventajas

- **Ventajas:** Eficiente para grandes volúmenes de crudo, fácil de implementar.
- **Desventajas:** Alto consumo de energía, posible degradación térmica del crudo.

3.1.2 Uso de Desemulsionantes Químicos

Los desemulsionantes químicos son aditivos utilizados para desestabilizar las emulsiones agua-aceite y facilitar la separación de las fases. Estos compuestos químicos se añaden al crudo emulsionado, donde actúan interfiriendo con los agentes estabilizadores presentes en la emulsión, como asfáltenos y resinas, y promoviendo la coalescencia de las gotas de agua.

Tipos de Desemulsionantes

- a. **Desemulsionantes No Iónicos:** Los desemulsionantes no iónicos son moléculas que no poseen carga eléctrica. Estos compuestos son especialmente efectivos para tratar emulsiones inversas, donde las gotas de agua están dispersas en una fase continua de aceite. Generalmente, los desemulsionantes no iónicos están basados en compuestos como los poliglicoles, alquifenoles y sus derivados. Actúan reduciendo la tensión interfacial entre las gotas de agua y el aceite, permitiendo que las gotas de agua se unan y formen gotas más

grandes que se pueden separar más fácilmente. Utilizados en una amplia variedad de crudos, especialmente aquellos con alto contenido de asfáltenos y resinas.

- b. **Desemulsionantes Catiónicos y Aniónicos:** Los desemulsionantes catiónicos y aniónicos son moléculas cargadas positivamente (catiónicos) o negativamente (aniónicos). Estos compuestos se seleccionan en función de la química específica del crudo y las características de la emulsión. Los desemulsionantes catiónicos, basados en sales de amonio cuaternario y otros compuestos cargados positivamente, interactúan con partículas cargadas negativamente en la emulsión, neutralizando las cargas y promoviendo la coalescencia de las gotas de agua. Son efectivos en crudos con altas concentraciones de arcillas y partículas cargadas negativamente. Por otro lado, los desemulsionantes aniónicos, basados en sulfonatos y otros compuestos cargados negativamente, neutralizan partículas cargadas positivamente en la emulsión, facilitando la separación de fases. Estos son utilizados en crudos con altas concentraciones de sales y partículas cargadas positivamente.

Proceso convencional

- **Selección del Desemulsionante:** La elección del desemulsionante adecuado se basa en la caracterización de la emulsión y la química del crudo. Se realizan pruebas de laboratorio para determinar el tipo y la concentración óptima del desemulsionante.
- **Preparación y Dosificación:** El desemulsionante seleccionado se prepara y se dosifica en el flujo de crudo emulsionado. La dosificación se puede realizar mediante bombas dosificadoras que aseguran una adición controlada y continua del químico.

- **Mezcla y Contacto:** El crudo con desemulsionante se mezcla adecuadamente para asegurar un contacto íntimo entre el desemulsionante y las gotas de agua. Esto se puede lograr mediante agitadores mecánicos o mediante turbulencia en la línea de flujo.
- **Separación de Fases:** Después de la mezcla, el crudo emulsionado se transfiere a tanques de separación o separadores donde se permite que las gotas de agua coalescidas se asienten por gravedad. En algunos casos, se puede aplicar calor adicional para mejorar la eficiencia de separación.
- **Recuperación de Agua y Aceite:** El agua separada se extrae y se trata adecuadamente antes de su disposición o reutilización. El crudo tratado, con un contenido de agua significativamente reducido, se almacena o se envía para su procesamiento posterior.

Ventajas y Desventajas

- **Ventajas:** Eficaz para una amplia gama de crudos, fácil de dosificar.
- **Desventajas:** Costos adicionales de productos químicos, posible impacto ambiental.

3.1.3 Separación Gravitacional

La separación gravitacional es un método sencillo y ampliamente utilizado en la industria petrolera para romper emulsiones agua-aceite. Este proceso se basa en la diferencia de densidad entre el agua y el aceite, permitiendo que las fases se separen por asentamiento debido a la gravedad. A pesar de su simplicidad, es un método eficaz para ciertas aplicaciones y puede ser combinado con otros métodos para mejorar la eficiencia de separación.

Equipos Utilizados

- a. **Tanques de Asentamiento:** Los tanques de asentamiento son grandes recipientes donde el crudo emulsionado se deja reposar durante un periodo de tiempo para permitir que las fases se separen por gravedad. El principio de funcionamiento se basa en que el crudo emulsionado se introduce en el tanque y se deja reposar; debido a la diferencia de densidad, las gotas de agua más densas comienzan a asentarse en el fondo del tanque, mientras que el aceite, siendo menos denso, se acumula en la parte superior. Los tanques de asentamiento pueden variar en tamaño y forma, pero generalmente son cilindros verticales o horizontales con capacidad para manejar grandes volúmenes de crudo. Pueden incluir elementos internos como deflectores para mejorar la distribución del crudo y la eficiencia de separación. El tiempo de residencia necesario para una separación efectiva puede variar dependiendo de la estabilidad de la emulsión y las condiciones operativas; además, la temperatura del crudo también puede ser controlada para mejorar la eficiencia de separación.
- b. **Separadores de Gotas:** Los separadores de gotas son dispositivos internos que se instalan dentro de los tanques de asentamiento o en línea para mejorar la eficiencia de separación al facilitar la coalescencia de las gotas de agua. El principio de funcionamiento se basa en el uso de materiales con propiedades coalescentes que atrapan y fusionan las gotas de agua, formando gotas más grandes que se asientan más rápidamente. Los diseños pueden incluir placas, mallas o elementos de varios materiales que promueven la coalescencia, y están diseñados para maximizar el área de contacto entre las gotas de agua y el material coalescente. Los separadores de gotas pueden ser instalados en diferentes puntos del

sistema de separación, incluyendo la entrada de los tanques de asentamiento o como parte de unidades separadas en línea.

Proceso convencional

- **Ingreso del Crudo Emulsionado:** El crudo emulsionado se introduce en el tanque de asentamiento a través de una entrada diseñada para minimizar la turbulencia y favorecer una distribución uniforme.
- **Asentamiento por Gravedad:** El crudo se deja reposar durante un periodo determinado, permitiendo que las gotas de agua más densas se asienten en el fondo del tanque mientras el aceite se acumula en la parte superior.
- **Separación de Fases:** El agua separada se extrae del fondo del tanque a través de válvulas de drenaje, mientras que el aceite tratado se recoge en la parte superior y se retira para su procesamiento posterior.
- **Uso de Separadores de Gotas:** En caso de utilizar separadores de gotas, estos dispositivos coalescentes facilitan la formación de gotas de agua más grandes que se asientan más rápidamente, mejorando la eficiencia del proceso.

Ventajas y Desventajas

- **Ventajas:** Bajo costo operativo, no requiere energía adicional.
- **Desventajas:** Lento, no eficaz para emulsiones muy estables.

3.1.4 Centrifugación

La centrifugación es un método de separación que utiliza la fuerza centrífuga para acelerar la separación de las fases en emulsiones agua-aceite. Este proceso se basa en la aplicación de una velocidad de rotación alta, que genera una fuerza centrífuga que separa las fases basándose en sus

diferencias de densidad. La centrifugación es especialmente útil para emulsiones estables o de alta viscosidad que no pueden ser fácilmente separadas por métodos gravitacionales.

Equipos Utilizados

- a. **Centrífugas Decantadoras:** Las centrífugas decantadoras son equipos que utilizan una alta velocidad de rotación para separar las fases en emulsiones agua-aceite. Funcionan mediante la introducción del crudo emulsionado en un tambor giratorio, donde la fuerza centrífuga generada por la rotación separa las fases basándose en sus diferencias de densidad. Las gotas de agua, siendo más densas, se desplazan hacia las paredes del tambor, mientras que el aceite, menos denso, se acumula en el centro. Estos equipos están diseñados con tambores cilíndricos o cónicos que giran a alta velocidad y permiten la extracción continua de las fases separadas. Las centrífugas decantadoras son capaces de manejar grandes volúmenes de crudo y proporcionan una separación eficiente en un tiempo relativamente corto.
- b. **Centrífugas de Disco:** Las centrífugas de disco son equipos especializados que utilizan discos giratorios para mejorar la eficiencia de separación en emulsiones agua-aceite. Estas centrífugas incorporan discos apilados dentro del tambor giratorio, creando un campo de fuerza centrífuga adicional que facilita la separación de las fases y la eliminación de partículas sólidas en suspensión. Las gotas de agua y los sólidos se concentran entre los discos, donde se fusionan y se separan más eficientemente. El tambor de la centrífuga de disco está equipado con discos cónicos o planos que giran a alta velocidad, optimizando el proceso de separación. Estos equipos son especialmente útiles para tratar emulsiones que contienen sólidos y proporcionan una separación más efectiva en comparación con las centrífugas decantadoras en ciertos casos.

Proceso convencional

- **Preparación del Crudo:** Antes de la centrifugación, el crudo emulsionado puede ser pretratado para ajustar su viscosidad y mejorar la eficiencia de separación.
- **Alimentación del Crudo:** El crudo emulsionado se introduce en la centrífuga a través de un sistema de alimentación que asegura una distribución uniforme dentro del tambor giratorio.
- **Separación por Centrifugación:** La alta velocidad de rotación crea una fuerza centrífuga que separa las fases basándose en sus diferencias de densidad. En las centrífugas decantadoras, el aceite menos denso se acumula en el centro del tambor, mientras que las gotas de agua más densas se desplazan hacia las paredes. En las centrífugas de disco, los discos giratorios facilitan la separación adicional de partículas sólidas y gotas de agua.
- **Extracción de Fases:** Las fases separadas se extraen a través de diferentes salidas: el aceite tratado se recoge y se dirige al siguiente paso en el procesamiento, mientras que el agua y los sólidos se extraen de manera separada.
- **Mantenimiento y Control:** Se realizan controles regulares de operación y mantenimiento para asegurar el funcionamiento eficiente del equipo y la calidad del crudo separado.

Ventajas y Desventajas

- **Ventajas:** Rápido y eficiente, especialmente para emulsiones estables.
- **Desventajas:** Alto costo de inversión y mantenimiento, consumo de energía.

3.1.5 Tratamiento Eléctrico

El tratamiento eléctrico es un método que utiliza campos eléctricos para inducir la coalescencia de gotas de agua dispersas en el aceite, facilitando así la separación de las fases en emulsiones agua-aceite. Este proceso se basa en la aplicación de un campo eléctrico que afecta a las gotas de agua, haciéndolas atraer unas a otras para formar gotas más grandes que puedan separarse más fácilmente por gravedad o mediante otros métodos de separación.

Equipos Utilizados

- a. Deshidratadores Electroestáticos:** Los deshidratadores electroestáticos son equipos especializados en el tratamiento eléctrico diseñados para generar campos eléctricos que promueven la separación de fases en emulsiones agua-aceite. Estos equipos funcionan utilizando placas o electrodos para crear un campo eléctrico en el flujo de crudo emulsionado. Las gotas de agua, al tener una mayor polaridad en comparación con el aceite, se cargan eléctricamente bajo la influencia del campo, lo que induce su coalescencia y formación de gotas más grandes que se separan con mayor facilidad. El campo eléctrico puede ser continuo o alterno, según las características de la emulsión y el diseño del equipo. Los deshidratadores electroestáticos suelen contar con una serie de placas paralelas o electrodos dispuestos en una cámara de flujo, donde el crudo pasa a través de este campo, y mecanismos para recolectar y eliminar el agua coalescida. Durante la operación, el crudo emulsionado es alimentado al equipo, las gotas de agua coalescidas se separan de la fase oleosa y se recogen para su tratamiento, mientras que el aceite tratado se dirige al procesamiento adicional. Entre sus ventajas, el tratamiento eléctrico es altamente eficiente en la coalescencia de gotas de agua, es adecuado para grandes volúmenes de crudo y puede reducir la necesidad de desemulsionantes

químicos. Sin embargo, presenta desventajas como el alto costo de inversión inicial, la necesidad de estrictas medidas de seguridad eléctrica y el requerimiento de mantenimiento especializado para asegurar el funcionamiento del sistema eléctrico y la integridad de los electrodos.

Proceso convencional

- **Preparación del Crudo:** Antes del tratamiento eléctrico, el crudo emulsionado puede ser pretratado para ajustar su viscosidad y mejorar la eficiencia de la separación.
- **Alimentación al Deshidratador:** El crudo emulsionado se alimenta al deshidratador electrostático a través de un sistema de entrada diseñado para asegurar una distribución uniforme del flujo.
- **Aplicación del Campo Eléctrico:** En el deshidratador, el crudo emulsionado pasa a través de un campo eléctrico generado por las placas o electrodos. Las gotas de agua se cargan eléctricamente y comienzan a coalescerse debido a la influencia del campo.
- **Coalescencia y Separación:** Las gotas de agua coalescidas forman gotas más grandes que se separan por gravedad o mediante otros métodos. El agua separada se acumula y se recoge en una sección de drenaje, mientras que el aceite tratado se extrae para su procesamiento adicional.
- **Mantenimiento y Seguridad:** Se realizan controles regulares y mantenimiento especializado para asegurar el funcionamiento eficiente del sistema eléctrico y la seguridad operativa del equipo. También se implementan medidas de seguridad para manejar los riesgos eléctricos asociados con el proceso.

Ventajas y Desventajas

- **Ventajas:** Alta eficiencia, adecuado para grandes volúmenes de crudo.
- **Desventajas:** Alto costo de inversión, requerimientos de seguridad eléctrica.

3.1.6 Filtración y Coalescencia Mecánica

La filtración y coalescencia mecánica son métodos utilizados para separar las fases en emulsiones agua-aceite mediante el uso de materiales filtrantes y coalescedores. Estos métodos se centran en la remoción de gotas de agua y partículas sólidas del crudo, facilitando la separación de las fases por la formación de gotas más grandes que se pueden eliminar fácilmente.

Equipos Utilizados

- a. **Filtros Coalescedores:** Los filtros coalescedores son equipos diseñados para separar las gotas de agua dispersas en el crudo emulsionado mediante la captura y fusión de estas gotas en gotas más grandes que se pueden eliminar fácilmente. Funcionan mediante materiales filtrantes especiales que actúan como superficies para que las gotas de agua se agrupen y coaleszcan. Estos filtros constan de varias capas de material fibroso o poroso dispuestas en un cartucho o elemento filtrante. A medida que el crudo emulsionado fluye a través del filtro, las gotas de agua se capturan y se fusionan, acumulándose en gotas mayores que luego se separan por gravedad o se eliminan mediante otros métodos. Durante la operación, el crudo pasa a través del filtro coalescedor, y las gotas de agua coalescidas se eliminan a través de un sistema de drenaje, mientras que el aceite tratado continúa hacia el siguiente proceso. Este método ofrece alta eficiencia en la separación y puede reducir la necesidad de químicos adicionales, aunque puede implicar costos de mantenimiento y una inversión inicial significativa.

- b. **Filtros de Membrana:** Los filtros de membrana utilizan una membrana semipermeable para separar partículas finas y gotas de agua del crudo emulsionado. Estos filtros están diseñados con membranas fabricadas de materiales como poliamida, polietileno o cerámica, que permiten el paso de líquidos mientras retienen partículas y gotas mayores que el tamaño de los poros de la membrana. El crudo emulsionado pasa a través de la membrana, donde las gotas de agua y partículas sólidas quedan retenidas en la superficie o dentro de los poros, mientras que el aceite filtrado continúa fluyendo a través de la membrana. Los filtros de membrana pueden tener diferentes configuraciones, como membranas planas, tubulares o de fibra hueca, y requieren un sistema de recirculación para mantener la eficiencia del filtro. Aunque estos filtros ofrecen una separación precisa y son efectivos en la eliminación de partículas finas, pueden presentar costos iniciales elevados y requerir un mantenimiento regular para asegurar su rendimiento óptimo.

Proceso convencional

- **Preparación del Crudo:** Antes de la filtración, el crudo emulsionado puede ser pretratado para ajustar su viscosidad y mejorar la eficiencia del proceso de separación.
- **Alimentación al Filtro:** El crudo emulsionado se alimenta al filtro coalescedor o de membrana a través de un sistema de entrada diseñado para asegurar una distribución uniforme del flujo.
- **Filtración y Coalescencia:** El crudo pasa a través del material filtrante, donde las gotas de agua se capturan y coalescen en gotas más grandes. Las gotas de agua coalescidas se separan y se eliminan a través de un sistema de drenaje (filtros coalescedores). El crudo pasa a través de la membrana, que retiene las gotas de

agua y partículas sólidas. El aceite filtrado continúa fluyendo a través de la membrana, mientras que las gotas de agua y partículas son retenidas (filtros de membrana)

- **Eliminación de Fases:** Las fases separadas se recogen y se tratan adecuadamente. El aceite tratado se dirige al siguiente paso en el procesamiento, mientras que el agua y las partículas retenidas son gestionadas de acuerdo con las regulaciones ambientales.
- **Mantenimiento y Control:** Se realizan controles regulares y mantenimiento de los filtros para asegurar el funcionamiento eficiente y prolongar la vida útil del equipo.

Ventajas y Desventajas

- **Ventajas:** Eficientes para pequeñas cantidades de emulsiones, flexibles en términos de diseño.
- **Desventajas:** Requieren reemplazo y mantenimiento regular, no adecuados para grandes volúmenes de crudo.

Tabla 1. Comparación de Eficiencia y Costos

Método	Eficiencia	Costo Operativo	Comentarios
Tratamiento Térmico	Alta	Alto	Eficaz pero costoso en energía
Desemulsionantes	Alta	Medio	Flexibles, pero con costos químicos
Separación Gravitacional	Baja	Bajo	Económico pero lento
Centrifugación	Alta	Alto	Rápido pero costoso
Tratamiento Eléctrico	Alta	Medio	Eficiente, pero requiere seguridad
Filtración y Coalescencia	Media	Medio	Versátiles, pero con mantenimiento regular

Consideraciones Ambientales y de Seguridad

- **Tratamiento Térmico:** Emisiones de CO₂ y consumo de energía.
- **Desemulsionantes:** Impacto de productos químicos en el medio ambiente.
- **Separación Gravitacional:** Mínimo impacto ambiental.
- **Centrifugación:** Alto consumo de energía.
- **Tratamiento Eléctrico:** Requiere manejo seguro de electricidad.
- **Filtración y Coalescencia:** Desecho de filtros usados.

4. Hidrógeno

El hidrógeno, descubierto por Henry Cavendish en 1766, ha sido un componente esencial en diversas aplicaciones industriales y energéticas a lo largo de la historia. En el siglo XVIII, Cavendish identificó este elemento, el cual fue posteriormente nombrado por Lavoisier, derivado de las palabras griegas "hydro" (agua) y "genes" (generador), debido a que su combustión produce agua (Bockris, 2013). Durante el siglo XIX, se lograron avances significativos en la producción de hidrógeno, especialmente a través de la electrólisis del agua, un proceso que descompone el agua (H₂O) en oxígeno (O₂) e hidrógeno (H₂) mediante la aplicación de una corriente eléctrica (Le Roy, 2006).

En el siglo XX, el hidrógeno se utilizó extensamente en la industria química, destacándose su uso en la síntesis de amoníaco mediante el proceso Haber-Bosch y en la hidrogenación de aceites vegetales (Smil, 2001). Paralelamente, se comenzaron a explorar sus aplicaciones como combustible, dadas sus propiedades energéticas. Con el incremento de las preocupaciones medioambientales a finales del siglo XX y principios del siglo XXI, y la búsqueda de fuentes de energía más sostenibles, se intensificó la investigación en la producción de hidrógeno de forma

sostenible, especialmente mediante la electrólisis del agua alimentada por energías renovables como la solar y eólica (Barbir, 2005). Recientemente, Bucaramanga, en Colombia, ha emergido como un centro de vanguardia en la investigación sobre hidrógeno de alta eficiencia utilizando principios de física cuántica, representando un avance significativo en la búsqueda de métodos de producción más eficientes y sostenibles. González y Mayorga Barrera (2021) exploraron el uso de nanofluidos como rompedores de emulsiones de agua en crudos pesados, destacando su efecto potencial en la mejora de la eficiencia de las bombas electrosumergibles. Su investigación numérica proporciona insights relevantes sobre cómo estos nanofluidos pueden ser aplicados para mitigar problemas de emulsión y optimizar el transporte de crudos pesados en operaciones industriales.

El hidrógeno se clasifica según su método de producción y la huella de carbono asociada. El hidrógeno azul es producido a partir de hidrocarburos con captura y almacenamiento de carbono (CAC), mitigando así las emisiones de CO₂ (IEA, 2019). El hidrógeno verde, por su parte, se genera mediante la electrólisis del agua utilizando fuentes de energía renovable, como solar o eólica, lo que resulta en una opción libre de carbono (IRENA, 2020). El hidrógeno gris, en contraste, se obtiene a partir de hidrocarburos sin captura y almacenamiento de carbono, lo que conlleva emisiones significativas de CO₂ (Rostrup-Nielsen, 2002). Otro tipo, el hidrógeno turquesa, se produce mediante pirólisis de metano, un proceso que genera hidrógeno y carbono sólido sin emisiones directas de CO₂ (Oliveira, 2021). Además, el hidrógeno amarillo se produce mediante electrólisis del agua empleando exclusivamente energía solar (Holladay, Hu, King, & Wang, 2009), mientras que el hidrógeno rosa se genera mediante electrólisis del agua utilizando energía nuclear (Levi, 2018).

La investigación y el desarrollo en la producción de hidrógeno han llevado a varios descubrimientos y métodos innovadores. La electrólisis de alta temperatura, por ejemplo, emplea electrolitos sólidos para incrementar la eficiencia y reducir los costos de producción de hidrógeno, siendo más eficiente que la electrólisis convencional a temperatura ambiente debido a las mejores propiedades de conducción iónica a altas temperaturas (Ni, Leung, Leung, & Sumathy, 2007). Otro avance significativo es la electrólisis asistida por microorganismos, que utiliza microorganismos para realizar la electrólisis del agua de manera más eficiente y con menor consumo energético, y puede utilizar agua contaminada o salina, ampliando las fuentes de agua disponibles para este proceso (Logan & Rabaey, 2012).

La electrólisis asistida por luz solar, también conocida como fotoelectrólisis, produce hidrógeno directamente a partir de la luz solar mediante el uso de materiales semiconductores que absorben la luz y generan una corriente eléctrica que descompone el agua (Walter et al., 2010). La fotocatalisis, por su parte, emplea catalizadores activados por la luz solar para facilitar la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno, buscando optimizar la eficiencia de la conversión de energía solar en hidrógeno (Chen, Li, & Zhang, 2010). Finalmente, la bioproducción de hidrógeno involucra el uso de microorganismos que, a través de procesos biológicos como la fermentación, producen hidrógeno, utilizando biomasa como fuente de energía y ofreciendo una solución sostenible y renovable (Kapdan & Kargi, 2006). Estos avances representan pasos cruciales hacia la creación de una economía del hidrógeno sostenible, que podría desempeñar un papel fundamental en la mitigación del cambio climático y en la transición hacia fuentes de energía más limpias y eficientes.

5. Metodología y diseño experimental

Este capítulo se centra en el estudio de la desemulsificación de crudos petroleros mediante un reactor prototipo, evaluando su eficacia en tres escenarios diferentes. Se plantea la hipótesis de que el uso del reactor reducirá significativamente el contenido de agua emulsionada (BSW) en los crudos tratados. Además, se caracterizará el gas liberado durante el proceso para identificar sus propiedades clave. Este análisis es crucial para explorar nuevas perspectivas en la optimización industrial de la desemulsificación de crudos.

Etapas Pre

Observación y Planteamiento del Problema:

- Observación de la necesidad de desemulsificar crudos de diferentes API, con el propósito de evaluar la eficacia del prototipo en tres distintos escenarios.
- Identificación de la importancia de caracterizar el gas de salida del reactor.

Formulación de Hipótesis:

- Hipótesis 1: La desemulsificación en el reactor prototipo reducirá el porcentaje de BSW en los tres escenarios.
- Hipótesis 2: El gas liberado tras la desemulsificación tendrá propiedades específicas que pueden ser caracterizadas, donde la mayor parte de su composición estará formada por hidrógeno y oxígeno.

Diseño Experimental:

- Selección de los crudos (liviano, mediano y pesado) y determinación de los rangos clasificatorios correctos.
- Planificación de la toma de muestras y pruebas de BSW previas al reactor.

Etapas Momentum**Pruebas Experimentales:**

- Implementación del proceso de desemulsión en el reactor prototipo con los tres tipos de crudos a cuatro tiempos múltiplos de diez.
- Seguimiento del proceso y toma de muestras periódicas para medir el porcentaje de BSW.

Análisis de Resultados:

- Comparación del porcentaje de BSW inicial y posterior al paso por el reactor.
- Evaluación de la eficacia de la desemulsificación a través del tiempo.

Etapas Pos**Caracterización del Gas de Salida:**

- Colaboración con Ecopetrol y el CDT del gas para caracterizar el gas liberado.
- Utilización del reactor prototipo para el proceso de caracterización.

Interpretación de Resultados:

- Análisis de las propiedades y composición del gas de salida.
- Relación de los resultados con el proceso de desemulsificación y su viabilidad industrial.

Conclusiones y Recomendaciones:

- Recapitulación de los hallazgos y sugerencias para futuras investigaciones.

Condiciones operacionales**Tabla 2. Condiciones operacionales**

CONDICIONES OPERACIONALES				
Item	Laboratorio	Refinería	CDT del gas	Descripción
Control de temperatura y humedad	T= 21°C; H=83%	T= 34°C; H=78%	T= 23°C; H=82%	Mantener condiciones ambientales estables para evitar influencias externas en los resultados.
Calibración y mantenimiento de equipos	Revisados por el profesional del laboratorio.	Revisados por profesionales de la refinería.	Revisados por profesionales del CDT del gas.	Asegura que todos los equipos utilizados estén calibrados correctamente y sean mantenidos adecuadamente.
Registro y documentación	Cumple	Cumple	Cumple	Documentar cuidadosamente todos los pasos del proceso de prueba, incluyendo condiciones de prueba, métodos utilizados y resultados obtenidos.
Control de calidad	Cumple	Cumple	Cumple	Implementar controles de calidad internos para monitorear la precisión y precisión de las pruebas realizadas.
Seguridad	Cumple	Cumple	Cumple	Cumplir con las normativas de seguridad pertinentes para proteger al personal del laboratorio y garantizar la manipulación segura de materiales peligrosos.

Reproducibilidad	Cumple	Cumple	Cumple	Realizar pruebas replicadas para verificar la reproducibilidad de los resultados y garantizar su validez.
Eliminación adecuada de residuos	Cumple	Cumple	Cumple	Disponer de manera adecuada de todos los residuos generados durante el proceso de prueba, siguiendo los protocolos de eliminación de residuos establecidos.

Elaborado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Equipos y descripción de equipos

Reactor prototipo de ondas gravitatorias por superposición El reactor prototipo de ondas gravitatorias por superposición es un componente crucial en el proceso experimental de disrupción de emulsiones. Su diseño se basa en la captura y utilización de ondas gravitatorias en superposición, y su funcionamiento consume alrededor de 1 kWh de energía. Este reactor, mediante una reacción inalámbrica con placas, reacciona exclusivamente con el agua atrapada en el petróleo. El funcionamiento del reactor implica varios aspectos clave:

Captura de ondas gravitatorias: El reactor está diseñado para aprovechar las ondas gravitatorias en superposición, un fenómeno aún en estudio en la física teórica. Estas ondas se utilizan como fuente de energía para impulsar el proceso de disrupción de emulsiones.

Incidencia en la reacción interna: Mediante este proceso, el reactor descompone selectivamente el agua atrapada en el petróleo en sus componentes básicos, como el hidrógeno y el oxígeno. Este proceso ocurre de forma inalámbrica, lo que implica una tecnología innovadora y de vanguardia.

Generación de hidrógeno: Como resultado de la reacción interna, el reactor genera hidrógeno como parte del gas de salida.

Figura 2. Reactor prototipo



Tomado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Centrifugadora: La centrifugadora es un equipo fundamental para separar las fases líquida y sólida de la muestra de petróleo. Este dispositivo aplica fuerza centrífuga para acelerar la sedimentación de las partículas sólidas y separarlas del líquido.

Figura 3. Centrifugadora



Tomado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Tubos de centrifugado: Son recipientes diseñados para contener las muestras de petróleo durante el proceso de centrifugado. Estos tubos suelen ser transparentes para facilitar la observación de las fases separadas después del proceso de centrifugado.

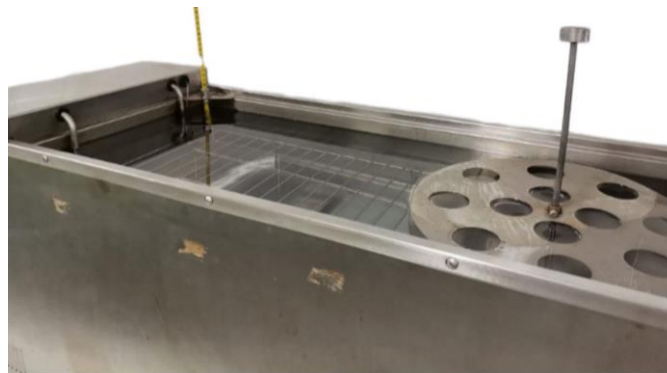
Figura 4. Tubos de zanahoria



Tomado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Equipo de baño caliente: Este equipo se utiliza para calentar la muestra de petróleo a una temperatura específica antes de realizar la prueba. El calentamiento ayuda a facilitar la separación de las fases líquida y sólida durante el proceso de centrifugado. El baño caliente proporciona un ambiente controlado y uniforme de temperatura para garantizar resultados consistentes.

Figura 5. Baño térmico



Tomado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Hidrómetro: El hidrómetro es un instrumento utilizado para medir la densidad relativa o gravedad específica de un líquido. En el contexto de la prueba de contenido de agua y partículas BSW, el hidrómetro se utiliza para medir la densidad del líquido en la muestra de petróleo después del proceso de centrifugado. Esta medición se utiliza para determinar el contenido de agua en la muestra, ya que el agua tiene una densidad diferente al petróleo.

Figura 6. Hidrómetro



Hidrómetro. Tomado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024

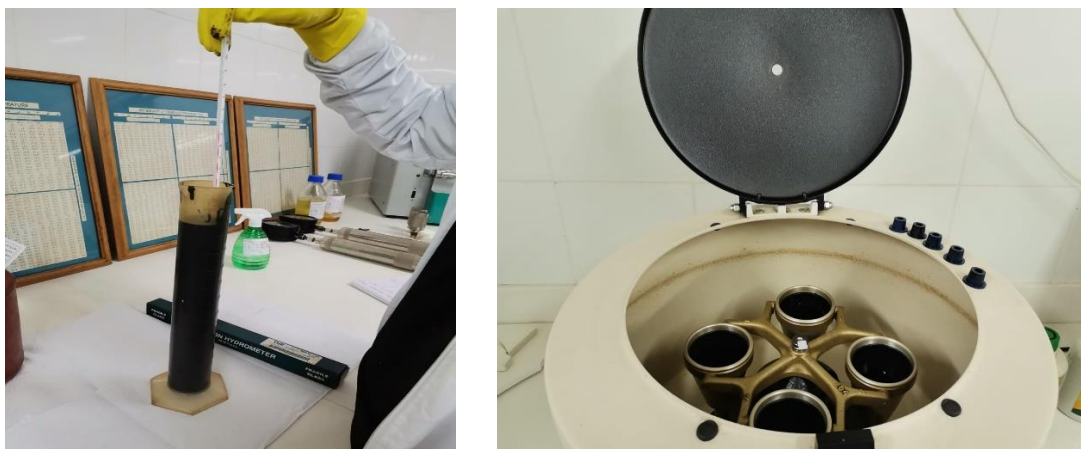
6. Análisis experimental

En el laboratorio se desarrolló la fase experimental planteada, primero se realizaron pruebas bases de BSW y °API a las diferentes muestras de crudo liviano, mediano y pesado.

Figura 7. Pruebas iniciales



Tomado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Figura 8. API y centrifugadora

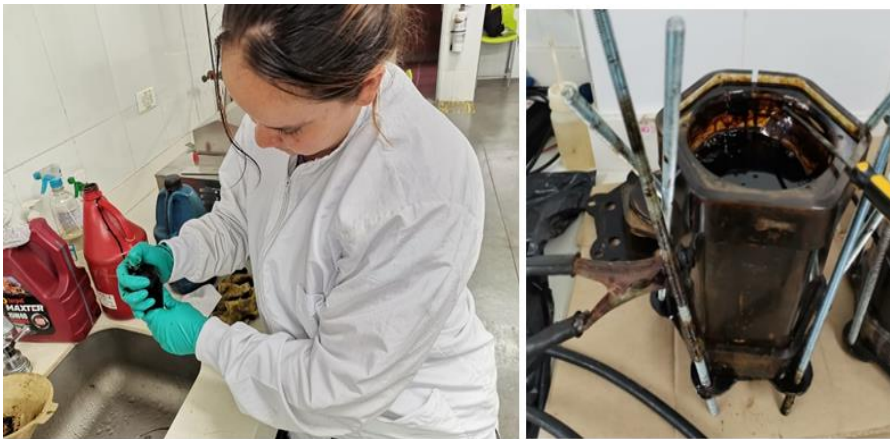
Tomado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Después de realizar las pruebas iniciales los crudos pasaron por el reactor, en este proceso se tuvo en cuenta el tiempo planteado en el diseño experimental, se sacaron muestras de 250ml a los 10, 20, 30 y 40 minutos desde que este es puesto en funcionamiento.

Figura 9. Muestras extraídas del reactor

Tomado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024

A cada una de las muestras se les tomó nuevamente el BSW para los diferentes tiempos y en la muestra final extraída del reactor a 40 minutos de reacción, se calcula la gravedad $^{\circ}\text{API}$.

Figura 10. Agitación de muestras extraídas

Tomado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Cabe destacar que las pruebas se realizaron en el transcurso recorrido de un día, con el fin de evitar alteraciones externas proporcionadas por la humedad y/o la temperatura. Además, la toma de cuatro muestras de 250 ml cada una, se utilizó con el fin de hacer una repetibilidad, puesto que se podrían pasar entre cuatro y cinco muestras (donde trabajamos cuatro) por la centrífuga y tener un margen más amplio para el análisis.

Tabla 3. Resultados de la prueba de BSW previa al reactor prototipo

TIPO DE CRUDO	API	MUESTRA	ETAPA PRE		
			V BSW (ml)	V total (ml)	BSW (%)
Liviano	36	L1	1.27	100	1.27
		L2			
		L3			
		L4			
Mediano	26	M1	1.22	100	1.22
		M2			
		M3			
		M4			
Pesado	12	P1	7	100	7.00
		P2			
		P3			
		P4			

Elaborado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Tabla 4. Planteamiento de tiempos en el reactor prototipo

TIPO DE CRUDO	API	MUESTRA	ETAPA POS			
			V BSW (ml)	V total (ml)	BSW	t RTCDGE (min)
Liviano	37.5	L1	0.2	100	0.20	10
		L2	0.1	100	0.10	20
		L3	0.1	100	0.10	30
		L4	0	100	0.00	40
Mediano	26	M1	0.70	100	0.70	10
		M2	0.40	100	0.40	20
		M3	0.30	100	0.30	30
		M4	0.05	100	0.05	40
Pesado	12	P1	4	100	4.00	10
		P2	2.2	100	2.20	20
		P3	1.3	100	1.30	30
		P4	0.6	100	0.60	40

Elaborado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Tabla 5. Comparativa

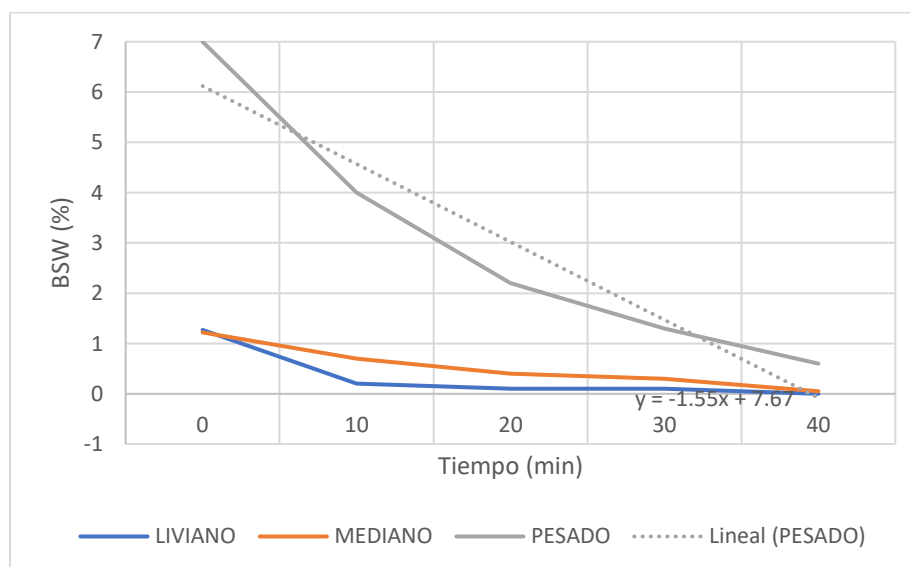
TIPO DE CRUDO	API- PRE	MUESTRA	Pre	Pos	API - POS
			BSW (%)	BSW (%)	
Liviano	36	L1	1.27	0.20	37.5
		L2		0.10	
		L3		0.10	
		L4		0.00	
Mediano	26	M1	1.22	0.70	27
		M2		0.40	
		M3		0.30	
		M4		0.05	
Pesado	12	P1	7.00	4.80	14
		P2		2.20	
		P3		1.30	
		P4		0.60	

Elaborado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024

6.1 Análisis general de resultados

El reactor prototipo operó de manera excepcionalmente eficiente, exhibiendo un patrón de comportamiento estable y gradual en su desempeño. El reactor logró desemulsionar en una velocidad promedio de 0.22 bsw por minuto (BSW/min), evidenciando así su capacidad para gestionar de manera efectiva el proceso de desemulsificación. Es importante destacar que este rendimiento se mantuvo constante a lo largo de las pruebas realizadas con los tres tipos de crudos evaluados. Desde crudos ligeros hasta crudos pesados, el reactor demostró su versatilidad al adaptarse y funcionar de manera óptima en diferentes condiciones de entrada. Esta capacidad de adaptación es fundamental para garantizar la eficiencia operativa y la productividad en diversas situaciones de producción de petróleo. El reactor prototipo no solo cumplió con las expectativas, sino que también superó las pruebas al demostrar su eficacia en la desemulsificación, independientemente de la variabilidad en las características del crudo.

Figura 11. Resultados BSW (%) en relación con el tiempo.



Elaborado por: Camacho, S. & Balaguera, A. 2024

Como se puede observar en la gráfica, podemos evidenciar que el comportamiento del agua atrapada a través del tiempo tiende a cero, siendo cuarenta (40) minutos, casi el tiempo ideal para la desemulsión total del agua atrapada en el crudo.

Este análisis se basa en los resultados experimentales donde se observa que la cantidad de agua atrapada en la emulsión va disminuyendo con el tiempo. La disminución gradual de la cantidad de agua atrapada indica un proceso de desemulsión en curso. Además, al observar la tendencia hacia cero, especialmente alrededor del intervalo de cuarenta minutos, podemos inferir que este período representa un punto crítico donde la desemulsión alcanza su máxima eficacia.

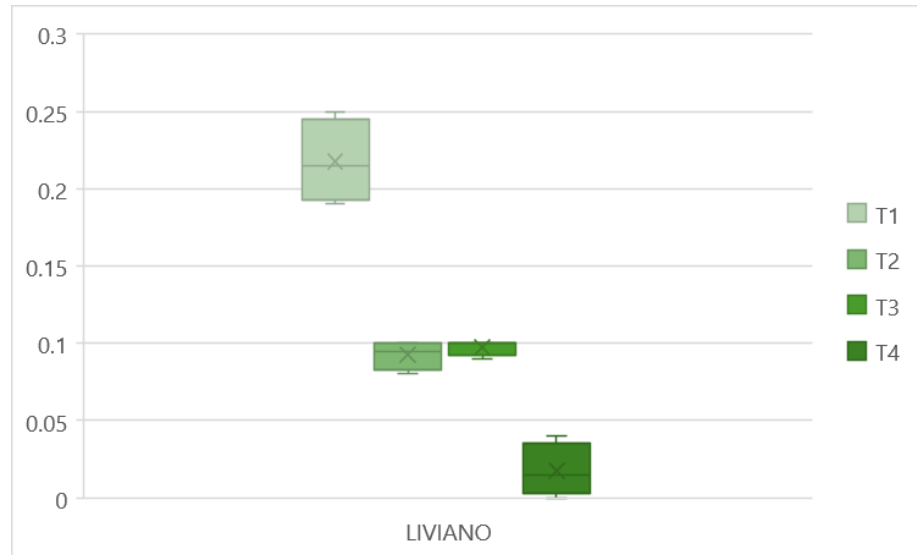
La identificación de este tiempo óptimo proporciona una guía valiosa para el diseño y la optimización de los procesos de desemulsión en las instalaciones de producción de petróleo.

Análisis de repetibilidad y desviación estándar de los resultados

Tabla 6. Cálculos de media y desviación estándar del BSW % crudo liviano

	T1	T2	T3	T4
LIVIANO	0.2	0.1	0.1	0
LIVIANO	0.25	0.08	0.09	0.02
LIVIANO	0.23	0.09	0.1	0.04
LIVIANO	0.19	0.1	0.1	0.01
MEDIA	0.217	0.092	0.097	0.017
DESVIACION ESTANDAR	0.0275	0.009	0.005	0.017
ERROR RELATIVO	12.661	10.350	5.128	97.590

Elaborado por Camacho, S & Balaguera, A. 2024

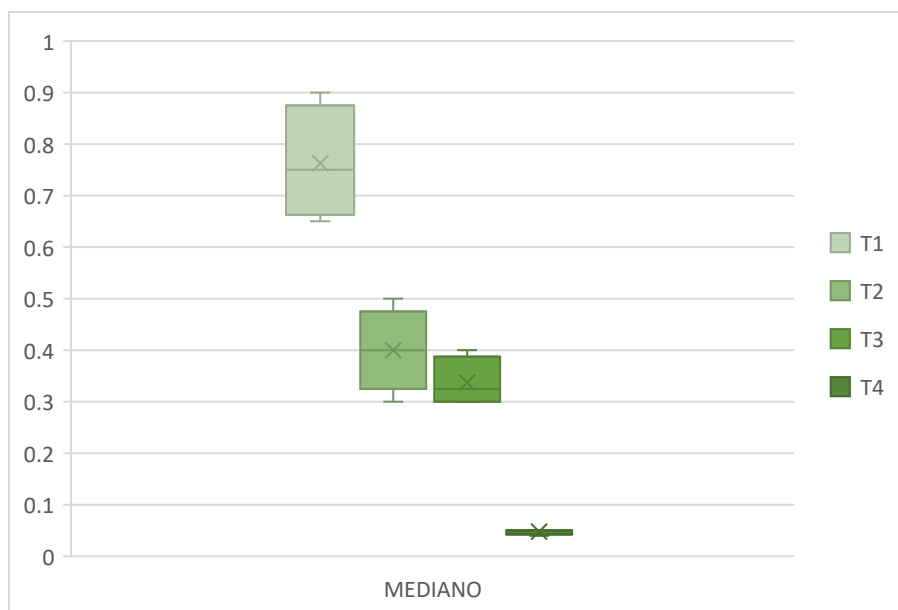
Figura 12. Comportamiento del BSW % de las muestras de crudo liviano

Elaborado por Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Tabla 7. Cálculos de media y desviación estándar del BSW % crudo mediano

	T1	T2	T3	T4
MEDIANO	0.7	0.4	0.3	0.05
MEDIANO	0.8	0.5	0.35	0.05
MEDIANO	0.9	0.3	0.4	0.04
MEDIANO	0.65	0.4	0.3	0.05
MEDIA	0.7625	0.4	0.3375	0.0475
DESVIACION ESTANDAR	0.11086779	0.08164966	0.04787136	0.005
ERROR RELATIVO	14.5400379	20.4124145	14.1841053	10.5263158

Elaborado por Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Figura 13. Comportamiento del BSW % de las muestras de crudo mediano

Elaborado por Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Tabla 8. Cálculos de media y desviación estándar del BSW % crudo pesado

	T1	T2	T3	T4
PESADO	4.8	2.2	1.3	0.6
PESADO	4.7	2.1	1.3	0.8
PESADO	4.8	2.3	1.4	0.7
PESADO	4.8	2	1.2	0.5
MEDIA	4.775	2.15	1.3	0.65
DESVIACION ESTANDAR	0.05	0.12909944	0.08164966	0.12909944
ERROR RELATIVO	1.04712042	6.00462534	6.28074293	19.8614531

Elaborado por Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Figura 14. Comportamiento del BSW % de las muestras de crudo pesado

Elaborado por Camacho, S & Balaguera, A. 2024

Para evaluar la repetibilidad de los datos de BSW (%) de crudos liviano, mediano y pesado según la norma ASTM D1796-22, se tomaron dos datos de cada tipo de crudo y se analizaron las diferencias absolutas entre ellos. En el caso del crudo liviano, las diferencias absolutas fueron de 0.1, indicando una buena repetibilidad conforme a los límites aceptables de la norma. Para el crudo mediano, las diferencias absolutas fueron de 0.3 y 0.25, lo que sugiere una variabilidad mayor que podría estar en el límite superior de aceptación de la norma, indicando una repetibilidad moderada. En el crudo pesado, las diferencias absolutas fueron de 2.6 y 0.7, reflejando una variabilidad significativamente alta y menor repetibilidad en las mediciones. Estos resultados muestran que, mientras que las mediciones del crudo liviano cumplen con los criterios de repetibilidad establecidos por la ASTM D1796-22, las mediciones de los crudos mediano y pesado presentan mayores desafíos en términos de repetibilidad y precisión, siendo especialmente notable en el crudo pesado.

Para realizar el análisis de repetibilidad ASTM de los datos presentados, primero se tienen en cuenta los conceptos básicos. La repetibilidad se refiere a la variación en los resultados

obtenidos al repetir mediciones en las mismas condiciones de prueba. Con base en los resultados de las mediciones de BSW (%) para diferentes niveles de prueba de petróleo crudo, se observa que la desviación estándar proporciona una medida de varianza que indica cuánto difieren los valores en el conjunto de datos de la media. En este caso se realizó un análisis de repetibilidad según la norma ASTM para tres niveles de prueba: liviano, mediano y pesado. En el crudo liviano, se puede observar una baja desviación estándar (0.0275) y un error relativo relativamente bajo (12.66%), lo que indica una buena repetibilidad y precisión en las mediciones. Por otro lado, en el crudo mediano, la desviación estándar (0.0816) es más alta, y el error relativo (20.41%) también es alto, sugiriendo una variabilidad significativa y una precisión relativamente menor en comparación con el nivel liviano. Sin embargo, en el crudo pesado, tanto la desviación estándar (0.05) como el error relativo (6.00%) son relativamente bajos, indicando una buena repetibilidad y precisión en las mediciones, aunque con una desviación estándar algo mayor que en el nivel liviano.

Estos análisis destacan que la repetibilidad de las mediciones de BSW varía significativamente según el tipo de crudo. Mientras que el crudo liviano presenta una alta repetibilidad y precisión en las mediciones, el crudo mediano muestra una mayor variabilidad que se acerca al límite superior de aceptación de la norma ASTM D1796-22. En el caso del crudo pesado, aunque las diferencias absolutas iniciales reflejan una alta variabilidad, los valores de la desviación estándar y el error relativo sugieren una repetibilidad aceptable. Esto resalta la importancia de considerar tanto las diferencias absolutas como las medidas estadísticas como la desviación estándar y el error relativo para una evaluación completa de la repetibilidad conforme a la norma ASTM D1796-22.

En el desarrollo de esta tesis experimental, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio utilizando un reactor prototipo para evaluar la capacidad de desentrampado de agua en muestras

facilitadas de crudo. La decisión de no utilizar pruebas THIEF Sampling se fundamentó en la falta de acceso directo a un pozo para la obtención de muestras. En su lugar, se emplearon muestras facilitadas, permitiendo realizar análisis BSW (Basic Sediment and Water) a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos demostraron que el método experimental propuesto cumplió con los estándares de precisión y repetibilidad establecidos por la norma ASTM, destacándose por su eficacia comparativa frente a las pruebas THIEF Sampling. Estas últimas, que requieren un acceso directo al pozo y están sujetas a variabilidades inherentes al proceso manual de muestreo, presentan limitaciones significativas en términos de control de variables experimentales y precisión de los resultados.

6.2 Ecopetrol y CDT del gas: Cromatografías del gas de salida

La cromatografía es una técnica analítica utilizada para separar, identificar y cuantificar los componentes individuales de una mezcla. Su principio se basa en la diferenciación de velocidad de migración de los componentes de una muestra a través de una fase estacionaria y una fase móvil.

En su forma más común, la cromatografía implica la aplicación de una muestra en una fase estacionaria y su posterior paso a través de una fase móvil. Los componentes de la muestra interactúan de manera diferente con la fase estacionaria y la fase móvil, lo que resulta en diferentes velocidades de migración. Esto lleva a la separación de los componentes a medida que viajan a través del sistema cromatográfico.

La fase estacionaria puede ser sólida o líquida, mientras que la fase móvil puede ser un líquido o un gas. Dependiendo de la naturaleza de la muestra y los componentes a separar, se elige el tipo de cromatografía más adecuado, como cromatografía líquida (LC), cromatografía de gases (GC), cromatografía de capa fina (TLC), entre otros.

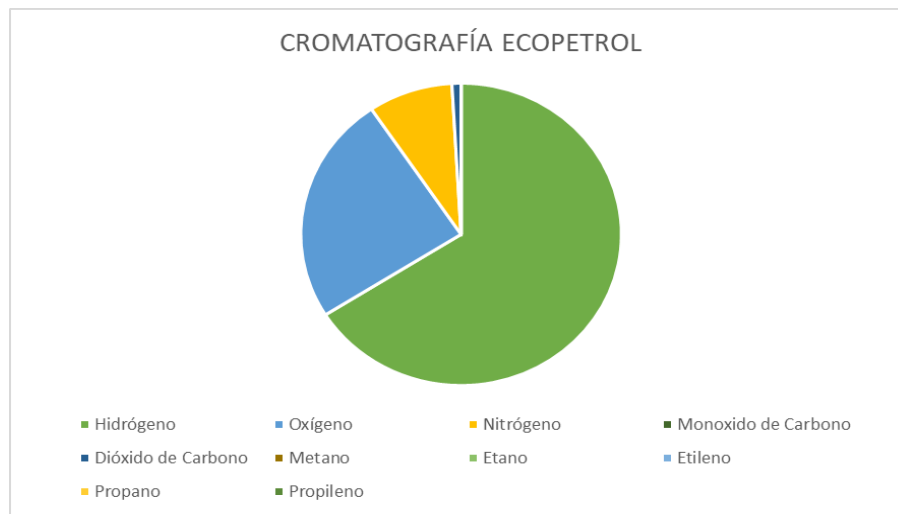
Como colaboradores externos, la empresa Ecopetrol y el CDT del gas, en compañía del director, el creador y los tesistas, usaron sus equipos y realizaron la debida caracterización del gas, obteniendo los resultados que se mostrarán a continuación.

Por parte de Ecopetrol, en las instalaciones de la refinería de Barrancabermeja, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 9. Resultados cromatografía del gas de salida Ecopetrol

ECOPETROL; CRUDO	
ID: EMULSIÓN CRUDO-AGUA OIL 28 API	
PARÁMETRO	RESULTADOS
	m/m %
Hidrógeno	65.796632
Oxígeno	24.39064
Nitrógeno	8.496009
Dióxido de Carbono	0.902884
Metano	0
Etano	0.001261
Etileno	0.000505
Propano	0.006967
Propileno	0.0003292

Proporcionado por: Ecopetrol, 2024

Figura 15. Resultados cromatografía del gas de salida Ecopetrol

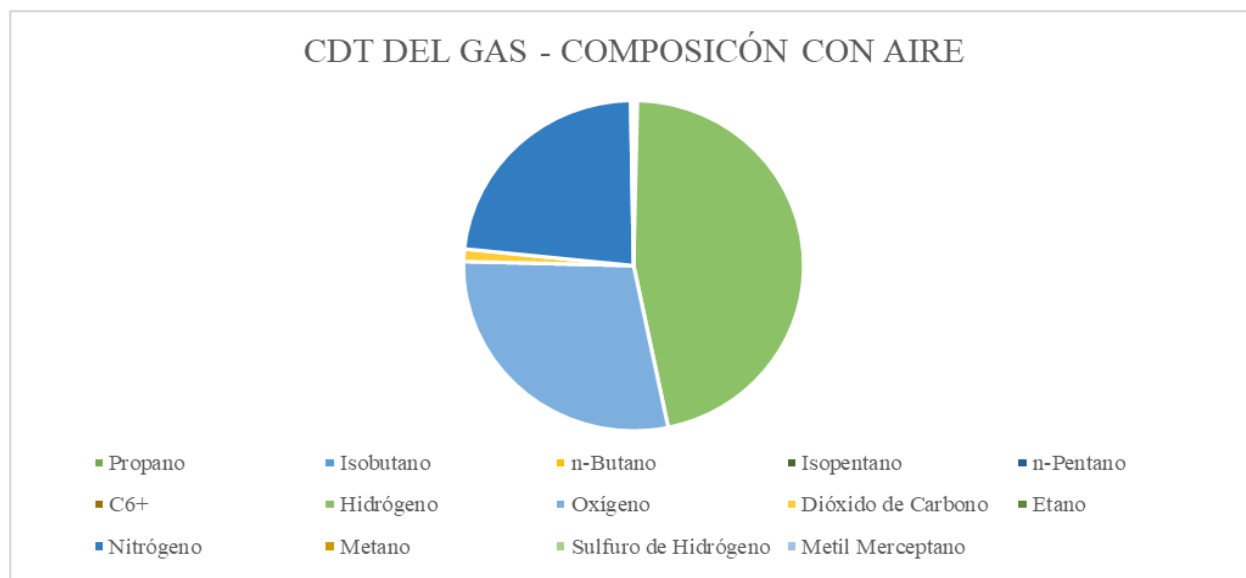
Elaborado por: Camacho & Adriana, 2024- Datos proporcionados por Ecopetrol

Por parte del CDT del gas, se obtuvieron los siguientes resultados de cromatografía:

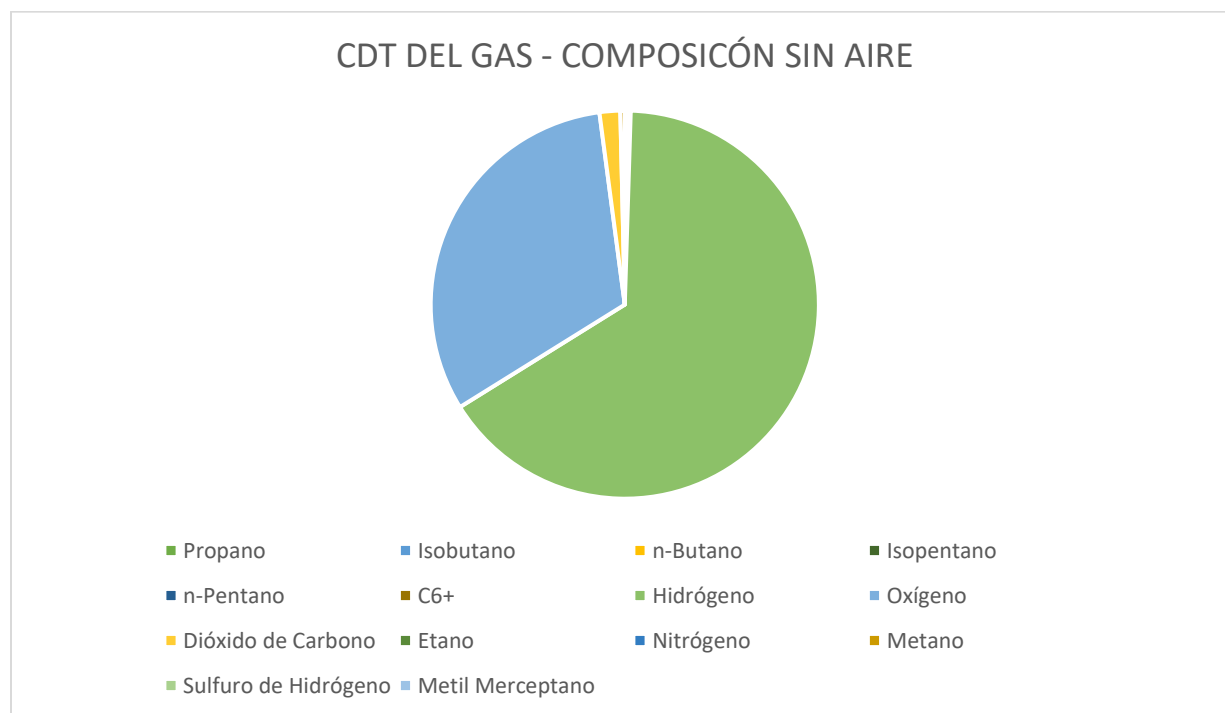
Tabla 10. Resultados cromatografía del gas de salida CDT

CDT GAS		
ID: EMULSIÓN CRUDO-AGUA, OIL 28 API		
COMPONENTE	COMPOSICIÓN (Con aire)	COMPOSICIÓN (Sin aire)
	m/m %	m/m %
Propano	0.039	0.055
Isobutano	0.091	0.129
n-Butano	0.087	0.124
Isopentano	0.057	0.08
n-Pentano	0.041	0.058
C6+	0.032	0.046
Hidrógeno	46.393	65.657
Oxígeno	28.664	31.758
Dióxido de Carbono	1.219	1.725
Etano	0	0
Nitrógeno	23.117	0
Metano	0.26	0.368
Sulfuro de Hidrógeno	0	0
Metil Merceptano	0	0
	100	100

Proporcionado por: CDT GAS, 2024

Figura 16. Resultados cromatografía del gas de salida con aire CDT

Elaborado por: Camacho & Adriana, 2024- Datos proporcionados por CDT GAS

Figura 17. Resultados cromatografía del gas de salida sin aire CDT

Elaborado por: Camacho & Adriana, 2024- Datos proporcionados por CDT GAS

Basándonos en los resultados de la cromatografía de Ecopetrol y la del Centro de Desarrollo Tecnológico (CDT) del gas (sin aire), podemos observar que la muestra de gas de salida está compuesta predominantemente por hidrógeno, representando aproximadamente el 65% de su composición total, junto con una proporción significativa de oxígeno, que oscila entre el 24% y el 28%. Esta variación en la concentración de oxígeno puede justificarse por las condiciones de operación del proceso, como fluctuaciones en la temperatura, presión y tiempo de reacción. Estos factores pueden influir en la eficiencia con la que se conserva o elimina el oxígeno durante la producción del gas, resultando en diferencias en la concentración observada en las mediciones realizadas por Ecopetrol y el Centro de Desarrollo Tecnológico.

Esta combinación de hidrógeno y oxígeno constituye la mayor parte de la muestra, siendo estos dos gases los principales componentes identificados en el análisis cromatográfico. Esta alta concentración de hidrógeno y oxígeno en la muestra de gas de salida sugiere la posibilidad de aplicaciones potenciales en diversos campos, desde la industria hasta la energía, donde estos gases podrían utilizarse como combustibles o materias primas en procesos químicos. Estos hallazgos son prometedores y ofrecen una visión valiosa sobre la composición del gas producido en este proceso específico.

Cabe destacar que las variaciones en los otros componentes del gas, puede deberse a los diversos factores que pueden influir en la composición de los gases liberados durante el proceso de desemulsificación del crudo, entre los que destacan:

Composición del crudo: La variabilidad en la composición del crudo es un factor fundamental que influye en el proceso de desemulsificación. El crudo puede contener una amplia gama de hidrocarburos, desde parafinas hasta compuestos aromáticos, cada uno con diferentes propiedades físicas y químicas. Estas diferencias en la composición pueden afectar la capacidad

de los agentes desemulsificantes para romper las emulsiones y liberar los gases atrapados, lo que a su vez puede influir en la cantidad y el tipo de gases liberados durante el proceso.

Condiciones de operación: Las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo la desemulsificación, como la temperatura, la presión, la agitación y el tiempo de reacción, son críticas para el éxito del proceso. Variaciones en estas condiciones pueden afectar la eficacia de la desemulsificación, ya que determinan la velocidad y la extensión de la separación de las fases acuosa y oleosa. Por lo tanto, cualquier cambio en estas condiciones puede tener un impacto significativo en la liberación de gases.

Eficiencia del método de desemulsificación: La eficacia del método de desemulsificación utilizado es otro factor clave que influye en la composición de los gases liberados. La elección de agentes desemulsificantes, su concentración y la técnica utilizada para aplicarlos pueden variar entre pruebas, lo que afecta directamente la capacidad del proceso para romper las emulsiones y liberar los gases atrapados en el crudo.

Contaminación o interferencias: La presencia de contaminantes en el crudo o en el proceso mismo puede ser una fuente de variabilidad. Contaminantes como agua salina, sólidos suspendidos o compuestos orgánicos pueden interferir con la eficacia de los agentes desemulsificantes o catalizar reacciones no deseadas que alteran la composición de los gases liberados.

Factores ambientales: Además de las condiciones de operación controladas, los factores ambientales externos también pueden desempeñar un papel importante. La humedad ambiental puede afectar la eficacia de los agentes desemulsificantes, mientras que la temperatura y la presión atmosférica pueden influir en la cinética de las reacciones químicas involucradas en el proceso de desemulsificación, lo que a su vez afecta la composición de los gases generados.

7. Relación costo-beneficio

Ahora bien, para evaluar las relaciones costo-beneficio del reactor de 2L bajo diferentes condiciones de BSW (la cantidad de agua atrapada en el petróleo), es crucial considerar varios datos relevantes. Por un lado, el BSW, expresado como un porcentaje, determina la cantidad de agua presente en la mezcla. En base con la información suministrada por el creador del reactor prototipo, cada litro de agua atrapada produce 9 kg de H₂, que se vende a 1 USD por kg. Por otro, se tiene un consumo de energía de 1 kWh por operación, con un costo de 0.13 USD por kWh. El reactor prototipo tiene un costo inicial de 1200 USD y conlleva gastos adicionales como mantenimiento (500 USD), mano de obra (500 USD), y un tiempo de desemulsificación de 40 minutos por operación, considerando una jornada laboral de 8 horas diarias.

Tabla 11. Reactor prototipo 2L

REACTOR PROTOTIPO DE 2L							
BSW (%)	Agua (L)	Producción de H ₂ (kg)	Ingresos por H ₂ (USD)	Costos Totales (USD)	Beneficio Neto (USD)	VPN a 5 años (USD)	TIR (%)
1.27	25.4	228.6	228.6	2200	-1971.4	-3196.8	-49.4
1.22	24.4	219.6	219.6	2200	-1980.4	-3345.2	-49.4
7	140	1260	1260	2200	-940	-2324.3	-28.6
12	240	2160	2160	2200	-40	618.4	7.4
20	400	3600	3600	2200	1400	1902.8	18.2
30	600	5400	5400	2200	3200	3320.5	29
50	1000	9000	9000	2200	6800	5922.4	44.7
70	1400	12600	12600	2200	10400	8317.6	57.4
80	1600	14400	14400	2200	12200	9717.4	65.7

Elaborado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024.

También se consultaron fuentes donde se plantean datos acerca de un equipo de electrólisis que maneja el mismo tamaño del reactor prototipo. Estos datos proporcionan una base comparativa importante con respecto al reactor de 2L, permitiendo evaluar y contrastar los costos iniciales, los costos operativos anuales, la eficiencia en la producción de hidrógeno, así como el precio de venta de este. Esta comparación es fundamental para determinar la mejor opción en términos de rentabilidad y eficiencia para la producción de hidrógeno bajo condiciones similares de tamaño y capacidad de operación.

Los resultados de esta evaluación se muestran en la siguiente tabla de costo-beneficio:

Tabla 12. Análisis equipo de electrólisis de 2L

EQUIPO DE ELECTRÓLISIS DE 2L							
BSW (%)	Agua (L)	Producción de H2 (kg)	Ingresos por H2 (USD)	Costos Totales (USD)	Beneficio Neto (USD)	VPN a 5 años (USD)	TIR (%)
1.27	25.4	27.01	270.1	2237.25	-1967.15	-6883.24	-
1.22	24.4	25.83	258.3	2237.25	-1978.95	-7133.83	-
7	140	189.27	1892.7	2237.25	-344.55	-1202.27	-
12	240	324.36	3243.6	2237.25	1006.35	2357.75	21.03
20	400	540.6	5406	2237.25	3168.75	6160.33	34.68
30	600	810.9	8109	2237.25	5871.75	10045.44	43.82
50	1000	1351.5	13515	2237.25	11277.75	18057.41	51.16
70	1400	1891.1	18911	2237.25	16673.75	25069.39	54.9
80	1600	2160.9	21609	2237.25	19371.75	28389.6	56.67

Elaborado por: Camacho, S & Balaguera, A. 2024.

Explicación de las tablas

- BSW (%): Porcentaje de agua atrapada en petróleo.
- Agua (L): Cantidad de agua en litros según el BSW y el volumen de petróleo tratado (2L).
- Producción de H2 (kg): Cantidad de hidrógeno producido en kg

- Ingresos por H₂ (USD): Ingresos generados por la venta de hidrógeno, calculados como la producción de H₂ multiplicada por el precio de venta (Para reactor 1 USD/kg y para el equipo de electrólisis 10 USD/kg).
- Costos Totales (USD): Suma de los costos de energía, mantenimiento, y costo de mano de obra por año.
- Beneficio Neto (USD): Ingresos por H₂ menos los costos totales.
- VPN a 5 años (USD): Valor Presente Neto calculado a una tasa de descuento del 10% anual (tasa de oportunidad).
- TIR (%): Tasa Interna de Retorno, es el porcentaje de retorno sobre la inversión inicial de 1200 USD (aplica para ambos).
- Se asumió una tasa de descuento del 10% anual para calcular el VPN.
- Los costos totales incluyen consumo de energía, mantenimiento, y costo de mano de obra, calculados anualmente y luego descontados al valor presente.

El análisis detallado revela que, a pesar de comercializar el hidrógeno a un precio de 1 dólar por kilogramo, el reactor exhibe una Tasa Interna de Retorno (TIR) superior y genera aproximadamente una tercera parte de las ganancias obtenidas por el proceso de electrólisis. Esta observación subraya la eficiencia económica considerable del reactor, a pesar del precio de venta aparentemente modesto.

También se destaca que la producción de hidrógeno del reactor supera significativamente la del electrolizador, esta disparidad en la producción no solo demuestra una mayor capacidad productiva del reactor, sino que también despierta un interés sustancial en los compradores, quienes pueden adquirir una cantidad considerablemente mayor de hidrógeno a una décima parte del costo comparado con el método de electrólisis, que es más conocido y utilizado en el mercado.

Este análisis indica claramente que el reactor no solo es rentable, sino que también presenta una ventaja competitiva significativa en términos de eficiencia de producción y rentabilidad financiera. Esta posición estratégica no solo fortalece su atractivo para inversores y consumidores, sino que también sugiere que el reactor tiene el potencial de convertirse en una potencia de mercado en el sector del hidrógeno, gracias a su capacidad para ofrecer una alternativa eficiente y rentable en comparación con métodos establecidos.

Se identifica que el reactor podría ser especialmente viable para usos con balances de agua mayores a 20, ya que después de este punto de equilibrio, su utilización se vuelve financieramente más atractiva. Esto implica que el reactor no solo puede competir en eficiencia y costo en condiciones favorables de producción de hidrógeno, sino que también podría capturar una porción significativa del mercado al ofrecer una solución rentable y escalable para la generación de hidrógeno.

8. Análisis socioambiental

En el contexto actual de creciente conciencia sobre los impactos ambientales de la industria petrolera, la adopción de un enfoque de "producción limpia de hidrocarburos" emerge como una perspectiva prometedora y transformadora. Este enfoque innovador no solo aborda la problemática de las aguas de producción asociadas con la extracción de petróleo, sino que también ofrece una serie de beneficios que van más allá de la mitigación de la contaminación.

El análisis socioambiental del uso de un nuevo reactor prototipo para desemulsionar el agua de producción y convertirla en hidrógeno resalta la multidimensionalidad de las oportunidades socioambientales que este enfoque podría proporcionar. En primer lugar, la implementación de esta tecnología contribuiría significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero al aprovechar el hidrógeno como una fuente de energía limpia. Esto no solo alinea la

industria petrolera con los objetivos de reducción de emisiones establecidos a nivel global, sino que también promueve una transición hacia una economía circular sostenible y baja en carbono.

Además, la adopción de un enfoque de producción limpia de hidrocarburos fomentaría la innovación tecnológica dentro del sector petrolero, impulsando el desarrollo y la implementación de tecnologías más avanzadas y eficientes. Esto no solo mejora la competitividad de la industria, sino que también impulsa la creación de empleos en el sector de tecnologías limpias y sostenibles.

Otro aspecto crucial es el impacto positivo en las comunidades locales y el medio ambiente circundante. Al reducir la contaminación del agua asociada con la producción de petróleo, se protege la salud y el bienestar de las comunidades cercanas a las instalaciones petroleras. Además, el uso de hidrógeno como una fuente de energía limpia puede disminuir la dependencia de combustibles fósiles y contribuir a la seguridad energética a nivel local y nacional.

8.1 Reducción de la contaminación

La contaminación del agua debido a las aguas de producción atrapadas en el crudo es un problema ambiental grave que plantea múltiples desafíos para la salud de los ecosistemas acuáticos y las comunidades que dependen de ellos. Estas aguas contaminadas pueden contener una variedad de contaminantes, que van desde hidrocarburos hasta metales pesados y productos químicos utilizados en la extracción de petróleo. En lugares como Colombia, donde las regulaciones ambientales exigen un tratamiento mínimo del agua hasta un tercer nivel, el proceso actualmente utilizado a menudo no es suficiente para eliminar por completo estos contaminantes, lo que puede resultar en la liberación de agua no completamente purificada en fuentes hídricas.

La introducción de un nuevo invento de generación de hidrógeno para desemulsionar estas aguas y convertirlas en hidrógeno representa un avance significativo en la mitigación de este

problema ambiental. Este enfoque innovador no solo permite una desemulsificación más eficaz del agua de producción, sino que también elimina la liberación de contaminantes en el medio ambiente. Al transformar estas aguas contaminadas en hidrógeno, se abre la posibilidad de un tratamiento más completo y efectivo, reduciendo así la carga de contaminantes liberados en el entorno natural.

Es crucial destacar que esta tecnología no solo protege los cuerpos de agua cercanos a las operaciones petroleras, sino que también preserva la salud de los ecosistemas acuáticos en general. Los cuerpos de agua limpios son vitales para mantener la biodiversidad y la productividad de los ecosistemas acuáticos, así como para garantizar el suministro de agua potable y los recursos pesqueros para las comunidades locales. Al eliminar la contaminación de estas aguas de producción, se contribuye significativamente a la conservación de estos valiosos recursos naturales y al bienestar de las comunidades que dependen de ellos.

8.2 Economía circular sostenible

Tradicionalmente, las aguas de producción se consideran un subproducto no deseado de la extracción de petróleo y, en muchos casos, se enfrentan a la necesidad de ser eliminadas mediante métodos costosos y, en ocasiones, poco eficientes. Este proceso de eliminación no solo representa un desafío económico para las compañías petroleras, sino que también plantea importantes preocupaciones ambientales debido a la liberación de contaminantes en los cuerpos de agua y en el suelo.

Sin embargo, el desarrollo y la implementación de tecnologías innovadoras, como el uso de un reactor prototipo para convertir estas aguas en hidrógeno, están revolucionando la forma en

que se aborda este problema. En lugar de considerar las aguas de producción como un desecho indeseable, este enfoque transforma un problema ambiental en un recurso valioso y sostenible.

Al convertir estas aguas en hidrógeno, se abre un abanico de posibilidades para su utilización en una variedad de aplicaciones. El hidrógeno resultante puede ser empleado como combustible para la generación de energía, proporcionando una fuente limpia y renovable de electricidad. Además, el hidrógeno puede ser utilizado como combustible en vehículos, contribuyendo así a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y al fomento de la movilidad sostenible.

Este enfoque no solo tiene el potencial de resolver el problema de la contaminación de las aguas de producción, sino que también puede impulsar la transición hacia una economía más sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Al aprovechar este recurso hasta ahora desaprovechado, se reduce la dependencia de los combustibles fósiles y se promueve la utilización de energías limpias y renovables.

8.3 Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero

El hidrógeno producido a partir de aguas de producción mediante un reactor es una forma de energía limpia y renovable. Cuando se utiliza en lugar de combustibles fósiles en aplicaciones de transporte, generación de energía y otros usos industriales, el hidrógeno ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto es crucial para combatir el cambio climático y cumplir con los objetivos de reducción de emisiones establecidos en acuerdos internacionales como el Acuerdo de París.

8.4 Fomento de la innovación tecnológica

La implementación de nuevas tecnologías como un reactor prototipo novedoso para la producción de hidrógeno a partir de aguas de producción petrolera impulsa la innovación en el sector energético. Este avance tecnológico no solo tiene el potencial de transformar la forma en que se gestionan los desechos industriales, sino que también pueden abrir nuevas oportunidades comerciales y promover la creación de empleo en campos relacionados con las energías renovables y la tecnología ambiental. Además, la investigación y el desarrollo continuos en este campo podrían llevar a mejoras adicionales en la eficiencia y la sostenibilidad de la producción de hidrógeno.

8.5 Seguridad energética

Al diversificar las fuentes de energía y promover el uso de hidrógeno producido a partir de aguas de producción petrolera con un reactor prototipo, amplía la canasta de energías alternativas y se fortalece la seguridad energética. Además, al aprovechar los recursos existentes de manera más eficiente, se reduce la necesidad de importar energía y se fomenta la autonomía energética a nivel local o nacional.

9. Beneficios en la Industria Petrolera

El uso de un nuevo reactor prototipo para desemulsificar el agua atrapada en el petróleo representa un avance significativo en la industria petrolera, ofreciendo una solución más económica y eficiente para abordar los desafíos asociados con la gestión de aguas residuales. Esta tecnología innovadora no solo permite una separación más efectiva del agua emulsionada del crudo, sino que también reduce los costos operativos para las empresas petroleras. Al optimizar el

proceso de producción de petróleo, se mejora la calidad del producto final, lo que puede traducirse en una mayor competitividad en el mercado y mayores márgenes de beneficio.

Además de los beneficios económicos directos, el uso de dicho reactor para realizar la desemulsión del agua de producción también ofrece ventajas ambientales significativas. La reducción de la contaminación ambiental derivada de la liberación de aguas residuales contaminadas contribuye al cumplimiento de regulaciones ambientales locales e internacionales. Esto ayuda a evitar posibles problemas legales, sanciones económicas y repercusiones negativas en la reputación corporativa. Al mismo tiempo, mejora la imagen pública de las empresas petroleras al demostrar un compromiso con prácticas más limpias y sostenibles.

La adopción de esta tecnología no solo implica un cambio en las prácticas operativas, sino que también promueve una cultura empresarial más orientada hacia la responsabilidad ambiental y social. Al invertir en soluciones más limpias y eficientes, las empresas petroleras pueden mejorar su reputación corporativa y aumentar la confianza tanto de los consumidores como de los inversores. Esto se alinea con una tendencia creciente hacia la sostenibilidad en todos los sectores de la economía, donde las empresas son cada vez más evaluadas no solo por su rentabilidad, sino también por su impacto en el medio ambiente y la sociedad en general.

9.1 Factibilidad del uso del reactor prototipo como facilidad de superficie

La viabilidad del uso del reactor prototipo como una facilidad de superficie en las operaciones petroleras es innegable. Introducir esta tecnología en el proceso de producción petrolera implica una mejora significativa en la eficiencia operativa. Al integrar el reactor prototipo directamente en las instalaciones de producción, se elimina la necesidad de transportar las aguas de producción a instalaciones externas para su tratamiento. Esto no solo reduce los costos

asociados con el transporte y la eliminación de aguas contaminadas, sino que también optimiza la operación general de la instalación al permitir un tratamiento in situ y en tiempo real de las aguas producidas. Además, se agilizan los procesos de procesamiento y se aumenta la flexibilidad en la gestión de los recursos hídricos en el sitio de extracción.

Asimismo, la implementación del nuevo reactor prototipo en la superficie de producción petrolera promete una reducción significativa en los impactos ambientales negativos. Al convertir las aguas de producción en hidrógeno, se elimina la necesidad de liberarlas en cuerpos de agua cercanos o de someterlas a procesos de tratamiento costosos y, a menudo, ineficaces. Esto contribuye a la preservación de la calidad del agua y a la protección de los ecosistemas acuáticos, así como a la prevención de la contaminación del suelo y del aire en las áreas circundantes a las instalaciones petroleras.

El enfoque del reactor también aprovecha eficazmente los recursos al convertir un subproducto no deseado en un recurso valioso y sostenible. El hidrógeno producido puede utilizarse no solo como combustible para la generación de energía, sino también en diversas aplicaciones industriales y comerciales, desde la propulsión de vehículos hasta la producción de productos químicos. Esto abre nuevas oportunidades para diversificar la matriz energética y crear valor agregado a partir de un subproducto que antes se consideraba un desperdicio.

Además, la tecnología del nuevo reactor prototipo es altamente adaptable y escalable, lo que facilita su integración en una variedad de instalaciones de producción petrolera, independientemente de su tamaño o capacidad. Esta versatilidad garantiza su implementación tanto en grandes operaciones industriales como en instalaciones más pequeñas y remotas. La capacidad de ajustar y expandir la tecnología según las necesidades específicas de cada sitio de extracción garantiza una solución personalizada y eficiente para cada caso.

Conclusiones

- Las pruebas iniciales realizadas con el reactor prototipo han mostrado resultados alentadores en términos de desemulsificación de crudos, sugiriendo que esta tecnología podría tener el potencial de reducir significativamente la dependencia de tratamientos químicos adicionales. Sin embargo, debido a que las teorías en las que se basa el funcionamiento del reactor, como la superposición cuántica y los campos gravitacionales cuánticos, son aún temas abiertos en la investigación científica, no es posible determinar con precisión la viabilidad completa del reactor en aplicaciones industriales.

- El desarrollo del reactor prototipo, aunque en fase experimental, ha permitido obtener una visión preliminar de su capacidad para generar hidrógeno como subproducto. Esto podría representar un avance importante hacia la sostenibilidad energética y la promoción de una economía circular dentro de la industria petrolera.

- Las pruebas básicas llevadas a cabo se limitaron por el espacio y los recursos disponibles, lo que restringe la generalización de los resultados obtenidos. A pesar de estas limitaciones, los datos preliminares sugieren que la tecnología del reactor tiene un potencial significativo para mejorar las prácticas de gestión ambiental en la industria, especialmente en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con métodos tradicionales de deshidratación de crudos.

- La implementación de esta tecnología podría mejorar la percepción pública de la industria petrolera al alinearse con un enfoque más sostenible y responsable. No obstante, este impacto positivo en la percepción pública dependerá en gran medida de la validación científica continua y de la capacidad para escalar el prototipo a niveles operativos más amplios.

Recomendaciones

- Identificar áreas específicas que requieran más estudio o que puedan beneficiarse de una investigación adicional. Por ejemplo, podrías sugerir investigaciones adicionales sobre la optimización de parámetros del nuevo reactor prototipo para diferentes tipos de crudos o explorar su aplicabilidad en otros sectores industriales.

- Proporcionar pautas prácticas para la implementación exitosa del reactor prototipo en la industria petrolera. Esto podría incluir recomendaciones sobre la integración de dicho reactor prototipo en las operaciones existentes, la capacitación del personal, la gestión de riesgos y la evaluación de costos y beneficios.

- Estudios en medidas de seguridad y políticas regulatorias para la promoción e implementación de las tecnologías sostenibles del nuevo reactor prototipo en la industria petrolera. Esto podría incluir apoyos fiscales en la inversión de tecnologías limpias, estándares ambientales más estrictos o programas de investigación en tecnologías innovadoras.

- Estudios adicionales, basados en la eficiencia del reactor cuando se implementa durante un periodo de tiempo mayor, con cantidades más significativas para aplicar en la industria, con el objetivo de obtener datos más sólidos y representativos para su aplicación. Estos estudios permitirán entender mejor el rendimiento del reactor en condiciones de operación a largo plazo y en escalas industriales, lo que facilitará su integración exitosa en procesos de producción petrolera a gran escala y contribuirá a maximizar su impacto en la mejora de los procesos industriales.

- Evaluación de la producción de hidrogeno del reactor, centrándose en las características y la calidad del hidrógeno generado. Esta evaluación proporcionará información crucial sobre la eficiencia del proceso de desemulsificación en la producción de hidrógeno, así como sobre la

pureza, la composición y otras características relevantes del hidrógeno obtenido. Comprender mejor estas características permitirá optimizar el diseño y la operación del reactor prototipo, así como identificar posibles aplicaciones industriales y beneficios adicionales derivados de la producción de hidrógeno de alta calidad.

- Dado que las teorías científicas fundamentales que sustentan el funcionamiento del reactor, como la superposición cuántica y los campos gravitacionales cuánticos, son áreas de estudio que aún no cuentan con un consenso consolidado, es esencial promover investigaciones más profundas en estas áreas. Se recomienda realizar estudios teóricos y experimentales para avanzar en la comprensión de cómo estas teorías pueden influir de manera efectiva en la eficiencia del reactor.

- Las pruebas realizadas hasta ahora han sido limitadas en alcance y se han basado en los recursos disponibles. Para obtener una evaluación más precisa de la viabilidad del reactor, es crucial llevar a cabo experimentos adicionales que consideren una variedad de condiciones operativas, incluyendo escalas más grandes y diferentes tipos de crudo.

- Además de los aspectos técnicos, es necesario realizar un análisis exhaustivo del impacto económico y ambiental de la implementación de esta tecnología. Esto incluye un estudio detallado del costo-beneficio en comparación con los métodos tradicionales de desemulsificación y un análisis del ciclo de vida para evaluar la reducción real de la huella ambiental. Estos estudios proporcionarán una base más sólida para tomar decisiones informadas sobre la escalabilidad y la viabilidad comercial del reactor.

Referencias Bibliográficas

- Abad Burgos, B. G. (2015). Selección y formulación de un agente desemulsificante para la deshidratación del grupo proveniente de la plataforma Albacora. <https://core.ac.uk/download/pdf/250077182.pdf>
- Acosta Poveda, E. T., & Cristancho Saiz, R. F. (2018). Emulsiones agua-en-crudo pesado: estudio de separación de fases a través de la proteína OmpA pura e inmovilizada en nanopartículas de magnetita. <https://repositorio.uniandes.edu.co/items/d14de77f-9c45-4326-b470-e3370b0c13c0>
- Alfonso Rojas, K. (2022). Micromundo para la enseñanza del concepto de sistema, estado y superposición desde la mecánica clásica y cuántica en estudiantes de grado octavo. <http://upnblib.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/18007>
- Amado González, L. A., & Mayorga Barrera, J. A. (2021). Evaluación numérica de nanofluidos; como rompedores de emulsiones de agua en crudos pesados, y su efecto en la eficiencia de las bombas electrosumergibles. <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8635>
- Ball, P. (2020). Cuántica: Qué significa la teoría de la ciencia más extraña. Turner. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=siHgDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT29&dq=Teor%C3%ADa+del+t%C3%BAnel+cuantico&ots=8kNor1XXb3&sig=F7K8fFHP_0TuRTIxQNiEWjtHIz0#v=onepage&q=Teor%C3%ADa%20del%20t%C3%BAnel%20cuantico&f=false

- Franco, E. R. (2021). Decaimiento del falso vacío en la Mecánica Cuántica y la Teoría Cuántica de Campos. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
<https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2873352>
- Lemoine, C., & Elaine, M. (2020). Estudio de compatibilidad del inhibidor de incrustaciones INTAV™ con otros aditivos, a fin de generar un tratamiento químico multifuncional para el aseguramiento de flujo (Doctoral dissertation). <http://saber.ucv.ve/handle/10872/17341>
- Martínez, O. G., Cortés, M. I., Pérez, C. B., Bautista, G. D., García, M. A., & Pérez, M. G. (2023). Estudio In Silico de las Interacciones del Ácido Elágico y los Aminoácidos de los Tejidos Humanos usando Química Cuántica. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7(4), 1354-1365. <https://www.ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/6959>
- Patiño, J. (2007). Enseñanza del fenómeno cuántico de efecto túnel. Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias, 2(1), 42-47.
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/GDLA/article/view/5306>
- Pérez Calderón, J. F. (2020). Tratamiento de efluentes líquidos industriales utilizando quitosano (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).
<https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/101532>
- Rodríguez Velásquez, E. S. (2023). Introducción al concepto de superposición en mecánica cuántica mediante los fundamentos de la computación cuántica.
<http://repository.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/19366>
- Rojas, V., & Sohira, J. (2021). Tratamiento de crudo proveniente de fosas de desecho haciendo uso de tecnologías aplicadas para el mejoramiento de crudos pesados (Bachelor's thesis).
<http://saber.ucv.ve/handle/10872/1420>

- Roque, J. P., Nunes, C. M., Schreiner, P. R., & Fausto, R. (2023). H-Tunneling Exhibiting Unexpectedly Small Primary Kinetic Isotope Effects. <https://chemrxiv.org/engage/chemrxiv/article-details/656f6721cf8b3c3cd7d9c438>
- Roque, J. P., Nunes, C. M., Schreiner, P. R., & Fausto, R. (2024). Hydrogen Tunneling Exhibiting Unexpectedly Small Primary Kinetic Isotope Effects. *Chemistry—A European Journal*, e202401323. <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/chem.202401323>
- Roque, J. P., Nunes, C. M., Viegas, L. P., Pereira, N. A., Pinho e Melo, T. M., Schreiner, P. R., & Fausto, R. (2021). Switching on H-tunneling through conformational control. *Journal of the American Chemical Society*, 143(22), 8266-8271. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jacs.1c04329>
- Utria Robinson, L. M. (2017). Caracterización fisicoquímica y evaluación de un rompedor de emulsiones agua/aceite para el tratamiento químico de aplicación en campo petrolero (Doctoral dissertation, Universidad de Cartagena). <https://repositorio.unicartagena.edu.co/handle/11227/9917>
- Vitalla, F. L. (1997). Estudio experimental del efecto túnel cuántico en materiales magnéticos (Doctoral dissertation, Universidad de Zaragoza). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=203830>
- Wilson, C., Sleyther, A., Estuardo, C., & Bravo, I. (2024). Principio de superposición cuántica y sus aplicaciones en la ingeniería civil. https://www.researchgate.net/profile/Henry-Cedeno-2/publication/380876498_PRINCIPIO_DE_SUPERPOSICION_CUANTICA_Y_SUS_APLICACIONES_EN_LA_INGENIERIA_CIVIL/links/665221b022a7f16b4f4c8735/PRI

[NCIPIO-DE-SUPERPOSICION-CUANTICA-Y-SUS-APLICACIONES-EN-LA-
INGENIERIA-CIVIL.pdf](#)