

Desarrollo de un Simulador que Determina los Cambios de API y Viscosidad a Diferentes Concentraciones
de una Mezcla de Nafta y Crudo Pesado en un Proceso de Cavitación Hidrodinámica

Tatiana Milena Muñoz Arias, Brandon Stivens Solano Rojas

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero De Petróleos

Director

Julio César Pérez Angulo

Magister en Hidrocarburos

Codirector

Juan Carlos Montes Cala

Ingeniero Químico

Universidad Industrial De Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2019

DEDICATORIA...

“Reconoce en tu corazón que, así como un padre disciplina a su hijo, también el Señor tu Dios te disciplina a ti.”

Deuteronomio 8:5

*En primer lugar, a Dios padre y a su hijo Jesucristo, para ellos toda la honra y gloria,
Paz que le da tranquilidad a mi alma y fortaleza a mi espíritu débil.*

*A la mujer que me dio la vida, gracias por enseñarme el valor del sacrificio y del trabajo duro, no
hay manera de devolverte todo lo que me has dado, te amo, este logro es por ti.*

*A mi papá por ser mi guía, un tipo inteligente que siempre me ha dado sus mejores consejos,
fuiste el primero en impulsarme a estudiar esta locura de la ingeniería, tú siempre serás el
engranaje principal en la maquinaria de mi vida.*

*A mi hermano Andrés por creer en mí; me has dado las mejores lecciones de vida que jamás
alguien me pudiera dar; mi admiración por ti es infinita.*

*A mis hermanos Ángel Jair y Alexandra, porque son los más consentidos y especiales en mi vida;
esta dedicatoria también es para ustedes.*

*A las demás personas que hicieron parte en la realización de este proyecto, a Juan Carlos por su
aporte intelectual y espíritu investigativo, a Brandon Stevens, mi compañero y amigo de largas
travesías llenas de triunfos y odiseas, gracias por la dedicación y paciencia en la culminación de
esta investigación.*

*A mis amigos Jhonn, Everson, Carolina, Matías, Augusto y Sávio, porque con ustedes aprendí,
que la amistad no reconoce fronteras, me regalaron ese lugar, justo donde la felicidad se
encuentra con la locura...*

*Por último, a mi alma máter y aquellas personas que hicieron parte de mi formación profesional
y personal.*

“Cambia tus opiniones, sigue tus principios; cambia tus hojas, mantén intactas tus raíces”.

Víctor Hugo.

Tatiana Milena Muñoz Arias

Este logro en mi vida se lo debo principalmente a Dios, que nos encaminó por el sendero del saber y nos permitió llegar a estas instancias.

Agradezco infinitamente a mis padres Jairo y Diana, que más allá de la distancia siempre fueron un apoyo total e incondicional, que con cariño supieron aconsejarme y darme las fuerzas que necesitaba para seguir siempre adelante en todo momento y ante cualquier situación, que gracias a su gran esfuerzo de padres que desarrollaron con sabiduría y humildad, formaron los peldaños que me han llevado a ser una gran persona.

A mi hermano Jairo por ser un apoyo en toda mi vida y ser de los primeros que espera grandes cosas de mí y que se enorgullecen por cada logro en mi vida como si fuese de él.

Agradezco infinitamente a mi familia la cual siempre ha sido sinónimo de unidad en la que cada uno de ellos siempre sostuvieron mi mano y me ayudaron a que todo esto llegase a ser posible.

Agradezco a mi compañera de tesis Tatiana Muñoz la cual, con su perseverancia, esfuerzo y dedicación, pudimos alcanzar este gran logro y en donde no solo le agradezco por el desarrollo de esta tesis, sino también por todos estos años de estudios juntos, por ser mi primera amiga en esta etapa universitaria y ser una persona valiosa, que con su gran apoyo me ayudó en los momentos más difíciles de mi vida y celebró conmigo cada triunfo.

Agradezco especialmente a mi codirector de tesis el Ingeniero Juan Carlos, por ser un motor de vida que siempre se enfoca en encaminarnos por la senda del conocimiento y crecimiento personal.

Agradezco a cada uno de mis amigos y compañeros que me ha dejado esta etapa de mi vida y no logré mencionar.

Por último, agradezco a cada docente que compartió conmigo algo de su conocimiento, y a mi alma máter que me ayudó a formarme como la persona que soy hoy en día.

“El futuro mostrará los resultados y juzgará a cada uno de acuerdo a sus logros”

Nikola Tesla.

Brandon Stevens Solano Rojas

Tabla de contenido

Introducción	14
1. Planteamiento del problema.....	16
1.1. Objetivos	16
1.2 Alcance.....	17
1.3 Metodología	18
1.3.1 Teórica	18
1.3.2 Computacional	18
1.3.3 Analítico.....	18
2. Cavitación hidrodinámica en hidrocarburos pesados.....	20
2.1 Cavitación	20
2.2 Cavitación hidrodinámica	21
2.3 Aplicaciones de la cavitación en diferentes sectores industriales.....	21
2.3.4 Síntesis del biodiesel.....	23
2.4 Reducción de la densidad y la viscosidad en crudos pesados por medio del fenómeno de cavitación hidrodinámica.	23
2.5 Función de un donante de hidrógeno en el proceso cavitación hidrodinámica.	25
2.6 Antecedentes de craqueo térmico en hidrocarburos mediante cavitación.	25
3. Modelo matemático.....	27
3.1. Modelo de mezclado	28
3.1.1. Balance macroscópico de materia.....	28
3.1.2. Reglas de mezclado.....	29
3.2. Modelo de cavitación.....	30

3.2.2. Cálculo equilibrio líquido-vapor.....	32
3.2.3. Ecuación de estado Peng Robinson.	33
3.2.4. Cálculo de la tensión superficial.....	33
3.2.5. Dinámica de la burbuja.	35
3.2.6. Temperatura de la burbuja	35
3.2.7. Fracción volumétrica de vapor.....	36
3.3. Modelo cinético	36
3.3.1. Reacción de radical.	37
3.3.2. Reacción molecular.....	37
3.4. Modelo del reactor	37
3.4.1. Velocidad de reacción.....	38
3.4.2. Balance molar de estado dinámico para el reactor.....	38
4. Desarrollo de la herramienta software CAVITATOR	39
4.1. Etapa I, mezclador.	40
4.2. Etapa II, reactor de cavitación.	41
4.3. Interfaz gráfica e interacción con el software.	42
5. Prueba del simulador.....	54
6. Resultados y validación	56
6.1. Resultados	57
6.2. Validación.	63
7. Análisis económico	66
7.1. Presentación de datos	67
7.2 Resultados	68
8. Conclusiones	73

9. Recomendaciones.....	74
Referencias bibliográficas.....	76

Lista de Tablas

Tabla 1 Datos de entrada del crudo y del donante.	55
Tabla 2. Valores volumétricos de la entrada de nafta a la etapa de mezclado.	55
Tabla 3. Diseño de la zona de cavitación en el reactor.	55
Tabla 4 Condiciones de entrada del fluido al reactor de cavitación.	56
Tabla 5. Propiedades del crudo de salida de la etapa de mezclado con concentraciones de nafta de 1, 2 y 5% v/v.	57
Tabla 6 Porcentaje de moles en fase vapor para cada concentración de nafta.	57
Tabla 7 Cambios de viscosidad en las etapas del proceso.	62
Tabla 8 Cambios de densidad del crudo en la etapa de mezclado y cavitación.	63
Tabla 9. Comparación viscosidad y densidad de la etapa 1 con los softwares Cavitator y Hysys a diferentes concentraciones de nafta.	64
Tabla 10. Datos de entrada y de salida de la mezcla en el reactor de cavitación	66
Tabla 11 Proyección económica a 5 años con 1% de concentración de Nafta.	68
Tabla 12 Proyección económica a 5 años con 2% de concentración de Nafta.	69
Tabla 13 Proyección económica a 5 años con 5% de concentración de Nafta.	71

Lista de Figuras

Figura 1. Comportamiento de la burbuja en el fenómeno de la cavitación hidrodinámica.	21
Figura 2. Esquema general del proceso.	40
Figura 3. Esquema de la etapa de mezclado.	41
Figura 4. Diagrama de la etapa del reactor de cavitación.	42
Figura 5. Ventana de Inicio del software Cavitator.	43
Figura 6. Ventana de selección de componentes del software.....	44
Figura 7. Ventana de mezclado del software.	45
Figura 8. Ventana de composición del fluido.	46
Figura 9. Ventana de propiedades del fluido.	47
Figura 10. Ventana de propiedades del fluido de alimentación.....	48
Figura 11. Ventana resultados del mezclado.	48
Figura 12. Ventana del cavitador.	49
Figura 13. Ventana de diseño del cavitador.....	50
Figura 14. Ventana 1 de resultados de cavitación.....	51
Figura 15. Ventana 2 de resultados de cavitación.....	52
Figura 16. Ventana Análisis y proyección económica del software.	53
Figura 17. Ventana Análisis económico de los resultados de cavitación del software.....	53
Figura 18. Comportamiento de la burbuja con concentración de 1% nafta.....	58
Figura 19. Comportamiento de la burbuja con concentración de 2% nafta.....	59
Figura 20. Comportamiento de la burbuja con concentración de 5% nafta.....	59
Figura 21. Temperatura de la burbuja con concentración de 1% nafta.	60
Figura 22. Temperatura de la burbuja con concentración de 2% nafta.	60
Figura 23. Temperatura de la burbuja con concentración de 5% nafta.	61
Figura 24. Temperatura de colapso local de las burbujas a diferentes concentraciones de nafta.	61
Figura 25. Cambio de la viscosidad del crudo en el reactor.	62
Figura 26. Cambio de la densidad del crudo en el reactor.....	63
Figura 27. Esquema de la etapa de mezclado simulación en HYSYS.....	64

RESUMEN

TÍTULO: Desarrollo de un simulador que determina los cambios de API y viscosidad a diferentes concentraciones de una mezcla de nafta y crudo pesado en un proceso de cavitación hidrodinámica*.

AUTORES: Tatiana Milena Muñoz Arias & Brandon Stivens Solano Rojas**

PALABRAS CLAVES: Software, Cavitación Hidrodinámica, Craqueo Térmico, Viscosidad, Densidad, Crudo Pesado, Donante De Hidrógeno, Mejoramiento De Crudos Pesados.

DESCRIPCIÓN:

La cavitación hidrodinámica es un proceso físico en el cual un fluido fluye a través de una región con una presión que está por debajo de la presión de saturación del fluido, creando cavidades (burbujas) que colapsan generando temperaturas locales mayores a 5000 °C. Debido a este aumento de temperatura local, se produce craqueo térmico de las moléculas del fluido; cuando la cavitación es aplicada al tratamiento de crudo pesado de manera positiva, afecta propiedades tales como viscosidad, densidad y composición, lo cual constituye una mejora importante en la calidad del crudo pesado.

En este estudio, se diseña y construye una herramienta software en MATLAB que involucra los modelos matemáticos de mezclado, cavitación, cinética y reactor que permiten modelar los cambios en densidad, viscosidad y composición de un crudo pesado cuando el fluido pasa a través de un reactor de cavitación hidrodinámica. La herramienta Software denominada CAVITATOR, permite evaluar la viabilidad del tratamiento de crudo pesado por medio de esta técnica. Como parte de este estudio, se realiza una simulación de un crudo pesado de 18.2° API a una viscosidad de 4908.2 cP @ 100 °F, utilizando nafta como donante de hidrógeno en concentraciones del 1, 2 y 5%, donde los resultados obtenidos mostraron un incremento API de 0.34, 0.88, 1.25° y una reducción de viscosidad en 4.8, 11.62, y 13.71% respectivamente. Estos resultados permiten obtener la predicción de un panorama favorable de este fenómeno aplicado a la industria, una visualización apropiada sobre la generación de conocimiento innovador de esta técnica y la oportunidad técnico-económica que beneficiaría el desarrollo del sector de hidrocarburos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de petróleos. Director: Julio César Pérez Angulo, Ingeniero de Petróleos; Codirector: Juan Carlos Montes Cala, Ingeniero Químico.

ABSTRACT

TITLE: Development of a simulator that determines changes in API and viscosity at different concentrations of a mixture of naphtha and heavy oil through hydrodynamic cavitation process.*

AUTHORS: Tatiana Milena Muñoz Arias & Brandon Stivens Solano Rojas**

KEY WORDS: Software, Hydrodynamic Cavitation, Thermal Cracking, Viscosity, Density, Heavy Oil, Hydrogen Donor, Upgrading Heavy Oil.

DESCRIPTION:

Hydrodynamic cavitation is a physical process in which a fluid flowing through a region with a pressure lower than the fluid's saturation pressure will generate bubbles that collapse and generate temperatures greater than 5000 ° C. Due to the high temperatures thermal cracking of the fluid molecules takes place. When applied to heavy oil, the hydrodynamic cavitation process positively affects oil properties such as viscosity, density and composition, which constitute an important improvement in the quality of the crude heavy oil. The objective of this study was to design a software through the mathematical integration models of mixing, cavitation, kinetics and reactor, which allowed modeling the changes in density, viscosity and composition of a heavy oil crude when the fluid passes through a hydrodynamic cavitation reactor. The study evaluates the viability of applying the technique in the oil industry.

The CAVITATOR Software creation will allow the evaluation of the feasibility of a heavy oil treatment project through cavitation. As part of the study, an 18.2°API heavy oil with a viscosity of 4908.2 cP @ 100 °F was simulated using naphtha as a hydrogen donor at concentrations of 1%, 2% and 5%, as a result the simulation showed an API increase of 0.34, 0.88 and 1.25°, and reduction viscosity of 4.8, 11.62, and 13.71% respectively. The results obtained lead to a favorable outlook on this technological development, an appropriate visualization on the generation of innovative techniques and the economic opportunity that benefits the development of the hydrocarbon industry.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de petróleos. Director: Julio César Pérez Angulo, Ingeniero de Petróleos; Codirector: Juan Carlos Montes Cala, Ingeniero Químico.

Introducción

Debido a la creciente demanda energética, el agotamiento de la producción de petróleo liviano y los escasos hallazgos de yacimientos convencionales, el futuro de la industria petrolera en Colombia y en el mundo se moverá en el desarrollo de la producción de crudos pesados; enfrentándose a los complejos métodos de extracción, procesamiento, transporte y refinación. Es por esto, que las compañías se verán incentivadas a implementar nuevas tecnologías y técnicas de alto impacto, que permitan optimizar el transporte y el tratamiento no solo a nivel tecnológico sino a nivel comercial, ya que también se deben enfrentar a los altos costos de operación y a los precios de venta que se encuentran por debajo del precio de referencia en los mercados internacionales.

En la industria de hidrocarburos, la cavitación hidrodinámica, es una tecnología prometedora con una excelente relación de costo-beneficio que puede ser aplicada en las facilidades de superficie de un campo, o en las refinerías como una técnica de mejoramiento parcial en crudos pesados (Askarian, Vatani, & Edalat, 2017).

Diversas investigaciones y estudios experimentales, han demostrado que durante el colapso de las burbujas, se pueden alcanzar temperaturas y presiones locales de (5000 ° C y 2000 atm, respectivamente), mientras que en el líquido, permanecen constantes a condiciones ambiente (Niazi, Hashemabadi, & Razi, 2014); bajo estas condiciones se lograría un craqueo térmico en zonas cercanas al colapso. Al aplicar esta técnica de forma positiva a crudos pesados, se lograría un mejoramiento en las propiedades de éste, disminuyendo la composición pesada, densidad y viscosidad del crudo (Brujan & Williams, 2005), sin embargo, debido a su desarrollo innovador en la industria, se hace necesario la realización de estudios exhaustivos en el desarrollo de pruebas físicas que permitan garantizar los buenos resultados a escala de campo.

El objetivo de este trabajo es el diseño de una herramienta computacional, que permita un modelado de los fenómenos físicos y químicos presentes en la cavitación hidrodinámica para este tipo de crudos, con el fin de obtener una predicción de los cambios en composición, densidad y viscosidad de dicho crudo a diferentes condiciones operacionales, reduciendo el umbral de incertidumbre que presenta esta tecnología en la industria.

1. Planteamiento del problema

Actualmente un proyecto de cavitación hidrodinámica aplicada a la industria petrolera, requiere de una planeación e inversión inicial para llevar a cabo pruebas pilotos tanto a escala de laboratorio como a escala de campo esto con el fin de poder evaluar los resultados de un upgrading de hidrocarburos mediante craqueo térmico, de esta manera se hace necesario comprender los principios y leyes que rigen este fenómeno, desarrollando un simulador computacional que permita describir y obtener valores predictivos en los cambios composicionales del crudo. Con la obtención de estos resultados, se podrán ajustar parámetros y demás condiciones operacionales que permitan garantizar la aplicación de esta técnica en la industria con resultados favorables, acortando la brecha entre los escenarios planteados y los que se lleven a cabo, ahorrando costos de operación durante su desarrollo en campo.

Siguiendo este orden de ideas descritos anteriormente, se diseña una herramienta software que predice mediante simulación numérica valores predictivos de cambios en viscosidad, densidad y composición de un crudo pesado cuando es sometido a cavitación hidrodinámica en presencia de un agente donante de hidrógeno, adicionalmente la herramienta cuenta con un módulo de análisis económico en base a los resultados obtenidos de la simulación, con el fin de establecer la viabilidad económica de usar la cavitación en la industria de los hidrocarburos.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo general:

Desarrollar un simulador que pueda determinar los cambios de API y viscosidad a diferentes concentraciones de una mezcla de nafta y crudo pesado en un proceso de cavitación hidrodinámica.

1.1.2 Objetivos específicos:

- Describir el fenómeno de cavitación hidrodinámica en el mejoramiento del API y viscosidad de un crudo pesado por medio del uso de la nafta como agente donador de hidrógeno.
- Desarrollar un algoritmo matemático en un software académico que permita determinar el cambio de API y viscosidad en una mezcla de nafta y crudo pesado en el proceso de cavitación hidrodinámica.
- Evaluar los resultados de viscosidad y API obtenidos en el simulador en una mezcla específica de nafta y crudo pesado a diferentes concentraciones.
- Determinar la viabilidad económica de la concentración de la nafta como donante de hidrógeno en el proceso de cavitación hidrodinámica a partir de los resultados obtenidos de la simulación.

1.2 Alcance

Desarrollar una herramienta software que permita obtener valores predictivos de composición, densidad y viscosidad en crudos pesados que pasan por un proceso de cavitación hidrodinámica, y desarrollar un panorama económico simple con los resultados obtenidos.

1.3 Metodología

Para dar cumplimiento a los objetivos del presente trabajo de investigación se utilizó la siguiente metodología de forma continua que contiene las modalidades teórica, computacional y analítica.

1.3.1 Teórica

- Revisión Bibliográfica del fenómeno de cavitación hidrodinámica y su aplicación en la industria petrolera.
- Determinación de los modelos de los fenómenos físicos y químicos presentes en la cavitación hidrodinámica.
- Ajuste de los modelos para crudos pesados.

1.3.2 Computacional

- Desarrollo de algoritmos para cada una de las etapas presente en la cavitación hidrodinámica.
- Integración de los algoritmos de forma secuencial en una interfaz gráfica amigable e intuitiva con el usuario.

1.3.3 Analítico

- Análisis de resultados de acuerdo a los fundamentos y principios teóricos y su posterior evaluación aplicado a un caso nuevo.

- Desarrollo de un panorama económico simple que demuestre la viabilidad de la técnica de cavitación hidrodinámica de acuerdo a los resultados obtenidos del software.

El libro está desarrollado en siete capítulos; el primer capítulo describe el planteamiento del problema, los objetivos, el alcance y la metodología utilizada en el desarrollo de este trabajo, es a partir de los siguientes capítulos que se da cumplimiento a los objetivos planteados, en el segundo capítulo, se realiza de manera teórica la descripción y recopilación de las investigaciones relacionadas a esta tecnología y su aplicación en diversos sectores como en la industria petrolera para el mejoramiento de las propiedades de un crudo pesado, en el capítulo tres se plantea el modelo matemático que permite describir el fenómeno de cavitación hidrodinámica aplicado en craqueo de hidrocarburos, en este capítulo se realiza una breve descripción de cada modelo y de las ecuaciones involucradas; el capítulo cuatro describe el desarrollo del simulador aplicando un algoritmo que involucra cada etapa del proceso y del modelo matemático; en el capítulo cinco se realizan varias simulaciones de un crudo pesado a diferentes concentraciones de nafta, en las cuales se muestran las condiciones de entrada al software en cada corrida. En el capítulo seis, se describe el análisis de resultados obtenidos en la simulación y su validación. Por último, en el capítulo siete se da cumplimiento al último objetivo planteado; el cual describe el desarrollo de un nuevo módulo dentro del software que permite realizar un análisis económico simple, integrando los resultados obtenidos en la simulación del capítulo anterior, con una proyección económica del proyecto hasta de 5 años.

2. Cavitación hidrodinámica en hidrocarburos pesados

En este apartado se explica primero el fenómeno de cavitación para luego dar paso a la cavitación hidrodinámica y después se explica la aplicación en diferentes industrias, luego como se ha desarrollado esta técnica en craqueo de crudos pesados implementando donantes de hidrógeno.

2.1 Cavitación

En los últimos años se han desarrollado nuevas tecnologías enfocadas en diferentes tipos de energía para producir cambios químicos; en este caso los efectos químicos son producidos por el fenómeno de la cavitación, el cual es el estudio de la formación, crecimiento y colapso de las burbujas o cavidades en un líquido (Shah, 1999).

Los tipos de cavitación se determinan de acuerdo a la forma en cómo se forman las cavidades o como se nuclean las burbujas, estos se clasifican en:

- Cavitación hidrodinámica.
- Cavitación acústica.
- Cavitación óptica.
- Cavitación de partícula.

2.2 Cavitación hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica o transitoria es la formación de cavidades dentro de un líquido que se encuentra en movimiento y que durante una caída de presión isotérmica a la presión de vapor, pasan al estado gaseoso en el cual el vapor es liberado en forma de burbuja dentro del líquido (Ozonek, 2012). Este fenómeno se debe a las condiciones de flujo y factores externos como la geometría del sistema por donde fluye el fluido, involucrando una variación en la velocidad, en la presión y el intercambio de energía cinética dando como resultado la generación de estas cavidades o burbujas (Gogate, 2008)

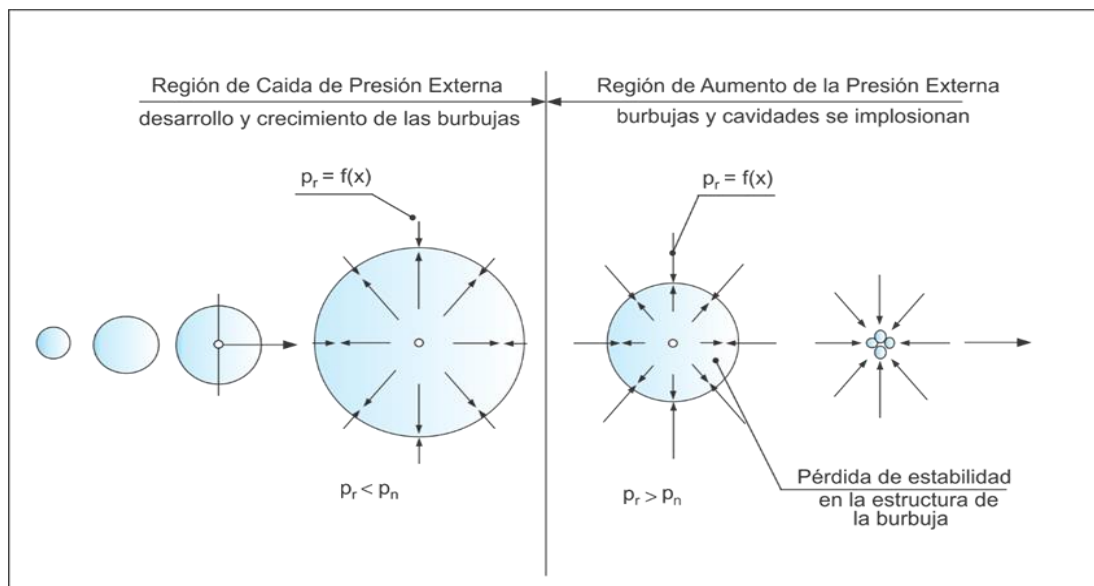


Figura 1. Comportamiento de la burbuja en el fenómeno de la cavitación hidrodinámica. Tomado de Ozonek (2012)

2.3 Aplicaciones de la cavitación en diferentes sectores industriales

La cavitación hidrodinámica contiene múltiples implementaciones en diferentes sectores industriales como se muestra a continuación.

2.3.1 Proceso de oxidación por cavitación. El proceso de oxidación por cavitación o CAV-OX por el nombre de la patente, es un sistema diseñado para destruir contaminantes orgánicos del agua. Este es un proceso híbrido en el proceso de limpieza del agua, donde se usa la cavitación hidrodinámica con otros procesos avanzados de oxidación, radiación ultravioleta y peróxido de hidrógeno. La cavitación, en este caso funciona como un proceso de oxidación, donde el agua en fase líquida entra a la cámara de cavitación, se forman cavidades dentro del fluido que luego colapsan; la energía que se libera en la implosión de la cavidad descompone el agua en átomos de hidrógeno los cuales son muy reactivos, formando radicales hidroxilo e hidroperóxido, los cuales se pueden recombinar para formar hidrógeno molecular y peróxidos de hidrógeno (Shah, 1999).

2.3.2 Procesos industriales y de alimentos. La homogeneización de la leche y sus productos es una de las operaciones de la industria más intensivas el cual afecta significativamente el consumo de energía durante su producción, así mismo, la homogeneización efectiva determina la calidad del producto final, así que el tratamiento de la leche con ayuda de cavitación hidrodinámica permite la fragmentación de la fase dispersa, en este caso (moléculas de grasa de la leche) hasta de 1 micrómetro de diámetro, lo cual se requiere para dar la consistencia apropiada. La homogeneización es un proceso físico que provoca la ruptura de los glóbulos grasos mediante 3 fenómenos los cuales son la cavitación, las fuerzas de impacto y las fuerzas de rozamiento, donde la cavitación es la parte más importante para homogeneizar la leche. El líquido atraviesa un espacio estrecho lo que genera un aumento en la velocidad y por lo tanto una caída de presión, allí se generan cavidades que explotan y dividen los glóbulos de la grasa (Sanjaya K, 2011).

2.3.4 Síntesis del biodiesel. Las técnicas convencionales para la síntesis de biodiesel hacen referencia a una reacción química catalizada que involucra aceite vegetal y alcohol para producir ésteres de ácidos alcalinos y glicerol. Las técnicas convencionales suelen utilizar temperaturas de 70-200°C y presiones en el rango de 6-10 atm, con tiempos de reacción hasta de 70 horas para lograr una conversión en el rango de 90-95% según el tipo de materia prima utilizada (Gogate & Kabadi, 2009).

La aplicación de reactores de cavitación hidrodinámica para la síntesis de biodiesel con diferentes aceites vegetales puede ser exitosa aplicado a las reacciones de transesterificación con más del 90% de rendimiento del producto a un tiempo corto de reacción de 15 minutos. En este proceso de intensificación. La energía otorgada al sistema reduce la resistencia de transferencia de masa durante la reacción, siendo la cavitación hidrodinámica 40 veces más eficiente que la cavitación acústica e inclusive de 160 a 400 veces más eficiente que la agitación convencional o el calentamiento (Gogate & Kabadi, 2009).

2.4 Reducción de la densidad y la viscosidad en crudos pesados por medio del fenómeno de cavitación hidrodinámica.

La mayor parte de las reservas mundiales de petróleo son de crudos pesados, caracterizados por tener una alta densidad y viscosidad, el tratamiento de estos crudos requiere de un mejoramiento preliminar para cumplir especificaciones de entrada en procesos de tratamiento o comercialización convencionales. La cavitación hidrodinámica es una técnica económica y efectiva puede ser aplicada en las facilidades de superficie y refinerías para el mejoramiento parcial de un crudo

pesado, ya que genera un upgrading en las moléculas y residuos pesados del crudo (Askarian et al., 2017).

El principal motivo de la reducción en la viscosidad de hidrocarburos pesados en un proceso de cavitación hidrodinámica se debe a la degradación de las moléculas del fluido (Zamilov & Godin, 2012). Para que suceda esta degradación es necesario romper los enlaces C-X (X puede ser: C, S, N, O o cualquier metal pesado) con el fin de obtener moléculas más livianas a partir de las pesadas. Para poder cumplir con el criterio de reducción de viscosidad, se requiere de la adición de un donante de hidrógeno en la cavitación de un crudo pesado (HCUP¹ por sus siglas en inglés), donde es posible obtener un resultado de aproximadamente 84% en reducción de la viscosidad para este tipo de crudos (Askarian et al., 2017)

Otro aspecto importante a tener en cuenta para describir la viscosidad en un crudo pesado es la interacción de las fuerzas de Van der Waals entre las moléculas, ya que este representa la estabilización molecular del hidrocarburo, si la estructura es similar a un polímero elástico este repercutiría negativamente en la viscosidad del crudo (Zamilov & Godin, 2012).

La cavitación hidrodinámica en hidrocarburos pesados además de ser implementada en procesos de mejoramiento de la viscosidad puede ser utilizada para llevar a cabo craqueo térmico en las moléculas.

La eficiencia del proceso es directamente proporcional a la densidad de las burbujas (Zamilov & Godin, 2012), debido al rompimiento de los límites moleculares y de la creación de radicales libres (Qin & Alehossein, 2016). En el proceso, algunas moléculas de la fracción pesada son las que rompen sus enlaces dejando radicales libres, los cuales se recombinan y generan nuevas especies químicas (Lin & Yen, 1993).

¹ HCUP: Por sus siglas en inglés Hydrodynamic Cavitation Upgrading Process.

2.5 Función de un donante de hidrógeno en el proceso cavitación hidrodinámica.

En el proceso de cavitación hidrodinámica, algunos de los enlaces del fluido se romperán debido al aumento extremo de la temperatura cerca del lugar donde se colapsan las burbujas, un enlace C-C en una cadena de hidrocarburo puede sufrir una escisión térmica debido a los radicales libres altamente energéticos, los cuales podrán intensificar el proceso de romper carbonos (Qin & Alehossein, 2016). Algunas de las cadenas de moléculas más largas son las que rompen sus enlaces dejando radicales libres, los cuales se pueden recombinar y formar componentes nuevos, sin embargo, la reorganización de estas moléculas puede producir unas de mayor tamaño y peso, lo cual afecta negativamente el proceso de disminución de densidad y viscosidad, para ello se usa donantes de hidrógeno como el agua, la nafta, el gas o hidrocarburos livianos (Lin & Yen, 1993).

El donante de hidrógeno debe considerarse como un elemento clave en este sistema, ya que no solo ayuda a disminuir el valor de la viscosidad como diluyente, sino que también asegura que la densidad del crudo pesado disminuya durante este proceso. Sin embargo, la función del donante en este caso, es importante durante la etapa de craqueo, la cual busca la deshidrogenación y la obtención de productos radicales libres altamente reactivos, que sirven como sellante de las moléculas que se acortaron en el craqueo, impidiendo que estas no reaccionen entre sí y evitando que se generen compuestos más pesados (Askarian et al., 2017).

2.6 Antecedentes de craqueo térmico en hidrocarburos mediante cavitación.

Padalka (1962), citado en (Nesterenko & Berlizov, 2007) presentó en la conferencia “*All-Union Scientific and Technical Conference*”, la implementación de la cavitación en la industria del

petróleo como la posibilidad de hacer craqueo para mejorar el crudo. El craqueo térmico se llevó a 430-470°C con una presión de 20-60 MPa a 27KHz, donde se concluyó que el rendimiento de los productos aumentó 1,3 veces. (Knapp, Daily, & Hammitt, 1970) afirman que una burbuja colapsa como resultado de la compresión no esférica, y la energía se libera en las proximidades del sitio donde desaparece la burbuja. Además, los autores afirman, que la temperatura puede alcanzar hasta los 10000K y la presión puede llegar hasta un rango de 200-400 MPa en el punto de colapso de la burbuja.

Nesterenko y Berlizov (2007) determinan que la energía obtenida por el colapso de una burbuja es aproximadamente igual al volumen de esta por la presión que tiene la fase líquida en el fluido, también que el volumen de burbujas cavitadas en una corriente de crudo es del 10% del volumen total de la corriente, en base al tamaño y cantidad de las burbujas, determinan la cantidad de energía que libera y la cantidad de masa que se puede craquear.

Lin y Yen (1993), Implementaron un proceso de Upgrading a través de la Cavitación y de surfactantes, la idea principal era usar este sistema híbrido y compararlo con el craqueo catalítico, concluyeron que este sistema era más rentable ya que se pudo convertir el 35% de asfaltenos en gasoil y en resinas en un tiempo aproximado de 15 minutos en condiciones adecuadas de presión y temperatura.

Teh Fu Yen (1994) Afirmó que la presión de colapso de una burbuja es de aproximadamente 75000 psig y alcanza una temperatura de 5200K en una frecuencia de 30KHz, lo que produce una densidad de energía entre 20-600 W/cm², además trabajó con una muestra de arena bituminosa y de crudo pesado, en los resultados pudo determinar un upgrading de +7°API, aumentando el contenido de gasoil y resina en un 18% y disminuyendo el contenido de asfaltenos en un 14%.

Gareth J. Price y Matthew McCollom (1995), determinaron en un experimento que el efecto de una cavitación de alta intensidad en combustibles diésel, tiene el mismo tipo de reacciones inducidas de alcanos que los de crudo pesado, además concluyeron, que la cavitación de alta densidad puede implicar la polimerización de componentes con nitrógeno y formar sedimentos insolubles.

Max Fomitchev-Zamilov y Sergei Godin (2007), proponen el diseño y la construcción a escala de uno de los mejores cavitadores ultrasónicos creados en Rusia, el activador ultrasónico Kladov / Selivanov para aplicarlo en hidrocarburos; su alta densidad de energía de 1 a 10 MW/m² se debe a la virtud de la cavitación inducida por ultrasonido e hidrodinámica en múltiples etapas que facilita la formación de burbujas y el craqueo de moléculas.

Askarian, Vatani, y Edalat (2017), Realizaron un estudio de upgrading en crudos pesados pasando una muestra por un cavitador hidrodinámico y usando como donante de hidrógeno la gasolina, el proceso fue llevado a una temperatura de 80°C a presión atmosférica; para llevar a cabo este estudio usaron diferentes concentraciones de gasolina , se obtuvo como mejor resultado el 2%, disminuyendo la viscosidad del crudo en un 33% y aumentando su gravedad API en 2.9°, con una disminución de cortes pesados del 20%vol, en este artículo se concluye que la técnica es viable, si se utiliza un agente donante de Hidrógenos.

3. Modelo matemático

Cualquier técnica, tecnología o proceso puede ser desarrollado de manera teórica y/o experimental, donde la implementación de un software permite describir la teoría para simular lo

experimental de forma predictiva, relacionando un proceso lógico-matemático a un fenómeno físico de interés, en este caso se describirá un modelo matemático de cavitación hidrodinámica aplicado a crudos pesados, el cual se compone de los modelos de mezclado, cavitación, cinético y del reactor; donde estos modelos se integran en un solo algoritmo del software de forma lógica y secuencial.

3.1. Modelo de mezclado

Es un modelo de una dimensión basado en un balance macroscópico de materia y reglas de mezclado, este modelo permite obtener propiedades de la mezcla de hidrocarburos líquidos en base a la composición de cada fluido. El modelo de mezclado es usado en la primera etapa del proceso, donde se mezcla el crudo con la sustancia donante de hidrógeno, también se utiliza en el cálculo de las propiedades del crudo después del craqueo por cavitación.

3.1.1. Balance macroscópico de materia. Integra el balance de materia en un sistema de múltiples componentes, en esta etapa no ocurre reacción química y tampoco se acumula masa (Bird, Stewart, & Lightfoot, 1992).

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \rho_1 v_1 S_1 - \rho_2 v_2 S_2 \quad (1)$$

Donde $\frac{\partial m}{\partial t}$ es el cambio de la masa de la sustancia con respecto al tiempo, ρ_1 y ρ_2 es la densidad de fluido en la entrada y salida del proceso, v_1 y v_2 es la velocidad media en la entrada y salida del proceso, S_1 y S_2 es el área transversal en la entrada y salida del mezclador.

3.1.2. Reglas de mezclado. Se implementaron reglas de mezclado para determinar la viscosidad y la densidad del producto de salida en función a su composición. Para la viscosidad se implementó el método de Kendall y Monroe, la cual es útil para mezcla de hidrocarburos líquidos en función a su composición (Boltzmann, 2004).

$$\mu_m^{1/3} = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i^{1/3} \quad (2)$$

Donde μ_m es la viscosidad de la mezcla, x_i y μ_i es fracción molar y la viscosidad respectivamente de cada componente.

Para la densidad se usó el balance macroscópico de materia del apartado anterior, asumiendo que no ocurre reacción ni acumulación de masa, se calcula la masa y el volumen que tiene la mezcla, teniendo en cuenta el factor de reducción volumétrica Shrinkage para mezclas de hidrocarburo (ecuación 3), la cual calcula el volumen que se contrae en dichas mezclas debido al tamaño de las moléculas del producto liviano que llena los espacios vacíos de las moléculas más grandes del producto pesado (API, 1996).

$$S = 4.86 \times 10^{-8} C (100 - C)^{0.819} G^{2.28} \quad (3)$$

Donde S es la contracción volumétrica, dado como un porcentaje del volumen ideal total mezclado, C porcentaje de concentración del volumen de hidrocarburo liviano en el total de la mezcla y G diferencia de gravedad en grados API.

Dentro del modelo de mezclado del software, se cuenta adicionalmente con una base de datos de las propiedades físicas y químicas de cada componente, donde se incluyen condiciones de presión, temperatura, volumen molar críticos, temperatura de ebullición, factor de acentricidad,

peso molecular, valores de presión de saturación, densidad y viscosidad a diferentes temperaturas, esta base de datos fue tomada desde el software Aspen Hysys versión 8.8 y de las siguientes referencias bibliográficas: (McCain, 1990; Riazi, 2005; Schön, 2015; Washington, 2000).

3.2. Modelo de cavitación.

Este modelo se basa en el cálculo de la formación de vapor en forma de cavidades o burbujas de un líquido cuando es sometido a una caída de presión, aquí se describe tanto el cambio de fase del fluido, como el comportamiento de la dinámica y la energía de la burbuja durante su crecimiento, desarrollo y colapso (Brennen, 1995; Singarella & Adams, 1982; Singhal, Athavale, Li, & Jiang, 2002).

3.2.1. Relación de equilibrio líquido-vapor. Cuando el fluido pasa por el reactor, se produce una caída de presión donde la mezcla se encuentra en dos fases, por lo tanto, se requiere encontrar la constante de relación de equilibrio líquido-vapor de cada componente, y su fracción molar en cada fase. Esta constante, relaciona la fracción molar de la fase de vapor (y_i), con la fracción molar fase líquida (x_i) de cada componente, esto como resultado del cálculo del coeficiente de fugacidad de un componente en ambas fases a partir de la ecuación de estado (McCain, 1990; Riazi, 2005; Schön, 2015; Washington, 2000).

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\phi_i^l}{\phi_i^v} \quad (4)$$

Donde K_i es la constante de relación de equilibrio líquido-vapor del componente, y_i y x_i son las fracciones molares del componente de su estado líquido y gaseoso respectivamente, y ϕ_i^l y ϕ_i^v

son los coeficientes de fugacidad de la fase líquida y gaseosa respectivamente para el componente i , donde los coeficientes de fugacidad son la relación entre la fugacidad con respecto a la presión del sistema (Schön, 2015).

Para el cálculo de esta constante se emplean correlaciones empíricas las cuales funcionan en condiciones de presiones intermedias y bajas para sistemas multicomponentes, en este caso se implementó la ecuación de estimación de Wilson (ecuación 6) la cual funciona para presiones intermedias y bajas que se encuentran por debajo de los 500 psi, esta ecuación está basada en la ley de Raoult (ecuación 5) la cual sirve para presiones bajas (Schön, 2015).

$$K_i = \frac{P_i^s}{P} \quad (5)$$

$$K_i = \left(\frac{P_{c_i}}{P} \right) \exp \left[5.37(1 + w_i) \left(1 - \frac{T_{c_i}}{T} \right) \right] \quad (6)$$

Donde P_i^s , P_{c_i} , w_i , y T_{c_i} , son la presión de saturación, presión crítica, factor acéntrico y temperatura crítica respectivamente para el componente puro i , y P y T son la presión y temperatura del sistema.

Conociendo estas constantes se puede determinar el estado en el que se encuentra el fluido ya sea fase líquida, gaseosa, o en ambas fases. Para nuestro sistema de interés el cuál se debe encontrar en dos fases, se debe cumplir con las ecuaciones 7 y 8 simultáneamente, por otra parte si la ecuación 7 es igual a 1 se afirma que el fluido se encuentra en el punto de burbuja, por el contrario si la ecuación 8 es igual a 1 está en el punto de rocío; si se cumple solo la condición de la ecuación 7, todo el sistema se encuentra en fase líquida, y si solo cumple con la condición de la ecuación 8 el fluido está en fase gaseosa (McCain, 1990; Riazi, 2005; Schön, 2015; Washington, 2000).

$$\sum_{i=1}^N K_i z_i > 1 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{K_i}{z_i} > 1 \quad (8)$$

Donde z_i es la fracción total del componente i , y N es el número total de componentes del fluido.

3.2.2. Cálculo equilibrio líquido-vapor. Al encontrar cada constante de equilibrio por correlaciones empíricas y al asegurar que se encuentra el sistema en dos fases, se debe calcular las moles y las fracciones de los componentes en ambos estados ya que se debe tener en cuenta que con el cálculo de las K_i se conoce únicamente la proporción que tiene la fracción molar de una fase sobre otra, para esto se plantea un sistema de $2N+2$ ecuaciones independientes para determinar $2N+2$ incógnitas, donde N es el número de componentes que hay en el fluido. Las incógnitas que se calculan en este sistema son n^L , n^v y los x_i y y_i de los N componentes, las ecuaciones se muestran a continuación (McCain, 1990; Riazi, 2005; Schön, 2015; Washington, 2000).

$$n^L + n^v = 1 \quad (9)$$

$$z_i = x_i n^L + y_i n^v \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N y_i = 1 \quad (11)$$

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \quad (12)$$

Donde n^L y n^v son la fracción de las moles totales del fluido en estado líquido y gaseoso respectivamente, x_i y y_i son las fracciones molares del componente i en fase líquida y gaseosa, z_i es la fracción molar del componente i en todo el fluido, y K_i es la constante de equilibrio líquido-vapor.

3.2.3. Ecuación de estado Peng Robinson. Esta ecuación de estado es conveniente para el cálculo de propiedades termodinámicas de la mezcla de hidrocarburos en la simulación del flujo en el reactor, donde el sistema se encuentra en estado de equilibrio líquido – vapor (McCain, 1990; Riazi, 2005; Schön, 2015; Washington, 2000).

Una vez calculado la composición de las fases que se encuentran en el fluido, se usa la ecuación de estado para calcular el volumen y la densidad del gas que se produce en el cambio de fase.

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a\alpha}{V(V + b) + b(V - b)} \quad (13)$$

Donde P es la presión del fluido, R es la constante universal de los gases, V es el volumen molar del fluido, a es la medida de las fuerzas de atracción de la ecuación, b Volumen de las moléculas y α es la fracción volumétrica de la fase vapor.

3.2.4. Cálculo de la tensión superficial. Ya obteniendo las propiedades de densidad y pesos moleculares de cada fase, se calcula la tensión superficial entre la parte líquida y la fase gaseosa del fluido, este cálculo se requiere para el planteamiento de la ecuación de dinámica de la burbuja debido que es una fuerza que se ejerce entre ambas fases del fluido, por lo tanto, es una fuerza que afecta la nucleación de las cavidades y su dinámica. (Brennen, 1995; Dynamics, 1977; Kamath,

Prosperetti, & Egolfopoulos, 1993; Klotz & Hynynen, 2010; Mehdi, Kamyar, & Jafar, 2010; Okumura & Ito, 2003; Singarella & Adams, 1982).

La tensión superficial es una propiedad molecular de una sustancia y es una característica de la interfaz entre dos fases, lo cual es el producto de fuerzas desiguales que actúan sobre las moléculas en dos lados de la interfaz, lo que se debe a las diferentes fuerzas intermoleculares que existen en dos fases (McCain, 1990; Riazi, 2005; Schön, 2015; Washington, 2000).

Para calcular la tensión superficial, primero se debe calcular el paracoro de cada componente, este relaciona el volumen molar con la tensión superficial, el cual es una constante. El paracoro se puede calcular en base al peso molecular de cada componente, tanto para componentes livianos (ecuación 11) como para pesados (ecuación 12), McCain, 1990. Finalmente para el cálculo de la tensión superficial en una mezcla de hidrocarburos se usa la ecuación 16 (McCain, 1990; Riazi, 2005; Schön, 2015; Washington, 2000).

$$Pa_i = 2.841M_i + 26.4 \quad (14)$$

$$Pa_{c+} = -12.43 + 3.226M_{c+} - 0.002145M_{c+}^2 \quad (15)$$

$$\sigma_{mix} = \left\{ \sum_{i=1}^N \left[Pa_i \left(\frac{\rho_l}{M_l} x_i - \frac{\rho_v}{M_v} y_i \right) \right] \right\}^n \quad (16)$$

Donde Pa_i y Pa_{c+} son los paracoros del componente i y de la fracción pesada respectivamente, M_i y M_{c+} son los pesos moleculares de los componentes y de la fracción pesada, M_l , ρ_l , M_v , ρ_v son los pesos moleculares y densidades de la fase líquida y fase vapor respectivamente, x_i y y_i son las fracciones molares del estado líquido y gaseoso del componente i , σ_{mix} es la tensión superficial de la mezcla y n es un exponente el cual tiene valores cercanos a 4.

3.2.5. Dinámica de la burbuja. Describe el comportamiento interno de la burbuja durante su nucleación, desarrollo y colapso en función de los cambios de la presión interna de la burbuja y de la presión que ejerce el fluido en el sistema (Brennen, 1995; Dynamics, 1977; Kamath et al., 1993; Klotz & Hynynen, 2010; Mehdi et al., 2010; Okumura & Ito, 2003; Singarella & Adams, 1982). Con los cálculos de las propiedades del fluido obtenidos en este modelo, se puede describir la variación del radio de la burbuja en el tiempo ($\dot{R}_b$), en función de las presiones internas y externas de la burbuja en todas sus etapas.

$$R_b \ddot{R}_b + \frac{3}{2} \dot{R}_b^2 = \frac{1}{\rho} \left(P_v + P_{go} \left(\frac{R_o}{R_b} \right)^{3\gamma} - P_{inf} - \frac{2\sigma}{R_b} - \frac{4\mu}{R_b} \right) \quad (17)$$

$$R_o = \frac{2\sigma}{P_v + P_{go} - P_{inf}} \quad (18)$$

Donde R_b es el radio de la burbuja, R_o es el radio de nucleación de la burbuja, $\dot{R}_b$ es la velocidad de la pared de la burbuja, $\ddot{R}_b$ es la aceleración de la pared de la burbuja, P_v es la presión de vapor del fluido, P_{go} es la presión del gas dentro de la burbuja, P_{inf} es la presión de la parte líquida, γ es el coeficiente politrópico el cual la relación de calores específicos del gas (C_p/C_v), σ es la tensión superficial, μ es la viscosidad del líquido.

3.2.6. Temperatura de la burbuja. Describe la temperatura generada por la burbuja en función de la variación de su radio hasta su colapso. (Brennen, 1995; Niazi, Razi, & Hashemabadi, 2013).

La temperatura generada en el colapso de cada burbuja es descrita como la energía térmica que se utiliza en el craqueo de las moléculas del fluido en el reactor de cavitación.

$$\left(\frac{\partial R_b}{\partial t}\right) = \frac{k_l}{\rho_v L} \left(\frac{\partial T}{\partial R_b}\right) \quad (19)$$

Donde k_l es la conductividad térmica de la fase líquida, $\frac{\partial T}{\partial r}$ es la variación de la temperatura de la burbuja con respecto al radio, ρ_v es la densidad de la fase vapor en la corriente del fluido y L es el área superficial de la burbuja.

3.2.7. Fracción volumétrica de vapor. Es función de la fracción másica del gas y de la variación de la nucleación y dinámica de las burbujas en el sistema, a partir de esta ecuación se puede obtener el número de burbujas que se producen (Singhal et al., 2002).

$$\alpha \equiv f \frac{\rho}{\rho_v} = n \frac{4}{3} \pi R_b^3 \quad (20)$$

Donde α es la fracción volumétrica de la fase vapor, f es la fracción másica de la fase vapor, ρ y ρ_v son las densidades del fluido y de la fase vapor respectivamente, n es el número de burbujas que se forman en el fluido y R_b es el radio promedio de las burbujas.

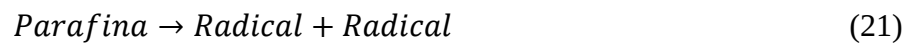
3.3. Modelo cinético

En este modelo se implementaron el modelo radical y el modelo molecular. El modelo cinético propuesto se basa en las reacciones no reversibles de craqueo térmico de los componentes de la mezcla representado por grupos o cluster que están organizados de acuerdo al punto de ebullición. En el modelo radical, se encuentra la etapa de iniciación, en la cual ocurre el rompimiento de la cadena, formando productos radicales que se estabilizan en una segunda y tercera etapa. En la

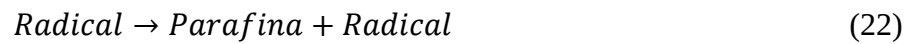
reacción molecular se encuentra la isomerización de radicales libres formando un nuevo compuesto alifático y por último para el modelo implementado ocurre la deshidrogenación, en el cual se produce nuevo hidrogeno que servirá como sellante en los nuevos productos de la etapa de terminación (Mehdi et al., 2010; Ramírez Hernández, 2012).

3.3.1. Reacción de radical.

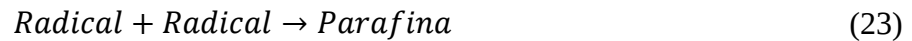
1. Iniciación de cadena:



2. Propagación:

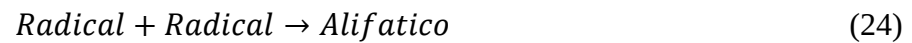


3. Terminación:



3.3.2. Reacción molecular.

1. Isomerización:



2. Deshidrogenación:



3.4. Modelo del reactor

Se utiliza un modelo de flujo unidimensional para simular el comportamiento del fluido en un reactor (Mehdi et al., 2010). Este modelo está conformado por el balance molar de estado dinámico

en el reactor y de las velocidades de reacción que ocurren dentro de este; además está representado por medio de la energía calculada en el modelo de cavitación y por las reacciones planteadas en el modelo cinético.

3.4.1. Velocidad de reacción. Esta ecuación define la rapidez con la que se produce o se consume cada uno de los productos de una reacción química (Smith, 1991); en el modelo matemático se aplica para determinar las velocidades de las reacciones que ocurren en el modelo cinético.

$$r_A(t) = k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT(t)}\right) C_A(t) \quad (26)$$

Donde r_A es la tasa de reacción, k_0 es el factor de frecuencia, E es la energía de activación, R es la constante universal de los gases, C_A es la concentración del producto y T es la temperatura en la que ocurre la reacción, la cual está basada como condición de referencia en la temperatura de colapso de las burbujas.

3.4.2. Balance molar de estado dinámico para el reactor. El balance molar permite conocer el efecto de los cambios de concentración de entrada a una temperatura dada, sobre la concentración de salida en un sistema multicomponente (Smith, 1991). El objetivo es encontrar los cambios de concentración de las reacciones en forma simultánea.

$$qC_{Ai}(t) - V_r r_A(t) - qC_A(t) = V_r \frac{dC_A}{dt} \quad (27)$$

Donde q es el caudal de operación al reactor, V_r es el volumen del reactor, r_A es la velocidad de reacción de cada componente, C_{Ai} es la concentración inicial de cada componente en función del

tiempo, C_A es la concentración de cada componente en el tiempo, y $\frac{dC_A}{dt}$ es la variación de la concentración de cada componente en el tiempo.

4. Desarrollo de la herramienta software CAVITATOR

La herramienta software CAVITATOR, predice el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas del crudo mediante simulación numérica obteniendo valores predictivos de cambios de viscosidad, densidad y composición de un crudo pesado cuando se somete a cavitación hidrodinámica en presencia de un agente, para este caso la nafta, como donante de hidrógeno. Para la industria, representaría un avance tecnológico que permitiría evaluar su alcance en la mejora de las propiedades con este tipo de crudos; sin embargo, la tecnología se limita por ser bastante reciente, su investigación aún sigue siendo de estudio y por este motivo, el software debería irse afianzando poco a poco mientras madura la implementación de este proceso en la industria.

Para la elaboración del software, primero se realizó una recopilación de información sobre los principios y fundamentos que rigen el fenómeno de cavitación hidrodinámica y de su implementación en la reducción de viscosidad y densidad en hidrocarburos pesados a partir del cambio de composición, también se determinó la importancia de adicionar una sustancia donante de hidrógeno necesaria en el sistema para evitar el problema de recombinación de radicales en cadenas más largas y formar moléculas más pesadas (Askarian et al., 2017).

El proceso se dividió en dos etapas, la primera corresponde a la etapa del mezclador y la segunda, al reactor de cavitación, como se muestra en la figura 2. Para la implementación de cada una de las etapas en el software, se realizó el planteamiento de las ecuaciones involucradas y se

dividió en cuatro modelos los cuales componen el modelo matemático a usar, es a partir de este modelo que se desarrolló el algoritmo matemático, adicionalmente el software cuenta con un módulo de análisis económico en base a los resultados obtenidos de la simulación, con el fin de establecer la viabilidad económica de usar la cavitación en la industria de hidrocarburos. El entorno informático utilizado es MATLAB (Matrix Laboratory) debido a su respectivo lenguaje de programación de alto nivel para la implementación del algoritmo, ya que ofrece un manejo eficiente de cálculos matemáticos y permite el desarrollo de una interfaz gráfica para el usuario; este software es licenciado por la Universidad Industrial de Santander.

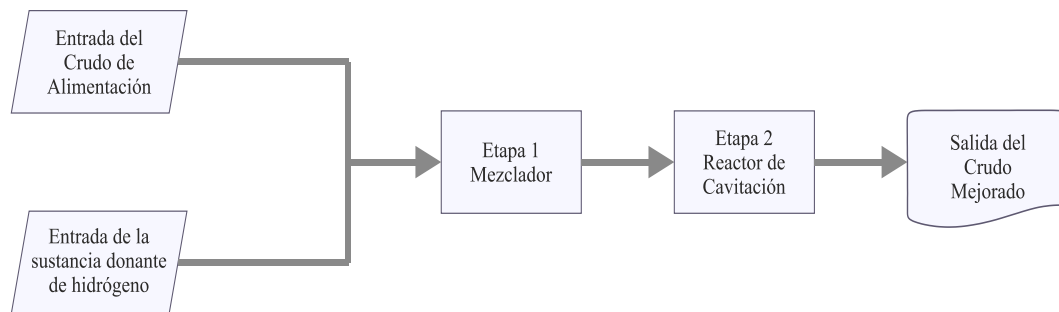


Figura 2. Esquema general del proceso.

4.1. Etapa I, mezclador.

Esta etapa determina las propiedades del fluido de entrada al reactor de cavitación, el cual se compone de un sistema de mezclado homogéneo entre el crudo y el donante de hidrógeno, se definen las propiedades de cada fluido de entrada, luego se organiza toda la data y finalmente por reglas de mezclado se determinan las propiedades de la corriente de salida, como se muestra en la figura 3.

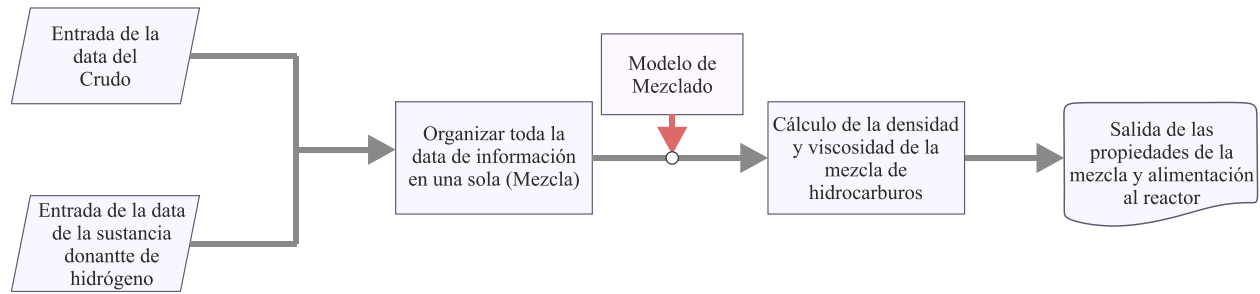


Figura 3. Esquema de la etapa de mezclado.

4.2. Etapa II, reactor de cavitación.

En esta segunda etapa, el fluido de la corriente de salida de la etapa anterior pasa a ser la alimentación para esta fase, el usuario debe definir las dimensiones y la geometría del reactor junto con las condiciones de entrada del fluido de alimentación, a partir de estos datos de entrada se calcula la caída de presión del fluido en el reactor y la presión de salida, con estas condiciones de entrada y el modelo de cavitación, se determina si el fluido es o no cavitado, de no cumplir esta condición el usuario debe redefinir ya sea el diseño del reactor o las condiciones de operación; por el contrario si es válida la condición, con el mismo modelo calcula las propiedades termodinámicas de la fase líquido-vapor, y se representa el comportamiento de las burbujas generadas por la cavitación y la energía térmica que aporta el colapso de las burbujas al sistema mediante solución numérica, por medio del método numérico de Runge Kutta (Chapra, 2012).

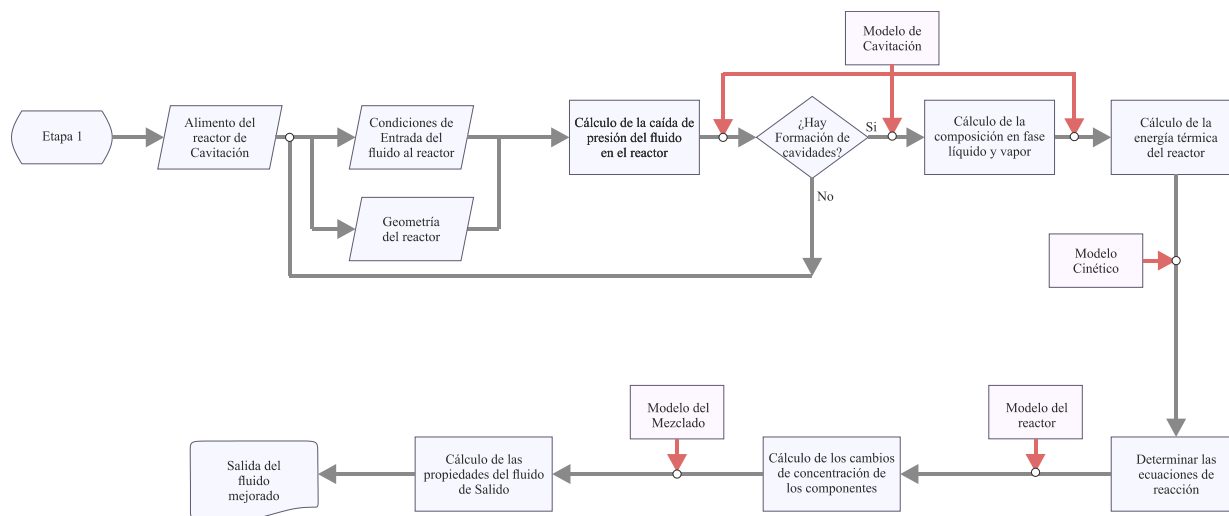


Figura 4. Diagrama de la etapa del reactor de cavitación.

Una vez finaliza el modelo de cavitación, se implementa el modelo cinético, se organizan los cluster y las reacciones que se van a llevar a cabo, es aquí donde se aprovecha la energía emitida en el colapso de la burbuja para llevar a cabo las reacciones químicas del modelo cinético.

En el modelo del reactor se verá reflejado el cambio de la composición, luego se implementan las reglas de mezclado para obtener los nuevos valores de viscosidad y densidad del crudo cuando es cavitado.

4.3. Interfaz gráfica e interacción con el software.

Se desarrolló un manual para el usuario, donde se encuentra la guía de instalación del software. En este apartado del libro se explicará únicamente la guía de interacción del usuario con el software una vez instalado.

Después de la instalación, al ejecutarse el programa se abrirá la ventana de inicio del software como se muestra en la figura 5, acá se encontrará un botón muy recurrente que es el de ayuda y

que se encuentra en la parte superior de la ventana, este abrirá automáticamente el manual del software; para acceder al programa se debe tener usuario y contraseña registrada, en caso de ingresar por primera vez, el usuario podrá registrarse en el botón de la parte superior izquierda de la ventana llamado “Registrarse”, allí aparecerá un formulario que debe diligenciar, una vez registrado el usuario, debe llenar los campos mostrados en la figura 5 seguido del botón “Entrar”.



Figura 5. Ventana de Inicio del software Cavitator. Tomado del Software Cavitator.

Aparece la primera ventana operativa del software como se muestra en la figura 6, al lado izquierdo de la ventana, se muestra un recuadro con los botones que tiene el software donde el usuario podrá ubicarse en cuál de ellas se encuentra actualmente. En la parte superior se encuentra el menú desplegable de “Archivo”, que permite abrir o guardar el progreso, también cuenta con la pestaña de “Diagramas”, donde se mostrará los algoritmos de ambas etapas, por último, la pestaña “Acerca de” se encuentra la información del software de los autores, la empresa e instituciones patrocinadoras del programa.

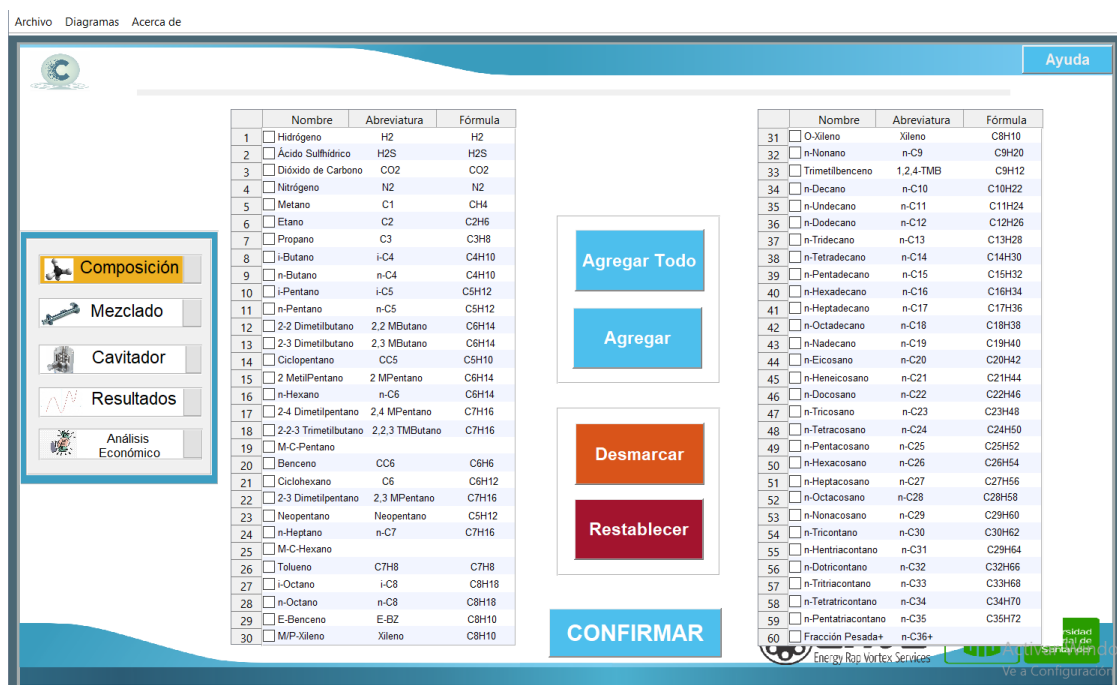


Figura 6. Ventana de selección de componentes del software. Tomado de Software Cavitator.

En el contenido central de la ventana, aparecen los componentes que el usuario desea seleccionar y que son correspondientes a la composición del crudo y del donante de hidrógeno, el usuario deberá marcar los componentes que desea agregar y luego pulsar el botón de “Agregar”, o por el contrario seleccionar el botón de “Desmarcar”, si desea desmarcar de la lista seleccionada los elementos agregados, el usuario también puede agregar todos los componentes de la lista pulsando el botón “Agregar Todo” por último, el botón “Restablecer”, permite dejar la ventana como se encontraba antes de cualquier cambio. Una vez definida la lista de los componentes se debe pulsar el botón “Confirmar”, allí aparecerá un mensaje de validación que muestra el número de componentes seleccionados para poder continuar en el siguiente módulo.

En la figura 7, se muestra la ventana de mezclado, en la cual se encuentra el diseño del mezclador, en este módulo se puede observar las corrientes de entrada de crudo y nafta junto con

la corriente de salida que corresponde a la mezcla final, el usuario debe ir seleccionando cada corriente de entrada agregando sus propiedades y condiciones de entrada, una vez realizado en ambas corrientes se debe seleccionar el botón simular, allí se validará la información indicando que la simulación fue exitosa, además se podrán visualizar los resultados de la mezcla con el botón de “propiedades de mezcla”; una vez hecha la simulación se podrá continuar con la siguiente fase.

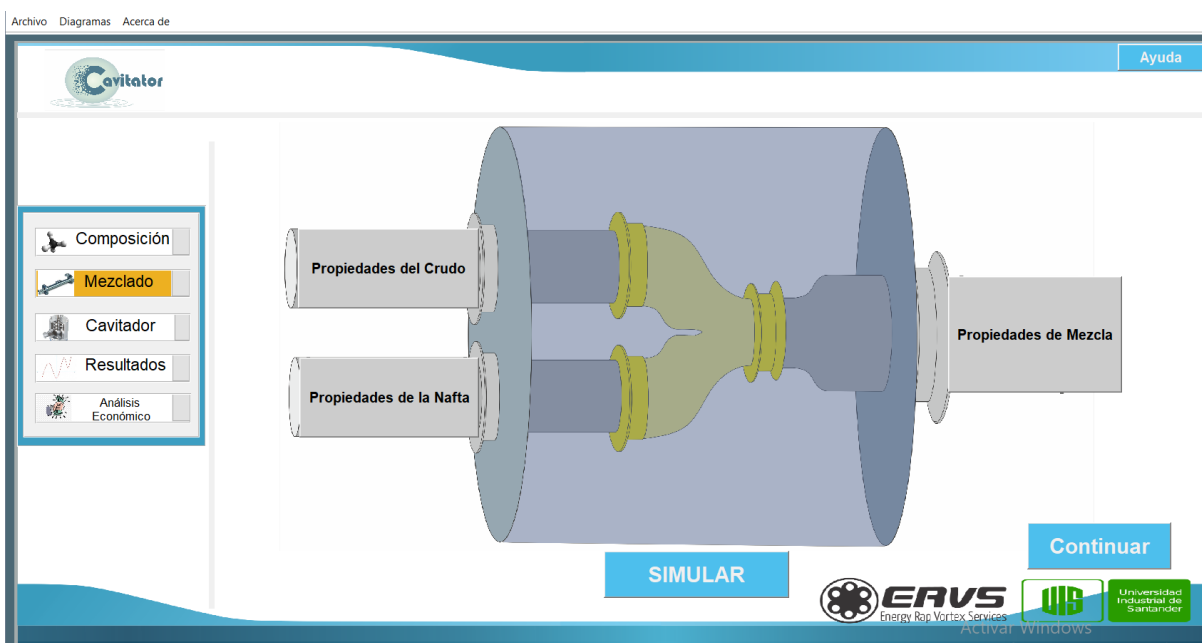


Figura 7. Ventana de mezclado del software. Tomado del Software Cavitator.

Al seleccionar el botón de alguna de las corrientes de entrada se desplegará una primera ventana la cual se muestra en la figura 8, allí se muestra una lista de los componentes en base a los que fueron seleccionados, se debe agregar la composición completa del fluido tanto del crudo como de la nafta, luego se selecciona el botón confirmar, el software realizará la suma total de los porcentajes de la fracción molar, el resultado se mostrará debajo del recuadro de la composición, este debe sumar obligatoriamente 100%, de cumplir con esta condición, se habilitará el botón

continuar el cual lleva a la siguiente ventana, de no cumplir con el parámetro saldrá un recuadro que describe el error.

Composición del Crudo

	Componentes	% Molar
48	n-C24	1.6300
49	n-C25	1.4500
50	n-C26	1.3900
51	n-C27	1.3000
52	n-C28	1.2300
53	n-C29	1.2500
54	n-C30	1.2200
55	n-C31	1.1800
56	n-C32	0.9800
57	n-C33	1.0200
58	n-C34	0.9500
59	n-C35	0.9700
60	n-C36+	12.5100

Total 0

Confirmar

ERVS
Equipo de Investigación y Desarrollo en Simulación

Figura 8. Ventana de composición del fluido. Tomado del Software Cavitator.

Una vez confirmada la composición se desplegará la siguiente ventana que se muestra en la figura 9, allí se deben llenar los campos con las propiedades de densidad y viscosidad del crudo y las condiciones de presión y temperatura a las que fueron tomadas, adicionalmente se deben agregar las propiedades de la fracción pesada del fluido a las mismas condiciones. Finalmente se cliquea el botón de confirmar, allí aparecerá un mensaje de validación y se habilitará el botón de continuar.

Abrir Continuar

Guardar

Propiedades del Crudo

Propiedades del Crudo en el Assay

Temperatura °F

Presión Psi

Densidad API

Viscosidad cP

Fracción Pesada

Densidad C36+ API

Peso Molecular C36+ g/mol

Confirmar

ERVS Universidad Nacional

Figura 9. Ventana de propiedades del fluido. Tomado del Software Cavitator.

Cuando se define la composición y las propiedades del crudo, se abre la ventana que se muestra a continuación figura 10, allí se deben diligenciar las propiedades de densidad y viscosidad con respecto a las condiciones de entrada del fluido en la etapa de mezclado, es decir son propiedades tomadas a las condiciones de operación, al igual que la ventana anterior, se debe seleccionar el botón continuar, éste valida que este bien diligenciado los campos habilitando el botón de finalizar.

Una vez realizados los pasos anteriores de manera correcta con ambas corrientes de entrada, el software retorna a la ventana de mezclado, aquí se deberá seleccionar el botón “Simular”; una vez finalizada la simulación, saldrá un mensaje confirmando que la simulación tuvo éxito, después se debe seleccionar la corriente de salida del mezclado, allí se visualizarán los resultados de las tres corrientes como se muestra en la figura 11; después de realizado este paso, se podrá continuar en la siguiente ventana, que corresponde al reactor de cavitación.

Propiedades de Alimentación del Crudo

Propiedades de la Alimentación

Temperatura °F

Presión Psi

Volumen gal

Propiedades del Crudo en alimentación

Densidad @T(in) API

Viscosidad @T(in) cP

Confirmar

ERVS Universidad Industrial de Santander

Figura 10. Ventana de propiedades del fluido de alimentación. Tomado del Software Cavitator.

Resultados del Mezclado

	Componentes	Peso Molecular [g/mol]	Frac. Molar	Frac. Másico	Masa Componente [Kg]	Viscosidad Componente [cP]	Densidad Componente [Kg/m3]
1	C2	30.0696	3.4388e-04	3.2075e-05	0.0048	0	0
2	C3	44.0965	0.0050	6.8205e-04	0.1012	0.0893	479.6800
3	i-C4	58.1234	0.0029	5.2147e-04	0.0774	0.1490	541.8161
4	n-C4	58.1234	0.0168	0.0030	0.4503	0.1487	570.1358
5	n-C5	72.1503	0.0350	0.0078	1.1632	0.1901	607.8264
6	n-C5	72.1503	0.0480	0.0107	1.5948	0.1989	611.9719
7	2,2 Mbutano	86.1772	3.8317e-04	1.0243e-04	0.0152	0.2795	645.1998
8	2,3 Mbutano	86.1772	0.0015	4.0288e-04	0.0598	0.2797	649.2067
9	Ciclopentano	70.1344	0.0116	0.0025	0.3739	0.3655	731.6484
10	2Mpentano	86.1772	0.0155	0.0042	0.6165	0.2449	640.4520
11	n-C6	86.1772	0.0356	0.0095	1.4137	0.2645	645.0734
12	2,4 Mpentano	100.2040	0.0025	7.8531e-04	0.1165	0.3409	703.6821
13	2,2,3 TMbutano	100.2040	0.0079	0.0025	0.3648	0.4619	674.6268
14	M-C Pentano	84.1613	0.0094	0.0024	0.3630	0.4111	732.2406
15	Benceno	78.1136	0.0048	0.0012	0.1718	0.5104	858.3570
16	CicloHexano	84.1613	0.0138	0.0036	0.5335	0.7320	761.5900
17	2,3 Mpentano	100.2040	0.0012	3.7558e-04	0.0557	0.3416	704.2514
18	Mezcla	75.4203	0.0044	0.0492e-04	0.1445	0.3430	676.0548

Masa: 148.379 Kg Volumen: 41.9504 gal Densidad: 934.378 Kg/m³ Viscosidad: 2575.35 cP

ERVS Universidad Industrial de Santander

Figura 11. Ventana resultados del mezclado. Tomado del Software Cavitator.

En el módulo de cavitación que se muestra en la figura 12, se observa un esquema general del cavitador, en este apartado se debe ir al botón de diseño y luego simular.

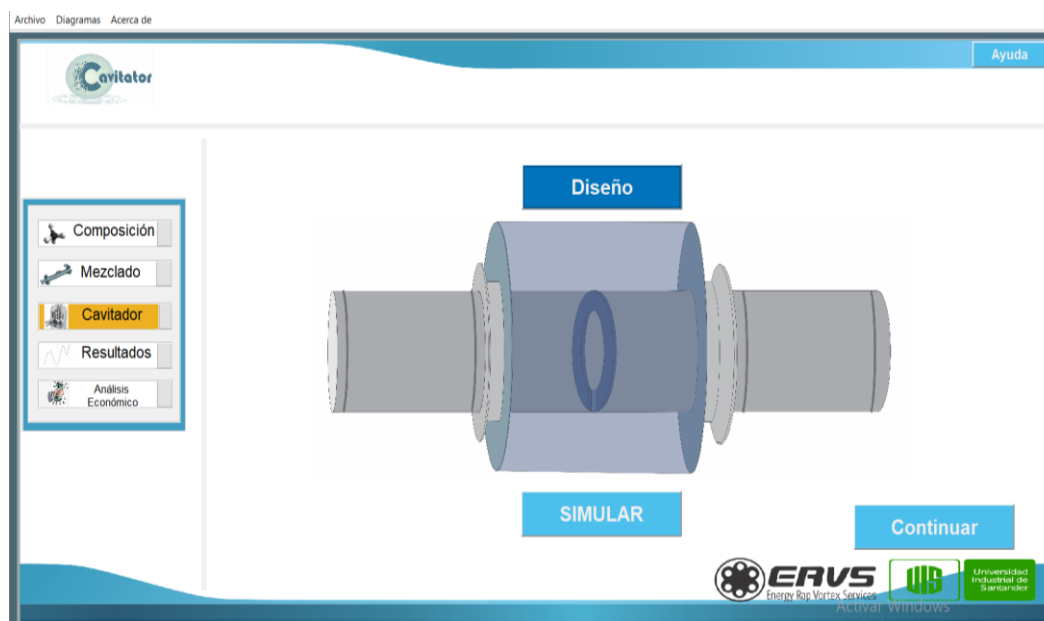


Figura 12. Ventana del cavitador. Tomado del Software Cavitator.

En la ventana de diseño que se muestra en la figura 13, se observa el diseño de la zona del sistema del reactor donde ocurre la cavitación, aquí es donde se definirán las dimensiones de las aberturas o rendijas donde ocurre la caída de presión y posteriormente el fenómeno de cavitación hidrodinámica, las burbujas que se forman en las rendijas viajarán a lo largo de ellas y saldrán a la abertura central donde colapsarán debido a la presión del fluido, este colapso produce la energía térmica que permite lograr el upgrading del crudo.

En esta ventana se encuentra una opción para seleccionar el número de rendijas e introducir las dimensiones del diseño, además el software cuenta con otro apartado para las condiciones de entrada del fluido de alimentación, donde la presión de saturación puede ser un parámetro de entrada dado por el usuario o por el programa, una vez ingresadas las condiciones de entrada, las dimensiones y el número de rendijas, se selecciona el botón confirmar, acá se verificarán que los datos de entrada sean correctos para que el programa pueda calcular la presión de saturación en

caso de que el usuario no la haya ingresado como parámetro de entrada; finalmente se pulsa el botón continuar y se espera el mensaje de validación, el cual muestra un mensaje que describe si existe cavitación o no, de no haber cavitación se deben modificar los parámetros de diseño o las condiciones de entrada, una vez que muestre el mensaje confirmando la cavitación, se selecciona el botón de continuar.

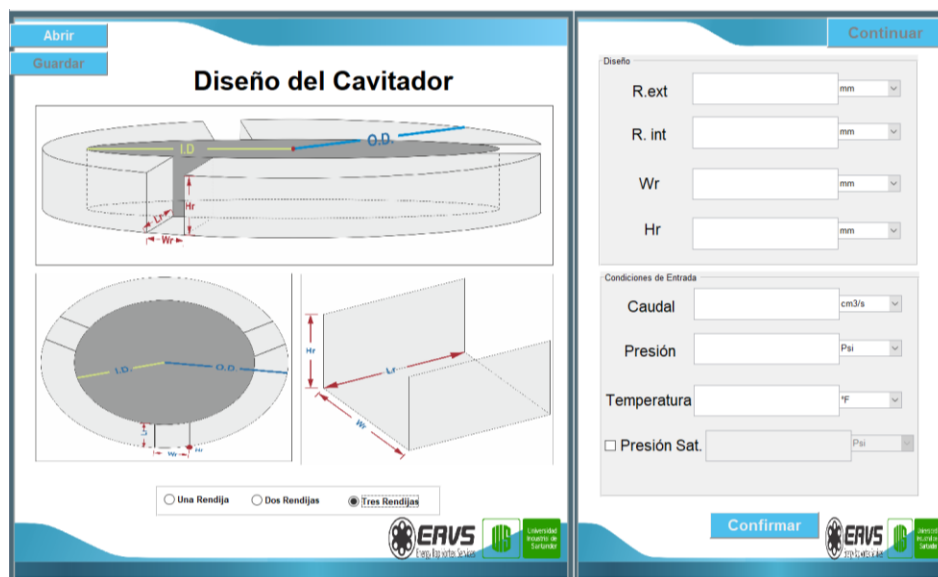


Figura 13. Ventana de diseño del cavitador. Tomado del Software Cavitator.

Después de retornar a la ventana de cavitación, finalmente se selecciona el botón simular, una vez realizada la simulación con éxito, se selecciona el botón “Continuar” el cual habilita la ventana de resultados. En la primera ventana de resultados que se muestra en la figura 14, se observa cuatro gráficas principales que son: dinámica de burbuja, viscosidad, densidad y gravedad API en función del tiempo, todas las gráficas cuentan con un botón en la parte superior derecha, al seleccionarlo muestra la gráfica en una ventana nueva que se podrá ajustar a gusto del usuario, al lado derecho de la ventana se encuentra una tabla que muestra la composición del fluido, debajo de esta tabla se

encuentra una barra de desplazamiento horizontal la cual tiene la función de mostrar los valores de composición, viscosidad y densidad en función del tiempo en el que el fluido pasa por el reactor; también se encuentra el botón “Continuar” el cual al presionarlo abre la siguiente ventana de resultados y por último el botón de “Análisis Económico” que permite abrir el módulo de análisis y proyección económica del proyecto.

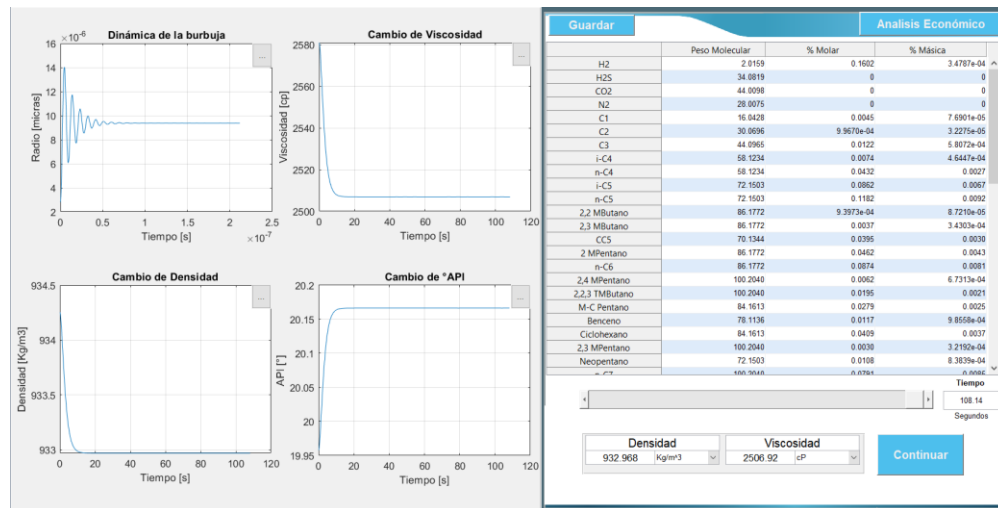


Figura 14. Ventana 1 de resultados de cavitación. Tomado del Software Cavitator.

En la segunda ventana de resultados que se muestra en la figura 15, se observa que, en el costado izquierdo, se encuentran los botones de cada uno de los componentes, al pulsar cualquiera de ellos se mostrará la gráfica de la variación de la concentración de moles en el componente, igualmente debajo de la gráfica se cuenta con un botón para el ajuste de gráfica, el cual se podrá abrir de forma independiente para poder ajustar a gusto del usuario.

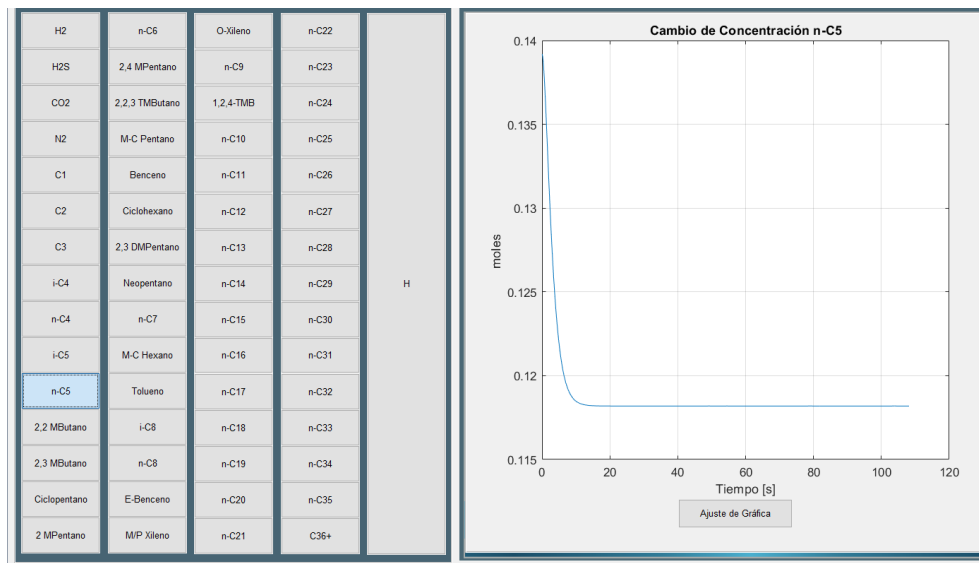


Figura 15. Ventana 2 de resultados de cavitación. Tomado del Software Cavitator.

El módulo de análisis y proyección económica que se muestra en la figura 16, permite al usuario analizar la viabilidad del proyecto de acuerdo a los valores de VPN y TIR proyectados a 5 años, el costado izquierdo de la ventana cuenta con 16 parámetros los cuales se deben llenar excepto los que están en letra negrilla, ya que estos serán calculados por el propio software, además se debe tener en cuenta el periodo (meses) en el cual se empieza a recibir el primer ingreso, el primer egreso y la tasa de interés. Una vez llenado los campos se selecciona el botón “calcular”.

En la tabla del costado derecho se muestra el valor de cada parámetro mes a mes hasta los 5 años, en la parte inferior de la ventana se encuentra una barra de desplazamiento horizontal, su función es cambiar el año, mostrando los valores de flujo de caja, flujo de caja acumulado, el VPN y la TIR correspondiente al año que se indica en el recuadro continuo a la barra.

ANÁLISIS Y PROYECCIÓN ECONÓMICA

1) Incremento Anual % 10

2) Cantidades de Servicio mensual 20 incremento% 0

3) Precio Unitario Servicio (USD) 5567.5

4) **Ventas Totales (USD)** 111350 ☐ Añadir

5) Costos Variables mensual 0

6) Costos Fijos mensual 0

7) Otros Costos y Gastos mensual 13000

8) **Costos y Gastos Totales (USD)** 13000

9) Depreciación y Amortización mensual 0 incremento% 0

10) Otros 0

11) **Utilidad Antes de Impuestos** 98350

12) Impuestos % 20

13) **Utilidad neta** 78680

14) Inversión Neta Total 300000

15) **Flujo de Caja Neto (USD)** 378680

16) **Flujo de Caja Acumulado** 378680

Indicadores

Mes del Primer 1 Mes del Primer 1

TASA DE INTERÉS 15

Calcular

	mes 0	mes 1	mes 2	mes 3	mes 4	mes 5
1	0	0	0	0	0	0
2	0	20	20	20	20	20
3	0	5.5675e+03	5.5675e+03	5.5675e+03	5.5675e+03	5.5675e+03
4	0	111350	111350	111350	111350	111350
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	13000	13000	13000	13000	13000
8	0	13000	13000	13000	13000	13000
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	98350	98350	98350	98350	98350
12	0	19670	19670	19670	19670	19670
13	0	78680	78680	78680	78680	78680
14	300000	0	0	0	0	0
15	300000	78680	78680	78680	78680	78680

Años 5

FLUJO DE CAJA USD 1.38234e+06

FLUJO DE CAJA ACUMULADO USD 6.06419e+06

VPN (USD) 3.46327e+06

TIR % 324.352

Figura 16. Ventana Análisis y proyección económica del software. Tomado del Software Cavitator.

Para la integración de los resultados de la cavitación con el análisis económico en este proyecto, se añadió un botón al lado derecho del parámetro número cuatro, “ventas totales (USD)”, este despliega una ventana nueva, la cual se muestra a continuación:

Datos del crudo

Viscosidad Inicial cP 3973 API Inicial 16

Viscosidad Final cP 2200.1 API Final 21.87

Datos Nafta

Viscosidad 0.2758 API 80

% de Nafta Añadido 5

Datos Económicos

Datos del crudo

Precio Petróleo (USD/BL) 65

Bariles a tratar (BPD) 1000

Datos Nafta

Precio Nafta (USD/BL) 85

Cobro servicio por reducción de Viscosidad (USD/BL) ☐ 0.60

Precio por reducción >80 % (USD/BL) 0.45

Precio por reducción >=50 % (USD/BL) 0.35

Precio por reducción >=30 % (USD/BL) 0.20

Cobro servicio por aumento de API (USD/API*BL) 0.25

Calcular

Resultados

Valor Total Servicio por Aumento de API USD/día 967.5

Valor Total Servicio por Reducción viscosidad USD 350

Cobro % de Nafta Añadido 4250

Valor Total Servicio USD/día 5567.5

Abrir

Guardar

Figura 17. Ventana Análisis económico de los resultados de cavitación del software. Tomado del: Software Cavitator.

Esta ventana debe contar con los precios de referencia del crudo, de la nafta, y la cantidad barriles de crudo a tratar, además se debe establecer dos parámetros para el cobro de servicio, el primero es por reducción en la viscosidad y el segundo por aumento de cada grado API, para el primer parámetro se propone establecerlo por porcentaje de reducción en la viscosidad, añadiendo valores a cada uno de ellos, aunque si el usuario lo prefiere puede seleccionar el checkbox del costado derecho y dar un precio único a este apartado. Al hacer clic en el botón calcular, se obtiene el valor del cobro por reducción de viscosidad, por aumento de API, y por la nafta añadida, finalmente se suma todo en un solo valor total del servicio, aunque si el usuario desea, puede dar un valor independiente a cada parámetro seleccionando el checkbox correspondiente en el panel de resultados.

5. Prueba del simulador

Para la aplicación del software, se trabajó con un crudo pesado de 18,2° API, una viscosidad reportada en 3974 @ 103°F, además se usó nafta como donante de hidrógeno de 80° API y viscosidad de 0.2759 cP @ 100°F, se contó con la composición y propiedades de estos fluidos mediante los reportes Assay y pruebas PVT, estos fueron los datos de entrada al simulador como lo muestra las ventanas de las figuras 8 y 9, después se agregaron las condiciones de entrada de crudo y nafta como lo muestra la ventana de la figura 10 con los datos de la tabla 1.

Tabla 1

Datos de entrada del crudo y del donante.

Propiedad	Crudo	Nafta
Gravedad API @ 60°F	18.2	80
Viscosidad(cP) @ 103.5°F	3974	0.268
Temperatura de entrada (°F)	103.5	103.5
Presión de entrada (psig)	24	24
Volumen de entrada (gal)	40	-

Nota: datos tomados de los reportes de Assay y pruebas PVT de los fluidos.

Para esta prueba se realizaron tres corridas, en las cuales se iba cambiando la concentración de donante al 1, 2 y 5 (%v/v) porcentaje volumétrico, en la tabla 2, se muestran los valores de volumen de entrada de la nafta.

Tabla 2.

Valores volumétricos de la entrada de nafta a la etapa de mezclado.

Concentración en porcentaje de volumen	1%	2%	5%
Volumen (gal)	0.404	0.816	2.105

Esta mezcla de crudo y nafta corresponde a la entrada de alimentación para el reactor, en la cual se estableció el modelo de una sola rendija junto con las dimensiones mostradas en la tabla 3.

Tabla 3.

Diseño de la zona de cavitación en el reactor.

Especificaciones de diseño	Dimensión
Radio externo (inch)	3.94
Radio interno (inch)	3.14

Ancho rendija (inch)	1
Espesor rendija (inch)	0.39

Por último, se definieron las condiciones de entrada de la mezcla como se muestra en la tabla 4, donde la presión de saturación es un dato opcional de entrada, ya que puede ser determinado por el propio software; para este caso se tomó el dato de presión arrojado por el programa en cada una de las corridas, después se procedió a simular la etapa del reactor.

Tabla 4
Condiciones de entrada del fluido al reactor de cavitación.

Condiciones de entrada	1%	2%	5%
Caudal (gpm)	10	10	10
Presión de entrada (psig)	500	500	500
Temperatura (°F)	239	239	239
Presión de saturación (psi)	21.911	24.404	31.26

6. Resultados y validación

Después de agregar todos los datos de entrada presentados en el capítulo anterior para ambas etapas del programa se procedió a simular, obteniéndose los respectivos resultados de cambio de viscosidad y densidad a partir de la variación en la composición; estos resultados posteriormente se validaron con el fin comprobar concordancia y similitud con la realidad.

6.1. Resultados

Los resultados de las tres corridas del simulador se muestran en la siguiente tabla; para la primera etapa de mezclado, se muestran los resultados de gravedad API, viscosidad, temperatura, masa y volumen de la mezcla crudo - nafta como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5.

Propiedades del crudo de salida de la etapa de mezclado con concentraciones de nafta de 1, 2 y 5% v/v.

Porcentaje de entrada de Nafta	1%	2%	5%
Gravedad API	18.60	19.00	20.23
Viscosidad (cP)	3619.57	3301.05	2520.61
Temperatura de Salida (°F)	103.5	103.5	103.5
Volumen (gal)	40.38	40.68	41.98
masa (lb)	318.19	320.42	327.12

Nota: datos obtenidos por el simulador CAVITATOR.

Una vez obtenido los datos de la etapa de mezclado y haber definido las condiciones de entrada y geometría del reactor, se pasa a la simulación de la etapa del reactor. En la primera fase, se determinó la fracción de moles que se encuentra en fase vapor de la mezcla (nv) en la rendija del reactor; esta variable se encuentra en el sistema de ecuaciones del cálculo de equilibrio líquido-vapor en el modelo de cavitación; los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6

Porcentaje de moles en fase vapor para cada concentración de nafta.

Concentración De Nafta (%v/v)	% moles en fase vapor de la mezcla
1	5.25

2	7.865
5	12.2

Nota: datos obtenidos por el software CAVITATOR.

Luego se determinó el comportamiento promedio del radio de las burbujas producidas a diferentes concentraciones como se muestran las figuras 18, 19 y 20; en las cuales se pudo observar que a mayor fase vapor (mayor concentración de nafta), además se obtuvo una mayor oscilación en el cambio del radio de la burbuja, lo cual implicó una mayor dinámica en las cavidades.

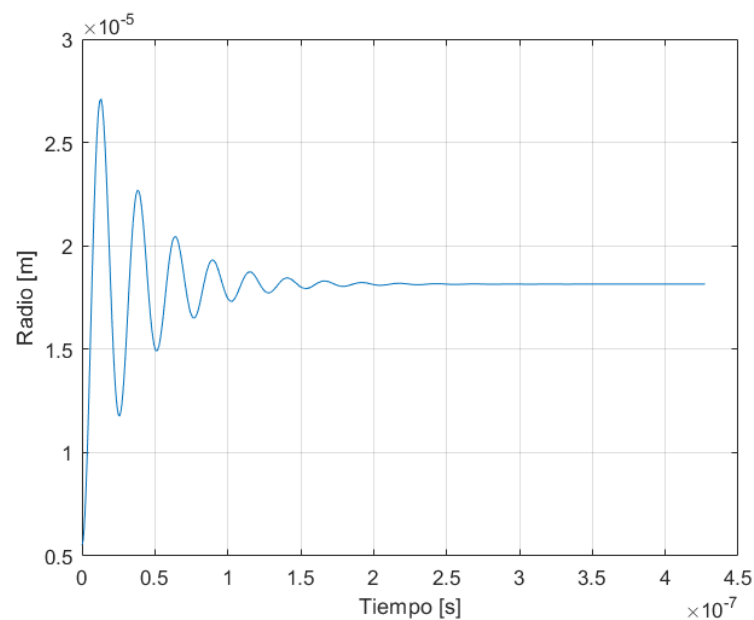


Figura 18. Comportamiento de la burbuja con concentración de 1% nafta. Gráfica obtenida por el simulador CAVITATOR.

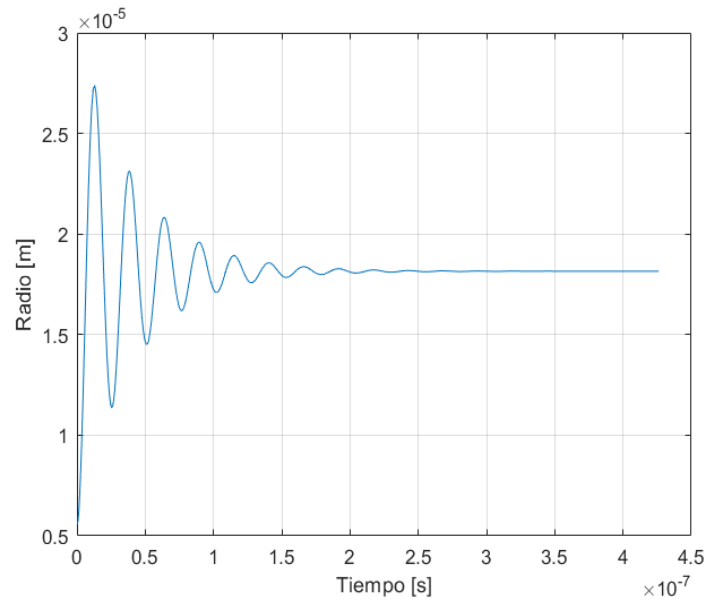


Figura 19. Comportamiento de la burbuja con concentración de 2% nafta. Gráfica obtenida por el simulador CAVITATOR.

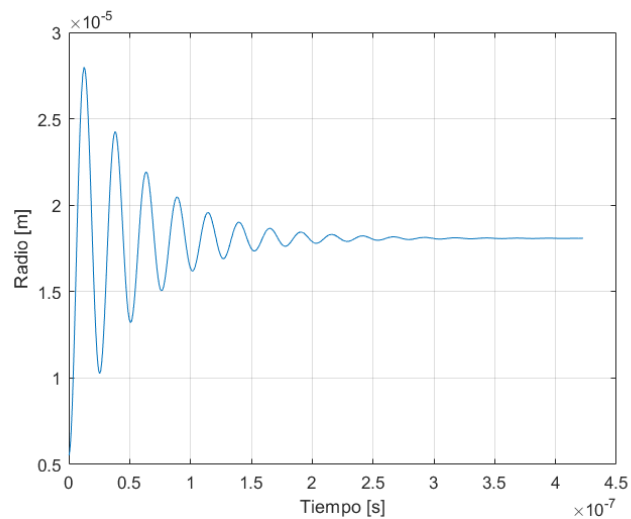


Figura 20. Comportamiento de la burbuja con concentración de 5% nafta. Gráfica obtenida por el simulador CAVITATOR.

Dado que la variación de temperatura de la burbuja depende de su dinámica y esta se encuentra en función de la concentración de nafta; para este estudio se concluyó que a mayor concentración se encuentran temperaturas de colapso local más altas (Dynamics, 1977), en las figuras 21, 22 y

23 se muestra la variación de la temperatura de burbuja en la mezcla a diferentes concentraciones de nafta.

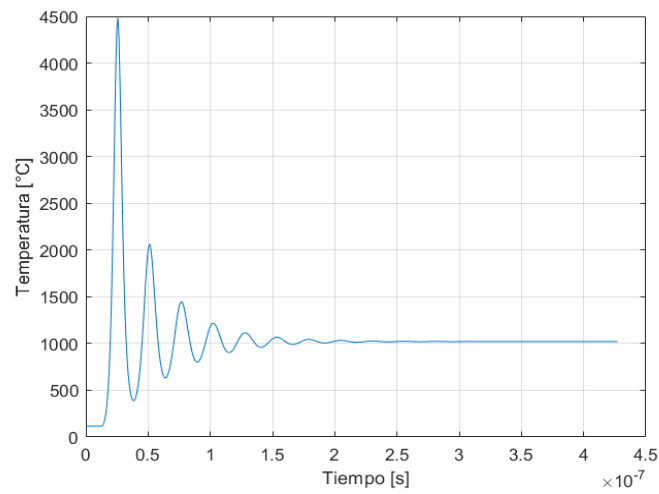


Figura 21. Temperatura de la burbuja con concentración de 1% nafta. Gráfica obtenida por el simulador CAVITATOR.

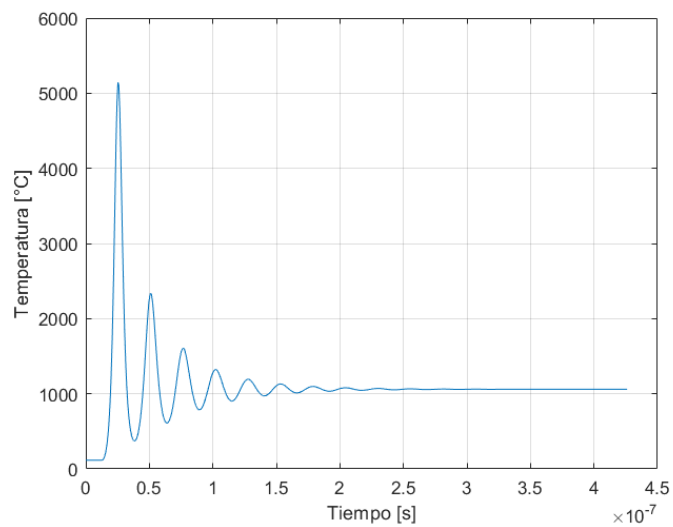


Figura 22. Temperatura de la burbuja con concentración de 2% nafta. Gráfica obtenida por el simulador CAVITATOR.

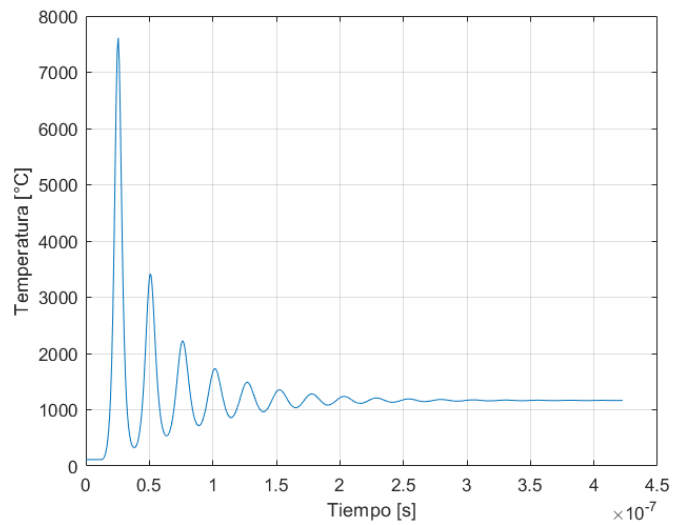


Figura 23. Temperatura de la burbuja con concentración de 5% nafta. Fuente: gráfica obtenida por el simulador CAVITATOR.

En base a la temperatura de la burbuja y a su temperatura de colapso, se estimó la temperatura local promedio que se obtuvo en el fluido a diferentes concentraciones de nafta, cuando pasó por el reactor, los valores se muestran en la figura 24.

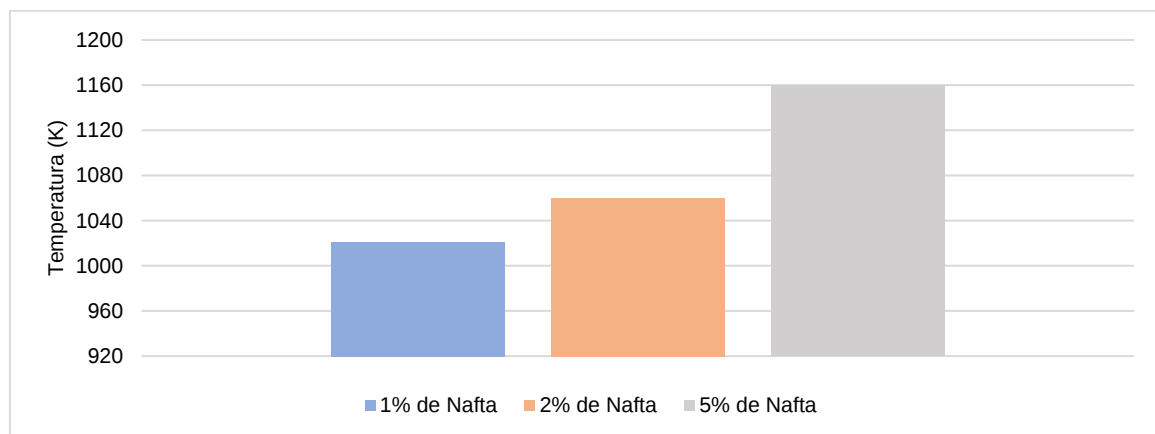


Figura 24. Temperatura de colapso local de las burbujas a diferentes concentraciones de nafta. Datos obtenidos por el simulador CAVITATOR.

En la figura 25, se puede observar el cambio de la viscosidad del crudo en el reactor con respecto al tiempo, y en la tabla 8, se muestra el cambio de viscosidad en la entrada y en la salida del reactor.

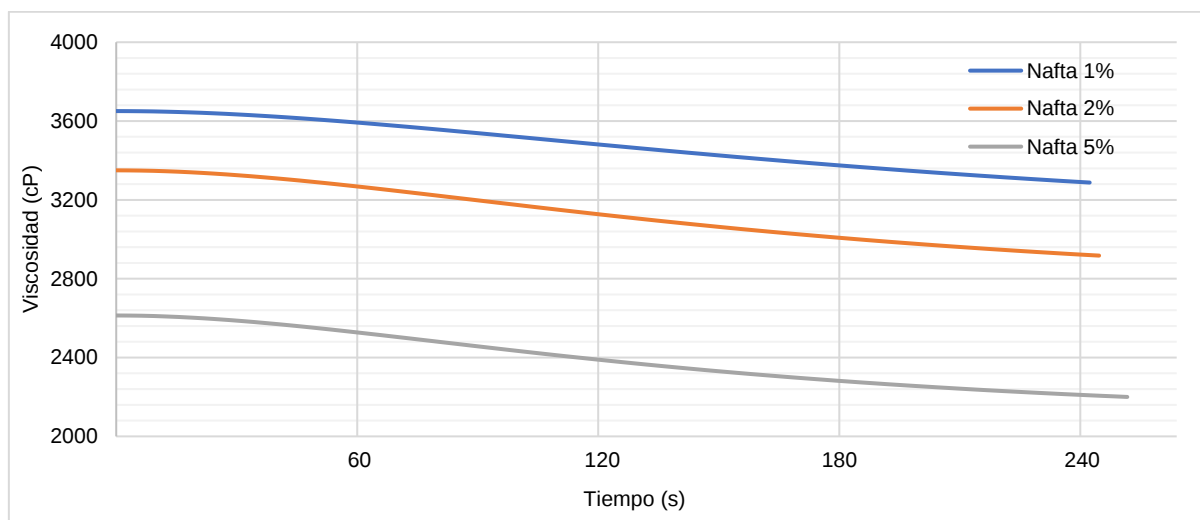


Figura 25. Cambio de la viscosidad del crudo en el reactor. Datos obtenidos por el simulador CAVITATOR.

Tabla 7

Cambios de viscosidad en las etapas del proceso.

Concentración de Nafta (%v/v)	Viscosidad en la Simulación etapa de mezcla (cP)	Viscosidad en la Simulación etapa de cavitación (cP)	% Disminución
1%	3619.57	3445.63	4.806
2%	3301.05	2917.2	11.62
5 %	2520.61	2200.1	13.71

Nota: datos obtenidos por el simulador CAVITATOR.

En la figura 26 se muestran los resultados de los cambios de densidad a diferentes concentraciones de nafta en la etapa de cavitación, donde se observa que el crudo tiene una disminución más grande en la densidad a mayores concentraciones de nafta, esto también se ve

reflejado en tabla 9, donde se observa que al 5% de nafta, se obtiene un aumento por encima de un grado API adicional, mientras que con las otras concentraciones el aumento no es tan significativo.

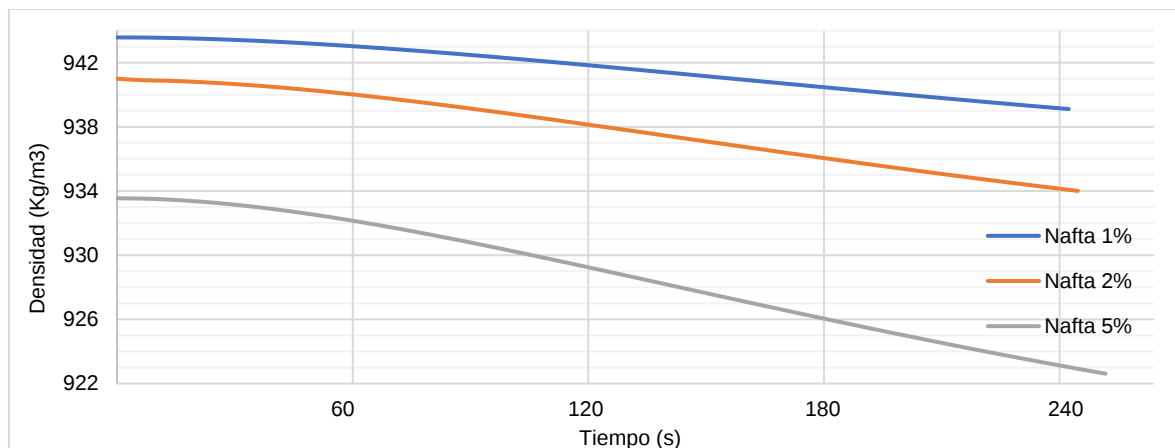


Figura 26. Cambio de la densidad del crudo en el reactor. Datos obtenidos por el simulador CAVITATOR.

Tabla 8

Cambios de densidad del crudo en la etapa de mezclado y cavitación.

Concentración de Nafta	Densidad etapa de mezclado (kg/m³)	Densidad etapa de cavitación (kg/m³)	°API etapa de mezclado	°API etapa de cavitación
1%	942.01	940.54	18.60	18.94
2%	940.06	934.62	19.00	19.88
5 %	932.53	916.19	20.23	21.48

Nota: datos obtenidos por el simulador CAVITATOR.

6.2. Validación.

La validación del software se realizó de forma práctica y teórica, donde la etapa de mezclado se hizo de forma práctica comparando los resultados obtenidos con el software CAVITATOR y los datos arrojados de una simulación realizada en el software Aspen HYSYS en su versión 8.8

licenciado por la Universidad Industrial de Santander. La etapa del reactor de cavitación se realizó de forma teórica de acuerdo a los resultados de las investigaciones realizadas por diferentes autores.

Para esta primera etapa se realizó la respectiva caracterización de los fluidos de acuerdo a los reportes de Assay y pruebas PVT en el software hysys, los resultados se muestran en la tabla 1 junto con el siguiente esquema.

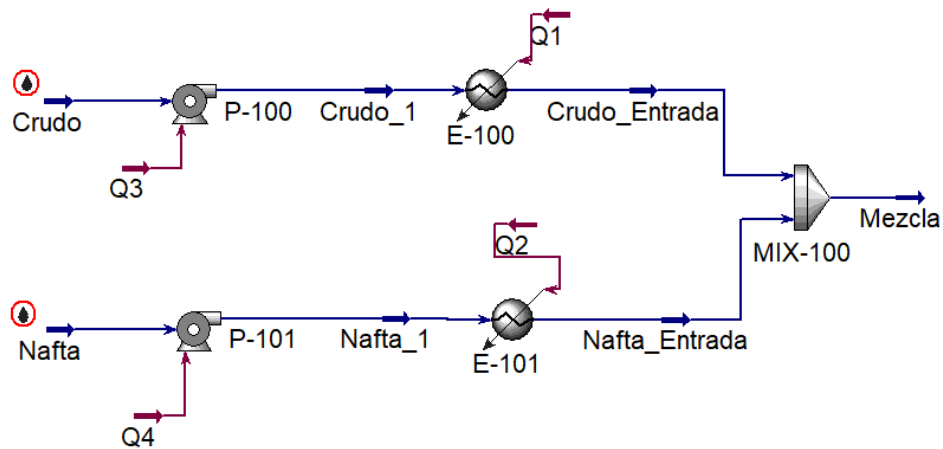


Figura 27. Esquema de la etapa de mezclado simulación en HYSYS. Tomado del Software Aspen HYSYS v8.8.

Una vez realizada la simulación en HYSYS a diferentes concentraciones de nafta se comparó las condiciones de salida con el software CAVITATOR como se muestra en la tabla 11, calculándose el error absoluto y relativo en base a los resultados obtenidos.

Tabla 9.
Comparación viscosidad y densidad de la etapa 1 con los softwares Cavitator y Hysys a diferentes concentraciones de nafta.

Nafta	Parámetro	Cavitator	HYSYS	Error Absoluto	Error Relativo
1 %	Viscosidad [cP]	3623	3625	2	0.05 %

2 %	Densidad [lb/ft ³]	58.9	58.2	0.5	0.86 %
	Viscosidad [cP]	3350	3308	42	1.27 %
	Densidad [lb/ft ³]	58.75	58.6	0.15	0.26 %
5 %	Viscosidad [cP]	2613.5	2571	42.5	1.65 %
	Densidad [lb/ft ³]	58.30	58.26	0.04	0.07 %

Nota: datos obtenidos por el simulador CAVITATOR y Aspen HYSYS.

Al comparar los dos programas se pudo observar que el porcentaje de error relativo fue bastante pequeño, donde los datos arrojados por el simulador Cavitator fueron cercanos a los del Hysys, lo cual se concluyó que los datos eran válidos en la entrada a la etapa de reacción.

La etapa del reactor se basó inicialmente en la correlación de los resultados de diferentes estudios de cavitación aplicado a crudos pesados comparados con los datos obtenidos en el simulador. Para validar los datos de densidad se estudió el artículo de Askarian et al (2017), en el cual se implementó la cavitación hidrodinámica para el upgrading de un crudo pesado en presencia de una sustancia donante de hidrógeno de origen hidrocarburo, una muestra de crudo de 15.8 API consiguió un upgrading de +0.4 °API usando un 2 % de donante, en nuestro caso obtuvimos una mejora desde +0.34°API a partir del 1% de concentración de nafta lo que demuestra a modo groso que los resultados arrojados por el simulador se asemejan a la realidad y se encuentran en un rango aceptable de acuerdo a los resultados experimentales de diferentes investigaciones.

Para validar los resultados de viscosidad, en el artículo (Avvaru, Venkateswaran, Uppara, Iyengar, & Katti, 2018), se analizó un caso estudio, donde la viscosidad en crudos pesados se redujo entre un 20-25% con sistema de recirculación durante 30-60 minutos, donde se pudo concluir que la reducción de la viscosidad del crudo se debía principalmente al rompimiento de las cadenas moleculares de los asfaltenos, basado en los resultados de la simulación para este estudio,

se consiguió la reducción de la viscosidad hasta en un 13.7% sin recirculación y de un tiempo de residencia más corto, los autores afirman en este mismo artículo que la viscosidad se podría reducir en por lo menos en un 10% con esta técnica.

7. Análisis económico

El software cuenta con un módulo de análisis económico, según el caso que se esté analizando, los escenarios están proyectados a 5 años. Esta sección permite al usuario analizar la viabilidad del proyecto de acuerdo a los valores de VPN y TIR.

De acuerdo al caso planteado en este capítulo, se realizó un análisis económico mediante el módulo del software, y para este estudio, se trabajaron los datos del crudo del caso anterior para una aplicación en escala de campo, las características del crudo iniciales antes y después de la cavitación son las que se muestran en la tabla 1.

Tabla 10.

Datos de entrada y de salida de la mezcla en el reactor de cavitación

Fluido	% de Nafta	API Inicial	API final	Viscosidad Inicial (cP)	Viscosidad después de la cavitación (cP)
CRUDO 1	1%	18.2	19.17	3974	3623
CRUDO 2	2%	18.2	19.00	3974	2917.2
CRUDO 3	5%	18.2	20.23	3974	2200.1

Nota: datos obtenidos por el software CAVITATOR.

7.1. Presentación de datos

Para este caso hipotético, la compañía de servicios OIL & ENERGY. S.A, adquiere la tecnología para evaluarla en campo, la compañía inicialmente realiza una inversión de 300000 USD para el proyecto, se requiere evaluar la utilidad del proyecto a una proyección de 5 años, El primer piloto se llevará a cabo en el pozo E-1, que cuenta con una producción de crudo pesado cercana a los 1000 BOPD.

Se considera un incremento anual del 10%, es decir, una estimación del aumento de los ingresos y egresos cada año, además los costos mensuales operacionales corresponderían en este caso a mantenimiento del sistema, costo de operadores, y por combustible del generador a Diesel.

Para este análisis en particular, se creó un módulo especial dentro del análisis económico que permitirá manejar un esquema específico de cobro por servicio de aumento API y % de reducción de viscosidad propuesto por cada barril de crudo tratado de la siguiente forma:

1. Los precios de servicio por aumento de viscosidad se llevarán a cabo de acuerdo a los siguientes parámetros manejados por la compañía:
 - Si el aumento por reducción de viscosidad es $>80\%$ (USD/BL) = 0.7
 - Si el aumento por reducción de viscosidad es ≥ 50 y <80 (USD/BL) = 0.55
 - Si el aumento por reducción de viscosidad es $\geq 30\%$ y <50 (USD/BL) = 0.45
 - Si el aumento por reducción de viscosidad es $<30\%$ (USD/BL) = 0.25
2. El precio de servicio por aumento de API de acuerdo a la compañía será de:
 - Cobro de Servicio por aumento de API (USD/API*BBL) = 0.3

Para este análisis no se tendrán en cuenta los costos por amortización ni depreciación mensual y el porcentaje de los impuestos corresponderán al 10% de la utilidad neta antes de impuestos, para este caso, se asume que el valor de los primeros ingresos y egresos se empiezan a generar desde el mes 1.

7.2 Resultados

A partir del flujo de caja se calculan los indicadores de VPN y TIR y se establece una tasa de interés para el proyecto del 15%, a continuación, se muestran en las tablas 10,11 y 12, los datos obtenidos por el simulador CAVITATOR, donde los valores de flujo de caja neto, VPN y TIR a una proyección hasta de 5 años, para cada uno de los casos presentados, son los que se muestran a continuación.

Tabla 11

Proyección económica a 5 años con 1% de concentración de Nafta.

Parámetro	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Incremento Anual (%)	0	0	10	10	10	10
Cantidades de servicio mensual	0	20	20	20	20	20
Precio Unitario Servicio (USD)	0	1342.5	1476.8	1624.43	1786.868	1965.55
Ventas Totales (USD)	0	26850	29535	32488.5	35737.35	39311.085
Costos Variables Mensual (USD)	0	6500	7150	7865	8651.5	9516.65
Costos Fijos mensual (USD)	0	6500	7150	7865	8651.5	9516.65

Otro Costos y Gastos Mensual (USD)	0	0	0	0	0	0
Costos y Gastos totales (USD)	0	13000	14300	15730	17303	19033.3
Depreciación y Amortización (USD)	0	0	0	0	0	0
Otros (USD)	0	0	0	0	0	0
Utilidad Antes de Impuestos (USD)	0	13850	15235	16758.5	18434.35	20277.79
Impuestos (%)	0	20	20	20	20	20
Utilidad Neta (USD)	0	11080	12188	13406.8	14747.48	16222.228
Inversión Neta Total (USD)	300000	300000	0	0	0	0
Flujo de Caja Neto Mensual (USD)	0	11080	12188	13406.8	14747.48	16222.23
Flujo de Caja Neto Anual (USD)	-300000	132960	146256	160882	176969.8	194666.74
Flujo de Caja Acumulado	-300000	432960	579216	740098	917067.4	1111734.1
Tasa de Interés (%)	15%	15%	15%	15%	15%	15%
VPN (USD)	-300000	-184383	-73792	31990	133173	229957
TIR (%)	N/A	-56%	-5%	21%	34%	42%

Nota: datos obtenidos por el software CAVITATOR.

Tabla 12

Proyección económica a 5 años con 2% de concentración de Nafta.

Parámetro	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Incremento Anual (%)	0	0	10	10	10	10

Cantidades de servicio mensual	0	20	20	20	20	20
Precio Unitario Servicio (USD)	0	2400	2640	2904	3194.4	3513.84
Ventas Totales (USD)	0	48000	52800	58080	63888	70276.8
Costos Variables Mensual (USD)	0	6500	7150	7865	8651.5	9516.65
Costos Fijos mensual (USD)	0	6500	7150	7865	8651.5	9516.65
Otro Costos y Gastos Mensual (USD)	0	0	0	0	0	0
Costos y Gastos totales (USD)	0	13000	14300	15730	17303	19033.3
Depreciación y Amortización (USD)	0	0	0	0	0	0
Otros (USD)	0	0	0	0	0	0
Utilidad Antes de Impuestos (USD)	0	35000	38500	42350	46585	51243.5
Impuestos (%)	0	20	20	20	20	20
Utilidad Neta (USD)	0	28000	30800	33880	37268	40994.8
Inversión Neta Total (USD)	300000	300000	0	0	0	0
Flujo de Caja Neto Mensual (USD)	0	28000	30800	33880	37268	40994.8
Flujo de Caja Neto Anual (USD)	-300000	336000	369600	406560	447216	491937.6

Flujo de Caja Acumulado	-300000	636000	1005600	1412160	1859376	2351314
Tasa de Interés (%)	15%	15%	15%	15%	15%	15%
VPN (USD)	-300000	-7826	271645	538964	794662	1039242
TIR (%)	N/A	12%	80%	105%	114%	118%

Nota: datos obtenidos por el software CAVITATOR.

Tabla 13

Proyección económica a 5 años con 5% de concentración de Nafta.

Parámetro	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Incremento Anual (%)	0	0	10	10	10	10
Cantidades de servicio mensual	0	20	20	20	20	20
Precio Unitario Servicio (USD)	0	5567.5	6124.25	6736.675	7410.3425	8151.37675
Ventas Totales (USD)	0	111350	122485	134733.5	148206.85	163027.535
Costos Variables Mensual (USD)	0	6500	7150	7865	8651.5	9516.65
Costos Fijos mensual (USD)	0	6500	7150	7865	8651.5	9516.65
Otro Costos y Gastos Mensual (USD)	0	0	0	0	0	0
Costos y Gastos totales (USD)	0	13000	14300	15730	17303	19033.3
Depreciación y Amortización (USD)	0	0	0	0	0	0
Otros (USD)	0	0	0	0	0	0

Utilidad Antes de Impuestos (USD)	0	98350	108185	119003.5	130903.85	143994.235
Impuestos (%)	0	20	20	20	20	20
Utilidad Neta (USD)	0	78680	86548	95202.8	104723.08	115195.388
Inversión Neta Total (USD)	300000	300000	0	0	0	0
Flujo de Caja Neto Mensual (USD)	0	78680	86548	95202.8	104723.08	115195.388
Flujo de Caja Neto Anual (USD)	-300000	944160	1038576	1142433.6	1256676.96	1382344.66
Flujo de Caja Acumulado	-300000	1244160	2282736	3425169.6	4681846.56	6064191.22
Tasa de Interés (%)	15%	15%	15%	15%	15%	15%
VPN (USD)	-300000	521009	1306321	2057490	2775999	3463269
TIR (%)	N/A	215%	301%	319%	323%	324%

Nota: datos obtenidos por el software CAVITATOR.

Según los datos obtenidos en este estudio y de acuerdo a los indicadores de VPN y TIR, se demuestra la viabilidad de la técnica, ya que para cualquiera de los escenarios propuestos se consigue recuperar la inversión inicial antes de los 5 años.

8. Conclusiones

En este estudio se demostró que, de acuerdo a los resultados arrojados de la simulación, se obtuvieron valores de temperatura locales por encima de los 1000 K para un crudo pesado de 18.2 API a concentraciones volumétricas de nafta del 1, 2 y 5%. lo cual concluye que a bajas concentraciones de nafta en la mezcla es posible llevar a cabo un craqueo térmico favorable mediante esta técnica.

Para concentraciones en porcentaje volumen de nafta del 1, 2 y 5% se obtuvo una disminución de la viscosidad del fluido del 4.8, 11.6 y 13.71%, y un aumento de la gravedad API de +0.34, +0.88 y +1.25° respectivamente, donde se destacó que a mayor concentración de donante se obtuvieron mejores resultados, finalmente se concluyó que estos cambios se dieron principalmente por la oscilación del radio de la burbuja, ya que a mayor dinámica de burbuja se produjeron temperaturas de colapso más altas, lo cual aportó la suficiente energía para llevar a cabo las reacciones de craqueo en el reactor.

En base a los resultados obtenidos del software, según el caso estudio propuesto en el análisis económico, se concluyó que es rentable aplicar la tecnología de acuerdo a los indicadores VPN y TIR, ya que para la concentración más baja (1%), se recuperó la inversión a partir del tercer año y para la concentración más alta estudiada en este caso (5%), se recuperó la inversión desde el primer año, obteniéndose una tasa interna de retorno que superó el valor esperado.

9. Recomendaciones

Realizar un estudio de los modelos de mezclado en función de la composición que mejor se ajuste entre el crudo y el donante de hidrógeno, donde se pueda evaluar la influencia que tiene las parafinas y los asfaltenos cuando el fluido se somete a cavitación, además incluir en el software la caracterización para otros donantes ya sea de tipo hidrocarburo y no hidrocarburo.

Realizar un estudio sobre la dinámica de las burbujas de radios no constantes, además de profundizar en el análisis de la temperatura en el colapso en las burbujas, esto con el fin de poder realizar un mejor modelado del perfil de temperaturas en las zonas de implosión, para poder integrar un balance de energía adecuado y poder obtener un modelo de cavitación más exacto.

Se recomienda fortalecer el modelo del reactor realizando una investigación profunda sobre el orden y las constantes de reacción en un proceso de craqueo térmico por cavitación para cada componente, con el fin de establecer modelos cinéticos que más se ajusten a los modelos de cavitación.

Estudiar e implementar nuevos modelos de diseño para los discos de cavitación obteniendo configuraciones que permitan mejorar los resultados de la técnica, es recomendable un posible estudio acerca de un modelo que permita agregar al sistema una línea de recirculación de flujo.

Incentivar a los estudiantes a desarrollar proyectos que abarquen el campo de la investigación sobre las tecnologías emergentes en la industria y el desarrollo de ideas innovadoras como la creación del código propio.

Referencias bibliográficas

- API. (1996). MANUAL OF PETROLEUM MEASUREMENT STANDARDS CHAPTER 12.3. In *MANUAL OF PETROLEUM MEASUREMENT STANDARDS* (1st ed., p. 110).
- Askarian, M., Vatani, A., & Edalat, M. (2017). Heavy oil upgrading via hydrodynamic cavitation in the presence of an appropriate hydrogen donor. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 151(January), 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.01.037>
- Avvaru, B., Venkateswaran, N., Uppara, P., Iyengar, S. B., & Katti, S. S. (2018). Current Knowledge and Potential Applications of Cavitation Technologies for the Petroleum Industry Ultrasonics - Sonochemistry Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry. *Ultrasonics - Sonochemistry*, 42(April), 493–507. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.010>
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1992). *FENÓMENOS DE TRANSPORTE*.
- Boltzmann, C. De. (2004). Algunos Métodos de Estimación para Viscosidad, 1–6.
- Brennen, C. E. (1995). *Cavitation and Bubble Dynamics*.
- Brujan, E. A., & Williams, P. R. (2005). BUBBLE DYNAMICS AND CAVITATION IN NON-NEWTONIAN LIQUIDS, 2005, 147–172.
- Chapra, S. C. (2012). *Applied Numerical Methods With MATLAB* (Third). New York.
- Dynamics, B. (1977). Further 1977.
- Gogate, P. R. (2008). Cavitational reactors for process intensification of chemical processing applications: A critical review. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(4), 515–527. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.09.014>
- Gogate, P. R., & Kabadi, A. M. (2009). A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. *Biochemical Engineering Journal*, 44(1), 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.006>
- Kamath, V., Prosperetti, A., & Egolfopoulos, F. N. (1993). A theoretical study of sonoluminescence. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 94(1), 248–260. <https://doi.org/10.1121/1.407083>
- Klotz, A. R., & Hynynen, K. (2010). Simulations of the Devin and Zudin modified Rayleigh-Plesset equations to model bubble dynamics in a tube. *Sciences-New York*, 1–15.
- Knapp, R. T., Daily, J. W., & Hammitt, F. G. (1970). *Cavitation*. (McGraw-Hill, Ed.). New York.
- Lin, J., & Yen, T. F. (1993). An Process. *Fuel*, (17), 111–118.
- McCain, W. D. (1990). *The Properties of Petroleum Fluids, 2nd Edition*. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=1TJQ64JN2ZUC&pgis=1>
- Mehdi, S., Kamyar, K., & Jafar, T. D. (2010). Olefin production from heavy liquid hydrocarbon

- thermal cracking: Kinetics and product distribMehdi, S., Kamyar, K., & Jafar, T. D. (2010). Olefin production from heavy liquid hydrocarbon thermal cracking: Kinetics and product distribution. Iranian Journa. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 29(4), 135–147.
- Nesterenko, A. I., & Berlizov, Y. S. (2007). THE POSSIBILITY OF CRACKING HYDROCARBONS WITH CAVITATION. *Technology*, 43(6), 43–44.
- Niazi, S., Hashemabadi, S. H., & Razi, M. M. (2014). CFD simulation of acoustic cavitation in a crude oil upgrading sonoreactor and prediction of collapse temperature and pressure of a cavitation bubble. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(1), 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.07.002>
- Niazi, S., Razi, M. M., & Hashemabadi, S. H. (2013). CFD simulation of acoustic cavitation in a crude oil upgrading sonoreactor and prediction of collapse temperature and pressure of a cavitation bubble. *Chemical Engineering Research and Design*, (June), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.07.002>
- Okumura, H., & Ito, N. (2003). Nonequilibrium molecular dynamics simulations of a bubble. *Physical Review E*, 67(4), 045301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.67.045301>
- Ozonek, J. (2012). *Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering*. <https://doi.org/10.1201/b11825>
- Qin, Z., & Alehossein, H. (2016). Heat transfer during cavitation bubble collapse. *Applied Thermal Engineering*, 105, 1067–1075. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.049>
- Ramírez Hernández, A. Y. (2012). *A Model for the Prediction of Olefin in Production and Coke Deposition During Thermal Cracking of Light Hydrocarbons*.
- Riazi, M. R. (2005). *Characterization and Properties of Petroleum Fractions* (1st ed.). ASTM.
- Sanjaya K, D. (2011). What is homogenization of milk. In *Course : Dairy and Food Engineering* (1°, p. 8). Bhubaneswar, India: Dept. of Agricultural Processing and Food Engineering.
- Schön, J. H. (2015). Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics. *Elsevier*, 65(A), 1–388. [https://doi.org/10.1016/S0376-7361\(98\)80023-X](https://doi.org/10.1016/S0376-7361(98)80023-X)
- Shah, Y. T. (1999). *Cavitation Reaction Engineering*. (D. Luss, Ed.) (1st ed.). Houston, Texas: Kluwer Academic/ Plenum Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4787-7>
- Singarella, P. N., & Adams, E. E. (1982). Physical and Numerical Modeling of the. *Design*, (March).
- Singhal, A. K., Athavale, M. M., Li, H., & Jiang, Y. (2002). Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model. *Journal of Fluids Engineering*, 124(3), 617. <https://doi.org/10.1115/1.1486223>
- Smith, C. A. (1991). *Control automático de procesos*.
- Washington, D. C. (2000). American Petroleum Institute (API) References, 427–438. <https://doi.org/http://www.api.org/about>

Zamilov, M. F., & Godin, S. (2012). Investigation of Hydrodynamic Cavitation as a Means of Natural Crude Oil and Synthetic Biofuel Upgrading, 1–28. Retrieved from [http://www.quantum-vortex.com/Cavitation Hydrocarbon Cracking.pdf](http://www.quantum-vortex.com/Cavitation%20Hydrocarbon%20Cracking.pdf)