

**Modelo Predictivo en Estado Transiente del Efecto de un Reactor de Cavitación
Hidrodinámica en la Reducción de Viscosidad de Crudos Pesados Empleando la Técnica de
Dinámica Computacional de Fluidos**

Edgar Andrés Centeno Quintero

Felipe Romero Consuegra

Luis Daniel Morales Camacho

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero de Petróleos

Director

German González Silva

PhD. en Ingeniería Química

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Químicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos**

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

A Dios por enseñarme a creer en mí y mis sueños, por ser mi cimiento y apoyo incondicional ante cualquier dificultad, por mostrarme la importancia de seguir perseverando y permitirme gozar de vida, salud junto a mi familia.

A mi padre, por su apoyo y ayuda incondicional en cada momento del desarrollo de este proyecto. A mi madre, por su brindarme fuerza para continuar sorteando cada dificultad.

A mi familia, por su motivación constante y su confianza en mí y mi carrera.

A los docentes de la escuela, que contribuyeron a mi formación académica.

A mis amigos, que fueron fuente de colaboración en diferentes oportunidades.

A todas las personas que de alguna manera hicieron parte del desarrollo de este proyecto.

Edgar Andrés Centeno Quintero

Dedicatoria

A Dios, dador de la vida, porque su amor y su bondad no tiene fin, dándome la oportunidad de
sonreír ante todos los logros resultado de su ayuda.

A la Dra. María Angélica Consuegra, madre, guerrera y, por sobretodo amiga, quién me ha
entregado todo el amor y la paciencia que sólo ella puede dar.

Al señor Benjamín Consuegra Madero, más que abuelo mi figura a seguir.

A mis hermanos: Carlos y María Camila, por ser mi razón para salir adelante.

Al señor Gustavo Valle, mi mentor científico, mi amigo, mi jefe y, una de las personas que más
aportes le han hecho a mi vida.

Al señor Germán González Silva, por adentrarme en el mundo que ahora es mi pasión: la
dinámica computacional de fluidos, llave de muchas de las puertas que se han abierto.

Al Ingeniero Edgar Centeno Cardona, siempre presente en la realización del presente proyecto,
colocando toda su experiencia en el tema y guiándome en obtención de los resultados.

A mis compañeros en el presente trabajo: Edgar Andrés Centeno y Luis Daniel Morales, por
permanecer juntos en el camino lleno de retos que representó este trabajo.

Felipe Romero Consuegra

Dedicatoria

A Clara Inés: mi madre, mi mejor amiga, el amor de mi vida, mi razón de ser.

A Luis Antonio: mi padre, mi motivación a ser mejor cada día.

A Gerardo Alberto: mi ejemplo a seguir.

A mi familia: porque pase lo que pase, la familia siempre es lo primero.

... Y a todos aquellos que contribuyeron de una u otra manera a forjarme lo que soy hoy día.

Luis Daniel Morales Camacho

Agradecimientos

A Dios primero que todo, porque gracias a Él que nos ha permitido llegar hasta donde hoy estamos y nos dio la fortaleza necesaria para no desistir.

Al ingeniero Édgar Centeno Cardona, por compartir su amplio conocimiento con nosotros y ser pieza fundamental a lo largo del desarrollo de este proyecto además de brindarnos su amistad y apoyo incondicional.

Al ingeniero German González Silva, por acompañarnos y guiarnos en el camino como director de este trabajo.

Al grupo de investigación de Modelamiento de Procesos Hidrocarburos, por brindarnos la oportunidad de crecer en el ámbito académico y profesional.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos y todo su personal docente por cada uno de los conocimientos, consejos y lecciones aprendidas.

A la Universidad Industrial de Santander, por permitirnos la oportunidad de convertirnos en profesional.

A todos aquellos que se opusieron al desarrollo de nuestro trabajo y nos enseñaron que la vida profesional no es fácil, pero que el que actúa honestamente siempre recogerá buenos frutos.

Contenido

Introducción 21

1. Estado del arte de la cavitación hidrodinámica..... 22

1.1. Generalidades..... 22

1.2. Cavitación Hidrodinámica 25

1.3. Generación de la Cavitación 28

1.4. Etapas de la Cavitación 30

1.4.1 Clasificación según Ozonek (2012): 30

1.4.2. Clasificación según Knapp, Daley y Hammitt (1970): 30

1.5. Tipos de Cavitación 31

1.6. Numero de Cavitación 32

1.7. Cavitación y Viscosidad 34

1.8. Antecedentes 35

2. Diseño de un reactor de cavitación 45

2.1 Efecto de la presión de entrada: 47

2.2 Efecto de propiedades fisicoquímicas del fluido: 51

2.2.1 Efecto de la presión de vapor del líquido: 51

2.2.2 Efecto de la viscosidad del líquido: 51

2.2.3 Efecto de la temperatura del líquido: 51

2.2.4 Efecto de la tensión superficial del líquido: 52

2.2.5 Efecto de la presencia de gases disueltos: 52

2.2.6 Efecto de los constituyentes del medio líquido: 53

2.3 Efecto de la geometría del orificio:..... 54

2.3.1 Efecto del diámetro del orificio: 54

2.3.2 Efecto del área libre para el flujo..... 55

2.3.3 Efecto del radio inicial: 56

2.4 Recomendaciones para diseños eficientes (Gogate, P. R., Pandit, A. B., 2001): 57

3. Dinámica computacional de fluidos aplicada al modelado de cavitación hidrodinámica 58

3.1. Ecuaciones de conservación para flujo multifásico en estado transiente 59

3.1.1. Modelo Euler-Lagrange 61

3.1.2. Modelo Euler-Euler. 62

3.1.3. Modelo de mezcla 63

3.1.4. Modelo de volumen de fluido (VOF). 64

3.2. Modelos de turbulencia usados en dinámica computacional de fluidos 66

3.2.1. Modelo RANS. 69

3.2.2. Modelo $k - \epsilon$ 70

3.2.2. Modelo $k - \omega$ 72

3.2.3. Modelo LES 74

3.3. Modelos de cavitación encontrados en la literatura 76

3.3.1. Modelo de transporte de la interfase 77

3.3.2. Modelos barotrópicos..... 77

3.3.3. Modelo de (Singhal, Mahesh, Li, & Jiang, 2002) (21) 79

3.3.4 Modelo de (Zwart, Gerber, & Belamri, 2004) (22). 80

3.3.5 Modelo de (Schnerr & Sauer, 2001) (23). 81

3.4. Discretización y solución del sistema de ecuaciones..... 82

3.4.1. Enmallado	85
3.4.2. Método de volúmenes finitos aplicado a mallas estructuradas	86
4. Modelo termoquímico desarrollado para un reactor de cavitación hidrodinámica.....	90
4.1. Modelo termodinámico.....	91
4.2. Modelo cinético-químico de craqueo térmico	93
5. Caso Aplicado.....	99
5.1. Caracterización del Fluido	100
5.2. Diseño de la Platina de Orificios	105
5.3. Simulación en Ansys Fluent	106
5.3.1. Geometría.....	106
5.3.2. Enmallado.	107
5.3.3. Configuración del Caso y Condiciones de Frontera	109
5.3.4. Solución del sistema	110
5.3.5. Visualización de los resultados.....	112
5.4. Cálculos energéticos	116
5.5. Cinética Química	116
5.6. Cálculos de Energía Requerida.....	118
5.7. Análisis de Sensibilidad.....	121
6. Evaluación Financiera.....	125
6.1 Generalidades.....	125
6.2 Objetivos de la evaluación financiera	129
6.3 Metodología de análisis	129
6.3.1 Análisis Costo-Utilidad (ACU).....	130

6.3.2. Análisis Costo-Efectividad (ACE).....	130
6.3.3 Análisis Costo-Beneficio (ACB).	130
6.4 Parámetros para la evaluación financiera (Gutiérrez, M. F., 2010).....	131
6.4.1 Vida útil estimada	131
6.4.2 Capital de inversión.	131
6.4.3 Costos variables directos.....	131
6.4.4 Ingresos por ahorro del 3% de nafta.	132
6.4.5 Flujo de Caja Neto.	133
6.5 Criterios de la evaluación financiera.....	134
6.5.1 Valor Presente Neto, VPN.	134
6.5.2 Tasa Interna de Retorno, TIR.....	135
6.5.3 Relación Beneficio/Costo, B/C.....	135
6.5.4 Periodo de recuperación de capital, PR. (Infante, A., 2006).	136
6.6 Análisis de rentabilidad de la inversión	137
6.7 Analisis de factibilidad	138
7. Conclusiones	140
Bibliografía	143

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Efecto de las propiedades de la fase líquida en el desempeño de los reactores de cavitación hidrodinámica: Resumen. (Traducida y editada de Gogate, P. R., Pandit, A. B. (2001). Hydrodynamic cavitation reactors: A state of the art review. Mumbai, India.)</i>	54
Tabla 2.. <i>Modelos que complementan el método RANS clasificados por la cantidad de ecuaciones que agregan</i>	70
Tabla 3. <i>Valor de constantes encontradas en las ecuaciones (26) - (28).</i>	72
Tabla 4. <i>Valor de constantes encontradas en las ecuaciones (30) – (32).</i>	73
Tabla 5. <i>Resultados de la prueba ASTM D86 para el fluido de estudio.</i>	100
Tabla 6. <i>Composición elemental del crudo.</i>	100
Tabla 7. <i>Composición de la fracción liviana del crudo.</i>	100
Tabla 8. <i>Otras propiedades del fluido.</i>	101
Tabla 9. <i>Detalles de la malla desarrollada.</i>	108
Tabla 10. <i>Propiedades de los fluidos ingresadas.</i>	110
Tabla 11. <i>Condiciones de frontera ingresadas al simulador.</i>	110
Tabla 12. <i>Detalles de la solución en Fluent.</i>	111
Tabla 13. <i>Cálculos de energía liberada durante la cavitación.</i>	116
Tabla 14. <i>Resultados del análisis cinético químico.</i>	117
Tabla 15. <i>Calculo de la viscosidad de salida a partir de la cinética química.</i>	118
Tabla 16. <i>Calores de combustión para los componentes del fluido.</i>	118
Tabla 17. <i>Tabla de normalización de contenido de carbono e hidrógeno para los destilados.</i>	119

Tabla 19. Tabla de normalización de contenido de carbono e hidrógeno para gasóleo.	119
<i>Tabla 20. Coeficientes estequiométricos para la combustión de gasóleo.</i>	<i>119</i>
Tabla 21. Tabla de normalización de contenido de carbono e hidrógeno para la fracción pesada.	119
<i>Tabla 22. Coeficientes estequiométricos para la combustión de la fracción pesada.</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 23. Cálculo de entalpía de reacción.</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 24. Cálculo final de la energía necesaria para llevar a cabo la reacción.</i>	<i>120</i>
Tabla 25. <i>Propiedades del crudo del campo La Esperanza</i>	125
<i>Tabla 26. Datos de viscosidad.</i>	<i>126</i>
Tabla 27. <i>Especificaciones de despacho</i>	127
Tabla 28. <i>Capital de Inversión</i>	131
Tabla 29. <i>Costos variables directos</i>	132
Tabla 30. <i>Costos asociados a la Nafta</i>	132
Tabla 31. <i>Flujo de Caja Neto Mensual</i>	133
Tabla 32. <i>Criterios para toma de decisiones sobre proyectos</i>	138
Tabla 33. <i>Resultados arrojados por el proyecto de cavitación hidrodinámica</i>	138

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Flujo de la corriente y variación de la presión en un equipo de cavitación hidrodinámica.	29
Figura 2. Representación esquemática de las diferentes fases del proceso de cavitación hidrodinámica aguas debajo de la placa de orificio.	33
Figura 3. Craqueo de hidrocarburos durante el colapso de las burbujas de la cavitación.	35
<i>Figura 4.</i> Variación de la Presión de colapso respecto a la Presión de entrada.	48
<i>Figura 5.</i> Efecto de la Presión de entrada sobre la Tasa de liberación de Yodo en una configuración de orificio.	50
<i>Figura 6.</i> Efecto de la Tensión superficial sobre la Presión de colapso generada.	52
<i>Figura 7.</i> Efecto del Constante politrópica del gas sobre la Presión de colapso generada.	53
<i>Figura 8.</i> Variación de la Presión de colapso con el Diámetro del hueco de la placa de orificio para una misma área libre para el flujo.	55
<i>Figura 9.</i> Variación e la Presión de colapso con el Porcentaje de área libre.	56
<i>Figura 10.</i> Variación de la Presión de colapso con el Radio de cavitación inicial.	57
<i>Figura 11.</i> Descripción del modelo de Volumen de Fluido.	66
<i>Figura 12.</i> Variación típica de la velocidad en un flujo turbulento.	67
<i>Figura 13.</i> Diferencia entre la velocidad filtrada y la velocidad instantánea.	74
<i>Figura 14.</i> Esquema típico de los modelos barotrópicos.	79
<i>Figura 15.</i> Mallas estructuradas en 2D, a la izquierda coordenadas cartesianas y a la derecha coordenadas curvilíneas.	85
<i>Figura 16.</i> Esquema representativo de la malla para la solución de la ecuación (51).	87

Figura 17. Esquema de un reactor de cavitación hidrodinámica utilizado para la deducción del modelo termodinámico. 92

Figura 18. Representación esquemática del modelo cinético-químico.. 94

Figura 19. Gráfico para la determinación del calor de combustión a partir de la gravedad API. 98

Figura 20. Curva TBP del fluido..... 101

Figura 21. Distribución inicial del fluido..... 102

Figura 22. Simulación del proceso de separación por etapas a través del software Hysys. ... 103

Figura 23. Grafico P-H del fluido de estudio..... 104

Figura 24. Isoterma de gráfico P-H a 130°F. 104

Figura 25. Vista explosionada del reactor diseñado 106

Figura 26. Volumen de fluido extraído de la geometría del reactor. 107

Figura 27. Enmallado seleccionado para la simulación..... 108

Figura 28. Simulación de liberación flash en Hysys..... 109

Figura 29. Gráfico de estabilidad de la solución..... 111

Figura 30. Mapa de contornos de velocidad en el cavitador..... 112

Figura 31. Gráfico de velocidad contra distancia en el cavitador..... 113

Figura 32. Mapa de contornos de presión en el cavitador. 113

Figura 33. Mapa de contornos de fracción de vapor en el reactor..... 114

Figura 34. Mapa tridimensional de la fracción de volumen producto de la cavitación en el reactor. 115

Figura 35. Fracción de vapor a través del cavitador. 115

Figura 36. Comparación entre las distribuciones de componentes para el fluido antes y después del proceso de cavitación..... 117

Figura 37. Fracción de vapor liberada con una presión de entrada de 300 psig. 122

Figura 38. Fracción de vapor liberada con una presión de entrada de 700 [psig]. 122

Figura 39. Comparación entre el vapor liberado a 180 psig y a 700 psig de entrada, respectivamente. 123

Figura 40. Gráfico de delta de presión vs energía liberada por cavitación. 123

Figura 41. Viscosidad de salida en función de la energía requerida para llevar a cabo el craqueo. 124

Figura 42. Flujo de Caja Neto 134

Figura 43. Periodo de Recuperación, PR. 137

RESUMEN

TITULO: MODELO PREDICTIVO EN ESTADO TRANSIENTE DEL EFECTO DE UN REACTOR DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA EN LA REDUCCIÓN DE VISCOSIDAD DE CRUDOS PESADOS EMPLEANDO LA TÉCNICA DE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDO¹

AUTORES: EDGAR ANDRÉS CENTENO QUINTERO, FELIPE ROMERO CONSUENGA, LUIS DANIEL MORALES CAMACHO**

PALABRAS CLAVE: cavitación, implosión, CFD, volúmenes finitos, simulación.

DESCRIPCIÓN:

La cavitación hidrodinámica es un fenómeno de transporte que se presenta en virtud de la geometría de un sistema, que permite mediante un proceso controlado, aprovechar la enorme cantidad de energía generada durante la implosión de las cavidades o burbujas, en el rompimiento de moléculas de crudo pesado permitiendo su reagrupamiento en moléculas más livianas afectando de esta manera la viscosidad del fluido.

La simulación del fenómeno de cavitación hidrodinámica, mediante dinámica computacional de fluidos-CFD y desarrollando un modelo hidráulico basado en el método de volúmenes finitos, utilizando el software ANSYS Fluent, permiten calcular la magnitud de la energía liberada y acoplarla a un modelo cinético propio del fluido.

Para llevar a cabo esta tarea, se realizó el desarrollo de un modelo de reactor de cavitación por platina de orificio que origina una caída drástica de presión ocasionado que el fluido alcance su presión de vapor, modificando su estado de fase líquido a fase vapor, y posteriormente al pasar a una zona de alta presión se produce la implosión de las cavidades formadas en el ciclo anterior, pasando de fase vapor a fase líquido con la correspondiente liberación de energía que es motivo del análisis computacional en el presente proyecto desarrollado.

Los resultados obtenidos en el simulador permiten establecer los valores de presión, que deben ser utilizados en el sistema para garantizar que la energía liberada durante la implosión sea la energía requerida para lograr el rompimiento de las moléculas del crudo, además permite establecer el valor final de viscosidad a alcanzar en un crudo pesado, una vez ha sido expuesto a un proceso de cavitación hidrodinámica.

La tecnología de cavitación hidrodinámica, se presenta como una alternativa confiable, económica, y de bajo impacto ambiental en la reducción de viscosidad para el transporte de crudos pesados.

¹ Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. PhD. German González Silva

ABSTRACT

TITLE: PREDICTIVE MODEL IN A TRANSIENT STATE OF THE EFFECT OF A HYDRODYNAMIC CAVITATION REACTOR IN THE REDUCTION OF VISCOSITY OF HEAVY CRUDES USING THE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS TECHNIQUE²

AUTORES: EDGAR ANDRÉS CENTENO QUINTERO, FELIPE ROMERO CONSUENGRÁ, LUIS DANIEL MORALES CAMACHO**

KEYWORDS: cavitation, implosion, CFD, finite volumes, simulation.

DESCRIPTION:

The hydrodynamic cavitation is a phenomenon of transport that is presented by virtue of the geometry of a system, which allows by a controlled process, to take advantage of the enormous amount of energy generated during the implosion of the cavities or bubbles, in the breaking of crude molecules Heavy allowing their regrouping into lighter molecules thereby affecting the viscosity of the fluid.

The simulation of the hydrodynamic cavitation phenomenon, using computational dynamics of fluids - CFD and developing a hydraulic model based on the finite volume method, using the software ANSYS Fluent, allow to calculate the magnitude of the energy released and to couple it to a kinetic model fluid.

In order to carry out this task, the development of a model of cavitation reactor was carried out by orifice platinum which causes a drastic pressure drop caused by the fluid reaching its vapor pressure, modifying its liquid phase to vapor phase state, and After passing to a high pressure zone, the cavities formed in the previous cycle are imploded, passing from vapor phase to liquid phase with the corresponding energy release that is the reason of the computational analysis in the present project developed.

The results obtained in the simulator allow to establish the pressure values, which must be used in the system to ensure that the energy released during the implosion is the energy required to achieve the cracking of the crude molecules, in addition it allows to establish the final value of Viscosity to be reached in a heavy crude once it has been exposed to a hydrodynamic cavitation process.

The hydrodynamic cavitation technology is presented as a reliable, economical, and low environmental impact alternative in the reduction of viscosity for the transport of heavy crude oil.

² Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. PhD. German González Silvia

Introducción

La nueva realidad de los precios del petróleo, ha afectado uno de los frentes más sensibles de Colombia, el de los crudos pesados. Con la disminución acelerada del valor del barril, los factores de recobro cercanos al 19% (Maya, s.f.) y la dependencia de crudo pesado en el orden del 50% (Langer, 2015) para mantener la producción del país, es imperante el planteamiento de un nuevo reto en relación con la optimización de los costos de producción.

La destacada necesidad de disminuir los costos asociados con la producción, el transporte de los crudos pesados y la búsqueda inmediata de incrementar los ingresos por concepto del petróleo para estabilizar las finanzas públicas, plantean un escenario crítico que se debe abordar en forma inmediata con una estrategia de carácter tecnológico que pueda ser concebida como una acción mitigadora para compensar los recursos que por concepto de operación (OPEX) y gastos de inversión o capital de desarrollo (CAPEX) se ven comprometidos en este tipo de proyectos que son elevados por las características del crudo.

La aplicación de la cavitación hidrodinámica ha sido estudiada por diferentes investigadores a nivel mundial por sus diversas aplicaciones, especialmente en la industria de los hidrocarburos, como en el upgrading de crudos, reducción de la viscosidad, hidrogenación de combustibles, entre otras, las cuales abren una puerta para los gobiernos y sus instituciones que tiene como meta la reducción significativa de los costos de producción y transporte de crudos pesados y la necesidad imperante de todos los gobiernos actuales, la utilización de tecnologías limpias, con mínima incidencia en el medio ambiente con el objeto de garantizar aire libre de contaminación para las generaciones futuras.

1. Estado del arte de la cavitación hidrodinámica

1.1. Generalidades

El crudo es una mezcla natural de una gran variedad de hidrocarburos pesados y livianos en diferentes proporciones, como parafinas, naftenos, aromáticos y asfáltenos (Fomitchev-Zamilov y Godin, 2012). Los componentes pueden ser separados por medio del proceso de destilación en una torre de refinación, en la cual el crudo se calienta, evapora y condensa en diferentes fracciones, que pueden ser livianas como la gasolina, queroseno y diésel, las cuales tienen un alto valor comercial debido a su uso como combustibles, o fracciones pesadas que aunque su gama de aplicación es amplia su rentabilidad es mucho menor.

Con la creciente demanda energética de hidrocarburos y la constante reducción de producción de crudos livianos, la explotación de crudos pesados y extra pesados ha venido en constante aumento, teniendo en cuenta que de acuerdo a las estadísticas de la EIA (como se citó en Fomitchev-Zamilov y Godin, 2012), el crudo pesado representa el 50% de las reservas recuperables mundiales. Sin embargo, la alta viscosidad de este crudo ha hecho que sus costos de producción, transporte y refinamiento sean excesivos, más aun con los precios bajos del barril, haciendo poco rentable su extracción.

El estudio de la compleja reología que presentan los crudos pesados, que tienen un comportamiento no newtoniano pseudo plástico, teniendo en cuenta que su viscosidad se reduce considerablemente con la temperatura al igual que con la adición de crudo liviano (Ghannam,

2012), ha permitido del desarrollo de diferentes técnicas para transportar el crudo pesado por medio de oleoductos, el cual es el medio más económico para el transporte.

Entre ellas encontramos la formación de emulsiones agua aceite, en donde el crudo se encuentra emulsionado en el agua, de forma que la viscosidad aparente de la mezcla se reduce, facilitando el flujo. Otra técnica, es el precalentamiento del crudo o la adicción de fracciones livianas de crudo. El crudo con pequeñas cantidades de calor, reduce significativamente su viscosidad, haciéndose más fácil el bombeo. Sin embargo, estas técnicas implican altos costos en cuestión de capital y operación, debido a las largas distancias, la pérdida de calor, la selección de los surfactantes y detergentes indicados, entre otros.

Por lo cual es necesario empezar a desarrollar tecnologías que aumenten el margen de rentabilidad de producción de este tipo de hidrocarburo, debido a que con la disminución de las reservas de crudos livianos en algunos años la industria petrolera enfocara toda su atención en los crudos pesados para seguir satisfaciendo la demanda energética, de la cual de acuerdo a numerosos reportes internacionales y a la EIA en dos décadas al menos el 80% del mundo demandara productos del petrolero como aceite o gas (Ghannam, 2012).

De acuerdo a investigadores de la American Society of Mechanical Engineers como Hemmit y Dejli J (s.f.) la perspectiva es el tratamiento con cavitación hidrodinámica, caracterizada por su desempeño, rentabilidad y la posibilidad de cambiar las propiedades internas del material. Por muchas décadas el fenómeno de la cavitación produjo estragos en los diferentes equipos de las diferentes industrias, pues, generaba corrosión en los diferentes elementos de los equipos como las

bombas, este fenómeno ocurría debido a una gran liberación de energía en las paredes de los dispositivos (Fedotkin y Nemchin, 1984).

Más adelante, se comenzó a buscar la manera de controlar este fenómeno, y se consiguió llevar a cabo la cavitación en la garganta de los dispositivos, es decir que en el centro del flujo ocurriera la liberación de energía y no en las paredes, como anteriormente ocurría, esto hacía que la liberación de energía rompiera enlaces moleculares: cracking.

La cavitación acústica, nació como un sueño y logro llevarse a la realidad tiempo después en un laboratorio. La cavitación hidrodinámica es algo que ha pasado a nivel industrial toda la vida, pero siempre fue un problema y siempre buscamos evitarla. Ahora, a nivel de laboratorio, se ha logrado desarrollar cavitación hidrodinámica controlada, la cual es muy útil para aumentar presiones y temperaturas en los sistemas bajo condiciones estándar; además es de gran utilidad en el momento de rompimiento de enlaces moleculares (Gogate y Pandit, 2001). Lo que hay para el futuro es lograr encontrar una relación o correspondencia entre la predicción de la dinámica de las burbujas y la química asociada a este fenómeno. De esta manera, poder escalar a nivel industrial esta tecnología y poder aprovechar todos sus beneficios (económicos principalmente).

El fenómeno de la cavitación ha sido investigado fuertemente en los últimos años debido a que es la alternativa, quizás, más efectiva para el tratamiento de crudos pesados. Al generarse cavitación dentro del fluido se reduce la viscosidad y la gravedad específica, facilitando su bombeo y transporte, además, hace posible que su fraccionamiento y refinación sea más sencillo (Chornet y Chornet, 2008).

1.2. Cavitación Hidrodinámica

La cavitación es un fenómeno hidrodinámico particular que ocurre dentro de un líquido cuando es sometido a cambios de presión a lo largo de un tiempo y distancia. Estos cambios causan la formación de vacíos, los cuales son ocupados por vapor proveniente del líquido así como gases disueltos en el mismo.

De esta forma, la cavitación hidrodinámica consiste en la formación, crecimiento e implosión de burbujas o cavidades generadas por el desplazamiento de un fluido a través de una tubería con una geometría determinada, p.ej. tubos de Venturi, en la que se genera una variación en la presión estática del fluido. Al caer la presión del fluido por debajo de su presión de vapor se generan las cavidades que consecuentemente colapsan con un aumento súbito de la presión, liberando la energía acumulada durante la expansión de las cavidades en forma de un pulso de presión, que alcanza temperaturas y presiones entre 500-15000°C y 200-400 Mega Pascales respectivamente (Lecoffre, 1999), que son condiciones completamente capaces de generar cambios físicos y químicos en el fluido (Moholkar, Senthil y Pandit, 1999).

Diferentes autores en la literatura desarrollan su propia definición de cavitación, por lo cual a continuación se recopilan diferentes definiciones de investigadores:

Para Gogate *et al.* (2006) La cavitación puede ser definida de forma general como la generación, crecimiento y colapso de cavidades resultado en altas densidades de energía del orden de 1 a 10^{18} kW/m³. Esta puede ocurrir en millones de lugares en el reactor simultáneamente y generar

condiciones de muy altas presiones y temperaturas, además radicales libres son generados debido a la disociación de vapores atrapados en las cavidades, lo cual resulta en la intensificación de las reacciones químicas o propagación de ciertas reacciones inesperadas.

Para Ranade y Bhandari (2014) la cavitación es el fenómeno de formación, crecimiento y colapso de micro burbujas o cavidades dentro del líquido en un intervalo de tiempo extremadamente pequeño de tiempo, microsegundos, en múltiples lugares del reactor liberando una gran cantidad de energía. Las cavidades son generadas por la caída de presión local (debido a la desorción de los gases disueltos o la evaporación del líquido). Cuando las cavidades viajan a una región de mayor presión, implotan o colapsan bajo ciertas condiciones, produciendo altas presiones y temperaturas en la zona cercana al colapso. Se producen temperaturas superiores a los 5000K y presiones mayores a las 1000 atm, y chorros de agua de alta velocidad que rondan los 100 a 300 m/s.

Para Fomitchev-Zamilov y Godin (2012) la cavitación es un proceso de formación de burbujas en líquidos debido a la variación de la presión. La cavitación ocurre cuando la presión del líquido cae por debajo de su presión de vapor. Se caracteriza por altas temperaturas, del orden de 10000K y mayores si es posible, además de altas presiones, del orden de 10 a 100MPa, que tienen lugar durante el colapso de las burbujas formadas por la cavitación. Es un método para tratar crudos, combustibles, bitúmenes y biocombustibles con el fin de reducir su viscosidad e incrementar los rendimientos de los destilados livianos tras una destilación atmosférica o al vacío.

Para Gogate y Pandit (2004) la cavitación hidrodinámica es un fenómeno producido de forma sencilla, al pasar un líquido a través de una restricción como una placa de orificio, válvula de estrangulamiento o un Venturi. Cuando el líquido cruza la restricción, la energía cinética, traducida en la velocidad del fluido, aumenta a expensas de la presión. Si el estrangulamiento es suficiente para causar una reducción de la presión por debajo de la presión de vapor el fluido a la temperatura de operación, millones de cavidades serán generadas. Posteriormente, cuando la presión es recuperada, todas estas cavidades colapsan. Después de la restricción, una gran cantidad de turbulencia se genera, dependiendo de la caída de presión, la cual depende de la geometría y las condiciones de flujo.

Para Chornet y Chornet (2008) la cavitación es la formación, crecimiento e implosión de burbujas de gas o vapor en líquidos. Esta ocurre en el crudo cuando se generan unas micro-cavidades temporales de vapor o gas que van creciendo hasta que implotan, aumentando la temperatura de la interfaz entre las micro-cavidades y el crudo líquido por unos intervalos muy cortos de tiempo (microsegundos) facilitando la formación de radicales libres y reacciones químicas. Entonces, el crudo reduce su viscosidad debido a un reordenamiento molecular.

1.3. Generación de la Cavitación

De acuerdo a Gogate y Pandit (2004) la cavitación hidrodinámica se puede generar básicamente de dos formas:

Incrementando la velocidad lineal un líquido forzándolo a fluir a través de una restricción como un tubo tipo Venturi o un orificio:

Cuando el líquido pasa a través de la sección de área reducida en la restricción, la velocidad aumenta a expensas de la presión. Si el estrangulamiento es suficiente para causar que la presión del líquido caiga por debajo del límite de presión para la cavitación, usualmente la presión de vapor a la temperatura de operación del medio, las cavidades son generadas localmente producto de una vaporización espontánea del medio precisamente en forma de micro burbujas.

Con la continua disminución de la presión, las cavidades continúan creciendo por la vaporización adicional o la desorción de gases, los cuales normalmente están disueltos en el medio, hasta alcanzar su máximo tamaño en la presión más baja. Posteriormente con el incremento de la presión se comprime las cavidades completamente hasta hacerlas colapsar de manera casi adiabática, generando condiciones de presión y temperatura extremas. Durante el paso del líquido a través de la constricción, se produce la separación de la capa límite y se pierde una cantidad sustancial de energía en forma de una caída de presión permanente. Después de la restricción se genera una zona de alta turbulencia que depende de la magnitud de la caída de presión, la cual a

su vez depende de la geometría y las condiciones del flujo. La intensidad de la turbulencia tiene un profundo efecto en la intensidad de la cavitación.

De esta forma, se puede controlar la intensidad de la cavitación modificando la geometría del reactor y las condiciones de operación del mismo, para de esta forma conseguir los cambios físicos y químicos deseados con una máxima eficiencia. A su vez las presiones y temperaturas de colapso son fuertemente función de los parámetros de operación y geométricos. Véase Figura 1

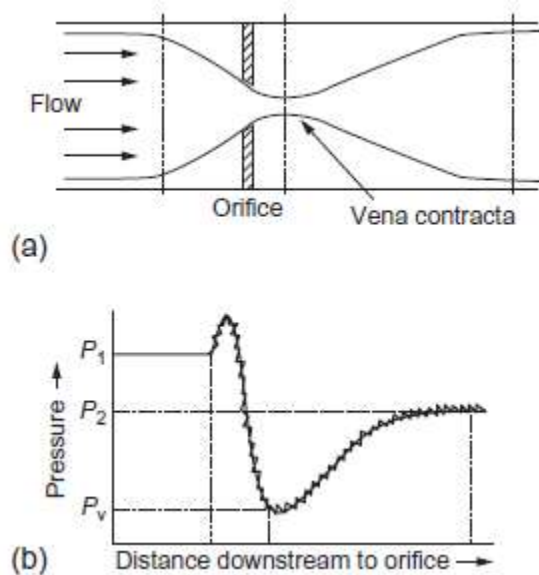


Figura 1. Flujo de la corriente y variación de la presión en un equipo de cavitación hidrodinámica.

Adaptado de Ranade y Bhandari (2014).

Aumentar la velocidad tangencial de un líquido forzándola a fluir a través de un dispositivo como un diodo de vórtice, que tiene un orificio de salida desde el centro del vórtice (flujo tangencial). Las dimensiones del diodo y el orificio de salida están diseñados de tal manera que se genera una región de baja presión debido a que el flujo altamente turbulento en la cámara de diodo es adecuado para generar cavidades. Las cavidades escapan de la cámara de diodos a través del orificio de salida y luego se colapsan al entrar en la región de alta presión.

1.4. Etapas de la Cavitación

1.4.1 Clasificación según Ozonек (2012): Primera Etapa, Inicio De La Cavitación: En esta fase se inicia la formación de las burbujas o cavidades en una escala macro, con dimensiones de micras. La formación de las burbujas bajo condiciones prácticas requiere de la existencia de un núcleo de cavitación, como micro burbujas llenas de gas o vapor o micro partículas sólidas.

Segunda Etapa, Crecimiento De Las Burbujas: Durante esta etapa las burbujas o cavidades se expanden debido a la pérdida del equilibrio entre las fuerzas internas y externas en la capa límite de transición entre las fases líquida y gaseosa.

Tercera Etapa, Desintegración De Las Burbujas: En esta fase se produce el colapso de las regiones de cavitación, el cual es de naturaleza implosiva debido al rápido incremento de las fuerzas externas que actúan sobre estas regiones.

1.4.2. Clasificación según Knapp, Daley y Hammitt (1970): Generación de burbujas: algunas veces, en un líquido que disminuye su presión por debajo de la presión de vapor las burbujas se generan y crecen un poco y desaparecen, no alcanzan a formar cavernas o cavidades.

Manifestación de la cavitación: Cuando la presión estática del líquido disminuye por debajo de la presión de vapor se forman burbujas que logran convertirse en cavernas que van creciendo con el cambio de la presión.

Desaparición de la cavitación: Cuando la presión estática aumenta, el vapor previamente generado se condensa y estas cavernas colapsan muy rápido (microsegundos). Mientras colapsan la presión del líquido cerca de la superficie aumenta demasiado. La energía cinética del líquido aumenta.

1.5. Tipos de Cavitación

Podemos identificar varios tipos de cavitación dependiendo de dónde ocurre y de las condiciones iniciales de acuerdo a Gogate y Pandit (2001).

- Cavitación hidrodinámica: producida por las variaciones de velocidad del flujo de líquido debido a la geometría del sistema.
- Cavitación acústica (ultrasónica): producida por la propagación de ondas de presión en un líquido.
- Cavitación óptica: producida por fotones de luz de alta intensidad que atraviesan un líquido (ejemplo: laser)
- Cavitación de partícula: Producida por cualquier tipo de partícula elemental (Ejemplo: Protón) que provoca el rompimiento del líquido formado burbujas

De acuerdo a Ranade y Bhandari (2014) únicamente la cavitación acústica e hidrodinámica han sido encontradas viables económicamente, además que producen los cambios físicos y químicos deseados, mientras que la cavitación de partícula y la óptica solo sirven para producir una burbuja de cavitación sencilla, lo cual no inducirá ningún cambio químico.

1.6. Número de Cavitación

El número de cavitación es un parámetro adimensional usado generalmente en la cavitación hidrodinámica que mide la resistencia del flujo a cavitarse en forma vaporosa y se define como:

$$K = \frac{P_o - P_v}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

Dónde:

K = Numero de cavitación

P_o = Presión del sistema

P_v = Presión de vapor del fluido

ρ = Densidad del fluido

V = Velocidad del fluido

Cuando mayor sea el coeficiente de cavitación menos probable es que ocurra la cavitación. El inicio de la cavitación se da cuando el número de cavitación cae por debajo de un valor crítico que depende de la geometría del cavitador, cuando el coeficiente de cavitación es igual a 1 se asegura que la presión estática del sistema caerá por debajo de la presión de vapor del fluido, lo que indica la presencia de cavitación hidrodinámica (Navarrete et al, 2003).

Gogate y Pandit (2012) mostraron que para números de cavitación mayor a 1, las cavidades oscilan bajo la influencia de un campo de presión fluctuante y las magnitudes de pulsos de presión generados son muy bajas, insignificantes para originar un cambio químico.

Sin embargo, Harrison Y Pandit (1992) encontraron que puede ocurrir cavitación en números mayores a 1 debido a la presencia de gases disueltos o algunas impurezas. Yan Y Thorpe (1990) mostraron que el número de cavitación es función de la geometría del sistema y aumenta a medida que aumenta el tamaño de la constricción.

De acuerdo a Kanthale *et al.* (2004) las cavidades que se forman durante el proceso de cavitación hidrodinámica luego de pasar a través de la restricción raramente existen en aislamiento, siempre se encuentran agrupadas en forma de nubes o clúster. A medida que el número de cavitación descende, el clúster de cavidades crece y su longitud se extiende. El rendimiento de los efectos de la cavitación hidrodinámica no solo depende de la presión de colapso de las cavidades, también del volumen activo de cavitación dentro del cavitador. Véase Figura 2

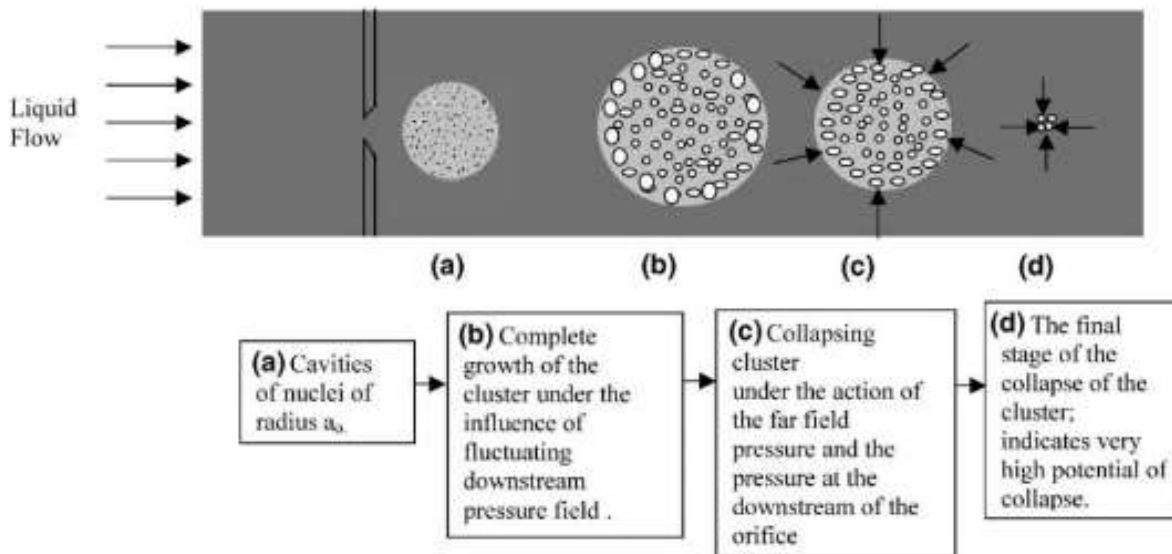


Figura 2. Representación esquemática de las diferentes fases del proceso de cavitación hidrodinámica aguas debajo de la placa de orificio. Adaptado de Kanthale et al. (2004)

1.7. Cavitación y Viscosidad

Las fuerzas intermoleculares son las fuerzas de atracción que unen a las moléculas unas a otras. También son llamadas fuerzas débiles, dentro de las que se encuentran las fuerzas de van der Waals, enlaces de hidrogeno y atracciones ion-dipolo (Galano, 2013). Son fuerzas físicas y principales responsables de las propiedades macroscópicas de la materia (Chang, 2002) como, por ejemplo, la viscosidad, tensión superficial, etc. (González, s.f.).

La viscosidad se define como la resistencia al movimiento de un fluido y en los líquidos depende tanto del arrastre causado por las fuerzas intermoleculares o de cohesión entre moléculas de capas adyacentes de fluido (Hernández, 2002), como de su estructura molecular. Por lo general, los líquidos con fuerzas intermoleculares fuertes presentan una gran viscosidad, debido a la mayor fricción entre sus moléculas que dificulta el desplazamiento entre ellas, comparado con otros fluidos con fuerzas intermoleculares débiles que generan una menor viscosidad por la mayor facilidad en el deslizamiento de las moléculas. Adicionalmente, los líquidos con estructuras moleculares alargadas y flexibles con mayor tendencia a doblarse, enredarse y entrelazarse que a deslizarse, representan otro factor que genera también una mayor viscosidad (Chang, 2002).

La viscosidad de los crudos varía dependiendo su origen, tipo y naturaleza de su composición química, particularmente de los componentes polares, para los cuales las interacciones intermoleculares pueden ocurrir (Sattarin, 2007). Para lograr una reducción de la viscosidad en un crudo se debe pensar en el rompimiento o debilitamiento de las fuerzas intermoleculares las cuales son las que crean la alta viscosidad (Miadonye, 2001). Durante el tratamiento por cavitación

hidrodinámica, se generan cavidades llenas de gas o vapor, las cuales luego de formarse, crecen e implosionan repentinamente, generando ondas de choque que liberan una gran cantidad de energía acumulada durante la expansión de las burbujas y que alcanzan temperaturas y presiones entre 500-15000°C y 200-400 MPa respectivamente (Lecoffre. 1999), las cuales conllevan al rompimiento y debilitamiento de las fuerzas intermoleculares del crudo y por ende una disminución en la viscosidad. Adicional, tales temperaturas y presiones conducen naturalmente al craqueo térmico de enlaces C-C y anillos aromáticos (Cataldo, 2000), lo que resulta, en un aumento de la gravedad API por el craqueo térmico generado. Véase Figura 3

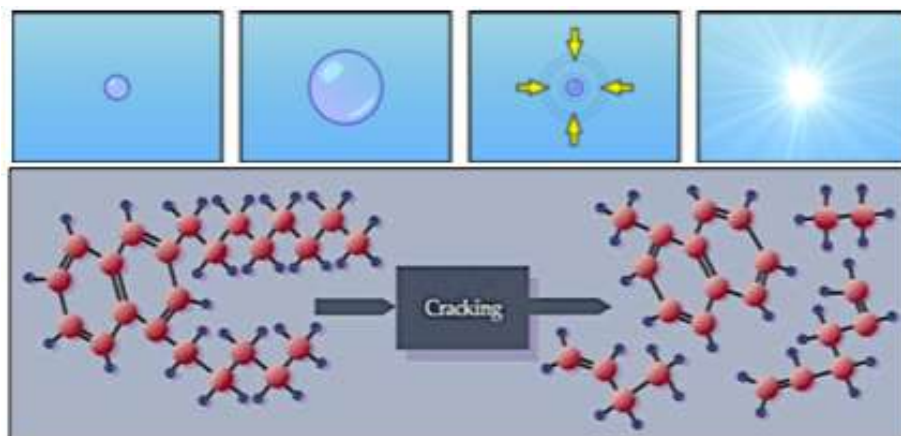


Figura 3. Craqueo de hidrocarburos durante el colapso de las burbujas de la cavitación. Adaptado de Fomitchev-Zamilov (2014).

1.8. Antecedentes

El desarrollo de la tecnología de cavitación hidrodinámica aplicada en el craqueo de hidrocarburos se ha trabajado desde la década de los sesenta en la Unión Soviética, en donde era muy conocida a diferencia de la región occidental (Fomitchev-Zamilov, 2014). Actualmente hay diferentes

compañías a nivel mundial, en Rusia, Ucrania, España que la investigan, desarrollan, manufacturan y exportan a países como China, India, España y Brasil.

Diferentes autores han analizado sus aplicaciones y resultados, los cuales varían ampliamente de acuerdo a las condiciones operacionales bajo las cuales se trabaja. A continuación se describen algunos de los principales estudios y resultados obtenidos en los diferentes campos de aplicación de la cavitación hidrodinámica.

Moholkar, Senthil y Pandit (1999) estudiaron los efectos sonoquímicos generados por la cavitación hidrodinámica, analizando los diferentes aspectos que influyen en el comportamiento de las burbujas: su origen, crecimiento y colapso. Este estudio sirvió para concluir que se requieren condiciones de operación óptimas para alcanzar reacciones químicas específicas.

Besov *et al.* (2002) realizaron experimentos combinando los efectos de la cavitación y campo eléctrico sobre n-octano y n-decano. Para ello emplearon un radiador que actúa sobre el hidrocarburo contenido en un cilindro de gas. La zona de cavitación se encuentra entre el radiador y el electrodo de alto voltaje. El campo eléctrico es controlado (10-20 kV/cm) cambiando la distancia del electrodo. El máximo voltaje fue 25 kV. La zona de reacción estaba refrigerada por un flujo de agua entre la celda y un cilindro de gas externo. Después de un largo tiempo del proceso, se llegó a la conclusión que generar una descarga eléctrica dentro de una burbuja de cavitación ocasiona la formación de radicales libres, los cuales favorecen los procesos de reacción.

Jianbing *et al.* (2006) investigaron el uso de la cavitación hidrodinámica y ultrasónica para la producción de biodiesel (Ester metílico de ácidos grasos) por transesterificación de aceite de soya. La producción de biodiesel requiere el uso de un catalizador tipo básico o ácido o de una temperatura cercana al punto de ebullición de la mezcla de los triglicéridos y metanol, el cual debe ser homogenizado con la anterior mezcla para la producción del biodiesel, como alternativa a la agitación mecánica se empleó la cavitación ultrasónica y la cavitación hidrodinámica. La cavitación crea burbujas micro finas, que colapsan asimétricamente rompiendo los límites de las fases y conduciendo a la intensificación de emulsificación del sistema, mejorando el mezclado de los reactivos.

Para ello, se emplearon dos sistemas, dependiendo del tipo de cavitación. La cavitación ultrasónica se generó en el sistema por medio de un reactor de ultrasonido que transmitía el ultrasonido a través de un transductor sumergido 2 cm en la mezcla, mientras que en el otro sistema la cavitación hidrodinámica se realizó con una placa de orificio. Ambos métodos probaron ser eficientes, ahorraron la mitad de la energía requerida por agitación mecánica, disminuyeron el tiempo de la reacción y se probó la cavitación hidrodinámica como la más potencial para ser escalada a nivel industrial por su facilidad de adaptación.

Nesterenko y Berlizov (2007) recopilaron información expuesta en *the All-Union Scientific and Technical Conference on Use of Ultrasound Industry*. Y, de un experimento que consistió en variar las condiciones de temperatura entre 430-470°C y la presión entre 20-60 MPa a una frecuencia de vibración ultrasónica de 27 kHz, se concluyó que las condiciones más efectivas fueron una temperatura de 450°C, y una presión de 50 MPa.

Chornet y Chornet (2008) emplearon la cavitación hidrodinámica como un tratamiento de crudos pesados, con el fin de reducir la viscosidad y la gravedad específica, generando un reordenamiento molecular que facilita el bombeo, transporte, procesamiento y refinación del hidrocarburo. Para ello, emplearon el “proceso para reducción de viscosidad de crudos pesados” en el que se calienta el aceite pesado a una temperatura de 400-900°C. Después, el crudo pesado es mezclado con otro fluido (gas calentando o un destilado como el pentano) a una presión de 700 a 2000 psi.

Posteriormente la mezcla es pasada a través de un pequeño orificio o boquilla, en donde ocurre la cavitación, tras una caída presión de 500 a 1500 psi, obteniendo un aceite con una viscosidad menor a la inicial. Este procedimiento, fue realizado en crudo de Lloydminster, con una gravedad API de 12°, una gravedad específica de 0,986 y una viscosidad cinemática de 34805 cSt a 15°C, El cual fue calentado a 400°C y mezclado durante 10 segundos con pentano calentando a 400°C en un relación 9% volumen, para después ser pasado a través de la boquilla generando una caída de presión de 410psig. El crudo tratado resultante alcanzo una gravedad API de 18.1°, una gravedad específica 0.945 y una viscosidad cinemática de 710cSt a 15°C.

Malykh, Petrov y Mal'tzev (2008) investigaron la aplicación de la tecnología de cavitación hidrodinámica y ultrasónica, como una alternativa para craquear térmicamente los hidrocarburos aprovechando las altas temperaturas ocasionadas durante el colapso de las burbujas producidas durante de la cavitación, sin embargo concluyeron que la aplicación industrial de la cavitación está marcada por una baja eficiencia, por lo que se requiere un método especial de aplicación de la

cavitación para liberar la energía necesaria para alcanzar temperaturas superiores a mayores 36000°C, las cuales son requeridas para destruir enlaces carbono-carbono.

Nesterenko y Berlizov (2008) a partir de un análisis matemático del fenómeno de la cavitación, teniendo en cuenta las ecuaciones que describen el volumen de una esfera, el flujo radial, la energía cinética, y el caudal, llegaron a la conclusión que, en la cavitación, la fracción de volumen de las cavidades no puede exceder el 10%. Si esta condición es violada, más energía se va a gastar en la interacción entre estas cavidades que en la creación de altas presiones y temperaturas. Sin embargo, es necesario lograr la mayor densidad de cavidades en el medio para intensificar el cracking..

Pal *et al.* (2009) estudiaron la producción de biodiesel por medio de cavitación hidrodinámica conduciendo una investigación experimental. La cavitación fue generada por el flujo de líquido bajo condiciones controladas a través de geometrías simples como tubos Venturi o palcas de orificio. Se emplearon 4 palcas de orificio, con 1, 3, 5 y 7 orificios con un diámetro de 3 mm. Cuando la presión del líquido cae en la garganta de la geometría, la presión de vapor del líquido cae y se genera un gran número de cavidades que posteriormente implotan y aumentan la presión y temperatura en forma de pulsos, los cuales generan un mejor mezclado de los líquidos inmiscibles mejorando el proceso de transesterificación.

Los resultados mostraron que el biodiesel producido por cavitación es un proceso simple, eficiente, ahorra tiempo, económicamente amigable, viable industrialmente, y una gran alternativa de mejor rendimiento y menores emisiones que el diésel mineral. Se alcanzó un rendimiento

máximo de diésel del 80% dentro de 30 minutos, lo cual es sumamente eficiente y mucho menos tiempo de consumo frente a un proceso sin cavitación que puede extender de 48-49 horas.

Díaz *et al.* (2013) estudiaron el efecto de la cavitación acústica sobre la viscosidad del crudo pesado, como una nueva alternativa potencial para reducir su viscosidad y facilitar el transporte por tuberías, debido a las condiciones inusuales de altas presiones y temperaturas generadas. Para ello, en una planta piloto realizaron un estudio experimental de un flujo continuo sometido a ultrasonido de alta densidad (alta amplitud y baja frecuencia) transmitido a través de un contacto entre fluido y una punta metálica que vibraba longitudinalmente con frecuencias superiores a 20kHz.

Para analizar la influencia de las principales variables del proceso, se varió la temperatura entre 308-319K, el tiempo de exposición entre 5,66 y 16,98 s y la intensidad sónica entre 170-250kW/m² y 400-680 kW/m². Se logró determinar que la temperatura inicial del tratamiento no tiene un efecto significativo en la reducción de viscosidad, por otra parte, el incremento del tiempo de exposición favorece la reducción de viscosidad, que varió entre 0,99-1,35%, valores que no son muy significativos desde el punto de vista práctico; sin embargo se pudo determinar que la interacción entre el tiempo de exposición y la intensidad sónica es la que rige el comportamiento del proceso.

Lee y Han (2013) investigaron otro campo de aplicación de la cavitación hidrodinámica, en el tratamiento de lodos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales, en donde es indispensable la desintegración del lodo activado para la digestión anaerobia, en este caso la cavitación hidrodinámica es empleada como un medio físico para romper el lodo activado. Además

que esta aplicación, representa un consumo energético mucho menor que los métodos térmicos y ultrasónicos empleados. La materia orgánica es degradada en ausencia de oxígeno, convirtiéndose principalmente en metano y dióxido de carbono. El gas producido tiene un contenido entre 65% y 70% de metano y entre 20% y 25% de otros, y puede ser utilizado como combustible. El lodo activado contiene un alto contenido de material biológico, generalmente microbios con paredes celulares lo suficientemente fuertes para evitar la biodegradación por parte de los digestores anaeróbicos. Por lo que es indispensable usar un pretratamiento para romper las paredes celulares y los digestores anaeróbicos puedan actuar.

El estudio busco obtener las condiciones óptimas con el propósito de maximizar el contenido de metano producido por el tratamiento anaeróbico. Para ello utilizaron los desechos de una planta de tratamiento de aguas residuales en Daejeon, Corea del Sur para ser tratada con los digestores anaeróbicos. Como métodos de pretratamiento de control se usó el tratamiento térmico, calentando la muestra en una rango de 110 a 150°C por 10 minutos. También se desarrolló un tratamiento alcalino usando soda caustica, hidróxido de potasio, e hidróxido de calcio, manteniendo un pH de 8 a 13.

La muestra fue mezclada combinadamente por 20 minutos. Además, se empleó el ultrasonido a una frecuencia de 20kHz. Finalmente, se usó un reactor de cavitación hidrodinámica hecho de acero inoxidable y conectado a una bomba de agua de agua. El reactor de cavitación hidrodinámica era una placa de orificio de 20mm de diámetro con 27 orificios de 1 mm de diámetro, la presión a la entrada fue de 0.7Mpa y a la salida 0.07 Pa. Bajo esta condición la velocidad en la placa de orificio fue de 21.2 m/S y el número de cavitación estimado de 2.79. Los resultados de la

investigación arrojaron que la HC es un método físico efectivo que mejora la desintegración de lodo activado, presenta un bajo consumo de potencia y es fácilmente escalable.

Fomitchev-Zamilov (2014) estudio el upgrading del crudo pesado por medio de la cavitación hidrodinámica. Para ello diseñaron su propio cavitador hidrodinámico, en el cual procesaron 55 galones de muestra de bitumen diluido de Athabasca a un caudal de 30 galones por minuto, calentando a 50°C inicialmente a 200°C y presión atmosférica. Después de 15 minutos de tratamiento la viscosidad fue reducida de 805.8 cSt a 408.5 cSt, aproximadamente en un 49% y al API incremento 1.5 grados, de 12 a 13.4. Además también procesaron el residuo de la destilación atmosférica del crudo liviano Pennsylvania, el cual fue calentado a 80°C inicialmente, y siguiente el procedimiento anterior, la viscosidad paso de 1490cSt a 680, obteniendo una reducción del 50%, mientras que la gravedad api aumento 1° de 23 a 24. De acuerdo a esto, y los precios del crudo para el 2013, se concluyó que el beneficio económico de estos resultados era de aproximadamente \$1 USD por barril.

Navarrete *et al.* (2014) estudiaron la aplicabilidad de la cavitación hidrodinámica y acústica para reducir la viscosidad del 1,2 propanodiol, que tiene una viscosidad de 6000 cP a 20°C. Para ello desarrollaron un circuito hidráulico de 70 litros, compuesto por cavitador hidrodinámico, en este caso un tubo Venturi, una bomba centrífuga, sistemas de almacenamiento y de enfriamiento, el cual lo llenaron completamente de propanodiol y estabilizaron la temperatura a 15°C, posteriormente se enciende la bomba y aumentan la potencia hasta que la bomba empieza a caviar a 1.7Kw, en este punto mantienen el coeficiente de cavitación de aproximadamente 0.5 y dejan variar la muestra durante 10 horas,.

Para la generación de energía acústica emplearon un procesador ultrasónico comercial de 750W a una frecuencia de 20Khz, inmerso en un matraz de 500 ml. En este la muestra se encuentra a presión atmosférica 101 kPa, T amb 20°C, y se cavita a potencia máxima durante una hora tratando de mantener la temperatura constante, el proceso se detiene cada media para dejar enfriar el sonotrodo que alcanza una temperatura de 120°C, esto se realiza hasta completar las 10 horas de tratamiento. Luego del tratamiento de la muestra de propanodiol de referencia que tenía una viscosidad de $40 \pm 0.37 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, la viscosidad se redujo a 30 ± 1.76 por el tratamiento ultrasonido y 28 ± 0.14 por el tratamiento hidrodinámico, por lo que se obtienen unas reducciones de viscosidad del 25 y 30% respectivamente. Se este modo se concluye que ambos sistemas de cavitación son eficientes a la hora de reducir al viscosidad de un polímero de bajo peso molecular, pero la cavitación hidrodinámica es más eficiente ya que se gastó menos energía y la reducción fue mayor.

Brand *et al.* (2015) debido a los altos costos de los procedimientos convencionales para el transporte de crudos pesados en Rusia, buscaron encontrar una alternativa más económica. Para esto, simularon el fenómeno de cavitación en ANSYS/FLUENT, y se observa que cuando el crudo pesado atraviesa la parte más estrecha del dispositivo, alcanza temperaturas bastante altas. Para hacer el ejercicio en laboratorio, se usa un equipo compuesto por una bomba centrífuga y tubos cilíndricos de 3 cm^2 de área transversal. Se usaron 200 litros de crudo de alta viscosidad con densidad de 945 kg/m^3 con viscosidad de 150 cP. Se concluye que la aplicación de la cavitación reduce considerablemente los costos del proceso, y esto genera grandes beneficios económicos. Este proceso incrementa la temperatura del crudo 2-3 °C, y a su vez reduce la viscosidad rompiendo los enlaces de carbono del crudo, generando una disminución en: el consumo de

combustible de los calentadores, el costo de transporte y de refinación. Esta tecnología puede ser aplicada en líneas de flujo de diámetros hasta de 300 mm y crudos de viscosidad de 150-200 cP.

Dular *et al.* (2015) investigaron el uso de la cavitación como un tratamiento para limpiar las aguas y aguas residuales es bien conocido, siendo empleado para remover productos farmacéuticos (clofibrac acid, ibuprofen, ketoprofen, naproxen, diclofenac, carba-mazepine) , cianobacterias tóxicas (*Microcystis aeruginosa*), bacterias (*Legionella pneumophila*), micro algas verdes (*Chlorella vulgaris*), virus (rotavirus). Con la reducción de disponibilidad de fuentes potables de agua, la cavitación hidrodinámica como un tratamiento para su purificación traza un gran camino.

Los investigadores afirman que las presiones y temperaturas extremas producto de los colapsos de la cavitación desintegran las pequeñas moléculas orgánicas, las cuales son difíciles de desintegrar usando métodos biológicos convencionales además que desintegran la mayor cantidad de partículas aumentando la superficie específica y por tanto e incrementando la biodegradación de los contaminantes orgánicos, abriendo la posibilidad de implementar la cavitación hidrodinámica para remover diferentes contaminantes farmacéuticos, bacterias, micro algas y virus del agua y las aguas residuales, de una forma energéticamente eficiente y escalable a nivel industrial. Para ello implementaron tres tipos diferentes de reactores de contaminación, 2 con tubos Venturi y otro con un cavitador de corte, concluyeron preliminarmente que la cavitación efectivamente contribuía a la remover las bacterias, cianobacterias *M. aeruginosa*, los virus rotavirus, aunque en micro algas no fue efectivo.

2. Diseño de un reactor de cavitación

Existen diferentes tipos de reactores para generar cavitación, cada uno tiene una dificultad distinta para diseñar y escalar a niveles de laboratorio y comerciales, y también son diferentes sus aplicaciones.

El cavitador acústico es bastante complejo de diseñar y escalar, puede ser usado para demostrar la viabilidad de un proceso e nivel de laboratorio y comercial. Con un diseño cuidadoso, también puede usarse para estudiar el comportamiento cinético del proceso de cavitación acústico. Este reactor puede operar solo o junto a otros con procesos de oxidación avanzados.

El cavitador óptico es generalmente útil para estudiar la dinámica de las burbujas o la cinética del proceso de cavitación. Es una herramienta útil para estudios, pues, con este pueden generarse múltiples burbujas en un ambiente controlad, además sirve para evaluar la factibilidad del proceso de cavitación en una escala de laboratorio, aunque, no resulta muy útil para escalas comerciales.

El cavitador hidrodinámico es tal vez el más simple de diseñar y operar. Permite demostrar la factibilidad del proceso de cavitación en escalas de laboratorio o más grandes inclusive. Sin embargo, este rector no sirve para examinar la cinética intrínseca en el proceso de cavitación, debido a que generan baja intensidad de cavitación. Por esto son usados generalmente en un sistema híbrido que incluye otro reactor de oxidación avanzada.

En un sistema fluyente, la velocidad del líquido varía localmente y las cavidades pueden ocurrir en los puntos de más alta velocidad y más baja presión. En un cavitador hidrodinámico, el cual

consiste principalmente de una bomba y un orificio aguas debajo de su descarga, las cavidades se generan por la reducción de presión cerca del orificio.

La forma de los orificios hace que el área de flujo varíe, así, la rata de vaporización y la cantidad de burbujas generadas puede ser controlada. Moholkar y Pandit (1997), encontraron de su simulación que poner dos o tres orificios uno tras de otro hace que el flujo entre en un campo de presión fluctuante, causando que el colapso sea más violento, y se alcancen temperaturas y pulsos de presión bastante altas.

Estudios en la hidrólisis de aceites grasos, de Joshi y Pandit (1993), y estudios en Polimerización, de Chivate y Pandit (1993), revelan que la cavitación hidrodinámica puede ser mucho más eficiente energéticamente que la cavitación acústica.

Un mejor control sobre las condiciones de cavitación y menos sensibilidad de los parámetros geométricos permiten mayor confiabilidad, predictibilidad y control de un cavitador hidrodinámico.

La presión de recuperación aguas abajo del orificio en este reactor es muy pobre. La pérdida permanente de cabeza de presión es inversamente proporcional a la relación entre el tamaño del orificio y el de la tubería (típicamente la pérdida de presión es del 73% de la presión en la tubería para una relación orificio-tubería de 0.5) los costos de bombeo de este reactor son bastante altos, especialmente para líquidos muy pesados, el desempeño de la cavitación hidrodinámica es un poco más bajo para mezclas muy viscosas.

Las magnitudes de los pulsos de presión producidos por la generación de burbujas no son muy altos, solo ocurren reacciones hasta 10-15 atm y se producen temperaturas hasta de 300 °C. Sin embargo, el calentamiento del medio es relativamente alto y esto reduce la intensidad de la cavitación. (Shah, Y. T., Pandit, A. B., Moholkar, V. S., 1999).

La intensidad de la cavitación, el número de burbujas generadas y la presión de colapso de las burbujas se ve afectada por distintos parámetros y condiciones del sistema. La presión de colapso es definida como la magnitud del pulso de presión generado al final del colapso de la burbuja. El colapso de la burbuja se asume cuando el radio de la burbuja es 0.1 veces el radio original. A continuación, se describen las distintas condiciones que ejercen un efecto sobre el fenómeno de la cavitación. (Gogate, P. R., Pandit, A. B., 2000).

2.1 Efecto de la presión de entrada:

La presión de entrada afecta el número de pasadas a las que el fluido es sometido con el tiempo, y casi el 70-80% de cabeza de presión es perdida durante el paso del fluido por el orificio en prácticamente cualquier configuración de placas de orificio. (Moholkar, V. S., Senthil, P., Pandit, A. B., 1999).

(Gogate, P. R., Pandit, A. B., 2001). El colapso generado por la cavitación depende la presión recuperada aguas abajo del orificio. El incremento de la presión de entrada incrementa este valor, y además aumenta la tasa de disipación de la energía debido a la permanente caída de presión al

cruzar por el orificio. Esto hace que el colapso de la burbuja sea más violento y se genere un pulso de presión de mayor magnitud. En el trabajo de Gogate y Pandit (2000), se muestra que la presión de colapso es proporcional a la presión de entrada basada en simulaciones numéricas. Senthilkumar y Pandit (1999), mostraron a partir de la simulación de la dinámica de las burbujas que la presión de colapso incrementaba al aumentar la presión de entrada, pues, una alta presión de entrada, sumada a una gran caída de presión a lo largo del orificio, generan altas tasas de disipación de energía e intensidades de turbulencia, lo que hace que el colapso de las burbujas sea más violento. Véase Figura 4

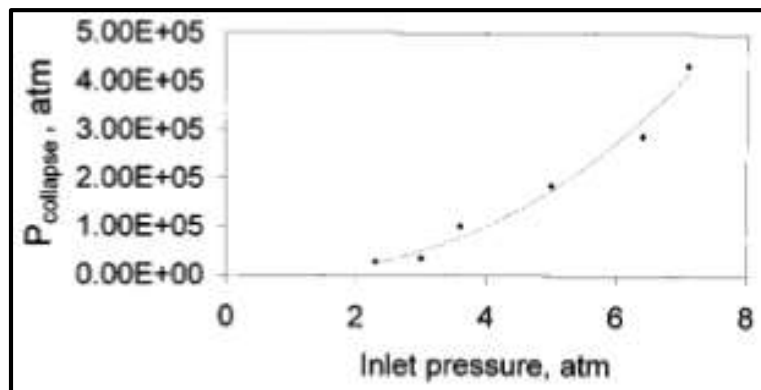


Figura 4. Variación de la Presión de colapso respecto a la Presión de entrada. Adaptado de Shah, Pandit y Moholkar (1999).

La generación de burbujas generalmente ocurre a la presión de saturación del líquido a la temperatura de operación. Un incremento en la presión de entrada incrementa la presión de garganta y disminuye la generación de burbujas. El número de cavitación aumenta con el aumento en la presión de entrada mientras el número de burbujas generadas disminuye (Oba, 1986). Se han llevado a cabo varios estudios experimentales. El rompimiento celular, estudiado por Gareth y Danver (1996), aumenta con la presión de operación hasta un punto y luego disminuye. En el homogenizador de alta presión, de Harrison y Pandit (1992), existía una presión óptima a la cual

la intensidad del colapso y el número de cavidades eran máximos. En la descomposición de KI acuoso, realizado por Shirgaonkar y Pandit (1997), el modelo indicaba que a un valor óptimo de presión la liberación de yodo era máximo. Por esto, hay un valor óptimo de presión de entrada que debería usarse para obtener los máximos beneficios del sistema.

En algunos valores de presión de entrada se puede generar un efecto de “Supercavitación”, la cual es descrita como la formación de una nube de vapor que resulta en un colapso de cavidades en una nube de vapor compresible que resulta en una reducción de presiones de colapso. El número crítico de cavitación depende de la geometría del sistema, especialmente en el valor de β (relación del diámetro de los orificios con el diámetro de la tubería). Yan y Thorpe (1990) reportaron números de cavitación críticos para el inicio de la supercavitación en el rango de 0.005 a 0.08 dependiendo del valor de β en el rango de 0.026 a 0.13 para una placa de un solo orificio. Vichare (2000) mostró que, para una placa de múltiples orificios, el número crítico de cavitación es 0.11 para el valor de β de 0.02. el valor más alto de número crítico de cavitación para supercavitación puede ser atribuido al hecho de que un gran número de localidades están disponibles para el origen de cavitación entre más área es cubierta por la capa cortante debido a múltiples chorros de líquido.

El fenómeno de supercavitación puede ser evitado ajustando las condiciones de operación para obtener un número de cavitación deseado, a partir de la geometría usada en los reactores. Véase

Figura 5

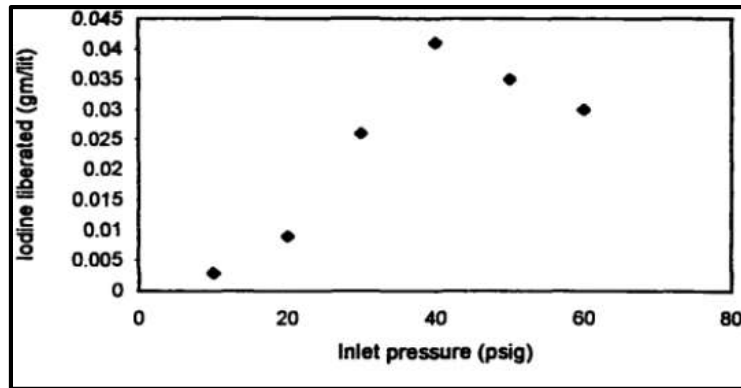


Figura 5. Efecto de la Presión de entrada sobre la Tasa de liberación de Yodo en una configuración de orificio.

Adaptado de: Gogate, Parag, Pandit y Aniruddha (2001).

2.2 Efecto de propiedades fisicoquímicas del fluido:

Existen algunas propiedades fisicoquímicas del fluido bastante importantes e influyentes en el fenómeno de la cavitación. Estas propiedades son:

- Presión de vapor del líquido
- Viscosidad del líquido
- Temperatura del líquido
- Tensión superficial del líquido
- Presencia de gases disueltos
- Constituyentes del medio líquido, como surfactantes.

2.2.1 Efecto de la presión de vapor del líquido: Es más difícil de inducir cavitación en un solvente puro de baja presión de vapor. Chivate y Pandit (1993) confirmaron en sus experimentos de polimerización/despolimerización que el número de cavidades generadas aumenta con un aumento en la presión de vapor.

2.2.2 Efecto de la viscosidad del líquido: Para que la cavitación ocurra en el líquido, se tiene que superar sus fuerzas cohesivas. Un incremento en las fuerzas viscosas incrementará la energía y presión requeridas para generar cavitación. El efecto de cavitación es más bajo para líquidos con altas viscosidades.

2.2.3 Efecto de la temperatura del líquido: La temperatura afecta la dinámica de las burbujas, pues, afecta la presión de vapor, la viscosidad, la tensión superficial, y la solubilidad del gas. Senthilkumar (1997), Sivakumar (2000), Lorimer (1991), Shirgaonkar y Pandit (1997), estudiaron

el efecto de la temperatura en reactores de cavitación acústica. Todos estos obtuvieron resultados desfavorables para la cavitación a medida que se incrementaba la temperatura. Sin embargo, no se ha experimentado ni simulado numéricamente nada para cavitación hidrodinámica. Por lo que se considera que el efecto global de la temperatura en la cavitación es muchas veces impredecible, pues, afecta algunos parámetros en forma positiva y otros de manera negativa.

2.2.4 Efecto de la tensión superficial del líquido: Los líquidos con valores altos de tensión superficial, como el agua, experimentan la máxima intensidad de cavitación. La tensión superficial controla el tamaño de las burbujas de gas presentes en el líquido. Por esto, entre más alta sea la tensión superficial, más rápida será la disolución de las burbujas de gas en el líquido. Por consiguiente, a mayor tensión superficial mayor presión de colapso se generará. Véase Figura 6

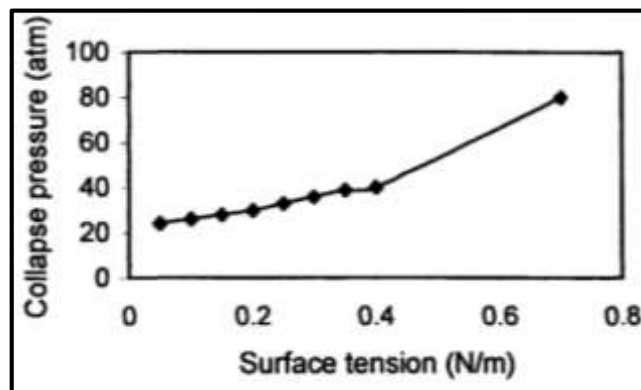


Figura 6. Efecto de la Tensión superficial sobre la Presión de colapso generada. Adaptado de Gogate y Pandit (2001).

2.2.5 Efecto de la presencia de gases disueltos: La naturaleza del gas y su fracción molar desempeñan un rol importante en el efecto de cavitación, en términos de presión y temperatura. Senthilkumar (1997) desarrolló simulaciones con las que concluía que la presión de colapso

aumenta con el incremento de la constante politrópica del gas. El mejor efecto de cavitación se puede lograr en gases monoatómicos como el argón y el helio. Véase Figura 7

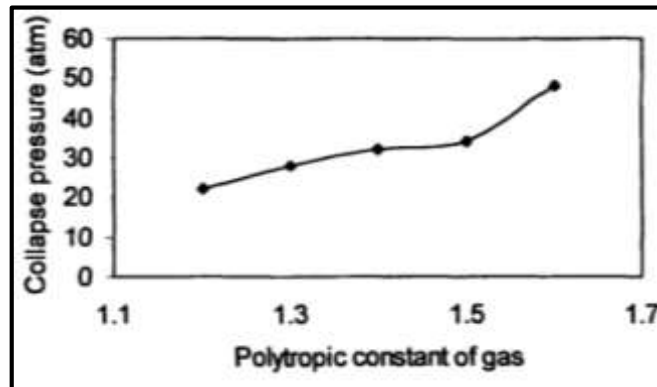


Figura 7. Efecto del Constante politrópica del gas sobre la Presión de colapso generada. Adaptado de Gogate y Pandit (2001).

Flynn (1964) postuló que entre menor sea el contenido de gas, la violencia de la cavitación aumenta. Plesset (1970) atribuyó la reducción de la intensidad para altos contenidos de gas a la compresibilidad de las mezclas gas-vapor. Sin embargo, Senthilkumar et al. (2000) reportaron que el desempeño de la cavitación mejoraba para la etapa inicial del fluido (mientras tenía gases disueltos), que más tarde cuando ya no tenía gases disueltos.

2.2.6 Efecto de los constituyentes del medio líquido: A pesar de que los surfactantes y electrolitos no se encuentran frecuentemente en sistemas de reacción, su presencia en pequeñas cantidades puede afectar significativamente el fenómeno de la cavitación. Los sólidos suspendidos pueden alterar también el fenómeno, también erosionan las bombas y demás componentes del sistema. Mientras que la presencia de otro líquido inmiscible aumenta la cantidad de burbujas generadas. Véase Tabla 1

Tabla 1.

Efecto de las propiedades de la fase líquida en el desempeño de los reactores de cavitación hidrodinámica: Resumen

Propiedad	Afecta	Condiciones favorables
Presión de vapor del líquido	Umbral e intensidad de la cavitación, tasa de reacciones químicas	Líquidos con alta presión de vapor
Viscosidad	Umbral transitorio	Baja viscosidad
Temperatura del líquido	Intensidad de colapso, tasa de reacción, umbral, nucleación, casi todas las propiedades.	Existe un valor óptimo, generalmente se prefieren bajas temperaturas
Tensión superficial	Tamaño de la burbuja	Baja tensión superficial
Gases disueltos	Contenido de gas, nucleación, colapso, intensidad de la cavitación	Baja solubilidad. Gases con alta constante politrópica y baja conductividad térmica.
Surfactantes	Umbral de cavitación, cinética de la reacción	Cada sistema es un caso distinto de estudio
Sólidos	Umbral de cavitación, nucleación, atenuación de la intensidad de sonido, cavitación interfacial, número burbujas, cinética de reacción	Bajas concentraciones. Depende la naturaleza del sistema.
Líquidos inmiscibles		

Nota: Traducida y editada de Gogate y Pandit (2001).

2.3 Efecto de la geometría del orificio:

La geometría del orificio tiene un efecto crucial tanto en el número de eventos de cavitación como en el pulso de presión generado por el colapso de una burbuja. También afecta la distribución de presión y el perfil de presión recuperada aguas abajo del orificio. Cuando se usan placas de orificio para generar cavitación, el área libre disponible para el flujo y la distribución de esta área en diferentes combinaciones (número y diámetro de huecos) tiene un efecto significativo en la intensidad de la cavitación y el pulso de presión generado.

2.3.1 Efecto del diámetro del orificio: Gogate y Pandit (2000) mostraron, a través de la simulación de la dinámica de las burbujas, que la presión de colapso también aumenta con el incremento del diámetro del orificio. Si se mantiene el porcentaje de área libre y se aumenta el

diámetro de orificio, entonces el número de agujeros disminuye y, por tanto, el número de burbujas generadas disminuye. Por esto se necesita optimizar para encontrar el número de orificios y su diámetro para obtener mejores resultados en cada sistema.

(Gogate, P. R., Pandit, A. B., 2000). Este incremento en la presión de colapso se atribuye a la manera con la que varía el número original de cavitación con el diámetro del hueco. El número original de cavitación es definido como el número de cavitación para el comienzo del proceso. Yan y Thorpe (1990) mostraron que este número incrementaba con el aumento del diámetro del hueco. Véase Figura 8

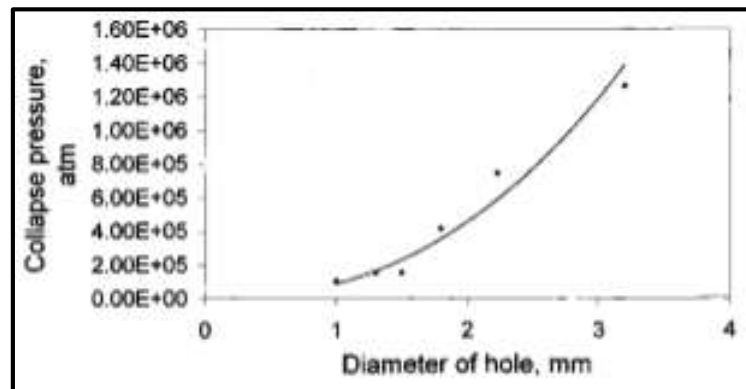


Figura 8. Variación de la Presión de colapso con el Diámetro del hueco de la placa de orificio para una misma área libre para el flujo. Adaptado de Gogate y Pandit (2000).

2.3.2 Efecto del área libre para el flujo: La presión de colapso disminuye con el incremento del porcentaje del área libre permitida por los huecos en las placas de orificio. El incremento en el área libre del orificio provoca una velocidad más baja cuando la rata de flujo se mantiene constante. El número de cavitación incrementa con la disminución de la velocidad en el orificio, resultando

en un número reducido de cavidades generadas. Entonces, la cantidad de energía disminuirá con el incremento del área libre disponible para el flujo. Senthilkumar (2000) estudió el efecto en la separación del yodo a partir del KI y obtuvieron mejores resultados en las placas de orificio con menos área libre para el flujo. Véase Figura 9

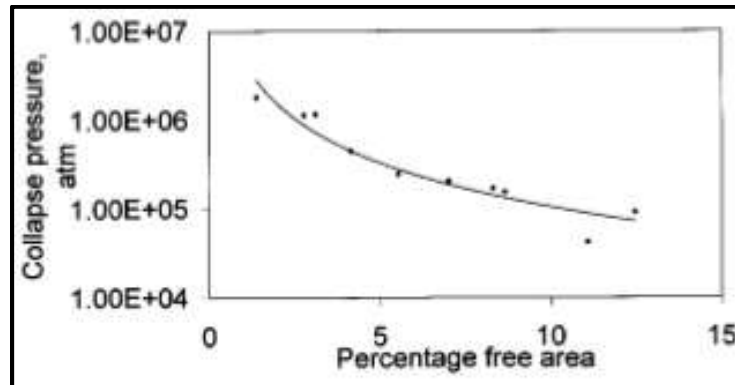


Figura 9. Variación e la Presión de colapso con el Porcentaje de área libre. Adaptado de Gogate y Pandit (2000).

2.3.3 Efecto del radio inicial: La presión del pulso generado al momento del colapso incrementa con la disminución del radio inicial del núcleo. Aunque es difícil de obtener el tamaño exacto, la presión de vapor del medio y los gases disueltos presentes ayudan a predecir el tamaño de la burbuja que se generará. Sin embargo, el verdadero efecto de la variación del radio inicial en la presión de colapso generada solo puede verse después de la estabilización inicial, y este tiempo de estabilización varía para cada sistema. Véase Figura 10

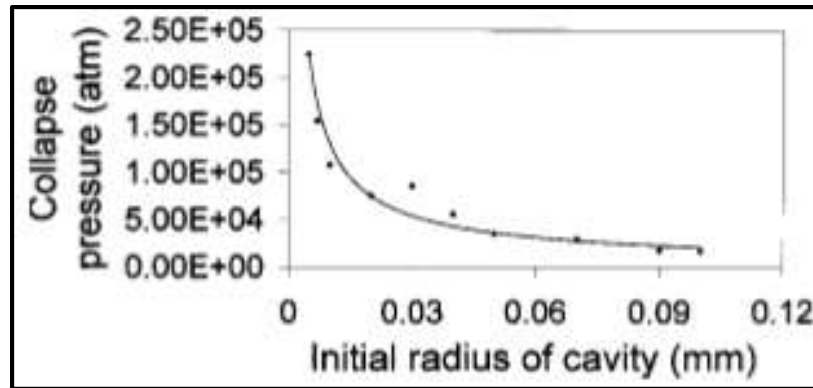


Figura 10. Variación de la Presión de colapso con el Radio de cavitación inicial. Adaptado de Gogate y Pandit (2001).

2.4 Recomendaciones para diseños eficientes (Gogate, P. R., Pandit, A. B., 2001):

1. Seleccionar la más alta presión de entrada que sea menor a la que genere supercavitación.
2. Seleccionar la combinación óptima de propiedades físicas del líquido.
3. Optimizar el número y diámetro de los orificios según el tipo de aplicación. Poco número de orificios de gran diámetro para aplicaciones que requieran alta intensidad de cavitación (destrucción de complejos químicos) y gran número de orificios de poco diámetro para aplicaciones que requieran de baja intensidad de cavitación (rompimiento celular).
4. Diseñar el reactor de cavitación hidrodinámica con la menor área libre para el flujo posible.
5. Escoger la velocidad de rotación de la bomba por encima de la necesaria para dar origen al fenómeno, pero por debajo de la que genere inducción de aire al sistema.
6. Ajustar el tamaño inicial de la burbuja generada manipulando las propiedades y los constituyentes del medio líquido

3. Dinámica computacional de fluidos aplicada al modelado de cavitación hidrodinámica

La dinámica computacional de fluidos (CFD) se ha convertido en los últimos tiempos en una herramienta de vital importancia para predecir el comportamiento de los fluidos asociados a un sistema, estando presente en aplicaciones tan diversas como la aerodinámica de vehículos, hidrodinámica de embarcaciones, análisis de sistema de combustión, diseño de turbomáquinas (i.e. bombas, compresores, turbinas, entre otros.), enfriamiento de sistemas electrónicos, flujo de sistemas fluviales, entre otros, haciendo parte esencial en los procesos de diseño e investigación. Para estos fines se ha dispuesto de sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que representan el fenómeno que sucede en el sistema, mismas que se deben solucionar empleando métodos numéricos, al no poseer una solución analítica. El uso de estos métodos numéricos depende en gran medida de la potencia del ordenador y de la cantidad de subfenómenos asociados al fenómeno principal que se requiere modelar, viéndose beneficiado por el aumento exponencial de la tecnología en la última década, permitiendo extender y diversificar el uso de CFD en áreas en las que antes se veía como imposible su uso.

Las primeras simulaciones llevadas a cabo con CFD para cavitación, tenían como objetivo predecir el comportamiento de la presión en turbomáquinas (Shah, Jain, Pate, & Lakhera, 2013), problema muy frecuente. Por tanto, las ecuaciones utilizadas para este tipo de modelos generalmente no consideran los efectos caloríficos y de trabajo realizados por el vapor liberado, muy importantes cuando el sistema es un reactor.

Luego, en la década de 1990, se desarrollaron algunas simulaciones de reactores de cavitación hidrodinámica basados en modelos propios con cierta precisión, aun así, estos no consideraban en general los efectos termodinámicos de las reacciones (Gogate & Pandit, 2001).

Aún hoy en día no existe un modelo diferencial para el estudio de la cavitación como fuente de energía, pero los modelos hidráulicos gozan de una alta precisión, a continuación se hacen algunos apuntes necesarios para poder desarrollar un modelo de cavitación utilizando la técnica de dinámica computacional de fluidos.

3.1. Ecuaciones de conservación para flujo multifásico en estado transiente

Las principales ecuaciones que constituyen el estudio de cualquier proceso fluidodinámico se fundamentan en las leyes de conservación, estas resuelven las condiciones de estado más generales. Se pudiese decir que *estas ecuaciones describen la física* (Anderson, 2009).

Generalmente las ecuaciones que se utilizan en la dinámica computacional de fluido incluyen la conservación de la masa, momentum y energía, y estas se complementan con ecuaciones de estado y otras relaciones con el fin de que se halle la misma cantidad de ecuaciones e incógnitas.

Estas ecuaciones tienen la capacidad de definir el estado de cualquier fluido en el caso particular de flujo que se desee, corrientemente la ecuación de conservación de masa (también llamada de

continuidad) y conservación del momentum (llamada Navier-Stokes) se escriben de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

En las ecuaciones anteriores, \mathbf{u} es la velocidad instantánea, P es la presión, $\boldsymbol{\tau}$ es el tensor de esfuerzos viscosos y \mathbf{g} el vector gravedad (Sharma, 2017).

A pesar de que estas ecuaciones pueden resolver por si solas todas las variables relacionadas al flujo, método de solución llamada DNS (Simulación Numérica Directa, por sus siglas en inglés) (Stenmark, 2013), puesto que este puede consumir demasiado tiempo, del cual generalmente no se dispone, se han desarrollado modelos que disminuyen en varios ordenes el tiempo de simulación, pero representan los efectos causados por los fenómenos que se quieren estudiar.

Cuando se trata con flujo multifásico diferentes enfoques aparecen, dependiendo del tipo, la cantidad de fases que fluyen y la forma en la cual interactúan entre si estas fases (i.e. si las fases se encuentran dispersas, si siguen un modelo de fase continua, etc.), de acuerdo a (Andersson, Andersson, Hakansson, Mortensen, Sudiyo, & Wachem, 2012) estos modelos los más utilizados son:

- i) Modelo Euler-Lagrange
- ii) Modelo Euler-Euler
- iii) Modelo de mezcla
- iv) Modelo de volumen de fluido (VOF)

Estos modelos se describen brevemente a continuación con sus características y limitaciones.

3.1.1. Modelo Euler-Lagrange. Es un enfoque actualmente limitado para casos en los que se tienen fases dispersas (i.e. sólidos en suspensión, burbujas o gotas). En este modelo se asume el fluido como un continuo utilizando la ecuación de Navier-Stokes para solucionar el balance de momentum en toda la fase, mientras que la fase discreta se soluciona tomando en cuenta la trayectoria que tiene individualmente cada partícula y las posibles interacciones que pueda tener con la fase continua o con otras partículas que se presenten en el sistema. Y las ecuaciones de conservación que se resuelven en este caso son:

$$\frac{\partial \alpha_f \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f) = \mathbf{S}_{mass} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha_f \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f \mathbf{u}_f) = \alpha_f \nabla P - \alpha_f \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_f - \mathbf{S}_p + \alpha_f \rho_f \mathbf{g} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_p}{\partial t} = \sum \mathbf{F} \quad (5)$$

Siendo \mathbf{S}_{mass} el termino de masa fuente, que puede existir por intercambio de masa, \mathbf{S}_p el termino fuente de momentum y \mathbf{F} es la fuerza actuando en la partícula.

Entre las limitaciones que presenta el modelo se puede evidenciar su costo computacional, requiriendo en algunos casos el uso de supercomputadores o sistemas de *clusters* para utilizar una cantidad representativa de partículas, por tal motivo algunos simuladores pueden simplificar el modelo negando las interacciones partícula-partícula, lo que se puede dar sólo en caso de que los sólidos en suspensión estén suficientemente separados unos de otros y la fase dispersa represente una fracción excesivamente baja, usualmente menos del 10% (ANSYS INC, 2017).

3.1.2. Modelo Euler-Euler. En este modelo cada una de las fases es tratada como una fase continua, y las ecuaciones de momentum, continuidad y energía son solucionadas para cada una de las fases de manera individual.

La formulación de este modelo se enfoca en hacer los cálculos a partir un volumen promedio de la fase, por tanto, el introducir una fracción volumétrica acertada de cada fase se vuelve imprescindible.

Las ecuaciones que forman parte de este modelo son:

$$\sum_k \alpha_k = 1 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_k \rho_k \mathbf{U}_{i,k}}{\partial x_i} = - \sum_{l=1}^p (\dot{m}_{kl} - \dot{m}_{lk}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k \mathbf{U}_{i,k}}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_k \rho_k \mathbf{U}_{i,k} \mathbf{U}_{j,k}}{\partial x_j} = -\alpha_k \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \alpha_k \boldsymbol{\tau}_{ij,k}}{\partial x_k} + \alpha_k \rho_k \mathbf{g}_i + \mathbf{F}_{i,k} \quad (8)$$

Donde p representa el número de fases, \dot{m}_{kl} la transferencia de masa que existe desde la fase k a la fase l , F_k la fuerza de interacción con otras fases, P representa la presión, $\tau_{ij,k}$ el esfuerzo cortante producido por la fase k .

3.1.3. Modelo de mezcla. Se presenta como una forma simplificada del modelo Euler-Euler, asumiendo que las fases están suficientemente acopladas como para que la velocidad relativa entre ellas se encuentra en un equilibrio local, en otras palabras, aceleran juntas (Andersson, Andersson, Hakansson, Mortensen, Sudiyo, & Wachem, 2012). En consecuencia, sólo se resuelve un set de ecuaciones para toda la mezcla, resolviendo las variables de flujo de toda la mezcla y no de cada fase individualmente. Luego, las propiedades individuales son calculadas a partir de correlaciones algebraicas para la velocidad relativa, incluyéndose un parámetro llamado velocidad de deriva ($U_{i,dr,k}$) representando la velocidad relativa de la fase k con respecto a la velocidad de la mezcla.

El set de ecuaciones que se debe solucionar en este modelo es el siguiente:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m \mathbf{U}_{i,m})}{\partial x_i} = 0 \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_m \mathbf{U}_{i,m})}{\partial t} + \frac{\rho_m \partial(\mathbf{U}_{j,m} \mathbf{U}_{i,m})}{\partial x_j} \\ = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij,m}}{\partial x_j} + \rho_m \mathbf{g}_i - \frac{\partial(\sum_k \alpha_k \rho_k \mathbf{U}_{dr,k} \mathbf{U}_{j,dr,k})}{\partial x_j} \end{aligned} \tag{10}$$

Con el subíndice m representando una propiedad de la mezcla, y la velocidad de deriva calculada como:

$$U_{i,k} = U_{i,dr,k} + U_{i,m} \quad (11)$$

Este modelo se utiliza generalmente cuando se requiere modelar cavitación (Wu, Liu, Dou, & Zhang, 2011) y otros procesos como la sedimentación.

3.1.4. Modelo de volumen de fluido (VOF). Es uno de los métodos más utilizados y se desarrolló con el fin de describir la posición en la cual se encuentra la interface de los fluidos en cada celda. Es un método similar al método Euler – Euler al tratar cada fase como un continuo, pero por el contrario de este, las fases no se interpenetran.

Dentro del modelo se utiliza una llamada función indicadora de fase, tomando el valor entre uno y cero en las celdas donde se puede encontrar una interfase y cero o uno en las demás (i.e. volúmenes de control totalmente lleno con una sola fase), por lo tanto, el indicador de fase contiene la propiedad de la fracción en volumen.

A medida que la interfase entre dos fluidos se vuelve más recta, se tiene una curvatura finita y los efectos de la tensión superficial empiezan a ser importantes, por lo tanto, esta se adiciona en los términos fuente de la ecuación de momentum en modelo de flujo estratificado, tal como indica la ecuación (12).

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U}_i)}{\partial t} + \mathbf{U}_i \frac{\partial(\rho \mathbf{U}_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho \mathbf{g}_i + S_{i,s} \quad (12)$$

La ecuación anterior sólo se utiliza en las celdas en las cuales el indicador de fase es diferente de cero o uno, en las demás se utiliza una ecuación de balance de momentos para una sola fase, cuyas propiedades se calculan promediando ponderadamente aquellas que componen la mezcla de fluido como indica la Ecuación 13.

$$\phi_i(x) = \sum \alpha_k \phi_{fk} \quad (13)$$

Siendo ϕ_i la propiedad de estudio y ϕ_{fk} la misma propiedad en la fase k .

Como se ha dicho anteriormente, se deben considerar los efectos de las fuerzas de tensión interfacial, para esto se calcula un vector normal n , dado por la el gradiente de la fracción de volumen:

$$n_i = \frac{\partial \alpha / \partial x_i}{|\sum_j \partial \alpha / \partial x_j|} \quad (14)$$

Luego, se calcula el término de tensión superficial de la siguiente manera:

$$S_{i,s} = \frac{\sigma_i \rho k n_i \Gamma}{\frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)} \quad (15)$$

Siendo Γ la función indicadora de interface y k la curvatura de la interface, calculadas con las ecuaciones (16) y (17) respectivamente.

$$\Gamma = \left| \sum_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} \right| \tag{16}$$

$$k = -\frac{\partial n_i}{\partial x_i} \tag{17}$$

Se puede explicar este modelo observando la Figura 11, en la figura (a) se puede ver la superficie real, en la (b) se encuentra la fracción volumétrica calculada por el modelo y en la (c) está la reconstrucción que se hace al aplicar los efectos de tensión superficial.

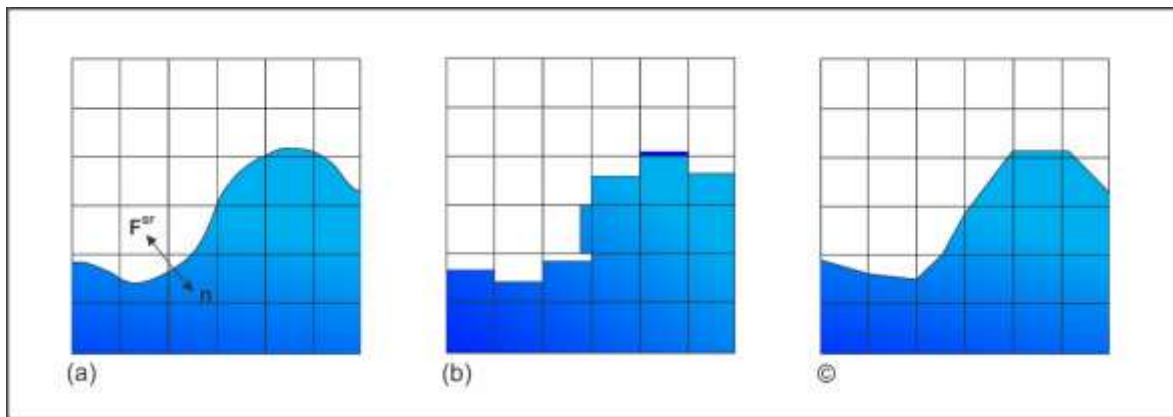


Figura 11. Descripción del modelo de Volumen de Fluido.

Adaptado de (Andersson, Andersson, Hakansson, Mortensen, Sudiyo, & Wachem, 2012).

3.2. Modelos de turbulencia usados en dinámica computacional de fluidos

La mayoría de los fluidos encontrados en la ingeniería se pueden volver inestables a ciertas velocidades, donde las variables de flujo muestran una variación aleatoria y caótica en el tiempo y el espacio tal como se puede ver en la Figura 12, donde la velocidad tiene una componente

estable U y una componente fluctuante $u'(t)$ y la velocidad total estaría dada por $u = U + u'(t)$, esto es llamado la descomposición de Reynolds.

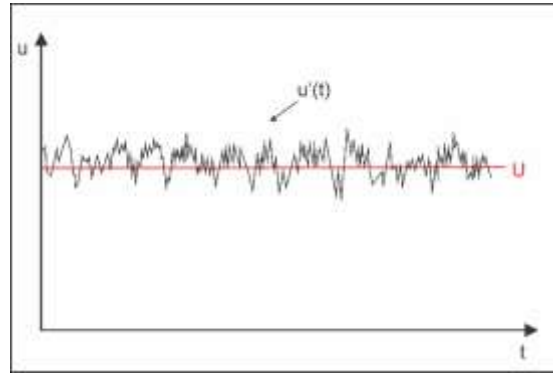


Figura 12. Variación típica de la velocidad en un flujo turbulento.

Adaptado de (Veersteg & Malalasekera, 2007).

La forma de predecir correctamente el comportamiento de la parte fluctuante de las variables relacionadas con el flujo ha sido uno de los grandes temas de estudio en la mecánica de fluidos, empezando en el siglo XIX con la publicación de O. Reynolds (**1895**), mostrando sus resultados relacionado con la formación de pequeños vórtices cuando la velocidad del fluido aumentaba, los llamados *eddies*, y en su búsqueda de medir el momento en el que empezaban a formarse estos determinó el hoy muy famoso número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho D U_m}{\mu} \quad (18)$$

Relacionando así las fuerzas viscosas con las fuerzas inerciales de un fluido incompresible. Además, en la misma publicación desarrolló una de las metodologías más utilizadas actualmente

en el modelado de flujo turbulento, el llamado método de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS, Reynolds-averaged Navier-Stokes).

En los años siguientes se buscó una manera de acercarse al resultado que muestra el solucionar las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando el método DNS, ya que el resultado de Reynolds sólo daba un promedio, entonces importantes avances se hicieron como la formulación de una longitud de mezcla, una longitud en la cual se va haciendo la transición de las propiedades que tiene un elemento fluido hasta un punto donde este obtiene las propiedades del medio circundante, y a partir de esta calcular la *viscosidad de eddy*, un término incluido para calcular la transferencia de momentum que existe en estos pequeños vórtices al fluido (Beckwith & Bushell, 1968).

Para mejorar el modelo, Prandtl (1945) postuló un modelo en el cual se calculaba la viscosidad de Eddy dependía de la energía cinética de las fluctuaciones turbulentas, referida como k , tomado como base de dos de los métodos más utilizados en este campo: $k - \epsilon$ y $k - \omega$.

El último de los enfoques importantes dentro de los modelos de turbulencia llegó a mitad del siglo pasado y es el llamado LES (Large Eddy Simulation), un método que aplica un filtro con el fin de seleccionar cuales son los *eddies* que pueden llegar a influir mayormente en el resultado de la simulación y aplicar estos un método DNS y, el resto de las perturbaciones se modelan utilizando el método RANS,

Con el fin de que el lector pueda entender de una mejor manera el funcionamiento de estos algoritmos, se detallará brevemente cada uno de ellos a continuación.

3.2.1. Modelo RANS. En la industria generalmente no se necesita información detallada de la componente fluctuante de una variable, ya que se trabaja constantemente con propiedades promedio (i.e. velocidad promedio, presión promedio, temperatura promedio, etc.), por tanto, este modelo se vuelve ampliamente apetecible en aplicaciones prácticas, y se basa en el uso de las fluctuaciones de las variables tomado en un tiempo promedio, definido por:

$$\overline{(\phi)'} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \phi'(t) dt \quad (19)$$

Al sustituir las variables asociadas al flujo (i.e. presión y velocidad en todas las direcciones) en su forma descompuesta dentro de las ecuaciones de continuidad (1) y Navier-Stokes (2) y tomando la componente fluctuante en su tiempo promedio, se pueden escribir un set de ecuaciones que definen el método RANS:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}}) = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}}_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}}_i \bar{\mathbf{u}}_i) = \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nabla \cdot [\mu \nabla (\bar{\mathbf{u}}_i)] + \frac{\partial (-\bar{\rho} \mathbf{u}'_i \mathbf{u}'_j)}{\partial x_j} + S_{Mi} \quad (21)$$

Definiendo a partir de lo anterior una serie de esfuerzos que conformarían el tensor de estrés de Reynolds:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho \mathbf{u}'_i \mathbf{u}'_j} \quad (22)$$

Para poder solucionar estas ecuaciones se necesitan de otros modelos que permitan resolver el tensor de esfuerzos de Reynolds, por lo que una serie de modelos se han desarrollado a través del tiempo, y, estos se pueden clasificar según la cantidad de ecuaciones que llevan para completar el modelo RANS. Véase Tabla 2

Tabla 2.
Modelos que complementan el método RANS clasificados por la cantidad de ecuaciones que agregan.

Número de ecuaciones extras	Nombre del modelo
Cero	Modelo de longitud mixta
Uno	Modelo de Spalart-Allmaras
	Modelo $k - \epsilon$
Dos	Modelo $k - \omega$
	Modelo de esfuerzos algebraicos
Siete	Modelo de esfuerzos de Reynolds

Adaptado de (Veersteg & Malalasekera, 2007).

3.2.2. Modelo $k - \epsilon$. En el año 1872 Boussinesq propuso en una reunión de la Academia de Ciencia Francesa que el tensor de esfuerzos de Reynolds debe ser proporcional a la razón de deformación total que sufre un elemento fluido por la turbulencia (Schmitt, 2007), representando esto según la siguiente ecuación:

$$\tau_{ij} = \mu_i \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \tag{23}$$

Donde δ_{ij} representa el delta de Kronecker, que toma el valor de uno (1) si $i = j$ y, toma el valor de cero (0) si $i \neq j$, mientras que k es la energía cinética turbulenta por unidad de masa y es calculado como:

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (24)$$

Siendo u , v y w las velocidades en la dirección x , y y z , respectivamente, mientras que estas se encuentran expresadas en forma de la varianza de su fluctuación en el tiempo definida por:

$$\overline{(\phi)'^2} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} (\phi'^2) dt \quad (25)$$

En la década de 1960 diferentes intentos se llevaron a cabo con el fin de analizar cómo se comportaba la energía cinética turbulenta y la manera en la que esta era transportada a través del flujo, hasta que se introdujo el modelo $k - \epsilon$ como una forma de relacionar la energía cinética turbulenta (k) con su fluctuación o rata de disipación (ϵ), dando así el primer modelo de dos ecuaciones para completar la ecuación (21) y uno de los modelos más utilizados hoy en día. La forma actual de este sistema de ecuaciones es (Wilcox, 2006):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right] + 2\mu_i S_{ij} \otimes S_{ij} - \rho \epsilon \quad (26)$$

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\epsilon\mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \nabla\epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_i S_{ij} \otimes S_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (27)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (28)$$

Donde μ_t es la viscosidad en el eddie, S_{ij} es la componente estable del tensor de esfuerzos que deforman el fluido, tal que $s_{ij}(t) = S_{ij} + s'_{ij}$, \otimes el producto tensorial y, los demás términos representan una serie de constantes cuyo valor se encuentra en la Tabla 3.

Tabla 3.

Valor de constantes encontradas en las ecuaciones (26) - (28).

Constante	Valor
C_μ	0.09
σ_k	1.00
σ_ϵ	1.30
$C_{1\epsilon}$	1.44
$C_{2\epsilon}$	1.92

3.2.3. Modelo $k - \omega$ Es un modelo muy similar al modelo $k - \epsilon$, la diferencia se encuentra en que este desarrolla sus ecuaciones utilizando como segunda variable un parámetro llamado razón de disipación específica (ω) definido como:

$$\omega = \frac{\epsilon}{k} \quad (29)$$

A partir de este se determina un sistema de ecuaciones combinados, representando una ecuación de transporte (30) y una ecuación de producción de energía cinética turbulenta (31) como sigue a continuación, definiendo a su vez una serie de constantes presentadas en la Tabla 4:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \omega \mathbf{U}) \\ = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_w} \right) \nabla \omega \right] + \gamma_i \left(2\rho S_{ij} \otimes S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_1 \rho \omega^2 \end{aligned} \quad (31)$$

$$P_k = \left(2\mu_t S_{ij} \otimes S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \quad (32)$$

Este modelo presenta una no linealidad mayor al modelo $k - \epsilon$, presentando así un mayor tiempo de cómputo y una estabilidad menor, aun así, puede ser utilizado como método alternativo en aquellas simulaciones en las que $k - \epsilon$ falla.

Tabla 4.

Valor de constantes encontradas en las ecuaciones (30) – (32).

Constante	Valor
γ_i	0.553
σ_k	2.00
σ_w	2.00
β_1	0.075
β^*	0.09

3.2.4. Modelo LES. Paralelo al desarrollo de los modelos descritos anteriormente, se trabajó en un modelo que permitiese predecir con mayor precisión el comportamiento de los eddies más amplios, al ser estos los que mayor aporte tienen en la fluctuación de la energía cinética turbulenta, entonces nació el modelo Large-Eddy Simulation (LES), muy poco utilizado anteriormente, pero con el crecimiento exponencial de los actuales procesadores, este se ha incorporado a la lista de los modelos más utilizados.

Este modelo se enfoca en aplicar un filtro paso bajo a las variables de flujo, y sobre éstas solucionar las ecuaciones de Navier-Stokes de manera directa, esto es llamado “filtrado explícito”. La Figura 13 ilustra la diferencia entre la velocidad filtrada (\bar{u}_i) y la velocidad instantánea.

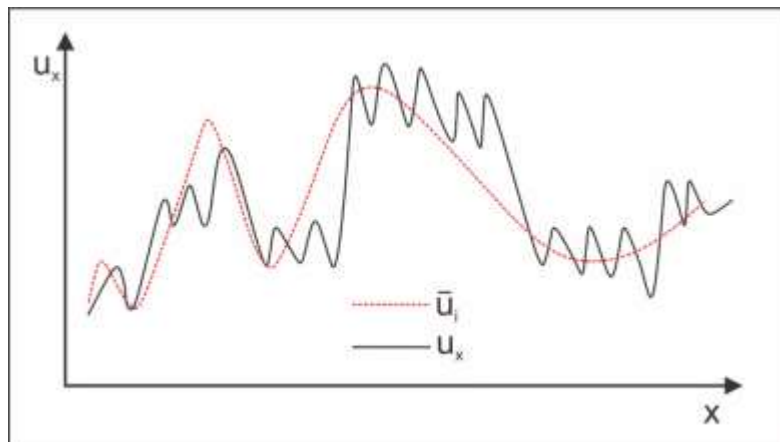


Figura 13. Diferencia entre la velocidad filtrada y la velocidad instantánea.

Adaptado de (Zhiyin, 2014).

Para poder aplicar el modelo primero se necesita aplicar una *función de filtrado* $G(x, x', \Delta)$, definida como:

$$\bar{\phi}(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, x', \Delta) \phi(x', t) dx'_1 dx'_2 dx'_3 \quad (33)$$

Donde se define $\bar{\phi}$ como la función filtrada, ϕ la función original y Δ es el corte del filtro. Como se puede observar, en el desarrollo se utiliza la barra superior sobre algunas variables, tal como en los modelos anteriores, en este caso esta notación muestra las variables filtradas.

Generalmente para utilizar el modelo LES en tres dimensiones se utiliza una forma de la función de filtrado tipo caja, expuesta como:

$$G(x, x', \Delta) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta^3} & |x - x'| \leq \frac{\Delta}{2} \\ 0 & |x - x'| > \frac{\Delta}{2} \end{cases} \quad (34)$$

Para poder definir el corte del filtro para una modelo tridimensional con celdas de longitud Δx , ancho Δy y altura Δz , se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad (35)$$

Finalmente se aplican las ecuaciones de conservación de masa y momentum para las variables filtradas, que en caso de un fluido incompresible y newtoniano toman la siguiente forma:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (36)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_i\bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial\bar{P}}{\partial x_i} + \frac{2\partial(\mu\bar{S}_{ij})}{\partial x_j} - \frac{\partial(\tau_{ij})}{\partial x_j} \quad (37)$$

3.3. Modelos de cavitación encontrados en la literatura

La cavitación es un fenómeno complejo y su modelado supone un reto para procesos que incluyen turbomáquinas, donde es causal de daños erosivos en los equipos, ruidos excesivos, vibraciones, alteraciones en el rendimiento, entre otros. Además, hoy en día su uso se ha extendido hacia otros campos como la medicina (Brennen, 2015) y el tratamiento de aguas residuales (Dular, y otros, 2016), por tanto, muchos modelos se han propuesto para predecir el comportamiento de las variables de flujo mientras ocurre este fenómeno, iniciando por el trabajo hecho por Lord Rayleigh en 1917, derivando una expresión para la dinámica de burbujas utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes para una burbuja de simetría esférica, añadiéndose los efectos de viscosidad y de tensión superficial en el año 1949, obteniendo finalmente la ecuación de Rayleigh-Plesset (Prosperetti, 1998):

$$\frac{P_b(t) - P_\infty(t)}{\rho_l} = \mathfrak{R}_b \frac{d^2\mathfrak{R}_b}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{d\mathfrak{R}_b}{dt} \right)^2 + \frac{4\nu_L}{\mathfrak{R}_b} \frac{d\mathfrak{R}_b}{dt} + \frac{2\sigma}{\rho_l\mathfrak{R}_b} \quad (38)$$

Siendo \mathfrak{R}_b el radio de la burbuja, σ la tensión superficial, ν_L la viscosidad cinemática del líquido, P_b la presión en la superficie de la burbuja y P_∞ la presión del fluido. Esta ecuación es fundamental en el estudio de la cavitación y supone el principio para la deducción de aquellos modelos basados en el transporte de propiedades.

Por otro lado, también se han desarrollado modelos basados en el cambio en las propiedades características del fluido, estos son muy sencillos, tienen una alta estabilidad y convergen en pocas iteraciones, estos modelos son llamados barotrópicos y tienen una alta acogida en situaciones donde no se necesita tanto detalle del sistema o se tiene un fluido altamente compresible y se requiere el cambio en sus propiedades a medida que cavita (Rapposelli & d'Agostino, 2003).

Finalmente, está el modelo de transporte de la interfase, método muy parecido en teoría al modelo de volumen de fluido (VOF), explicado anteriormente, con algunas modificaciones.

3.3.1. Modelo de transporte de la interfase. Este modelo se enfoca en dar solución a las ecuaciones en el dominio del líquido, añadiendo una descripción de la frontera de la superficie de cavitación (Chen & Heister, 1994), y se utiliza en conjunto con modelos de flujo multifásico en cuya formulación se maneje esta interfase como lo es el VOF.

Actualmente no es un modelo muy utilizado, al llevar un alto costo computacional, pero se puede tener como opción cuando se requiere modelar el comportamiento de una única burbuja con respecto a su medio circundante.

3.3.2. Modelos barotrópicos. Distintos modelos barotrópicos se han desarrollado con el tiempo, pero todos se fundamentan predecir la forma que tiene el gráfico de la densidad del fluido al existir la transición entre el líquido y el gas liberado durante la cavitación, descrita en la Figura 14, controlando la forma de la curva con la siguiente condición (Meijn, 2015):

$$\left. \frac{d\rho}{dP} \right|_{P_{sat}} = \frac{1}{c_{min}^2} \quad (39)$$

Entre los modelos barotrópicos más utilizados se encuentra el desarrollado por Delannoy (1990), utilizando un cuarto del periodo de la función seno para predecir la transición llegando finalmente a la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{\rho_l + \rho_v}{2} + \frac{\rho_l - \rho_v}{2} \cdot \sin\left(\frac{P - P_{sat}}{c_{min}^2} \cdot \frac{2}{\rho_l - \rho_v}\right) \quad (40)$$

Luego, utilizando la función tangente hiperbólica y una deducción similar a la anterior, Koop (2008) llegó a al siguiente modelo:

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\frac{\rho_l + \rho_v}{2} + \frac{\rho_l - \rho_v}{2} \cdot \tanh\left(\frac{C_p - \sigma}{\rho_l - \rho_v} \cdot \frac{U^2}{a^2}\right) \right] \quad (41)$$

$$a^2 = \frac{\left(\frac{dP}{d\rho}\right)_{min}}{\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v}} \quad (42)$$

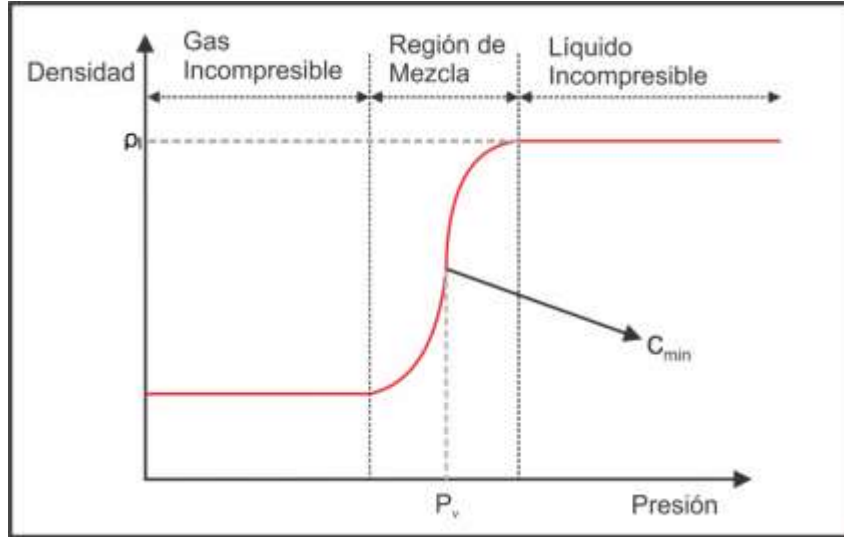


Figura 14. Esquema típico de los modelos barotrópicos.

Adaptado de (Claramunt & Hirsch, 2013)

3.3.3. Modelo de Singhal, y otros (Singhal, Mahesh, Li, & Jiang, 2002). También es conocido como el *modelo completo de cavitación* al tener en cuenta todos los efectos de primer orden que ocurren durante esta (i.e. cambio de fase, dinámica de la burbuja, fluctuaciones en la presión debido a la turbulencia y gases no condensables), además de poder extenderse a un flujo de N-fases, incluyendo transporte de especies y efectos térmicos en cada una de las fases, pudiendo así acoplarse al modelo de mezcla para flujo multifásico.

La deducción de este modelo se basa en el cálculo de la razón neta de cambio de fase, llegando finalmente al siguiente set de ecuaciones:

$$\frac{\partial(f_v \rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (f_v \rho \mathbf{V}_v) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla f_v) + R_e - R_c \tag{43}$$

$$R_e = F_{vap} \frac{\max(1.0, \sqrt{k}) (1 - f_v - f_g)}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2 P_v - P}{3 \rho_l}} \quad (44)$$

$$R_c = F_{cond} \frac{\max(1.0, \sqrt{k}) f_v}{\sigma} \rho_l \rho_l \sqrt{\frac{2 P - P_v}{3 \rho_l}} \quad (45)$$

Siendo f_v la fracción másica de vapor, f_g la fracción de gases no condensables, Γ el coeficiente de difusión, k la energía cinética, V_v la velocidad del vapor, R_e y R_c representan términos asociados a la transferencia de masa producida por el crecimiento y el colapso de la burbuja, respectivamente. Finalmente $F_{vap} = 0.02$ y $F_{cond} = 0.01$, son las constantes que complementan el modelo.

Al ser un modelo tan complejo se presenta un gran tiempo de cómputo y una menor estabilidad con respecto a otros modelos, además, incluye cierta incompatibilidad con otros modelos, como es el caso del modelo Euler – Euler para el flujo multifásico o el modelo LES para turbulencia, limitando así su uso.

3.3.4 Modelo de Zwart & Gerbert (Zwart, Gerber, & Belamri, 2004). Se presenta como una modificación al *modelo de Singhal, Mahesh, Li & Yang*, asumiendo que todas las burbujas dentro del sistema tienen el mismo tamaño e introduciendo un término relacionado con la fracción volumétrica de vapor en el sitio de nucleación (α_{nuc}), completando la ecuación (43) con los siguientes términos de intercambio de masa:

$$R_e = F_{vap} \frac{3\alpha_{nuc}(1 - \alpha_v)\rho_v}{\mathfrak{R}_b} \sqrt{\frac{2P_v - P}{3\rho_l}} \quad (46)$$

$$R_c = F_{cond} \frac{3\alpha_v\rho_v}{\mathfrak{R}_b} \sqrt{\frac{2P - P_v}{3\rho_l}} \quad (47)$$

Donde α_v representa la fracción volumétrica de vapor, \mathfrak{R}_b el radio de la burbuja, que para fines prácticos se toma como 10^{-6} [m], α_{nuc} se determinó como 0.0005 y las constantes F_{vap} y F_{cond} toman los valores de 50 y 0.01, respectivamente.

3.3.5 Modelo de Schnerr & Sauer (Schnerr & Sauer, 2001). Es posiblemente el modelo más utilizado hoy en día para investigar los efectos de cavitación en turbomáquinas y otros equipos, beneficiándose de su estabilidad y rápida convergencia (Zhu, Chen, Zhao, & Zhang, 2015).

Sigue un enfoque parecido a los dos modelos anteriores, pero a su vez deriva una expresión que relaciona la fracción volumétrica de vapor con el número de burbujas por unidad de volumen de líquido (n_b):

$$\alpha = \frac{n_b \frac{4}{3} \pi \mathfrak{R}_b^3}{1 + n_b \frac{4}{3} \pi \mathfrak{R}_b^3} \quad (48)$$

Para poder completar finalmente la ecuación (43), los autores llegaron a las siguientes expresiones:

$$R_e = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{\Re_b} \sqrt{\frac{2 P_v - P}{3 \rho_l}} \quad (49)$$

$$R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{\Re_b} \sqrt{\frac{2 P - P_v}{3 \rho_l}} \quad (50)$$

3.4. Discretización y solución del sistema de ecuaciones.

La gran mayoría de los modelos utilizados en la dinámica computacional de fluidos requieren de la solución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de alta no linealidad, siendo de suma importancia la implementación de un método numérico que permita encontrar la solución discreta de estas, convirtiendo una ecuación diferencial en derivadas parciales en un conjunto de ecuaciones lineales que luego podrán ser solucionadas con un sencillo método numérico.

Entre los métodos numéricos más utilizados para la solución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales se encuentran:

- **Método de diferencias finitas (FDM):** Basado en el desarrollo de series de Taylor y su truncamiento en el segundo o tercer término, es en general el método más utilizado para la solución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales y sirve de base para el resto de métodos desarrollados. Tiene una rápida convergencia y estabilidad, pero presenta como limitante una elevada complejidad cuando se trabaja con mallas no estructuradas (Chung, 2010).

- **Método de elementos finitos (FEM):** En este se aproxima la variable de la ecuación diferencial como una combinación lineal de funciones de prueba (i.e. interpolación, ecuación de forma o ecuación de base), conocida también como función de peso (Logan, 2012). Es muy utilizado en el campo del cálculo estructural, ya que físicamente la forma de las ecuaciones se puede relacionar con las empleadas para esfuerzos y desplazamientos.
- **Método de volúmenes finitos (FVM):** Se fundamenta en aproximar la variable original de la ecuación diferencial a una variable promedio para cada volumen de control en el cuál se ha dividido el dominio del fluido, y a partir de esta calcular el flujo entre cada celda. Es el método más utilizado en el área de dinámica computacional de fluidos al introducir dentro de sus ecuaciones el concepto de conservación de las variables implícitamente.

Cada uno de los métodos anteriores presentan de forma general, la misma serie de pasos con el fin de llegar a sus resultados, y estos son:

1. Preparación de la geometría: Se define el dominio del fluido sobre el cual se van a solucionar las ecuaciones que gobiernan el fenómeno, generalmente se utilizan geometrías diseñadas por software CAD (i.e. Solidworks®, AutoCAD®, Inventor®, etc.), además de que estas deben ser limpiadas y simplificadas con el fin de generar mejores mallas y evitar errores en los cálculos.

2. Creación de la malla (Enmallado): Para la solución de las ecuaciones se necesita la división del dominio computacional en subdominios sobre los cuales se van a hacer las

aproximaciones, dependiendo del método de discretización seleccionado, estos pueden ser puntos (FDM), elementos (FEM) o volúmenes de control (FVM).

3. Definición de la física y configuración del solver: Es importante determinar los modelos que describen el fenómeno de estudio (i.e. flujo multifásico, transferencia de energía, turbulencia, transporte de fase discreta, etc.), además de la inclusión de las condiciones iniciales y de frontera que darán unicidad a la solución de las ecuaciones, y la elección de la forma en la cual se quiere aplicar el método de discretización (i.e. tratamiento del tiempo, orden de solución, etc.).

4. Solución del sistema de ecuaciones: Luego de aplicado el método de discretización, se tienen que resolver el sistema de ecuaciones lineales resultado de este, para lo cual diversos métodos numéricos se han propuesto a través del tiempo, pero el más empleado actualmente es el algoritmo de Gauss-Seidel.

5. Verificación y validación de los resultados: Finalmente, se procede al análisis de los resultados, convergencia y estabilidad del método aplicado, además, todo modelo debe ser validado con información producto de experimentos reales, esto con el fin de buscar errores que puedan retroalimentar el modelo posteriormente,

Algunos de estos pasos se explicarán brevemente a continuación, aplicado al método de volúmenes finitos.

3.4.1. Enmallado. Ya que este trabajo se enfoca en el uso del método de volúmenes finitos, se requerirá de la división del dominio en volúmenes de control, entonces, se habla de la creación de una malla, definiendo esta como espacios encerrados por líneas. También es común referirse a esta con la palabra *grilla*, haciendo referencia a la palabra inglesa *grid*, tomando esta como un conjunto de líneas y nodos interconectados.

Generalmente se habla de dos tipos de mallas: estructuradas y no estructuradas, las primeras se definen como mallas en las cuales las celdas están siempre organizadas generalmente utilizando los subíndices *i, j* y *k* en cualquier sistema de coordenadas, en el caso de tener un sistema de coordenadas cartesiano, estos harían referencia a su ubicación en los ejes *x, y, z*, respectivamente. Si se utiliza un sistema de coordenadas curvilíneas generalizado, se puede utilizar una interpretación similar en las direcciones ξ_1, ξ_2 y ξ_3 , tal como muestra la Figura 15

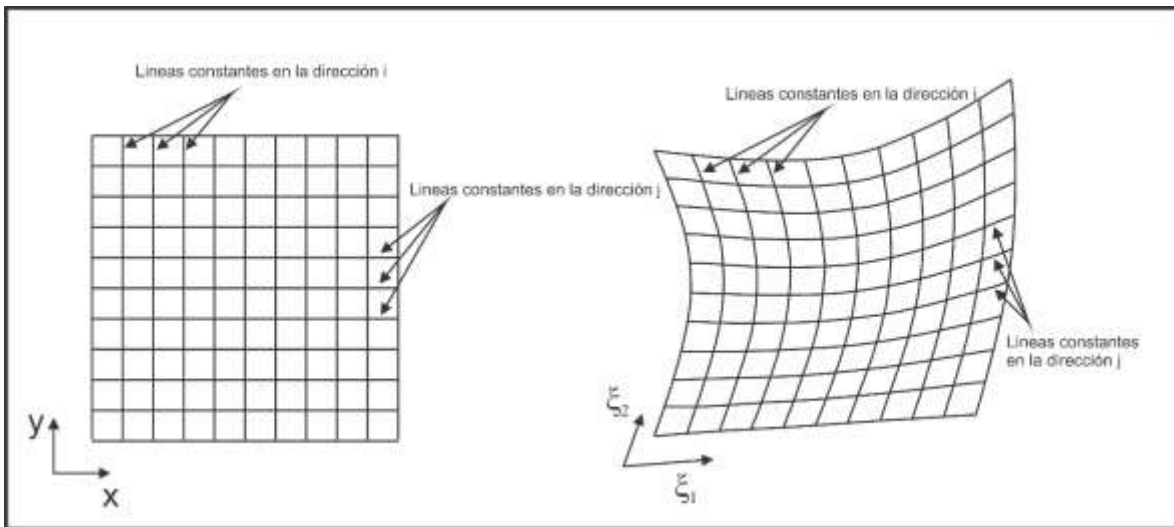


Figura 15. Mallas estructuradas en 2D, a la izquierda coordenadas cartesianas y a la derecha coordenadas curvilíneas.

Adaptado de (Mazumder, 2015).

A pesar de poseer algoritmos más eficientes, las mallas estructuradas suponen un problema al necesitar intervención humana para su generación en geometrías muy complejas, teniéndose que indicar los lados opuestos a partir de los cuales se va a generar esta.

Luego, se encuentran las mallas no estructuradas, en las cuales los elementos no tienen un orden específico, por lo tanto el dominio se puede rellenar con una combinación de polígonos de cualquier forma y tamaño, lo que las hace una forma atractiva para casos en los cuales se desea hacer refinamiento local o generar una malla más gruesa automáticamente, aun así, al no tener un orden de los elementos, no se hace obvia la posición de este, información que debe ser generada explícitamente por el programa que se esté utilizando, consumiendo más tiempo de computo en su generación.

3.4.2. Método de volúmenes finitos aplicado a mallas estructuradas. Como se ha dicho anteriormente, el método de volúmenes finitos es por mucho, el método de discretización más utilizado en el campo de la dinámica computacional de fluidos, teniendo en su formulación una filosofía totalmente diferente a los otros métodos, respetando las leyes de conservación implícitamente.

Distintas formas de deducción del método se han llevado a cabo, en este caso se partirá de forma práctica utilizando el esquema de solución para la Ecuación número 51

$$\frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) = -S_{\phi} \quad (51)$$

Siendo esta una ecuación típica de transporte difusivo, donde Γ representa un coeficiente que es función de las variables dependientes en la ecuación. Esta ecuación se resolverá sobre un dominio de longitud L , dividido en N_c volúmenes de control, y tomando de base la celda O , con su centro en i , además se definen la celda anterior con la letra W y una cara w , de la misma manera, se tiene la celda E con su cara e , tal como indica la Figura 16.

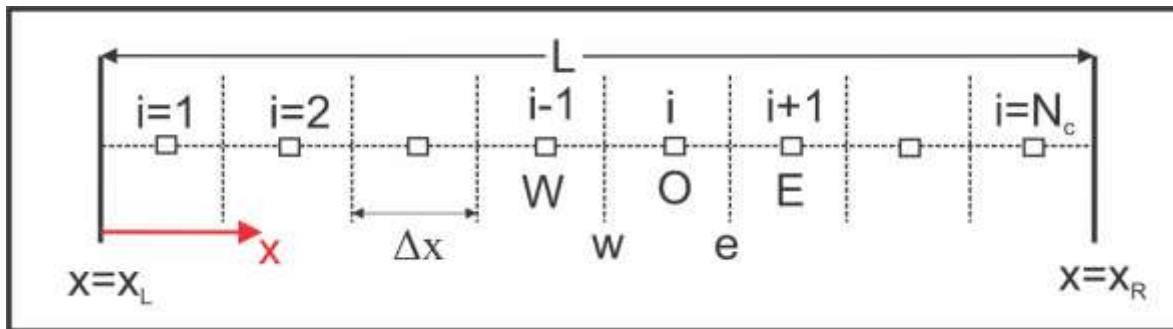


Figura 16. Esquema representativo de la malla para la solución de la ecuación (51). Modificado de (Mazumder, 2015).

Siguiendo con el procedimiento, se deben definir el valor promedio volumétrico de una variable y el flujo de esta:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{V_o} \int \phi \, dv \tag{52}$$

$$J = -\Gamma \frac{d\phi}{dx} \tag{53}$$

Luego, integrando la Ecuación 51 en el volumen de la celda i a ambos lados, se tiene que:

$$\int_w^e \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) dx = - \int_w^e S_\phi dx \quad (54)$$

$$\left[\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right]_{e,i} - \left[\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right]_{w,i} = -S_i \Delta x_i \quad (55)$$

Siendo e, i y w, i la cara izquierda y derecha de la celda, respectivamente, y S_i representa el valor promedio de S_ϕ en el volumen de control. Reemplazando la Ecuación 53 en la Ecuación 55 se tiene que:

$$J_{e,i} - J_{w,i} = S_i \Delta x_i \quad (56)$$

La Ecuación 56 representa una ecuación de conservación, describiendo que la acumulación de la variable ϕ es igual a la diferencia entre los flujos de entrada y salida de estos en el volumen de control. Si se aplica para todas las celdas del dominio se tiene el siguiente sistema:

$$\begin{aligned} J_{e,1} - J_{w,1} &= S_1 \Delta x_1 \\ J_{e,2} - J_{w,2} &= S_2 \Delta x_2 \\ &\vdots \\ J_{e,N_C} - J_{w,N_C} &= S_{N_C} \Delta x_{N_C} \end{aligned} \quad (57)$$

Ya que se habla dentro del flujo a través de volúmenes de control colocados uno tras otro, este debe ser continuo, de tal manera que se cumpla que $J_{e,i} = J_{w,i+1}$ para todo $i = 1, 2, \dots, N_C - 1$, aplicando esto a la Ecuación 57 se obtiene:

$$J_{e,Nc} - J_{w,1} = S_1 \Delta x_1 + S_2 \Delta x_2 + \dots + S_{Nc} \Delta x_{Nc} = \int_{x_L}^{x_R} S dx \quad (58)$$

Mostrando así la ventaja de aplicar este método sobre ecuaciones de conservación, convirtiéndolo en el mejor método para problemas de fluidodinámica. Luego de esto, aplicando sobre la Ecuación 55 un esquema de diferencias finitas centradas se puede escribir:

$$\Gamma_{ei} \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{\Delta x} - \Gamma_{wi} \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{\Delta x} = -S_i \Delta x \quad (59)$$

Al ser Γ_{ei} una propiedad de la cara de la celda y no de su centro, generalmente se calcula por interpolación:

$$\Gamma_{ei} = \frac{\Gamma_i + \Gamma_{i+1}}{2} \quad (60)$$

$$\Gamma_{wi} = \frac{\Gamma_i + \Gamma_{i-1}}{2} \quad (61)$$

Sustituyendo las Ecuaciones 60 y 61 en la Ecuación 59 y ordenando, finalmente se obtiene la ecuación discretizada:

$$\left(\frac{\Gamma_i + \Gamma_{i+1}}{2\Delta x} + \frac{\Gamma_i + \Gamma_{i-1}}{2\Delta x} \right) \phi_i - \left(\frac{\Gamma_i + \Gamma_{i+1}}{2\Delta x} \right) \phi_{i+1} - \left(\frac{\Gamma_i + \Gamma_{i-1}}{2\Delta x} \right) \phi_{i-1} = S_i \Delta x \quad (62)$$

4. Modelo termoquímico desarrollado para un reactor de cavitación hidrodinámica

A pesar que los modelos descritos en el capítulo anterior han sido aplicados en numerosos estudios y han demostrado ser una buena aproximación al fenómeno (Li W.-G. , 2014), pero al intentar aplicarse a un reactor de cavitación hidrodinámica estos modelos demuestran estar incompletos al no considerar la energía liberada por las burbujas y su posible transferencia, además del trabajo realizado por el gas en las paredes del sistema, ni las pérdidas de energía en forma de ondas de choque y radiación.

Aun así, se han realizado algunas simulaciones muy sencillas desde el punto de vista energético, la mayoría de ellas aplicadas a la predicción de zonas de erosión en bombas (Kulkarni, Kulkarni, & Salutagi, 2016), además de estudios aplicados a reactores de cavitación destinados al *upgrading* de crudos pesados, pero activados por acústica, modificando el campo de presiones en el fluido por ondas de ultrasonido (Niazi, Hashemabad, & Razi, 2014), sin embargo, en ningún estudio se han tenido en cuenta las interacciones químicas, por tanto, se hace necesario un modelo que no sólo permita entender de mejor manera los eventos asociados al fenómeno de cavitación, sino que también pudiese servir como una herramienta para el diseño y selección del equipo en aplicaciones industriales.

Partiendo de esto, se desarrolló un modelo termoquímico propio, basado en los resultados obtenidos por el modelado hidráulico y su asociación a un modelo termodinámico, que permite predecir la energía neta liberada en el proceso, y un modelo cinético-químico, determinando la

energía necesaria para la consecución final de la reacción a su máxima eficiencia, todo lo anterior asumiendo un proceso isotérmico.

4.1. Modelo termodinámico

Para poder entender el desarrollo de este modelo, primero se debe hacer un análisis de los resultados arrojados por el modelo hidráulico, y cuáles de estos datos se pueden utilizar para definir la energía total liberada en el proceso.

Se determinó que estas variables de salida necesarias para la construcción del modelo deben ser: i) campo de presiones, ii) fracción de vapor en cada celda, iii) cantidad, volumen y ubicación de cada celda creada durante la etapa de enmallado.

A partir se procedió a utilizar la utilizar las ecuaciones propuestas por la primera ley de la termodinámica para relacionar la transferencia de calor con la entalpía del sistema:

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta H \quad (63)$$

Para poder terminar la diferencia entalpías se empleó el esquema mostrado en la Figura 17, en el cual se tienen un reactor de cavitación hidrodinámica del que se han tomado dos

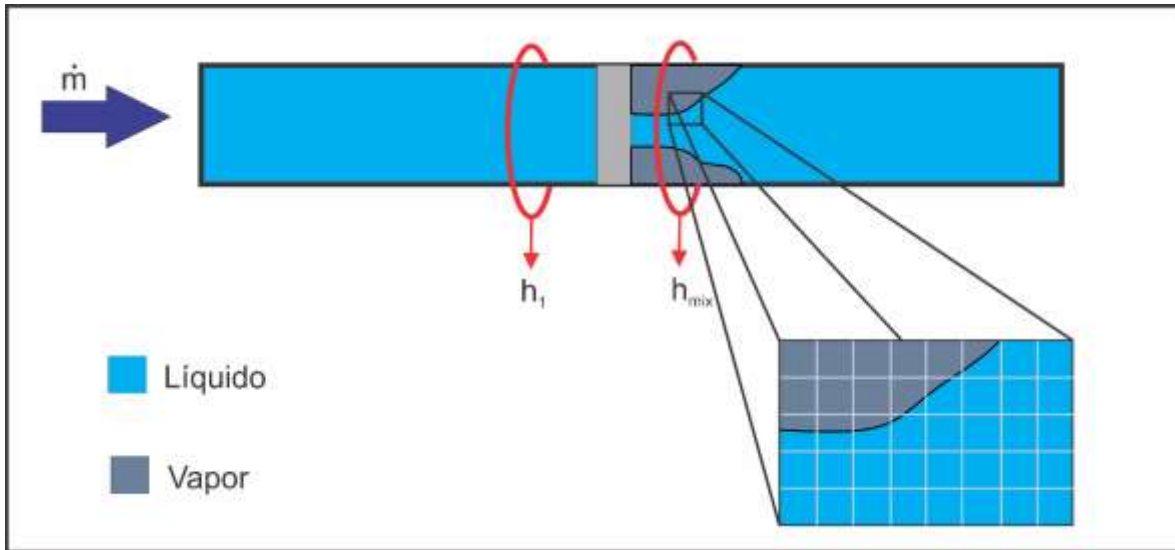


Figura 17. Esquema de un reactor de cavitación hidrodinámica utilizado para la deducción del modelo termodinámico.

Volúmenes de control, uno antes de la cavitación (h_1) y uno luego de ocurrida la cavitación (h_{mix}), luego la Ecuación 63 se transforma en:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_{mix} - h_1) \tag{64}$$

Continuando con el desarrollo, se define la entalpía de una mezcla como (Smith, Ness, & Abbott, 2005):

$$h_{mix} = h_f + x_f h_{fg} \tag{65}$$

Siendo h_f la entalpía específica del líquido, x_f la fracción másica de vapor y, h_{fg} el calor latente de vaporización. Dividendo el dominio fluido en celdas, se puede determinar el calor transferido como:

$$\begin{aligned} \dot{Q} = \rho_f \{ & \dot{V}_1 [h_f(P_1) - h_f(T_{ref}) + x_{f1} h_{fg}(P_1)] \\ & + \dot{V}_2 [h_f(P_2) - h_f(T_{ref}) + x_{f2} h_{fg}(P_2)] + \dots \} \end{aligned} \quad (66)$$

Finalmente, aplicando las definiciones de sumatorias e integrales se llega al modelo que define el calor total generado por cavitación en un reactor:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \rho_f \frac{\partial}{\partial t} \int \left\{ \sum_{i=1}^n [h_f(P_i) - h_f(T_{ref}) + x_{fi} h_{fg}(P_i)] \right\} dV \quad (67)$$

Donde n representa la cantidad de celdas en las cuales fue dividido todo el dominio de fluido y $h_f(T_{ref})$ es la entalpía del fluido a la temperatura de alimentación, para la determinación de las distintas entalpías se pueden utilizar algoritmos como los presentados por (Riazi, 2005), dependiendo de la información que se tenga acerca de la caracterización de este.

4.2. Modelo cinético-químico de craqueo térmico

Para la predicción del comportamiento cinético de las reacciones que suceden, se utiliza un modelo de tres lumps con reacciones de primer orden, tal como sugieren Rueda-Velásquez & Gray (2017).

El modelo de lumps incluye la formación de: i) nafta (con un punto de ebullición por debajo de los 177°C), ii) destilados (177-343°C), iii) gasóleo (343-524°C) y, además considera parte del crudo pesado que no reacciona (con un punto de ebullición >524°C), considerando una constante

cinética general y unos coeficientes estequiométricos a, b, c que se relaciona con la selectividad que tendrá la reacción para la formación de cada producto, tal como se puede observar en la Figura 18.

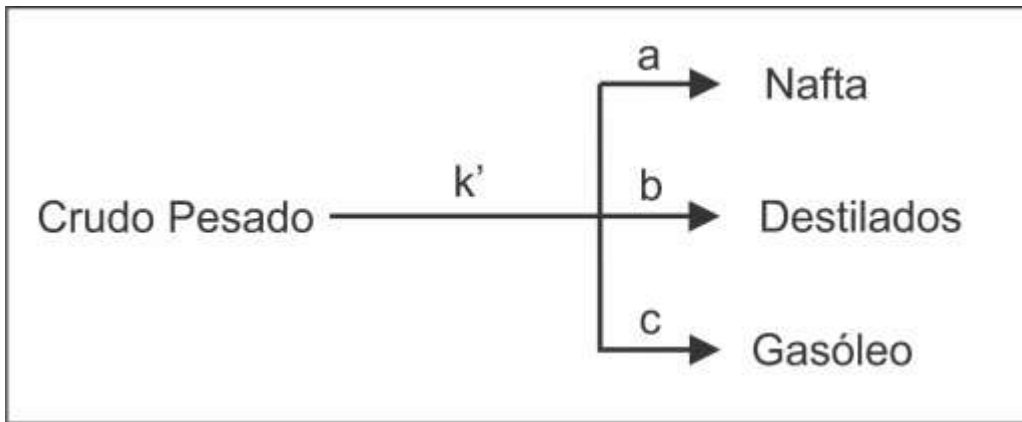


Figura 18. Representación esquemática del modelo cinético-químico.

Adaptado de (Rueda-Velásquez & Gray, 2017).

Las ecuaciones que representan este esquema son:

$$\frac{d(HO)}{dt} = -k' * HO \tag{68}$$

$$\frac{d(Nafta)}{dt} = a * k' * HO \tag{69}$$

$$\frac{d(Destilados)}{dt} = b * k' * HO \tag{70}$$

$$\frac{d(\text{Gasóleo})}{dt} = c * k' * HO \quad (71)$$

$$a + b + c = 1 \quad (72)$$

Luego de integrar las ecuaciones (56) - (59) nos da el sistema ecuaciones que finalmente se deben resolver:

$$HO = HO_0 * e^{-k't} \quad (73)$$

$$\text{Nafta} = \text{Nafta}_0 + a * HO_0 * e^{-k't} \quad (74)$$

$$\text{Destilados} = \text{Destilados}_0 + b * HO_0 * e^{-k't} \quad (75)$$

$$\text{Gasóleo} = \text{Gasóleo}_0 + c * HO_0 * e^{-k't} \quad (76)$$

Siendo HO la concentración de crudo pesado. Los datos necesarios para solucionar este sistema pueden ser obtenidos utilizando las curvas de destilación del crudo, específicamente con el método ASTM D6352 o ASTM D2887 dependiendo de los puntos de ebullición esperados, corriéndose cada uno a un tiempo de reacción indicado, a partir de estas podrá encontrar el valor de k' , a, b y c, primero extrapolando los puntos de ebullición experimentales para obtener la TBP (Curva de Puntos de Ebullición Verdaderos, por sus siglas en inglés) (Riazi, 2005):

$$T^* = \frac{T_b - T_0}{T_0} = \left[\frac{A}{B} \ln \left(\frac{1}{1 - x_c} \right) \right]^{1/B} \quad (77)$$

Siendo T^* el punto de ebullición de todo el material, T_0 es una temperatura de referencia por debajo de la mínima temperatura de ebullición de todas las fracciones, x_c es la fracción másica acumulada de la fracción con temperatura de ebullición T_b y, A y B son constantes que se deben encontrar desarrollando un caso de optimización, encontrando el mínimo de la diferencia cuadrática:

$$SSR = \sum_{i=1}^n (T_{bi,pred} - T_{bi,experimental})^2 \quad (78)$$

Para poder realizar el cálculo del calor consumido por la reacción, se procede a ejecutar un balance de energía para un sistema de una entrada y una salida con reacción única utilizando el método mostrado por (Reklaitis, 1986):

$$\frac{dQ}{dt} = r\Delta H_R(T^r) + \sum_{i=1}^S N_i(\bar{H}_i - H_i^r) - \sum_{j=1}^E N_j(\bar{H}_j - H_j^r) \quad (79)$$

Donde r representa la velocidad de reacción, ΔH_R el calor de reacción, \bar{H}_s la entalpía idea del fluido y, S y E son las corrientes de salida y entrada, respectivamente. Tomando el estado de entrada como condición referencia para el balance de energía, y asumiendo un proceso isotérmico se puede deducir:

$$\frac{dQ}{dt} = r\Delta H_R(T_{ref}) + \sum_s N_s^{sal} \int_{T_{ref}}^{T_{ref}} C_{ps}dT \quad (80)$$

$$r = \frac{-XN_{HO}^{ent}}{\sigma_{HO}} \quad (81)$$

Siendo X la conversión del crudo pesado, relacionado con el rendimiento de la reacción y σ_{HO} el coeficiente estequiométrico que posee el crudo pesado en el modelo cinético.

Sustituyendo la Ecuación 81 en la Ecuación 80 y, convirtiendo el flujo molar en flujo másico, la ecuación finalmente toma la forma:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{X}{M_{HO}} \rho_{HO} \dot{V}_{HO} \left[\Delta H_{RSC} + \sum_s \sigma_s \int_{T_s}^{T_{ref}} C_{ps}dT \right] \quad (82)$$

Definiendo M_{HO} como la masa molecular del crudo pesado, \dot{V}_{HO} el caudal de diseño y, ΔH_{RSC} la entalpía de la reacción a condiciones estándar que se puede calcular a partir de las entalpías de formación de los componentes de la reacción ($H_{f,s}^0$):

$$\Delta H_{RSC} = \sum_{s=1}^S \sigma_s H_{f,s}^0 \quad (83)$$

Para poder encontrar las entalpías de formación de cada componente se puede hacer uso del calor de combustión de cada fluido, de la siguiente manera (Raseev, 2003):

$$(\Delta H_f^0) = n(\Delta H_f^0)_{CO_2} + \frac{m}{2}(\Delta H_f^0)_{H_2O} - (\Delta H_a)_{C_nH_m} \tag{84}$$

Donde n y m representan el número de carbono e hidrógeno promedio existente en cada molécula de hidrocarburo, para tal caso se debe proveer de la composición elemental del fluido, mientras que el calor de combustión de cada fracción del fluido se puede obtener a partir de la Figura 19, empleando los valores de gravedad API y factor de caracterización (K_{UOP}).

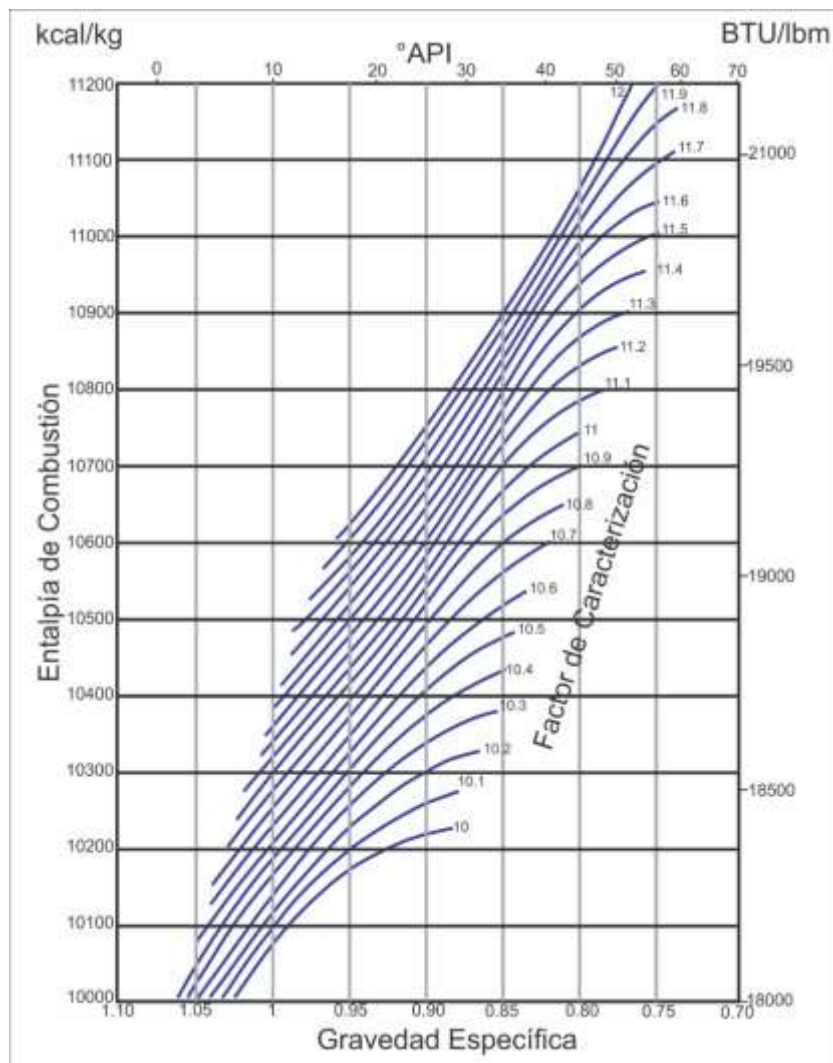


Figura 19. Gráfico para la determinación del calor de combustión a partir de la gravedad API. Modificado de (Raseev, 2003).

Por último, para el cálculo de la viscosidad a la salida del reactor, se procede a calcular la viscosidad de cada componente a partir de sus puntos de ebullición con la siguiente correlación (Mehrotra, 1991):

$$\log(\mu + 0.8) = 10^a * T^{-3.7} \quad (85)$$

$$a = 5.489 + 0.148 * (T_b)^{0.5} \quad (86)$$

Luego, se utiliza la ecuación de Andrade para el cálculo de la viscosidad total del fluido, ignorando la interacción binaria, para diferentes temperaturas:

$$\ln \mu = \sum_i x_i \ln \mu_i \quad (87)$$

5. Caso Aplicado

Con el fin de evaluar las capacidades de los modelos descritos anteriormente, se sometió a una prueba utilizando datos provenientes del campo La Esperanza, mismo en el cual se llevó a cabo una prueba piloto.

Para los cálculos relacionados a CFD, se utilizó el software ANSYS Fluent, mientras que en la predicción de las propiedades de comportamiento de fases del fluido se empleó el paquete ASPEN Hysys.

5.1. Caracterización del Fluido

Para proceder con la aplicación del modelo, se entregaron las pruebas de destilación bajo la norma ASTM D86 y una prueba de composición elemental para algunos de sus productos, estas se pueden ver en la Tabla 5, Tabla 6 y, Tabla 7, además de algunas características de la fase enlistadas en la Tabla 8.

Tabla 5.

Resultados de la prueba ASTM D86 para el fluido de estudio.

%Volumen	Temperatura °F
0.00	99.14
5.00	300.9
10.00	428.9
20.00	577.4
30.00	691.2
40.00	798.1
50.00	904.8
60.00	1033

Tabla 6.

Composición elemental del crudo.

Componente	%wt O	%wt H	%wt C	%wt S
Nafta	0	12.45	87.505	0.0045
Destilados	0.08	12.007	87.774	0.219
Gasóleo	5.19	10.962	88.318	0.720
Pesados	1.81	8.9432	88.313	2.744

Tabla 7.

Composición de la fracción liviana del crudo.

Componente	Fracción en peso*
C2	0.00026010
C3	0.00036414
i-C4	0.00109243
n-C4	0.00317325

**Fracción sobre el crudo total, determinados por cromatografía.*

Tabla 8.
Otras propiedades del fluido.

Propiedad	Valor
Gravedad API	12.8
Factor K (UOP)	11.43
Viscosidad @ 104 °F	2298 cSt
Viscosidad @122 °F	936.8 cSt

Partiendo de estas pruebas se inició la caracterización del fluido calculando la TBP (ver Figura 20), y la distribución de este (Figura 21).

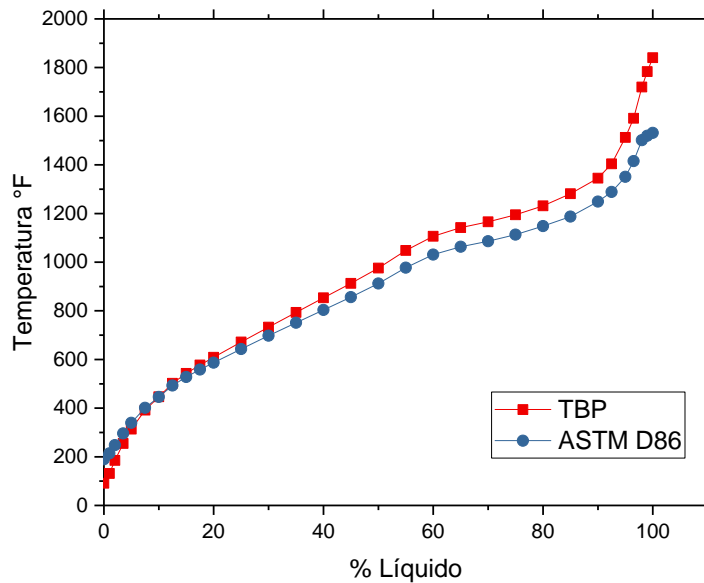


Figura 20. Curva TBP del fluido.

Se puede observar como el crudo presenta una viscosidad muy alta a condiciones estándar, necesitando la dilución de este con un alto porcentaje de nafta para que su transporte sea rentable, teniendo en cuenta la alta producción del campo, de aproximadamente 80,000 BPDC (Barriles Por Día Calendario).

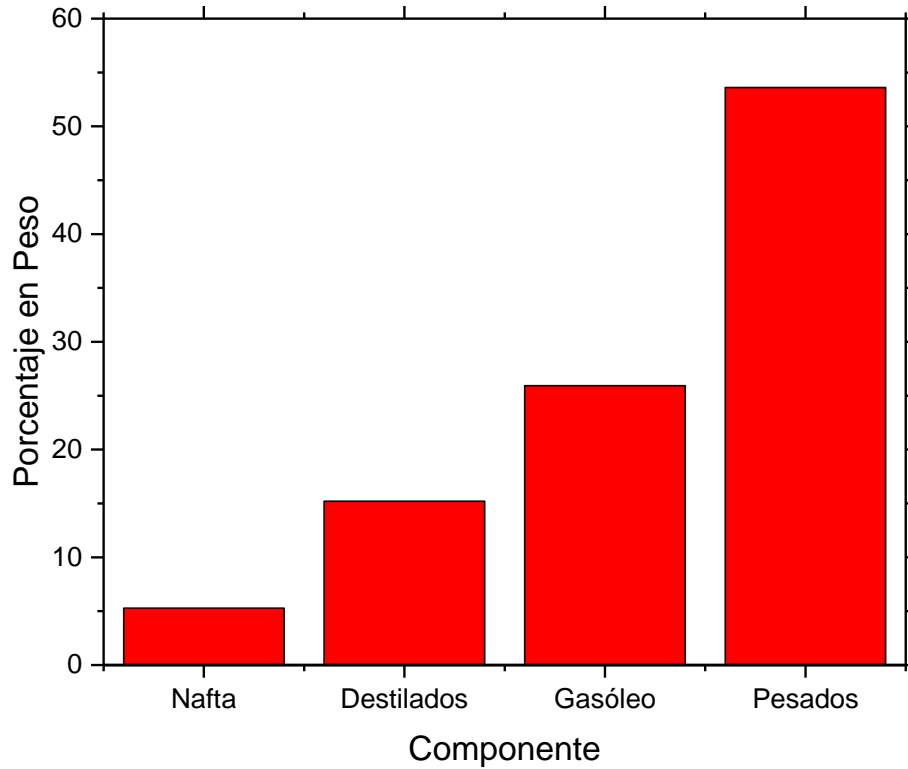


Figura 21. Distribución inicial del fluido.

Teniendo en cuenta las características del fluido, se convierte en un candidato muy atractivo para la aplicación de la tecnología de cavitación hidrodinámica. Así mismo, para futuros cálculos se deben conocer algunas propiedades individuales de los componentes principales del fluido, por lo que se diseñó una simulación de separación por etapas para este (ver Figura 22).

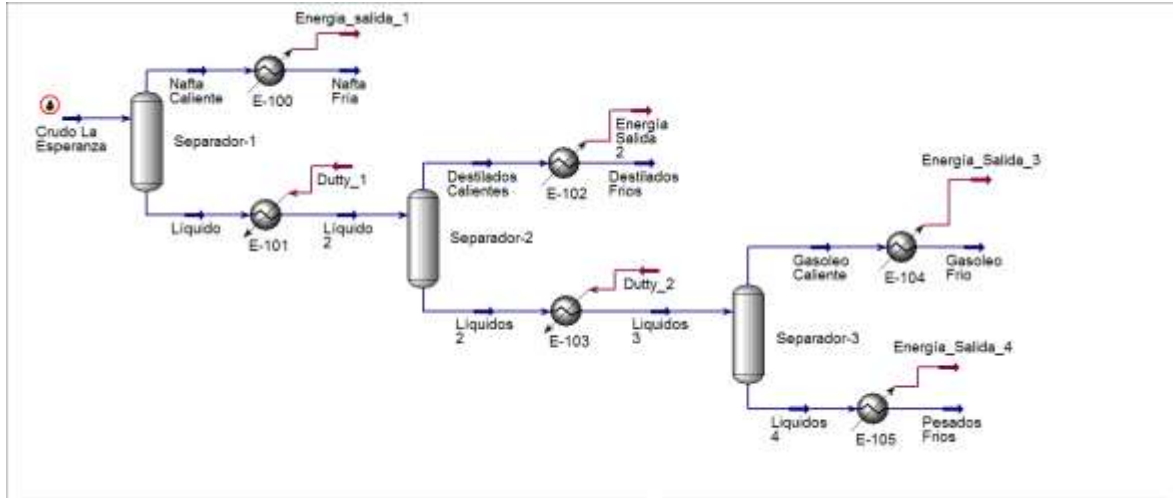


Figura 22. Simulación del proceso de separación por etapas a través del software Hysys.

Como se puede observar, se hizo uso de un conjunto de calentadores y enfriadores con el objetivo de poder obtener las propiedades de cada componente a diferentes condiciones de presión y temperatura.

Por último, se extrajo el diagrama P-H y una isoterma de este a la temperatura de operación de la prueba de cavitación (130 °F), aproximando una expresión matemática de la entalpía en función de la presión para poder realizar los cálculos correspondientes a la liberación de energía por el colapso de las burbujas en cavitación, las gráficas correspondientes se pueden observar en las Figuras 23 y 24, respectivamente.

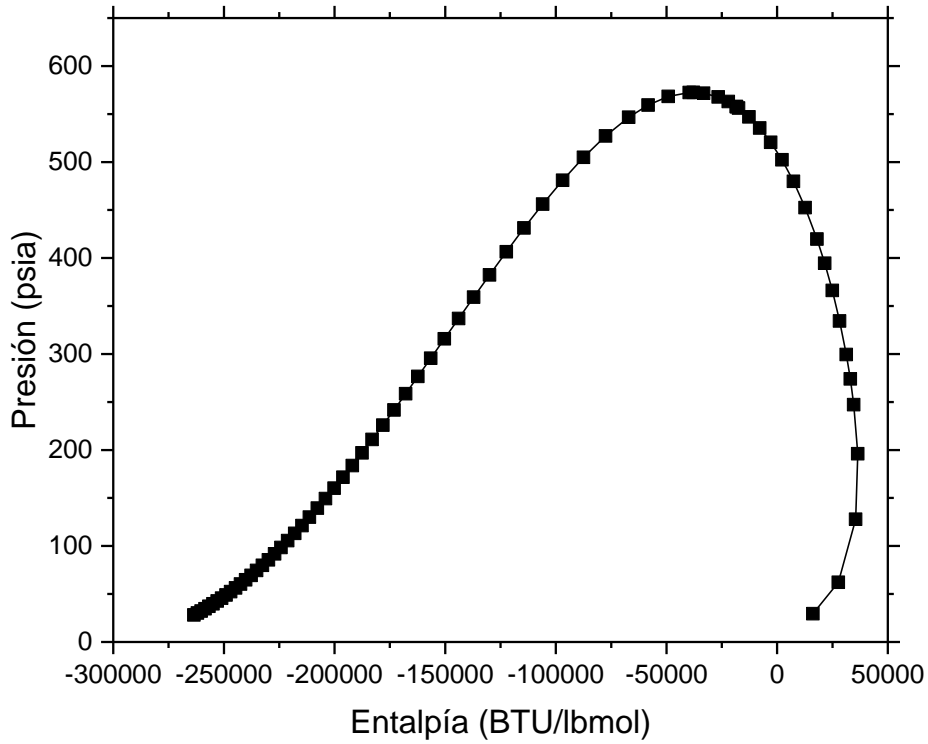


Figura 23. Grafico P-H del fluido de estudio.

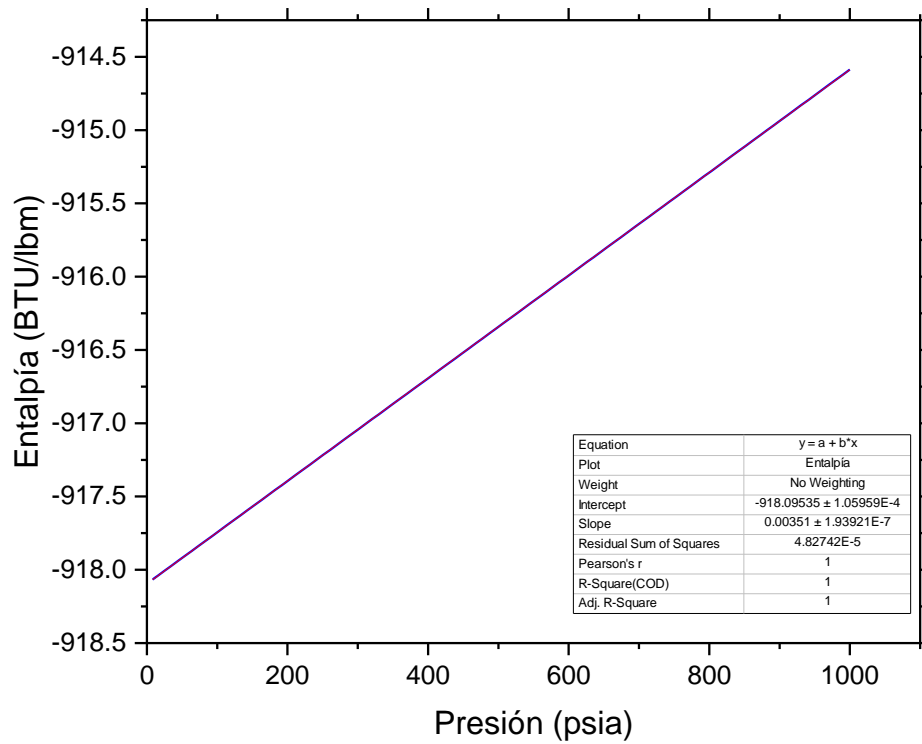


Figura 24. Isoterma de gráfico P-H a 130°F.

El polinomio que mejor se ajusta a esta curva corresponde a la ecuación $y = 0.0035x - 918.1$ obteniendo un factor de ajuste $R^2 = 1$, lo que correspondería con un ajuste perfecto.

5.2. Diseño de la Platina de Orificios

Para el diseño de los diámetros correspondientes a la platina del reactor, se partió de la norma ISO 5167, utilizada para el diseño de unidades de medición propiamente, empleando las siguientes correlaciones (Reader-Harris, 2015):

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} \left(\frac{10^6}{Re}\right)^{0.75} + 0.0900 \left(\frac{L_1}{D_1}\right) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.0337 \left(\frac{L_2}{D_1}\right) \beta^3 \quad (88)$$

$$\beta = \frac{D_2}{D_1} \quad (89)$$

$$Q = CA_o \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad (90)$$

Donde D , P , L , corresponden a diámetros, presiones y longitudes, y los subíndices 1 y 2, corresponden a la tubería y la platina de orificio, respectivamente.

La selección del diámetro interno de la platina se hizo de tal manera que se pudiese alcanzar un diferencial de presiones de 200psig a la salida del reactor, que la tubería de entrada tuviese un diámetro de 2" y un caudal de crudo de 3000 BOPD, obteniendo como resultado un diámetro de 0.595392472" equivalentes a 15.123 mm.

5.3. Simulación en Ansys Fluent

El primer paso para predecir el resultado del proceso es realizar de la simulación hidráulica para obtener datos que se puedan utilizar en posteriores cálculos, a continuación, se detalla el proceso de modelado del equipo utilizando el método de volúmenes finitos para su discretización.

5.3.1. Geometría. Utilizando los resultados del diámetro interno de la platina de orificios, se construyó el modelo físico del reactor con la ayuda del software Solidworks, teniendo en cuenta que la tubería a la que iría conectada el reactor es una de 2[in] Schedule 40, por tanto, se le adaptaron bridas soldadas ANSI 150 para tal fin, la vista final del reactor está en la Figura 25.



Figura 25. Vista explosionada del reactor diseñado

Para poder importar esta geometría a un paquete de análisis CFD se debe extraer el volumen de fluido, que representa la sección por la cuál va a pasar este, en este caso se realizó con el software Ansys Spaceclaim, incluido en el paquete Ansys Workbench; el resultado se muestra en la Figura 26.

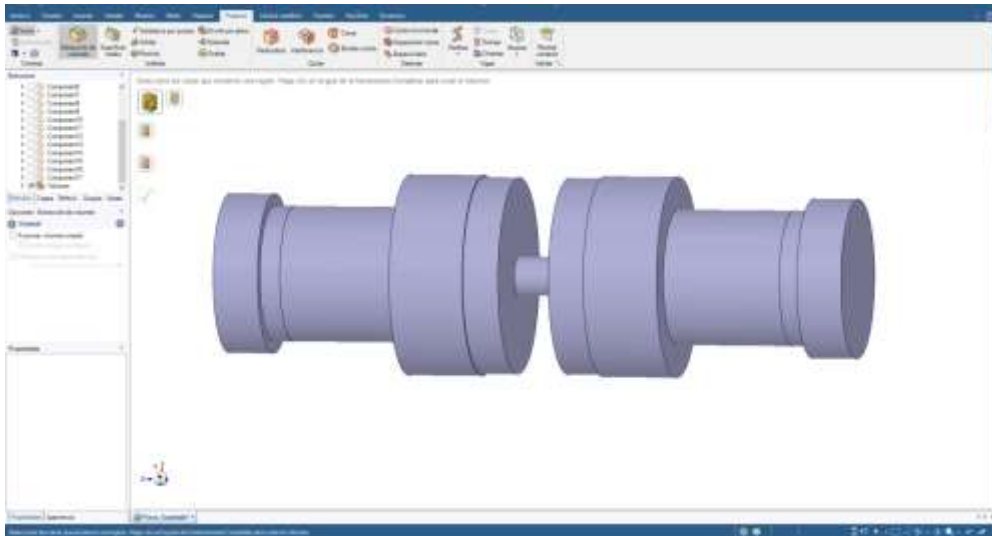


Figura 26. Volumen de fluido extraído de la geometría del reactor.

Finalmente se simplificó la geometría, retirando accesorios como los espárragos y las tuercas, que aumentarían el tiempo de cómputo del sistema sin ningún beneficio.

5.3.2. Enmallado. La generación del enmallado para este caso se llevó acabo en el software Ansys Meshing, utilizando una malla mixta con el fin de recoger la forma de la geometría con la mayor fidelidad posible, los detalles de esta se encuentran en la Tabla 9.

Tabla 9.
Detalles de la malla desarrollada.

Parámetro	Valor
Número total de nodos	62833
Número total de elementos	315840
Calidad mínima ortogonal*	6.6614E-3
Máxima razón de distancias**	2.8535
Tamaño mínimo de los elementos	1.642E-4 [m]

**Es mejor a medida que se acerca a cero*

La malla desarrollada se podría considerar como una de tipo gruesa, además, lo ideal para la selección final de un tamaño es realizar un estudio de la independencia del resultado a diferentes tamaños de mallas, con el fin de escoger la que mejor resolución de resultados ofrezca con la menor cantidad de elementos. En este caso, tanto el tamaño de la malla como la falta de una prueba de independencia son debido a la limitación de la licencia académica que presenta el paquete de Ansys, con un máximo de 512000 celdas para un estudio de fluidos, así que se realizó la mejor aproximación posible a este. El resultado de la malla se observa en la Figura 27.

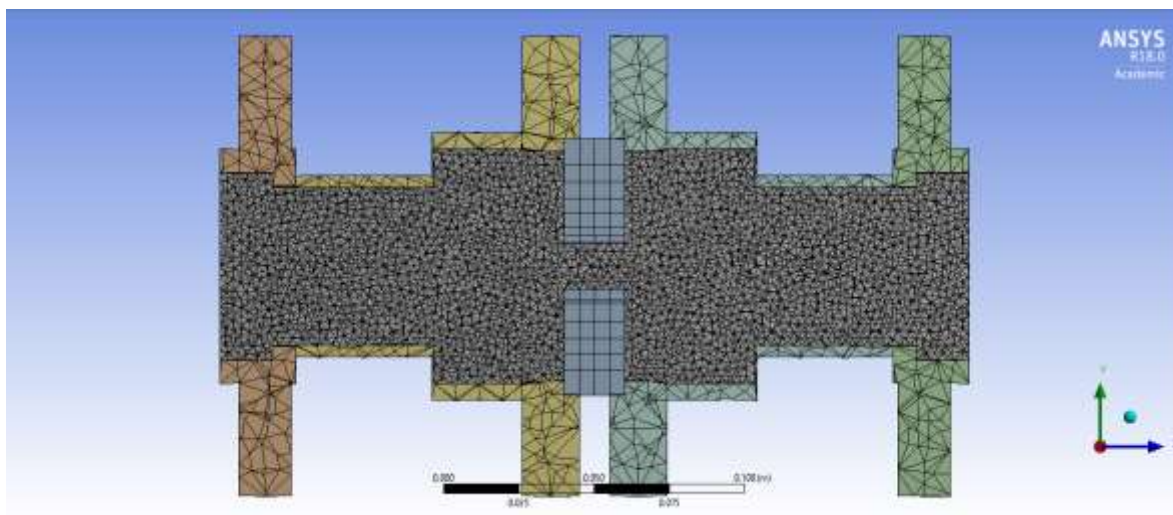


Figura 27. Enmallado seleccionado para la simulación.

5.3.3. Configuración del Caso y Condiciones de Frontera. Para la definición del caso en Ansys Fluent, primero se deben seleccionar los modelos que interactuarán en este fenómeno, en este caso se activaron los modelos de flujo multifásico, en específico el modelo mezcla, ignorando los efectos de deslizamiento que puede haber entre las fases, disminuyendo el tiempo de convergencia. Así mismo, se activó el modelo de turbulencia, escogiendo el modelo $k - \epsilon$, siendo un modelo robusto, fácil de implementar y de rápida convergencia.

Se establecieron dos fases como aquellas que interactúan: una fase para el crudo y otra fase para el vapor liberado, las propiedades de este vapor liberado fueron calculadas utilizando una simulación de liberación flash en Hysys; Aquí se bajó la presión de la alimentación de crudo hasta un punto por debajo de la presión de vapor a través de la inclusión de una válvula de control, y luego se pasó a través de un separador. Véase Figura 28

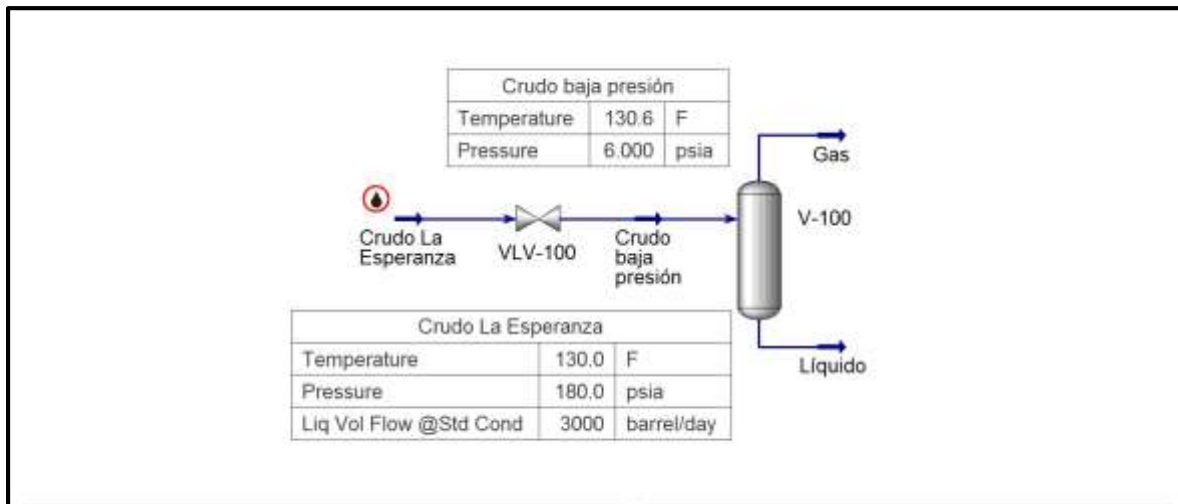


Figura 28. Simulación de liberación flash en Hysys.

Luego de esto se configuró la interacción entre las fases, escogiéndose el modelo de cavitación Schnerr-Sauer, colocando la presión de vapor del líquido en 6.71 psia, calculado con Hysys.

A continuación, se ingresó las características de los fluidos, calculadas a la temperatura de entrada de la prueba con Hysys y las condiciones de frontera para realizar la prueba. Véase Tablas 10 y 11

Tabla 10.
Propiedades de los fluidos ingresadas.

Fluido	Propiedad	Valor
Crudo	Densidad	61.53 [lbm/ft ³]
	Viscosidad	0.9262 [Poise]
Vapor	Densidad	0.05364608 [lbm/ft ³]
	Viscosidad	8.12083e-05 [Poise]

Tabla 11.
Condiciones de frontera ingresadas al simulador.

Condición	Valor
Presión de entrada	180 [psig]
Presión de salida	10 [psig]

5.3.4. Solución del sistema. En el estado transiente, Ansys Fluent maneja una formulación explícita para la discretización temporal, lo que indica que se debe cumplir una relación de estabilidad definida como:

$$\lambda < \frac{\Delta x}{u} \tag{91}$$

Donde Δx en este caso representa el tamaño de celda más pequeña que se encuentra en el dominio y u , la velocidad en esa parte del sistema. Teniendo en cuenta esto se seleccionó un paso de tiempo de 0.001 [s], sumado a una cantidad de 15 pasos de tiempos en total y una cantidad máxima de 50 iteraciones por paso de tiempo con el fin de obtener una precisión considerable.

Durante la solución del sistema se puede observar cierta inestabilidad propiciada por el modelo de cavitación seleccionado que se evidenciar en la Figura 29. Algunos detalles al finalizar la simulación, sumado a las características del ordenador, se pueden observar en la Tabla 12.

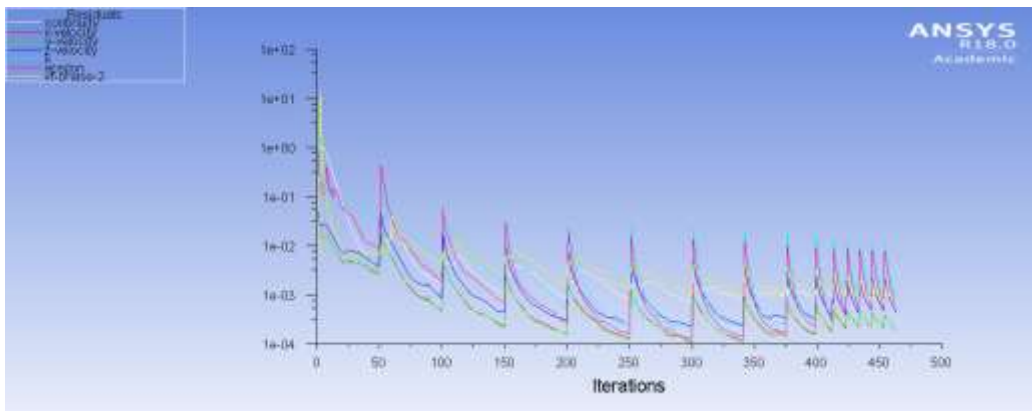


Figura 29. Gráfico de estabilidad de la solución.

Tabla 12.

Detalles de la solución en Fluent.

Dato	Valor
Modelo de Procesador	Intel Core i7-4720HQ
Frecuencia de Procesador	2.60 [GHz]
Memoria RAM	32 [GB]
Núcleos en Paralelo	4
Cantidad de Iteraciones	463
Tiempo de Cómputo	102.941 [s]
Tiempo por Iteración	0.20 [s]

5.3.5. Visualización de los resultados. Posteriormente se exportaron los resultados al programa CFD-Post para su visualización, pudiéndose obtener los resultados para las variables: presión, fracción de vapor, velocidades y, parámetros de turbulencia, todo a través de todo el dominio del fluido.

La primera variable que se debe analizar en este caso es la velocidad, ya que, al utilizar condiciones de frontera de presión de entrada y salida, se debe verificar que estas condiciones concuerden con el flujo que se tiene en el sistema. Los resultados se pueden verificar en la Figura 30 y Figura 31, en los cuales se observa como la velocidad aumenta en la zona inmediata luego de atravesar la platina por efecto de la turbulencia.

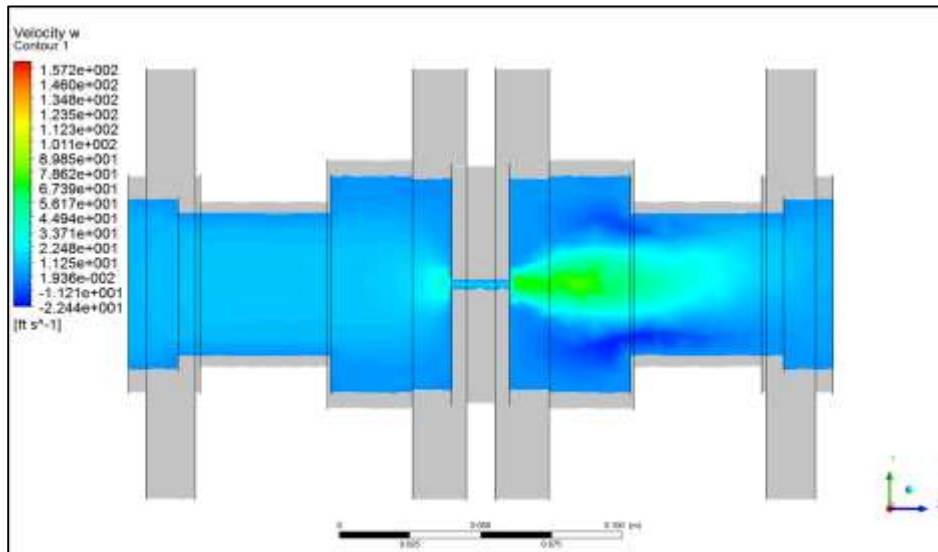


Figura 30. Mapa de contornos de velocidad en el cavitador.

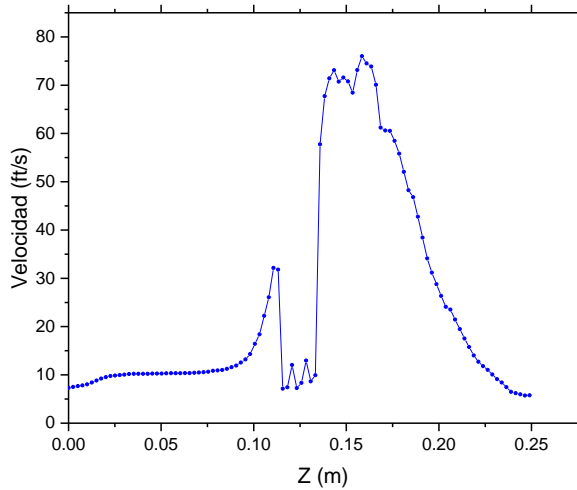


Figura 31. Gráfico de velocidad contra distancia en el cavitador.

A partir de la Figura 31, se contempla la velocidad en la zona de 2” de diámetro, siendo esta de 11.38 ft/s, lo que equivale a 3000 BOPD aproximadamente, cumpliéndose así la condición.

La segunda variable a analizar es la presión, ya que esta es la que garantiza la formación de vapor y, por lo tanto, la creación de una zona de cavitación. Los resultados de esta se pueden ver en la Figura 32.

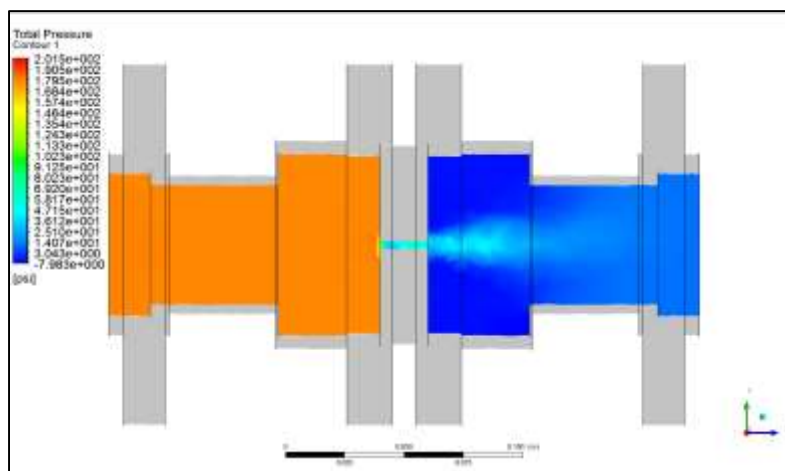


Figura 32. Mapa de contornos de presión en el cavitador.

En la figura 32 se muestra una zona que mantiene una presión de -7.983 psig, presión a la cual se forman las burbujas de vapor, y que finalmente esa presión se va restaurando hasta llegar a los 10 psig que se colocó como condición de frontera, al ser esta una presión que está por encima de la presión de vapor, se dan las condiciones necesarias para el colapso de estas burbujas liberando toda la energía necesaria para el craqueo térmico.

Por último, en la Figura 33, se analiza la fracción en volumen de la fase vapor, en la Figura 34, se observan las zonas de cavitación y colapso, en un plano tridimensional. Es importante observar cómo la mayor parte de las burbujas son transportadas hacia una zona de colapso en la zona inferior, posiblemente por acción de la gravedad.

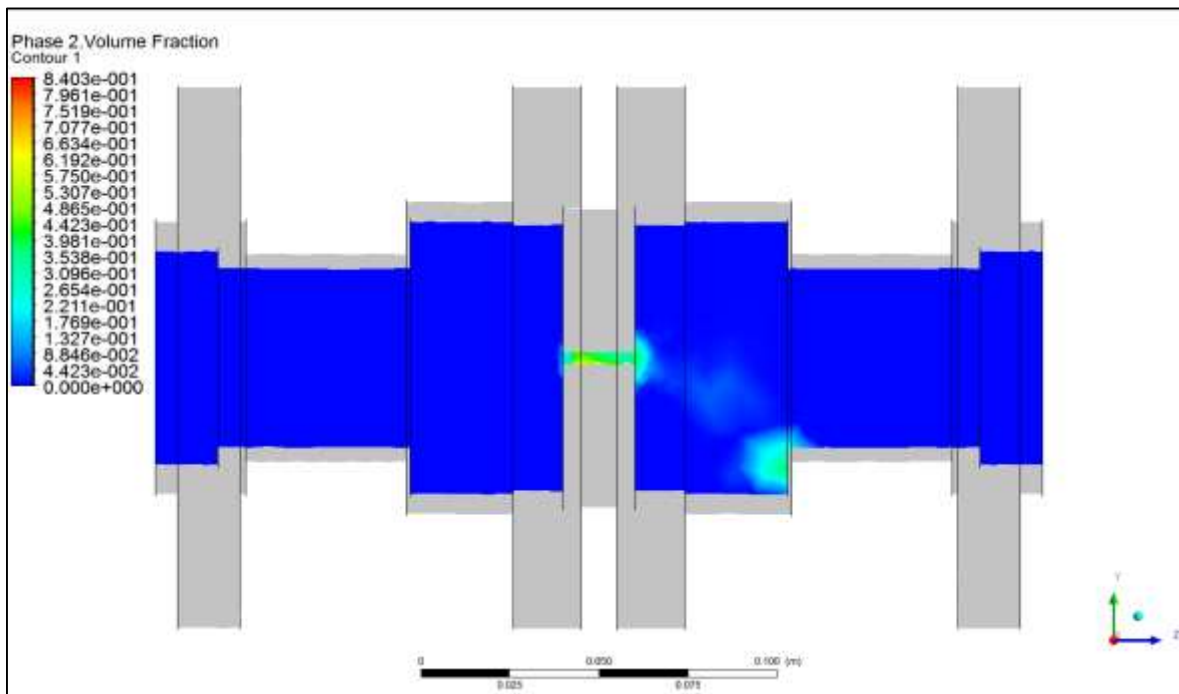


Figura 33. Mapa de contornos de fracción de vapor en el reactor.

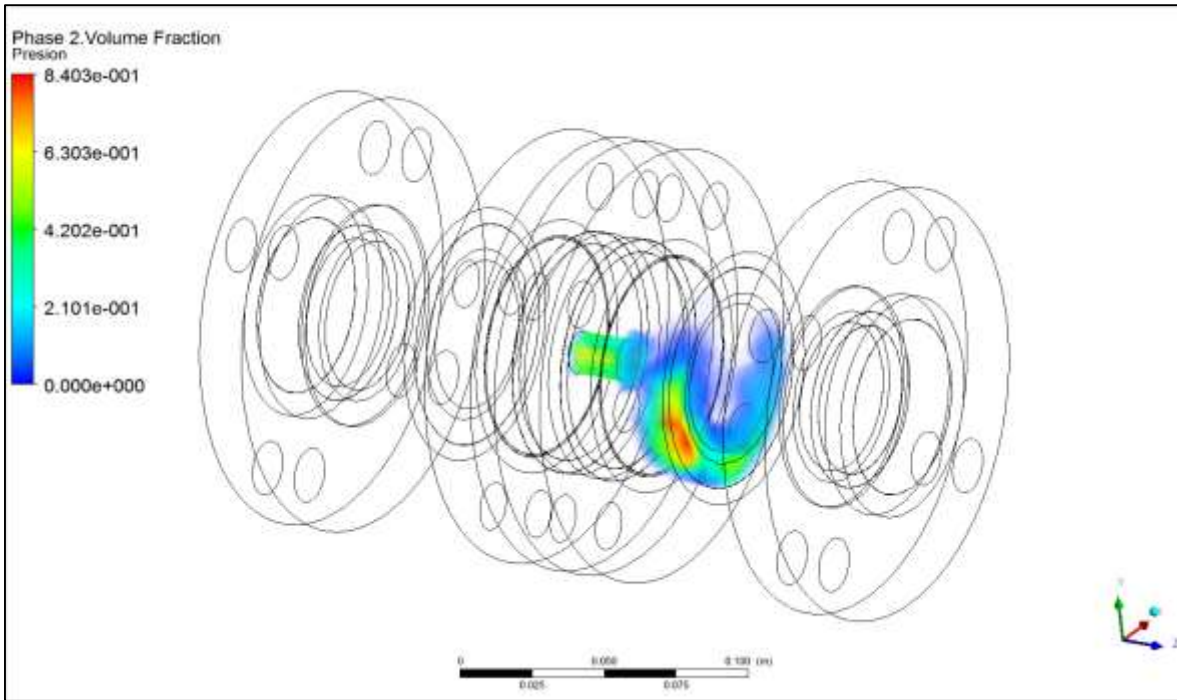


Figura 34. Mapa tridimensional de la fracción de volumen producto de la cavitación en el reactor.

Para cuantificar el tamaño de la zona de cavitación, se puede observar la Figura 35, esta es de aproximadamente 0.063m y, además se contempla como la fracción de vapor puede llegar a un valor de 0.5 en el cavitador.

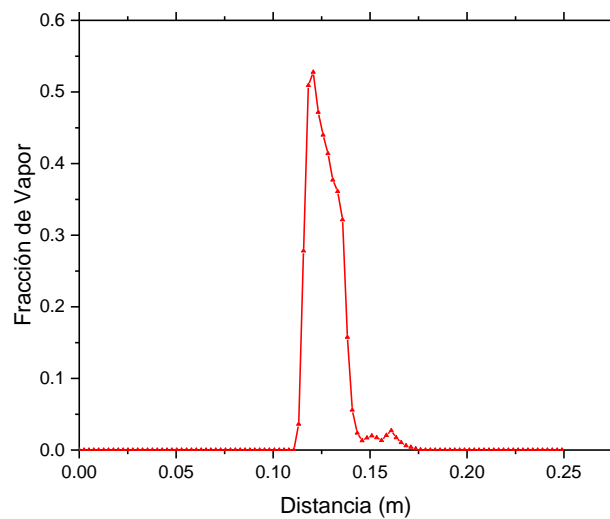


Figura 35. Fracción de vapor a través del cavitador.

5.4. Cálculos energéticos

Con el fin de aplicar el modelo desarrollado en el capítulo 4, se supuso que la diferencia de entalpías es constante, y que la presión a la cual se cavita es la de vapor, con estas consideraciones, se calcula la integral de fracciones volumétricas de vapor, que finalmente constituyen la cantidad de vapor total que se liberó en el paso de tiempo seleccionado. Los resultados de la liberación de energía se observan en la Tabla 13.

Tabla 13.
Cálculos de energía liberada durante la cavitación.

Parámetro	Valor
Delta P	170 [psig]
Total de vapor generado	0.004051453 [ft ³]
Paso de tiempo	0.001 [s]
Densidad	59.50517601 [lbm/ft ³]
Entalpía de entrada	-917.19 [BTU/lbm]
Entalpía de cavitación	-918.06644 [BTU/lbm]
Energía liberada	304262.4932 [BTU/d]

5.5. Cinética Química

Tomando como referencia un tiempo de 1 minuto, y mediante análisis computacional en Hysys, se determinó la nueva composición del fluido, en la Figura 36 se contempla una comparación entre esta y la composición inicial. Se observa que el componente que se craquea en mayor proporción es el gasóleo, posiblemente por la cantidad de energía que se está irradiando, la cual no alcanza la energía de activación para romper otro tipo de enlaces.

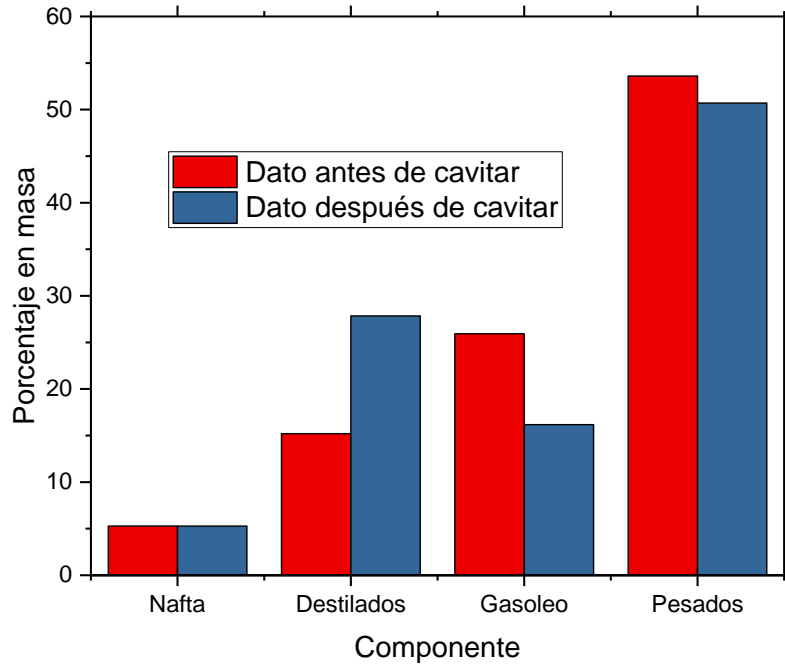


Figura 36. Comparación entre las distribuciones de componentes para el fluido antes y después del proceso de cavitación.

Aplicando las ecuaciones (68) - (71) se definieron los coeficientes estequiométricos de la reacción y la velocidad a la cual se da la misma, y los resultados se presentan en la Tabla 14. A partir de esta y utilizando la ecuación (87) se calculó la nueva viscosidad, empleando las viscosidades individuales que se exportaron de Hysys, este resumen se puede ver la Tabla 15.

Tabla 14.
Resultados del análisis cinético químico.

Dato	Valor
k'	3.336722104 [h ⁻¹]
a	0
b	4.613617357
c	-3.559480378

Tabla 15.

Cálculo de la viscosidad de salida a partir de la cinética química.

Componente	Mass. Fracc	Visc (cP)	ln(Visc)
Nafta	0.05275	0.32913735	1.11128015
Destilados	0.15196	0.61894011	0.47974677
Gasóleo	0.25934	1.01694825	0.01680623
Pesados	0.53595	2635.15712	0.96894281
Viscosidad final = 2637.429 cP			

5.6. Cálculos de Energía Requerida.

El paso primordial en esta etapa es poder calcular la entalpía de la reacción a partir de la cinética química desarrollada en el capítulo anterior, se hizo uso de la Figura 19, determinándose la entalpía de combustión para cada componente. Véase Tabla 16

Tabla 16.

Calores de combustión para los componentes del fluido.

Componente	API	Factor K	Calor de Combustión (BTU/lbmol)
Nafta	52.0545405	11.3021961	1627013.567
Destilados	30.0286633	11.185205	3074924.167
Gasoleo	16.2110877	11.1807004	5889700.292
Pesados	3.84455004	11.2056662	10217630.3

Luego, para cada componente se normaliza el porcentaje de carbono e hidrógeno con el fin de calcular los coeficientes estequiométricos de la reacción de combustión y, a partir de esta poder llegar a la entalpía de formación de cada componente, los resultados se pueden verificar en las Tablas 17 a la 24.

Tabla 17.

Tabla de normalización de contenido de carbono e hidrógeno para los destilados.

Destilados			
Componente	%wt	%wt/MW	Normalización
C	87.77386952	7.314489127	1
H	12.00713048	12.00713048	1.641554218

Tabla 18.

Coefficientes estequiométricos para la combustión de los destilados.

Coefficientes Estequiométricos	
O2	1.410388555
CO2	1
H2O	0.820777109

Tabla 19.

Tabla de normalización de contenido de carbono e hidrógeno para gasóleo.

Gasóleo			
Componente	%wt	%wt/MW	Normalización
C	88.31816932	7.359847443	1
H	10.96183068	10.96183068	1.489410041

Tabla 20.

Coefficientes estequiométricos para la combustión de gasóleo.

Coefficientes Estequiométricos	
O2	1.37235251
CO2	1
H2O	0.74470502

Tabla 21.

Tabla de normalización de contenido de carbono e hidrógeno para la fracción pesada

Pesados			
Componente	%wt	%wt/MW	Normalización
C	88.31277898	7.359398248	1
H	8.943221023	8.943221023	1.215210907

Tabla 22.
Coefficientes estequiométricos para la combustión de la fracción pesada.

Coefficientes Estequiométricos	
O2	1.303802727
CO2	1
H2O	0.607605454

Finalmente, se utiliza la ecuación (84) para calcular la entalpía de formación de cada elemento, a partir de este se calcula la entalpía estándar de reacción, corrigiéndose esta última por llevarse a cabo a una temperatura no estándar, los resultados se encuentran resumidos en la Tabla 23.

Tabla 23.
Cálculo de entalpía de reacción.

Componente	Entalpía de formación (BTU/lbmol)	Cp (BTU/lbmol-°F)
Destilados	-595.7457162	0.452361097
Gasóleo	-575.1215403	0.439372631
Pesados	-537.9519866	0.436645007
$\Delta H_r = 1957.898159$ [BTU/lbmol]		

Los cálculos de la energía requerida a partir de esta se hacen empleando la ecuación número (82), tratando la conversión como la diferencia entre el flujo molar que entra del compuesto en estudio y el que sale, se puede llegar a los cálculos mostrados en la Tabla 24, donde finalmente se muestra la energía necesaria para que se lleve a cabo la reacción de craqueo.

Tabla 24.
Cálculo final de la energía necesaria para llevar a cabo la reacción.

Parámetro	Valor
Fracción Molar de Pesados a la Entrada	0.91799972
Fracción Molar de Pesados a la Salida	0.868341483
dQ/dt [BTU/d]	-283084.3263

A partir de estos resultados se puede concluir que, no sólo se tiene la energía suficiente para llevarse a cabo la reacción de craqueo, además se tiene un diferencial de 21178.17 [BTU/d] en pérdidas de energía, que se disipa en forma de ondas de choque y aumento de temperatura en las paredes del reactor.

5.7. Análisis de Sensibilidad

Siguiendo con la metodología anterior se propone hacer una sensibilidad de la variación de la viscosidad y la energía liberada a partir del diferencial de presión colocado y el tiempo de cavitación que se puede llegar a tener.

Primero, se corrieron simulaciones a diferentes diferenciales de presiones con el objetivo de analizar la variación de zona de cavitación y su energía liberada, en la Figura 37 se muestra la fracción volumétrica del vapor liberado con una presión de entrada de 300 psig, mientras que en la Figura 38, se encuentra a una presión de entrada de 700 psig.

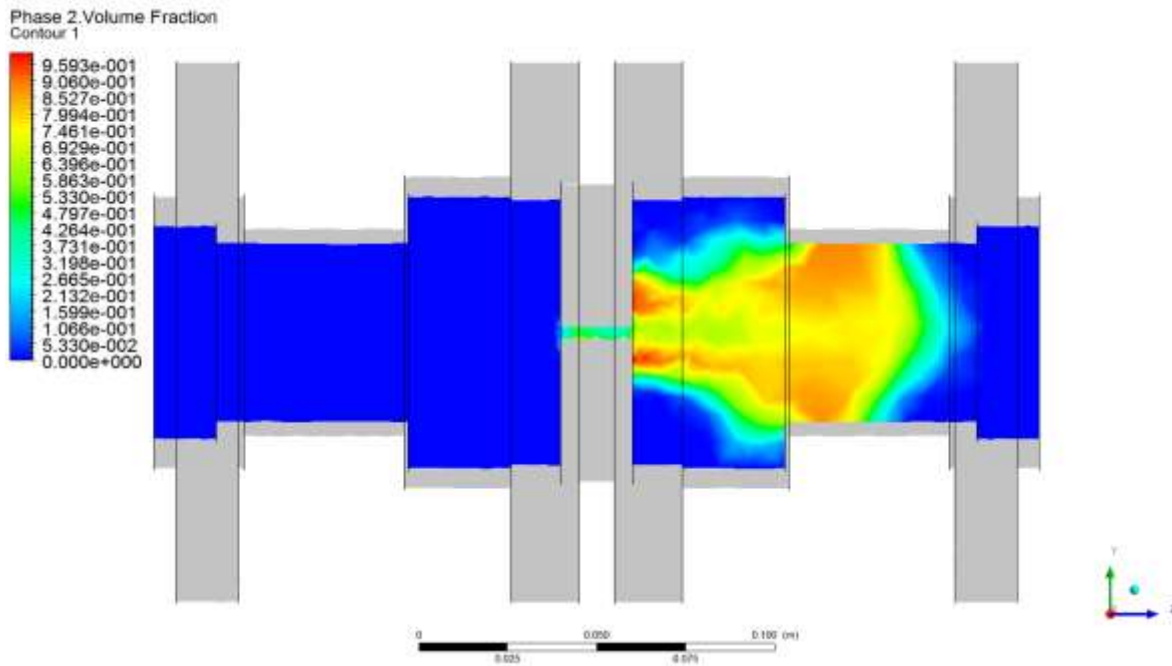


Figura 37. Fracción de vapor liberada con una presión de entrada de 300 psig.

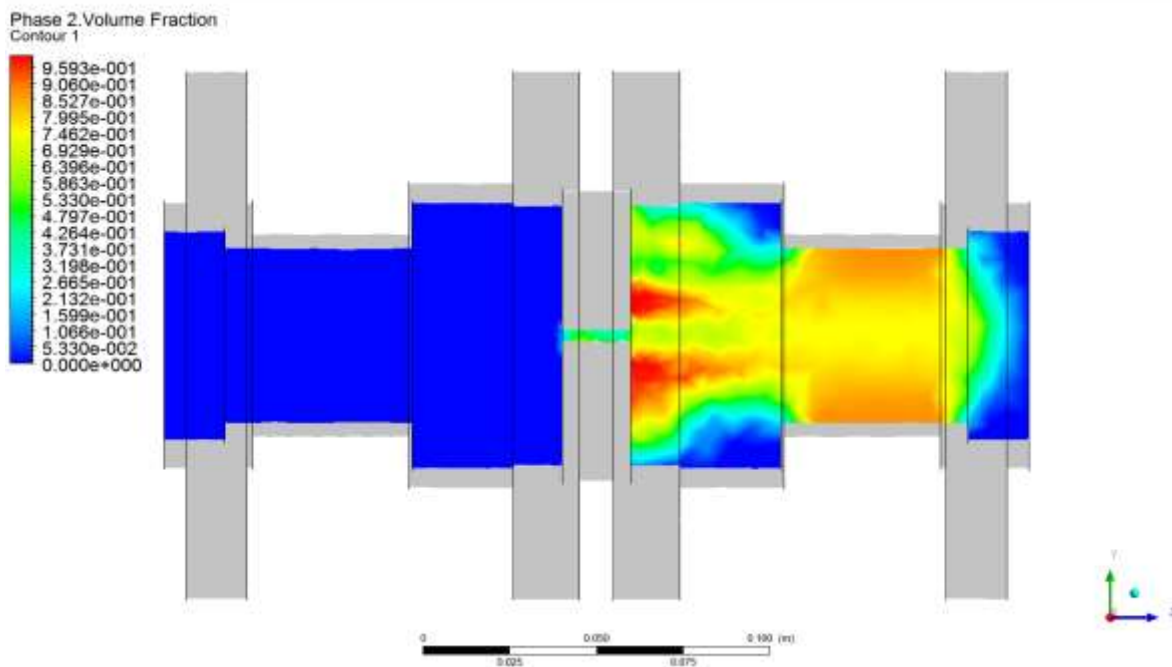


Figura 38. Fracción de vapor liberada con una presión de entrada de 700 [psig].

En ambas se observa la forma en la que se extiende la zona de cavitación, además de que se produce una mayor fracción de vapor, que se traducirá en una mayor liberación de energía, pudiéndose llegar mayores cambios en viscosidad, esto se muestra más a detalle en la Figura 39, se comparan las fracciones de vapor a 700 psig con la de 180 psig del caso aplicado.

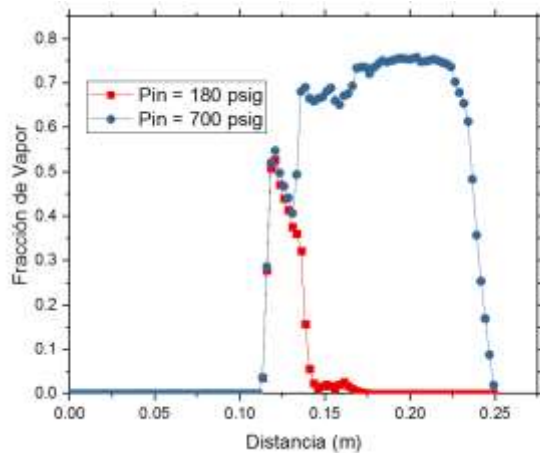


Figura 39. Comparación entre el vapor liberado a 180 psig y a 700 psig de entrada, respectivamente.

A partir de estas simulaciones se pudo calcular una curva de energía liberada en función a la diferencia de presión que se le aplique al fluido, la cual se muestra en la Figura 40, esta parece ser lineal luego de un diferencial de presión de 100 psig

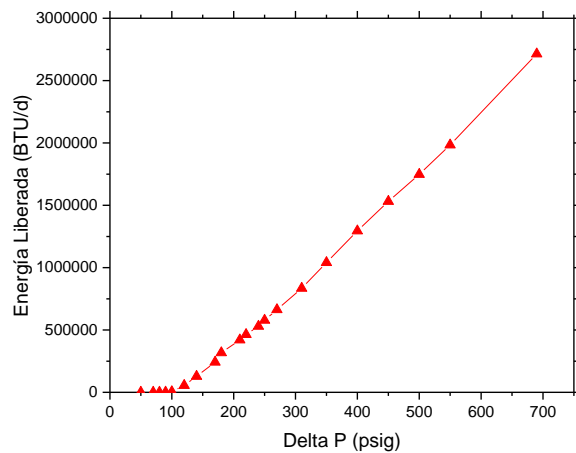


Figura 40. Gráfico de delta de presión vs energía liberada por cavitación.

Para finalizar, se desarrolló una gráfica que relaciona la viscosidad obtenida a la salida del cavitador en función de la energía liberada, obteniéndose una función tipo exponencial negativa, lo que indica que a medida que se aplica mayor presión se pierde la eficiencia del método. Véase

Figura 41

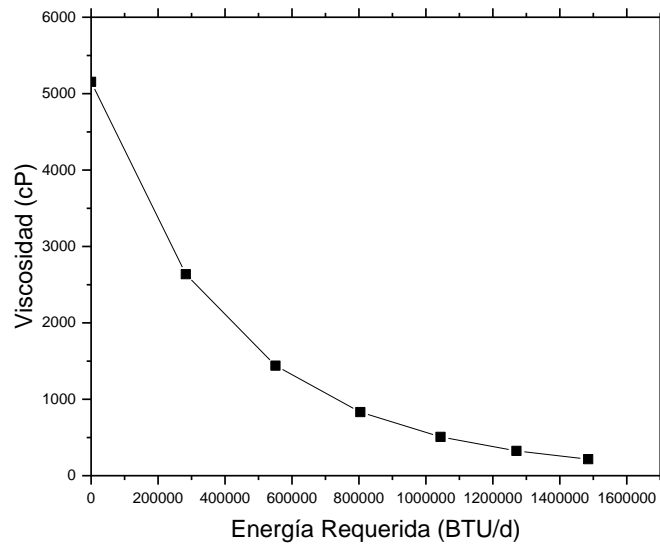


Figura 41. Viscosidad de salida en función de la energía requerida para llevar a cabo el craqueo.

6. Evaluación Financiera

6.1 Generalidades

La evaluación financiera que será desarrollada en el presente capítulo establece nombres ficticios de campos y pozos de petróleo, con el objeto de adelantar en forma genérica, pero con datos reales, una evaluación que permita concluir la viabilidad de la aplicación de la herramienta de cavitación como alternativa para la reducción de costos de transporte de hidrocarburos pesados en campos de Colombia, que utilicen nafta como diluyente.

El campo seleccionado para el análisis es “Campo La Esperanza”, ubicado en el valle del Magdalena medio con un total de 10 pozos en operación (ESP-1....ESP10), con una producción estimada de 3.000 BOPD (Barriles de Aceite por Día), de las características especificadas en la Tabla 25.

Tabla 25.
Propiedades del crudo del “campo La Esperanza”

Gravedad API	BS&W	Viscosidad [cSt]
12	80%	5036

El crudo de los pozos es recolectado mediante troncales de producción y llega a las facilidades de producción a través de un Manifold de entrada donde se le adiciona 8% de Nafta como diluyente, y es direccionado hasta un sistema de separación conformado por un serie de tanques que actúan como separadores, donde se le adiciona un 10% de Nafta, y es retirada el agua y los sedimentos para ser enviado al tanque de almacenamiento de crudo en especificaciones donde se

aplica un 3% de Nafta para ser entregado a transporte con una viscosidad de 300 cSt y un BS&W de 0.5%, siendo luego despachado a través de un oleoducto en condiciones de venta.

Acorde con el proceso descrito, entre el Manifold de entrada y la entrega del crudo a despacho se aplican en total un 21% de Nafta como diluyente; la evaluación financiera del presente proyecto plantea el ahorro de la Nafta que es aplicada después del tanque de almacenamiento (3%) donde el crudo está en especificaciones de calidad de venta pero presenta una viscosidad de 600 cSt, levemente por encima del valor estipulado para transporte, que es 300 cSt. Véase Figura 42

El despacho del crudo de este campo se hace a través de oleoducto, por lo tanto, debe cumplir con ciertas especificaciones mínimas requeridas. Una de estas condiciones es la viscosidad; esto exige la implementación de alguna técnica que permita reducir la viscosidad hasta las condiciones establecidas por la compañía transportadora. En la mayoría de campos colombianos se ha implementado la dilución con nafta como mecanismo reductor de viscosidad.

Tabla 26
Datos de viscosidad

Campo	Viscosidad original [cP]	Viscosidad original [cSt]	Viscosidad máxima permitida [cSt]	%Nafta usada para dilución
La Esperanza	5155	5071	250	21

$$\mu = \vartheta * \rho$$

μ : *Viscosidad dinámica*

ϑ : *Viscosidad cinemática*

ρ : *Densidad del fluido*

$$API = 12$$

$$\mu = 5155 \text{ cP}$$

$$\vartheta = 5228 \text{ cSt} = 5071 \text{ cSt}$$

$$\rho = 0,986 = 0.98606$$

Para el cálculo del volumen de nafta utilizado para la dilución se utilizan las correlaciones de cálculo de viscosidad para mezclas de hidrocarburos desarrolladas por *Al- Besharah, Akashah y Mumford*.

$$VBN_i = 10,975 + 14,535 * Ln[Ln(\mu_{i,cSt} + 0,8)]$$

$$VBN_M = \sum VBN_i * W_i$$

$$\mu_M = EXP \left(EXP \left(\frac{VBN_M - 10,975}{14,535} \right) \right) - 0,8$$

VBN = Viscosity Blending Number

Acorde con el proceso descrito en la Figura 42, entre el manifold de entrada y la entrega del crudo para despacho se aplica un total de 21% de Nafta en volumen como diluyente; el análisis económico del presente proyecto plantea el ahorro de la Nafta aplicada después del tanque de almacenamiento (3%), pues, aunque el crudo está en especificaciones de calidad de venta, presenta una viscosidad ligeramente por encima del valor exigido para transporte, 250 cSt.

El punto para la aplicación de la tecnología es seleccionado teniendo como criterio el porcentaje de BS&W, ya que el crudo en el punto seleccionado se encuentra deshidratado; razón por la cual se optimiza la aplicación de la tecnología evitando posibles problemas de emulsiones crudo-agua que nos ocasionen problemas en el despacho del hidrocarburo.

Las condiciones de entrega son:

Tabla 27.
Especificaciones de despacho

Gravedad API	Contenido Sal	BS&W	Viscosidad
18	20 PTB	0,5%	250 cSt

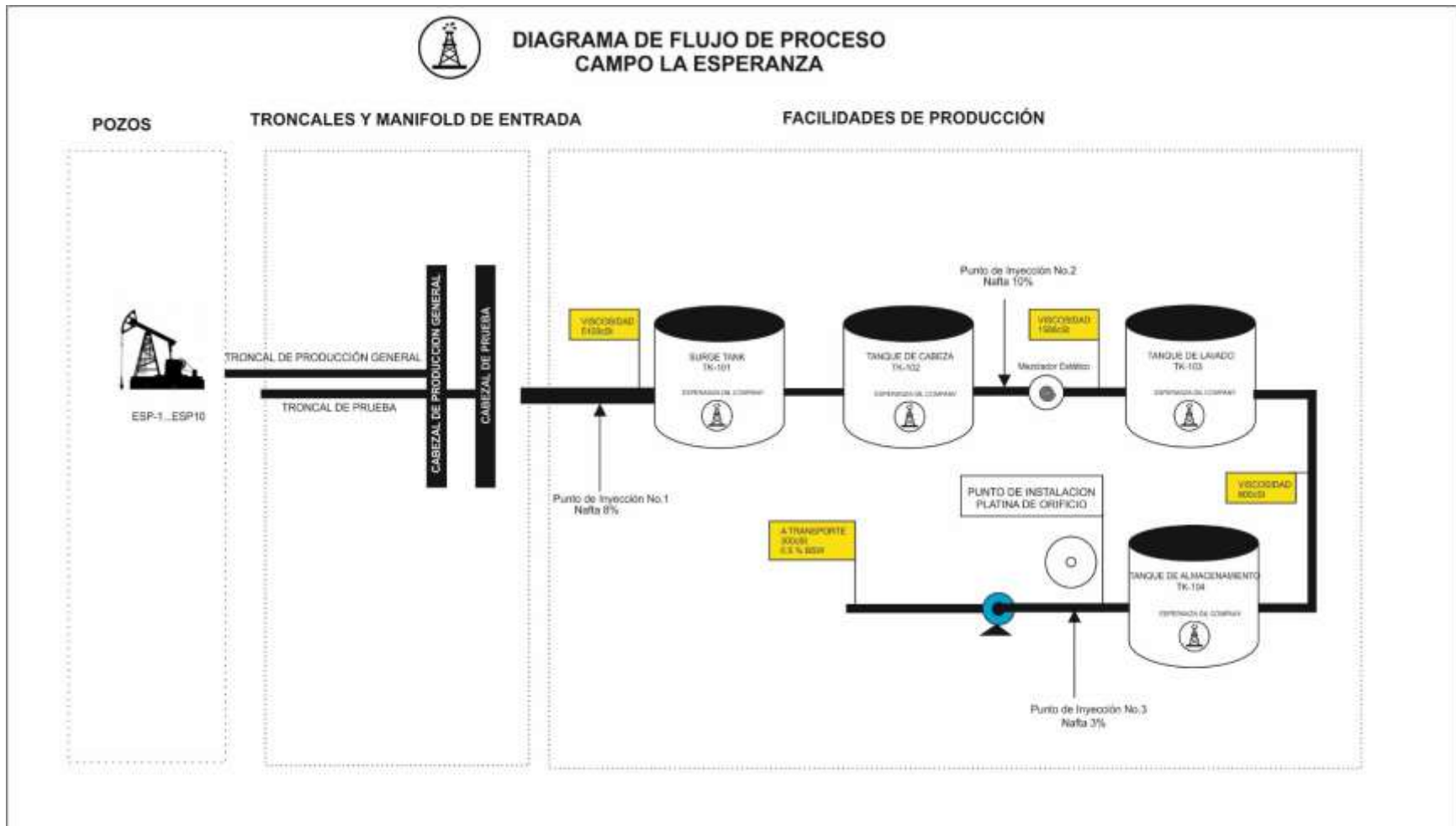


Figura 42. Diagrama de flujo de proceso “CAMPO LA ESPERANZA”

La evaluación financiera tendrá como parámetro la reducción de un 3% de Nafta en volumen usada como diluyente. Este porcentaje representa la proporción aplicada en la salida del tanque de almacenamiento para el despacho del crudo.

6.2 Objetivos de la evaluación financiera

La evaluación financiera de un proyecto tiene por objetivo general la identificación de las ventajas y las desventajas asociadas a la inversión de un proyecto antes de la implementación del mismo. Dentro de los objetivos específicos que persigue la evaluación financiera se encuentran:

- Identificar los diferentes costos y beneficios asociados al proyecto
- Seleccionar el tipo de evaluación financiera más adecuado que permita evidenciar la viabilidad financiera del proyecto
- Valorar la rentabilidad de la inversión acorde con los indicadores estandarizados para tal fin

La evaluación financiera nos permitirá tomar decisiones racionales ante las diferentes alternativas de ejecución del proyecto.

6.3 Metodología de análisis

(Sabalza, M., 2006). Se distinguen tres tipos de análisis económicos según las características de los beneficios:

- Análisis Costo-Utilidad (ACU)
- Análisis Costo-Efectividad (ACE)
- Análisis Costo-Beneficio (ACB)

6.3.1 Análisis Costo-Utilidad (ACU).. Los beneficios identificados se expresan en una escala de utilidad. Ayuda a establecer un orden según la bondad de actuaciones alternativas.

El ACU se utiliza cuando los beneficios tienen su origen en percepciones subjetivas. Se trata de categorizar diferentes estados de la realidad de acuerdo con nuestra visión de mejora de una situación.

6.3.2. Análisis Costo-Efectividad (ACE). Compara costos en unidades monetarias contra beneficios expresados en otro tipo de unidades. Permite elegir entre alternativas que podrían cumplir unos mismos objetivos con diferentes costos.

El ACE se utiliza cuando los beneficios sí tienen un valor cuantificable, aunque no en dinero, sino en indicadores objetivamente verificables.

6.3.3 Análisis Costo-Beneficio (ACB).. Expresa costos y beneficios en unidades monetarias. Permite valorar la rentabilidad de la acción según criterios objetivos.

En el ACB los costos y los beneficios son medibles en dinero. Este es el tipo de análisis más utilizado en los estudios de viabilidad de inversiones productivas, y es el que se utilizará en la evaluación del proyecto.

6.4 Parámetros para la evaluación financiera (Gutiérrez, M. F., 2010)

6.4.1 Vida útil estimada. Para la evaluación financiera del proyecto, se estimó una vida útil de cinco (5) años.

6.4.2 Capital de inversión. Representa el recurso de capital que debe ser invertido para la compra y construcción de los equipos. Dentro los equipos requeridos para la construcción del skid se encuentran: Platina de orificios bridada, Bomba de paletas para crudos pesados, fabricación de skid, Manifold de interconexión, y tableros e instrumentación asociadas para la operación de los equipos. Estos equipos y sus respectivos precios están desglosados en la Tabla 28.

Tabla 28.
Capital de Inversión

Ítem	Descripción	Cantidad	Costo unitario (USD\$)	Costo Total (USD\$)
1	Platina de orificios bridada	1	1.500	1.500
2	Bomba de paletas de alta presión	1	15.000	15.000
3	Construcción de manifold y skid	1	9.000	9.000
4	Tablero de control con variador	1	8.000	8.000
5	Control y automatización	1	13.000	13.000
6	Traslado de equipo y generador	1	3.300	3.300
			TOTAL	49.800

6.4.3 Costos variables directos. Los costos directos asociados con el proyecto están relacionados en la Tabla 29.

Tabla 29.
Costos variables directos

Ítem	Descripción	Cantidad mensual	Costo unitario (USD\$/mes)	Costo Total (USD\$/mes)
1	Operador/Mantenedor	2	1.150	2.300
2	Alquiler generador de 40 kW	1	1.000	1.000
3	Combustible generador 40 kW (galones)	1.400	2,5	3.500
4	Mantenimiento Mensual	1	700	700
			TOTAL	7.500

- Los valores son estimados en dólares americanos a una TRM de 3.052 el 19-07-2017
- Se estima un salario de COP\$3'500.000 por operador
- Se estima un consumo de combustible diésel (2 gal/hr – 75% de carga). Por lo tanto, el consumo mensual es de 1.440 galones a un precio unitario de COP\$7.800/galón (USD\$2,5/galón)

6.4.4 Ingresos por ahorro del 3% de nafta. La producción del “Campo La Esperanza” es de 3.000 BOPD, para el cual se utiliza 21% v/v de Nafta como diluyente, que tiene un costo asociado y sobre el cual se calcula el ahorro del 3% de la nafta que será reemplazada por la tecnología de cavitación, y sobre esta base se aplican los criterios de evaluación financiera del proyecto. La tabla 30 nos presenta el precio unitario de la nafta y el costo asociado al 3% que dejaremos de utilizar:

Tabla 30.
Costos asociados a la Nafta.

Ítem	Descripción	Cantidad mensual	Costo unitario (USD/Bbl)	Costo total (USD/mes)
1	Consumo original Nafta 80° API (21% v/v)	18.900	60	1.134.000
2	Ahorro del 3% v/v de Nafta	2.700	60	162.000

- Los valores son estimados en dólares americanos a una TRM de 3.052 el 19-07-2017
- Los porcentajes de Nafta están calculados sobre una producción del campo de 3000 BOPD
- El 21% v/v de Nafta representa 630 BNPD
- El 3% v/v de Nafta representa 90 BNPD
- El costo de Nafta/barril es de USD\$60.

El esquema de negocio que se plantea al operador del campo, está representado en el ahorro del 3% en el consumo de nafta, equivalente a USD\$ 162,000, de cuyo valor el inversionista recibirá

como ingreso el monto correspondiente al 50% es decir USD\$81,000, como ingreso del proyecto; valor que será tomado para el flujo de caja que se presenta a continuación.

6.4.5 Flujo de Caja Neto. Es la utilidad neta por periodo después de impuestos y depreciación. Para el desarrollo del flujo de caja neto se asume que el capital de inversión es el resultado de un préstamo a 60 meses en una entidad financiera que cobra un interés del 2% E.M (Efectivo Mensual)

Tabla 31.
Flujo de Caja Neto Mensual

Item	Descripción	Valor(USD\$/mes)
1	Ingreso por ahorro de 3% de Nafta (50%)	+ 81.000
2	Costos variables directos	- 7.500
3	Depreciación lineal (5 años)	- 830
4	Intereses entidad financiera (2%)	-996
5	Renta liquida gravable	71.674
6	Impuesto a la renta (25%)	-17.918
7	Ganancia despues de impuestos	+53,756
8	Depreciación lineal (5 años)	+ 830
9	Abono a la deuda entidad financiera	-996
10	FCN	53.590

- Los valores son estimados en Dólares americanos a una TRM de 3,052 el 19-07-2017
- El flujo de caja neto asume que los dineros de la inversión son el resultado de un préstamo en una entidad financiera que tiene una tasa de interés mensual de 2%
- Se asume una depreciación en línea recta con valor de salvamento nulo a 5 años de los equipos.

Con los datos obtenidos en el flujo de caja neto mensual y con el valor de la inversión realizamos la Gráfica del Flujo de Caja Neto descrita en la Figura 43.



Figura 42. Flujo de Caja Neto

Nota: No se utilizó capital de trabajo, puesto que los costos fijos no operacionales los asume la compañía operadora del campo.

6.5 Criterios de la evaluación financiera

6.5.1 Valor Presente Neto, VPN. (García, J. A., 2008). El valor presente neto del flujo de caja de un proyecto o alternativa de inversión representa el valor, equivalente en una moneda, de la ganancia o pérdida que se obtendrá al llevar a cabo dicho proyecto. Teniendo en cuenta lo anterior, este índice puede interpretarse así:

- Si $VPN > 0$, significa que de llevarse a cabo este proyecto se obtendrá una utilidad que, medida en la moneda hoy, es igual al valor del VPN.
- Si $VPN < 0$, significa que de llevarse a cabo este proyecto se obtendrá una pérdida que, medida en la moneda hoy, es equivalente al valor del VPN.
- Si $VPN = 0$, significa que de llevarse a cabo este proyecto no se obtendrá pérdida ni ganancia.

Para el cálculo de este índice es importante tener en cuenta el flujo de caja, el tiempo de evaluación y la tasa de oportunidad. Esta última depende del inversionista, del factor de riesgo y de su liquidez.

La tasa de oportunidad del inversionista es 2% E.M (Efectivo Mensual).

$$VPN=53.590* [(1-(1,02)^{-60})/0,02] - 49.800$$

$$\mathbf{VPN= USD\$ 1'813.035}$$

6.5.2 Tasa Interna de Retorno, TIR. La tasa interna de retorno es la tasa de interés que ganan o devengan los dineros que permanecen invertidos en el proyecto. Esto quiere decir que, la tasa de retorno o TIR no necesariamente representa el rendimiento sobre la inversión inicial, sino sobre la parte de la inversión no amortizada al comienzo de cada periodo evaluado. Para este caso se procede a calcular la TIR por el método del VPN. (García, J. A., 2008).

$$VPN=0=53.590*[(1-(1+i)^{-60})/i] - 49.800$$

$$i= 1,076$$

$$\mathbf{TIR=107,6\% E.M (Efectivo Mensual)}$$

$$TIR= [(1+1,076)^{12} - 1] *100$$

$$\mathbf{TIR= 640.708\% E.A (Efectivo Anual)}$$

6.5.3 Relación Beneficio/Costo, B/C. Este índice también tiene en cuenta la variación del dinero respecto al tiempo, y se corresponde a la relación entre los beneficios y los costos de un proyecto. Los beneficios se definen como el valor presente de los flujos netos de caja cuando son positivos; y, los costos se definen como el valor presente de los flujos de caja cuando son negativos.

Aquí se supone una tasa de oportunidad constante en todos los periodos de la vida útil del proyecto. (García, J. A., 2008).

$$\mathbf{B/C = VAB / VAC}$$

Donde:

VAB: Valor Actual de los Beneficios

VAC: Valor Actual de los Costos

$$\text{VAB (USD\$)} = 53.590 * (1,02)^{-1} + 53.590 * (1,02)^{-2} + \dots + 53.590 * (1,02)^{-60} = 1'813.035$$

$$\text{VAC (USD\$)} = 49.800$$

$$\text{R B/C} = \text{USD\$}1'813.035 / \text{USD\$}49.800$$

$$\mathbf{R B/C = 36,40}$$

El valor obtenido para la relación Beneficio/Costo indica que por cada dólar invertido se ganan 36.4 dólares.

6.5.4 Periodo de recuperación de capital, PR. (Infante, A., 2006). El periodo de recuperación del capital es el plazo, en número de años, en que la inversión inicial se recupera con las utilidades netas futuras. La regla de decisión asociada a este indicador señala que se deben preferir los proyectos con menor periodo de recuperación. Su principal desventaja es que no tiene en cuenta la pérdida del poder adquisitivo del dinero en el tiempo.

Si las utilidades anuales son constantes o similares, como en este caso, se aplica la siguiente relación:

$$\text{PR} = \text{Capital Invertido} / \text{Utilidad Anual}$$

$$\text{PR} = 49.800 / (53.590 * 12)$$

$$\text{PR} = 0,077 \text{ años}$$

$$\text{PR} = 0,929 \text{ meses}$$

De acuerdo con el cálculo anterior, el capital invertido se recupera en el primer periodo, aproximadamente un (1) mes. Véase Figura 44

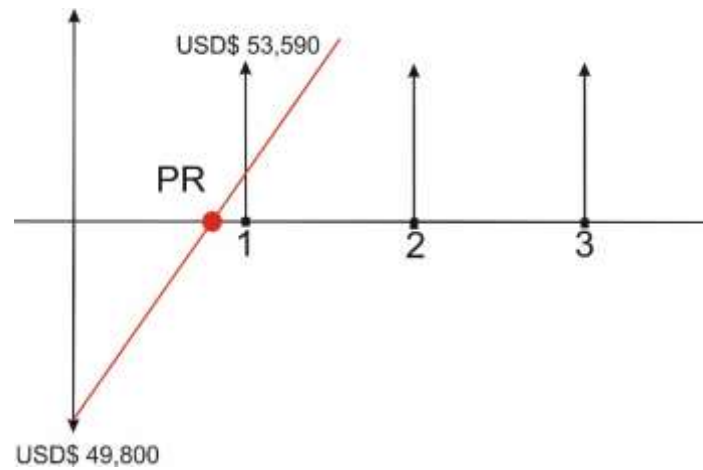


Figura 43. Periodo de Recuperación, PR.

6.6 Análisis de rentabilidad de la inversión

Existen algunas consideraciones que se deben tener en cuenta para la evaluación financiera, las cuales están consignadas en la Tabla 32, que permiten evaluar la rentabilidad de un proyecto:

Tabla 32.
Criterios de evaluación financiera

Criterio	Condición
Valor presente Neto, VPN	$VPN > 0$
Tasa Interna de Retorno, TIR	$TIR > \text{Tasa de Oportunidad}$
Relación beneficio/Costo, R B/C	$R B/C > 1$
Periodo de Recuperación de la Inversión, PR	Bajo (Menor a 60 meses)

- El Valor Presente Neto ES MAYOR que cero.
- La Tasa Interna de Retorno ES MAYOR que la Tasa de Oportunidad del inversionista.
- La Relación Beneficio-Costo ES MAYOR que uno.
- El Periodo de Recuperación de la inversión es supremamente menor a 60 meses.

Con base en los valores obtenidos en el ítem 6.5, para los criterios VPN, TIR, R B/C y PR, y teniendo en cuenta las consideraciones consignadas en la Tabla 32. Los indicadores de rentabilidad del proyecto arrojaron resultados positivos, que están consignados en la Tabla 33

Tabla 33
Criterios de evaluación financiera del proyecto de cavitación hidrodinámica

Criterio	Condición	Cumple
Valor presente Neto, VPN	USD\$ 1'831.285 > 0	SÍ
Tasa Interna de Retorno, TIR	640.708% > 2%	SÍ
Relación Beneficio/Costo, B/C	36,40 > 1	SÍ
Periodo de Recuperación de la Inversión, PR	1 mes < 60 meses	SÍ

6.7 Análisis de factibilidad

Los resultados arrojados por la evaluación financiera del proyecto para la implementación de la tecnología de cavitación hidrodinámica como alternativa para la reducción de viscosidad de crudos pesados permiten concluir que:

- √ El reemplazo del 3% de Nafta como diluyente por cavitación hidrodinámica es una inversión financieramente rentable para el inversionista.
- √ La proyección del ejercicio para ahorros superiores de nafta genera tasas internas de retorno superiores.
- √ El proyecto contempla que la utilidad está proyectada sobre la base del ahorro de nafta y tiene como dividendo el 50% para el inversionista y el 50% para la compañía operadora.
- √ El tratamiento de caudales superiores al proyectado en el ejercicio anterior (3.000 BOPD), teniendo como referencia el mismo consumo de diluyente por barril tratado, arrojará escenarios de rentabilidad superiores.

7. Conclusiones

El diseño de la placa de orificios basado en el algoritmo para diseñar medidores de flujo constituye un método acertado para generar cavitación dentro de un reactor, sin embargo, se debe ser cuidadosos a la hora de seleccionar las variables de operación.

La simulación del fenómeno de cavitación hidrodinámica realizada a partir de la técnica de dinámica computacional de fluidos permite predecir con gran certeza las variables hidráulicas relacionadas al sistema, generando un ahorro significativo en costos en la construcción del prototipo experimental.

Acoplado el modelo de simulación CFD a un modelo de complemento energético, y un modelo cinético-químico de la reacción, se pueden establecer las relaciones necesarias para predecir la reducción en viscosidad que tendrá el fluido de estudio, teniendo en cuenta, que tanto el fluido como el equipo deben poseer un modelo propio que permita reproducir el comportamiento de estos.

Realizando un análisis de sensibilidad, variando el diferencial de presión y la reducción en viscosidad esperada, se pueden crear las gráficas de energía liberada en función del diferencial de presión aplicado y viscosidad en función a la energía consumida por la reacción, lo que permite obtener el punto óptimo de operación del sistema.

La cavitación hidrodinámica supera a la cavitación ultrasónica en cuanto a la posibilidad de escalarla a nivel de campo, pues, es más fácil de controlar todos sus parámetros y requiere de menos fundamentos técnico-científicos para poder modelarla numéricamente.

La cavitación hidrodinámica, en varias ocasiones y por diversos autores, ha demostrado su efectividad al momento de reducir la viscosidad de crudos y craquear térmicamente algunos de sus componentes más pesados.

En el ejemplo utilizado dentro del presente trabajo de investigación, se manejó un caudal muy reducido en comparación con la producción diaria de hidrocarburos pesados en Colombia, y a pesar de esto, mostró una excelente rentabilidad. Esto convierte a la tecnología de cavitación hidrodinámica como una opción muy atractiva para cualquier inversionista.

La cavitación hidrodinámica es el futuro para el transporte de hidrocarburos pesados en Colombia y en el mundo.

8. Recomendaciones

Ampliar el alcance de este trabajo realizando pruebas del simulador con crudos de diferente viscosidad tendiendo como referencia los PVT, Prueba de destilación, Analisis de viscosidad y estudios composicionales basados en cromatografías liquidas del fluido.

Validar el modelo computacional con un prototipo experimental de cavitación hidrodinámica de parámetros conocidos que permita el modelado utilizando la técnica de CFD, y comparar de esta manera los resultados obtenidos en el simulador con los resultados arrojados en los análisis de laboratorio obtenidos a partir del prototipo experimental.

Se recomienda realizar un trabajo de aplicación del software de CFD en la ingeniería de petróleos, buscando obtener mejores predicciones y disminuir costos en el diseño y evaluación de equipos y sistemas.

Bibliografía

- Al-Besharah, J. M., Akashah, S. A., & Mumford, C. J. (1989). Viscosities of binary crude-oil mixtures correlated. *Ind. Eng. Chem. Res.*, págs. 2445-2449.
- Anderson, J. (2009). Governing Equations of Fluid Dynamics. En J. Wendt, *Computational Fluid Dynamics* (págs. 15 - 51). Berlin: Springer-Verlag.
- Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., & Wachem, B. v. (2012). *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Edinburgh: Cambridge University Press.
- ANSYS INC. (2017). *Fluent Theory Guide*. Ansys.
- Arrojo, S., & Benito, Y. (2007). A theoretical study of hydrodynamic cavitation. *Elsevier*, 203-211.
- Beckwith, I. E., & Bushell, D. M. (1968). *Calculation of Mean and Fluctuating Properties of the Incompressible Turbulent Boundary layer*. California: Conference on Computation Methods in Turbulent Boundary Layers.
- Besov, A. e. (2006). Degradation of hydrocarbons in the cavitation region activated by aqueous electrolyte solutions in the presence of electric field. *Elsevier*, 411-414.
- BRAND, A. E. (2015). Applying the technology of hydrodynamic cavitation treatment of high-viscosity oils to increase the efficiency of transportation. *Materials Science and Engineering*.
- Brennen, C. (2015). Cavitation in medicine. *Interface Focus*, 5.

- Cataldo, F. (2000). Ultrasound-induced cracking and pyrolysis of some aromatic and naphthenic hydrocarbons. *Ultrasonics Sonochemistry*, 35.
- Chang, R., & College, W. (2002). *Chemistry*. USA: McGraw-Hill.
- Chen, Y., & Heister, S. D. (1994). A Numerical Treatment for Attached Cavitation. *Journal of Fluids Engineering*, 116, 613-618.
- Chornet, M., & Chornet, E. (12 de Septiembre de 2008). Hydrodynamic cavitation process for treating heavy oils. *World Intellectual Property Organization*.
- Chung, T. (2010). *Computational Fluid Dynamics. Second Edition*. New York: Cambridge University Press.
- Claramunt, K., & Hirsch, C. (2013). *Transport equation cavitation models in an unstructured flow solver*. Grenoble: SHF Conference on hydraulic machines and cavitation.
- Delannoy, Y. (1990). Two phase flow approach in unsteady cavitation modelling. *ASME Cavitation and Multiphase flow forum*, 153-158.
- Diaz Alvarez, J. C. (2013). Experimental study on the efficiency of an ultrasound treatment in a continuous flow system for viscosity reduction of heavy crude oil. *Revista ION*, 2145-8480.
- Dular, M., Griessler-Bulc, T., Gutierrez-Aguirre, I., Heath, E., Kosjek, T., Klemenčič, A. K., y otros. (2016). Use of hydrodynamic cavitation in (waste)water treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 29, 577-588.
- Fedotkin, P. R., & Pandit, A. B. (1984). *Use of cavitation in manufacturing processes*. Kiev: Vishcha Shkola.
- Fomitchev-Zamilov, M. (2014). Heavy crude oil upgrading with hydrodynamic cavitation. *Quantum Vortex*, 1-8.

- Fomitchev-Zamilov, M., & Godin, M. (2012). Investigation of hydrodynamic cavitation as a means of natural crude oil and synthetic biofuel upgrading. *Quantum Potential Corporation*, págs. 1-28.
- Galano, A. (2013). *Fuerzas intermoleculares*. Obtenido de Annia Galano's Web Site: http://agalano.com/cursos/estructura/estructura_08_09_fzas_intermoleculares.pdf
- Garcia, J. A. (2008). *Matemáticas financieras con ecuaciones de diferencia finita* (Quinta ed.). Bogotá.
- Ghannam, M. e. (2012). Rheological properties of heavy & light crude oil mixtures for improving flowability. *Elsevier*, págs. 112-128.
- Gogate, P. R. (2006). Cavitation: a technology on the horizon. *Research Gate*, págs. 35-45.
- Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2001). Hydrodynamic Cavitation Reactors: A State Of the Art Review. *Reviews in Chemical Engineering*, 17(1), 1-85.
- Gogate, P., & Pandi, A. (2004). A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future. *Elsevier*, 21-27.
- Gogate, P., & Pandit, A. (2000). Engineering design methods for cavitation reactors II: Hydrodynamic cavitation. *AIChE Journal*, 46(8).
- Gonzalez Manas, J. M. (s.f.). *Fuerzas Intermoleculares*. Obtenido de Curso de biomoleculas: <http://www.ehu.eus/biomoleculas/fuerzas.htm>
- Gutierrez , M. F. (2010). *El costo del dinero en economías inflacionarias*. Prentice Hall.
- Harrison, S., & Pandit, A. (1992). The disruption of microbial cells by hydrodynamic cavitation. *9th International Biotechnology Symposium*.
- Hernandez, J. e. (2002). Sensitivity of reservoir simulations to uncertainties in viscosity. *SPE*, 1-10.

- Infante, A. (2006). *Evaluación financiera de proyectos de inversión*. Norma.
- Kanthale, P. e. (2004). Dynamics of cavitation bubbles and design of hydrodynamic cavitation reactor: cluster approach. *Elsevier*, 441-452.
- Knapp, R. T., Daley, J. W., & Hammit, R. G. (1970). *Cavitation*. New York: McGraw-Hill.
- Koop, A. H. (2008). *Numerical simulation of unsteady three-dimensional sheet cavitation*. University of Twente.
- Kulkarni, A., Kulkarni, M., & Salutagi, S. (2016). Modelling of Cavitation Using Energy Approach. *International Journal of Research in Mechanical Engineering and Technology*, 6(2), 44-50.
- Langer, J. (s.f.). *Crudos pesados: el reto para Colombia*. Obtenido de Campetrol: <http://campetrol.org/crudos-pesados-el-reto-para-colombia>
- Lecoffre, Y. (1999). *Cavitation: bubble trackers*. Balkema.
- Lee, I., & Han, J.-I. (2013). The effects of waste activated sludge pretreatment using hydrodynamic cavitation for methane production. *Elsevier*, 1450-1455.
- Li, H. (2015). Study interactions between fine particles and micron size bubbles generated by hydrodynamic cavitation. *Elsevier*, 106-115.
- Li, W.-G. (2014). Validating Full Cavitation Model With an Experimental Centrifugal Pimp. *Task Quartely*, 18(1), 81-100.
- Logan, D. L. (2012). *A first course in the Finite Element Method. Fifth Edition*. United States of America: Cengage Learning.
- Malykh, N. V., Petrov, V. M., & Mal'tzev, L. I. (2008). Ultrasonic and hydrodynamic cavitation and liquid hydrocarbon cracking. *XX Session of the Russian Acoustical Society*, 27-31.

- Maya, G. (2010). *Estatus de la recuperación mejorada de petróleo en Colombia*. Obtenido de OilProduction.net: http://oilproduction.net/files/eor_ecopetro.pdf
- Mazumder, S. (2015). *Numerical Methods for Partial Differential Equations*. Elsevier Academic Press.
- Mehrotra, A. (1991). A simple equation for predictiong the viscosity of crude oil fractions. *Chem. Eng. Res. Des*, 73, 87-90.
- Meijn, G.-J. (2015). *Physical modeling of cavitation using an enthalpy based model*. Amsterdam: Master of Science Thesis. Delft University of Technology.
- Miadonye, A. (2001). Modelling viscosity and mass fraction of bitumen-diluent mixtures. *The Journal of Canadian Petroleum Technology*, 52-57.
- Moholkar, V. S., Senthil, P., & Pandit, A. B. (1999). Hydrodynamic cavitation for sonochemical effects. *Elsevier*, págs. 53-65.
- Navarrete, M. e. (2014). Rompimiento de la viscosidad en líquidos por cavitación hidrodinámica y acústica. *SOMI: Congreso de instrumentacion*, (págs. 1-10). Puerto Vallarta.
- Nesterenko , A., & Berlizov, Y. S. (2007). The possibility of cracking hydrocarbons with cavitation. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*.
- Nesterenko, A. I., & Berlizov, Y. S. (2008). Use of cavitation for cracking hydrocarbons. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*.
- Niazi, S., Hashemabad, 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*, 166-173.
- Ozonek, J. (2012). *Application of hydrodynamic cavitation in environmental engineering*. UK: Taylor & Francis Group.

- Pal, A. e. (2009). Biodiesel production through hydrodynamic cavitation and performance testing. *Elsevier*, 619-624.
- Pandit, A. B. (2008). Modeling of hydrodynamic cavitation reactors based on orifice plates considering hydrodynamics and chemical reactions occurring in bubble. *Elsevier*, 201-209.
- Plesset, M. S. (1972). Temperature effects in cavitation damage. *Research Gate*, 559-563.
- Prosperetti, A. (1998). A generalization of the Rayleigh–Plesset equation of bubble dynamics. *The Physics of Fluids*, 25(3), 409.
- Ranade, V., & Bhandari, V. (2014). *Industrial wastewater treatment, recycling and reuse*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Rapposelli, E., & d'Agostino, L. (2003). *A barotropic cavitation model with thermodynamic effects*. Osaka: Fifth International Symposium on Cavitation.
- Raseev, S. (2003). *Thermal and Catalytic Processes in Petroleum Refining*. USA: Marcel Dekker, Inc.
- Reader-Harris, M. (2015). *Orifice Design*. Springer.
- Reklaitis, G. (1986). *Balances de materia y energía*. Mexico: Nueva Editorial Interamericana.
- Reynolds, O. (1985). On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Serie A.*, 186, 123.
- Riazi, M. R. (2005). *Characterization and Properties of Petroleum Fractions*. ASTM manual series: MNL50.
- Rueda-Velásquez, R. I., & Gray, M. R. (2017). A Viscosity-conversion Model for Thermal Cracking of Heavy Oil. *Fuel*, 197, 82-90.

- Sabalza, M. (2006). *Evaluación Económica de proyectos de cooperación*. País Vasco.
- Sattarin, M. e. (2007). New viscosity correlations for dead crude oils. *Petroleum & Coal*, 33-39.
- Schmitt, F. (2007). About Boussinesq's Turbulent Viscosity Hypotesis: Historial Remarks and a Direct Evaluation of its Validity. *Comptes Rendus Mécanique*, 9-10(335), 617.
- Schnerr, G. H., & Sauer, J. (2001). *Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics*. New Orleans: Fourth International Conference on Multiphase Flow.
- Shah, S., Jain, S., Pate, R., & Lakhera, V. (2013). CFD for Centrifugal Pumps: A Review of the State-of-the-art. *Procedia Engineering*, 51, 715-720.
- Shah, Y. T., Pandit, A. B., & Moholkar, V. S. (1999). *Cavitation reaction engineering*. New York: Springer.
- Sharma, A. (2017). *Introduction to Computational Fluid Dynamics: Development, Application and Analysis*. Chichester: Jhon Wiley & Sons Ltd.
- Singhal, A. K., M. M., Li, H., & Jiang, Y. (2002). Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model. *Journal of Fluids Engineering*, 617-624.
- Smith, J., Ness, H. V., & Abbott, M. (2005). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. Seventh Edition*. McGraw-Hill Education.
- Stenmark, E. (2013). *On Multiphase Flow Models in ANSYS CFD Software*. Suecia: Chalmers University of Technology. Master Thesis.
- Veersteg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Harlow: Pearson Education Limited.
- Wilcox, D. (2006). *Turbulence Modelling for CFD. Thid Edition*. California: DCW Industries, Inc.

- Wu, Y., Liu, S., Dou, H.-S., & Zhang, L. (2011). Simulations of unsteady cavitating turbulent flow in a Francis turbine using the RANS method and the improved mixture model of two-phase flows. *Engineering with Computers*, 27, 235-250.
- Yan, Y., & Thorpe, R. (1990). Flow regime transitions due to cavitation in the flow through an orifice. *Elsevier*, 1023-1045.
- Zhiyin, Y. (2014). Large-eddy simulation: past, present and the future. *Journal of Aeronautics*.
- Zhu, J., Chen, Y., Zhao, D., & Zhang, X. (2015). Extension of the Schnerr–Sauer model for cryogenic cavitation. *European Journal of Mechanics*, 52, 1-10.
- Zwart, P. J., Gerber, A. G., & Belamri, T. (2004). *A Two-Phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics*. Yokohama: Fifth International Conference on Multiphase Flow.