

Estudio del uso de las ondas sónicas en la deshidratación de crudos pesados (ESOTM)

Angela Stefany Tarazona Robles y Danna Vanessa Noguera Llanos

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera de Petróleos

Director

Julio César Pérez Angulo

M.Sc. © Ingeniería Énfasis En Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos
Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Agradezco a Dios por la vida que me ha dado, por permitirme nacer en este hermoso país que es Colombia con todas sus riquezas culturales y del medio ambiente, también por darme tantas oportunidades de vida y la sabiduría de aprovecharlas, del mismo modo el concederme la valentía para siempre tratar de dar mi mejor esfuerzo frente a todas las situaciones de vida.

Doy gracias a mi familia y mis mascotas las cuales me han dado todo su amor y calidez durante toda mi vida, ellos son la razón de mi fortaleza y mi deseo de ser mejor persona día tras día, sobre todo a mi madre Emely la cual ha sido un ejemplo de vida tanto en su entereza, en su amor por la naturaleza, la compasión por las personas, su deseo por mejorar y su gran aprecio por la educación así mismo a mi gran amigo de vida, mi hermano Anderson junto con él realizamos muchos inventos de niños y ahora de grandes nos queda es plasmarlos en la realidad y ser las personas que Dios quiere que seamos en este mundo, por último en memoria de Katy mi compañera de vida hasta su partida con Dios.

Del mismo modo Agradezco a todas las personas que he conocido y las que voy a conocer por todo el cariño y las enseñanzas que aportan a mi vida, por apoyarme en las diferentes etapas y momentos de mi vida debido a que con sus ejemplos o palabras de vida me permiten comprender todas las oportunidades y bendiciones que tiene este mundo.

Del mismo modo quiero agradecer al capítulo estudiantil SPWLA UIS en el cual pude conocer grandes compañeros y pude desarrollar mucho mi potencial como persona, como líder y como estudiante etc., todos los años en los que estuve en este capítulo me llenaron de muchas cosas buenas, me dio más que un equipo de trabajo me dio una familia en la universidad en donde el compañerismo y el apoyo se siente en todos sus integrantes, también me inspiró y me retó para participar de forma internacional en el concurso de papers de SPWLA internacional en el cual pude trabajar con profesionales de la industria así mismo conocer personas de otros lugares y poner en práctica mis conocimientos de la carrera y del inglés generando así un gran crecimiento profesional en mí.

Angela Stefany Tarazona Robles

Dedicatoria

A Dios, padre todo poderoso, por su amor incondicional, porque gracias a él y a sus bendiciones infinitas he logrado llegar hasta este punto, logré conocer a personas maravillosas, hacer nuevas amistades, conocer diversas culturas y enriquecer mi vida de experiencias y conocimientos valiosos acompañada de seres extraordinarios, llenos de mucho potencial y cosas buenas para aportar.

A mis padres, Rafa y Vivi, que siempre han trabajado duro por sacarme adelante, por ser mi motor, porque gracias a ellos y a su increíble esfuerzo pude llegar a esta increíble universidad y conseguir este título. A ellos, porque sin importar lo duro que fuera el camino, siempre tenían palabras de aliento y motivación para darme, porque sin importar la situación, siempre estaban disponibles para tomar mi mano y ayudarme a continuar. Gracias por ser incondicionales en mi vida, por mostrarme lo lindo e importante del amor, del respeto, del compromiso, de la responsabilidad, por ser los mejores padres que alguien puede desear tener y por permitirme tener los mejores modelos a seguir.

A mi hermanito, Seba, mi negro, la felicidad de mi vida, mi compañero, mi mejor amigo, por ser mi apoyo siempre, por regalarme una sonrisa en los momentos más duros, por entenderme, por amarme, por cuidarme como ha sabido hacerlo, por aconsejarme y escucharme, por ser la mejor compañía que he tenido en este increíble viaje llamado vida. Gracias por estar cada vez que te necesité, por tu amor y tus palabras de aliento.

A mi novio, Genghi, por ser mi polo a tierra, por estar conmigo en las buenas y las no tan buenas, por apoyarme en todo lo que se me ocurre y ayudarme a sacarlo adelante, por darme la fuerza emocional y mental para seguir luchando y continuar avanzando, por permitirme descubrir lo hermoso de compartir tus días con alguien que te entiende, te ama, te valora, se preocupa por ti y que lo único que quiere es verte grande y logrando tus sueños. Gracias, amor, por enseñarme a entenderme, a quererme, a aceptar lo que no puedo cambiar y a trabajar en lo que sí puedo.

A SPE UIS Student Chapter, por mostrarme que siempre soy capaz de más, por ayudarme a crecer como persona, por aportar constantemente a mi desarrollo profesional, y, sobre todo, por regalarme una segunda familia, una con la que siempre he contado, en la que siempre he encontrado apoyo, buenas personas, excelentes profesionales y grandes amigos con los que he compartido momentos increíbles. Gracias a todos por estar ahí.

Por último, pero no menos importante, a los maravillosos amigos que esta grandiosa experiencia me dejó, por hacer de mi estadía en el campus y en Bucaramanga algo inolvidable, por regalarme tantos momentos de felicidad y alegría. Los llevo a todos en mi corazón.

Gracias a todos por acompañarme en este camino y ayudarme a decir ¡Lo logré!

Danna Vanessa Noguera Llanos

Agradecimientos

Las Autoras de este trabajo agradecen especialmente:

A Dios, por permitirnos finalizar con éxito esta carrera, obtener nuestro título y, además de eso ser muy buenas amigas.

A nuestra queridísima alma mater, la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos las herramientas y conocimientos necesarios para lograr convertirnos en grandes profesionales, además de permitirnos pasar todos estos años en sus instalaciones y tener tantas aventuras y momentos felices, rodeadas de excelentes amigos y buenos compañeros.

A todos los profesores que hemos tenido tanto en la academia como en la vida, por estar prestos a ayudarnos siempre, a transmitirnos sus saberes y aportar positivamente a nuestro desarrollo integral, en especial, a nuestro director de tesis, el M.Sc. Julio César Pérez Angulo, por su invaluable guía y el tiempo dedicado a orientarnos, así mismo al Grupo de Investigación en Tomografía Computarizada para Caracterización de Yacimientos (GIT) el cual nos apoyó y enfocó en la creación de este proyecto.

A los capítulos estudiantiles SPWLA UIS Student Chapter y SPE UIS Student Chapter por darnos la oportunidad de explotar todo nuestro potencial tanto en lo académico como en lo personal, por permitirnos ser líderes y por brindarnos la posibilidad de vivir y crear grandiosos recuerdos junto con otros excelentes compañeros.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	17
1 Objetivos	18
1.1 Objetivo General.....	18
1.2 Objetivos Específicos.....	18
2 Marco Teórico.....	19
2.1 Emulsiones.....	19
2.1.1 Clasificación de las Emulsiones.....	19
2.1.1.1 La fase continua de la emulsión.....	19
2.1.1.2 Tamaño de la gota presente en la emulsión.	21
2.1.1.3 La concentración volumétrica de la fase dispersa (Φ).	22
2.1.1.4 El grado de estabilidad.....	23
2.1.2 Agentes que afectan una emulsión.....	24
2.1.2.1 Los ácidos nafténicos.....	24
2.1.2.2 Los asfáltenos.....	24
2.1.2.3 Resinas.	24
2.1.2.4 Ácidos carboxílicos.....	25
2.1.2.5 Ácido sulfúrico.....	25
2.1.2.6 Las partículas.	25
2.2 Ondas Sónicas.....	26

2.2.1	Parámetros que caracterizan una Onda	26
2.2.1.1	Amplitud (A).....	26
2.2.1.2	Frecuencia (f).....	27
2.2.1.3	Velocidad (c).....	28
2.2.1.4	Longitud de onda (λ).....	28
2.2.2	Espectro acústico	28
2.2.2.1	Intensidad (I).....	28
2.2.2.2	Tono.....	28
2.2.2.3	Timbre.....	29
2.2.2.4	Evolución Temporal.....	29
2.2.3	Clasificación de las ondas sónicas	29
2.2.3.1	Según el desplazamiento de las partículas.....	29
2.2.3.2	Según la frecuencia de la onda.....	30
2.2.4	Ultrasonido y sus características.....	31
3	Panorama actual de las metodologías usadas en la deshidratación de crudos pesados	35
3.1	Métodos de deshidratación de crudo pesado a nivel mundial.....	35
3.1.1	Método químico.....	35
3.1.2	Método Mecánico.....	36
3.1.3	Método Eléctrico.....	37
3.1.4	Método Térmico.....	38
3.2	Métodos de deshidratación de crudo pesado en Colombia.....	38
3.3	Conceptos clave para la deshidratación	43
3.3.1	Mecanismos de desestabilización de la emulsión.....	43

3.3.2 η_w la tasa de deshidratación	44
4 Ondas sónicas en la industria Oil & Gas	46
4.1 Componentes para generar una onda ultrasónica.....	48
4.2 Fenómenos físicos causados por las Ondas Ultrasónicas al interactuar con el crudo durante la deshidratación.	53
4.2.1 Transferencia de presión acústica.	53
4.2.2 Fuerza acústica.....	54
4.2.2.1 Fuerza acústica primaria	55
4.2.2.2 Fuerza acústica secundaria.....	56
4.2.3 Cambio en la temperatura	57
4.2.4 Cavitación acústica	58
4.2.5 Flujo acústico	60
4.2.6 Acción en el medio	61
4.2.7 Acción en la interfase.....	62
4.2.8 Acción en la Gota.....	62
4.3 Efectos de las ondas ultrasónicas sobre el crudo en el proceso de deshidratación, encontrados en la literatura	64
4.3.1 Intensidad Vs Deshidratación.	64
4.3.2 Frecuencia Vs Deshidratación.	68
4.3.4 Potencia Vs Deshidratación.	69
4.3.5 Tiempo de irradiación Vs Deshidratación.	71
4.3.6 Amplitud Vs Deshidratación.....	76
4.4 Otros factores que influyen en la deshidratación de los crudos, hallados en la literatura.	78

4.4.1 Temperatura.	78
4.4.2 Agua en emulsión.	82
4.4.3 Adición de químicos.	84
4.4.4 Presencia de tensoactivos.....	88
5 Principales características de las ondas que posibilitan la deshidratación.....	93
5.1 Intensidad del sonido.	93
5.2 Frecuencia.	93
5.3 La potencia.....	94
5.4 Amplitud.	94
6 Tipo de onda sónica que permite la deshidratación de crudos pesados: Rangos operacionales recomendados.	97
7 Conclusiones.....	101
8 Recomendaciones.....	103
Referencias Bibliográficas.....	104
Anexos... ..	112

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Ventajas y desventajas de los métodos de deshidratación más usados en Colombia.	41
Tabla 2. Equipos usados en la industria del petróleo para deshidratar con ultrasonido.	49
Tabla 3. Cuadro comparativo de los mejores resultados hallados en la literatura para deshidratación al aplicar ultrasonido.	97
Tabla 4. Rangos de aplicación sugeridos de ultrasonido para deshidratar crudos pesados.	99

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Emulsiones Directas O/W	20
Figura 2. Emulsiones Inversas W/O.	20
Figura 3. Emulsiones Múltiples W/O/W y O/W/O.....	21
Figura 4. Clasificación de emulsiones según la concentración de la fase dispersa.	23
Figura 5. Amplitud de una onda.	27
Figura 6. Periodo y Frecuencia de una onda.....	27
Figura 7. Longitud de una Onda.	28
Figura 8. Ondas longitudinales.	29
Figura 9. Ondas Transversales.....	30
Figura 10. Espectro Sonoro.....	30
Figura 11. Desigualdad acústica en la frontera de dos medios diferentes.	32
Figura 12. Distribución de un campo de onda incidente en una cámara rectangular.	34
Figura 13. Esquema de los mecanismos de desestabilización de una emulsión.	43
Figura 14. Contenido de agua respecto a un campo estacionario y no estacionario de al aplicar ultrasonido.....	51
Figura 15. Sistema de Deshidratación con Ultrasonido.....	52
Figura 16. Cambio de tamaño en la gota al aplicar la onda ultrasónica	54
Figura 17. Diagramas esquemáticos de las gotas de agua en aceite al aplicar ultrasonido.	55
Figura 18. Destrucción de una microburbuja.....	58
Figura 19. Colapso de una burbuja.	60

Figura 20. Dirección del flujo acústico.....	61
Figura 21. El efecto de la intensidad acústica en la tasa deshidratación de la emulsión.	65
Figura 22. Curva de relación entre la intensidad del sonido y la tasa de deshidratación.....	66
Figura 23. Variación del contenido de agua en emulsión Vs la Intensidad Acústica.....	67
Figura 24. Efecto de la Intensidad Acústica sobre el tamaño de las gotas de agua en emulsión..	68
Figura 25. Curva de relación entre la frecuencia del sonido y la tasa de deshidratación.	69
Figura 26. Curva de relación entre la potencia del sonido y la tasa de deshidratación.	70
Figura 27. El impacto del ultrasonido a diferentes potencias.	71
Figura 28. Efecto del tiempo de irradiación en la tasa de deshidratación de la emulsión.	72
Figura 29. Resultados de la desemulsificación ultrasónica del crudo 1.	73
Figura 30. Resultados de la desemulsificación ultrasónica del crudo 2.	74
Figura 31. Curva de relación entre el tiempo de irradiación ultrasónica y la tasa de deshidratación.	75
Figura 32. Variación del tamaño de la gota de agua en emulsión Vs El tiempo de irradiación de ultrasonido.....	76
Figura 33. Fracción de volumen (%) de la capa de aceite y la capa de agua a diferentes amplitudes ultrasónicas – Grupo 3.	77
Figura 34. Curva de relación entre la temperatura y la tasa de deshidratación.	79
Figura 35. Fracción de volumen (%) de la capa de emulsión para diferentes amplitudes de ultrasonido – Grupo 1	80
Figura 36. Fracción de volumen (%) de la capa de emulsión para diferentes amplitudes de ultrasonido – Grupo 2.	80

Figura 37. Fracción de volumen (%) de la capa de emulsión para diferentes amplitudes de ultrasonido – Grupo 3.	81
Figura 38. Curva de relación entre la proporción de agua en la emulsión y la tasa de deshidratación.	83
Figura 39. Resultados de la deshidratación química con irradiación ultrasónica del crudo N°3 con el químico 1.....	84
Figura 40. Resultados de la deshidratación química con irradiación ultrasónica del crudo N°3 con el químico 2.....	85
Figura 41. Comparación de los diversos comportamientos de la emulsión al aplicar diferentes métodos de deshidratación a 40°C.....	86
Figura 42. Comparación de los diversos comportamientos de la emulsión al aplicar diferentes métodos de deshidratación a 70°C.....	87
Figura 43. Distribución de gotas de agua a diferentes condiciones de deshidratación a 70°C.....	88
Figura 44. El efecto de la irradiación ultrasónica cuando hay presencia de asfáltenos.	90
Figura 45. El efecto de la irradiación ultrasónica en algunas partículas sólidas.....	91
Figura 46. Esquema de una onda acústica cuando se induce la cavitación en términos de la amplitud de presión.	95
Figura 47. Diagrama de los parámetros más importantes de la onda ultrasónica para deshidratar un crudo.	96

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A. Característica de los crudos usados en el estudio de Khajehesamedini et al., (2018).	112
Anexo B. Caracterización de las muestras usadas en el estudio de Schoepel & Howard, (1996)	113
Anexo C. Nomenclatura de descripción de las características de los escenarios de estudio para deshidratación con ultrasonido, para el estudio realizado por Chun Haur, (2016).....	114
Anexo D. Tamaño de gota de agua en capa de emulsión. Estudio realizado por Chun Haur, (2016).	115
Anexo E. Caracterización de la muestras usada en el estudio de Yi et al., (2017).....	116
Anexo F. Características del crudo usado durante el estudio de Xie et al., (2015)	117
Anexo G. Condiciones iniciales y resultados de la investigación realizada por Giraldo Atehortúa, et al., (2019).	118

Resumen

Título: Estudio del uso de las ondas sónicas en la deshidratación de crudos pesados (ESOTM)^{1*}

Autores: Angela Stefany Tarazona Robles, Danna Vanessa Noguera Llanos^{2**}

Palabras Clave: Deshidratación, ondas sónicas, emulsiones, ultrasonido, Crudo pesado.

Descripción:

Durante las operaciones de producción, el petróleo crudo sale del yacimiento con cierto porcentaje de agua en emulsión, esto, aunque es natural, representa un problema para el proceso, ya que, le resta calidad al crudo, dificultando su venta y transporte al no cumplir con la normativa estipulada para tales fines. Para solucionar dicho inconveniente, existen diferentes métodos de deshidratación de crudos, el más usado es el método químico, aunque este suele tener costos elevados por la cantidad de químicos necesarios para lograr el objetivo.

El propósito de esta investigación, se centra en estudiar el método mecánico de deshidratación de crudos pesados utilizando ondas ultrasónicas y determinar si este método posee la eficiencia necesaria para ser implementado como método principal de deshidratación, para lograrlo se realizó una revisión bibliográfica extensa sobre los conceptos fundamentales del método y varios casos de estudio experimentales realizados a nivel mundial sobre la implementación de la irradiación ultrasónica para la desemulsificación y deshidratación de crudos pesados.

Dentro de los resultados encontrados en la literatura, este método logró obtener eficiencias de desemulsificación desde 73.33% hasta 99.7%, así como una reducción en el tiempo necesario para la sedimentación de las gotas y la reducción significativa del uso de químicos en el sistema.

Esto tiene implicaciones favorables para el uso de ondas de ultrasonido, ya que se puede considerar un método eficiente y funcional para la deshidratación de crudos pesados, teniendo en cuenta que debe mantenerse en rangos óptimos de frecuencia, intensidad y potencia.

Abstract

^{1*} Trabajo de Grado

^{2**} Facultad de Ingeniería fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Julio César Pérez Angulo. M.Sc. © Ingeniería Énfasis En Hidrocarburos. Codirector: Jimena Lizeth Gómez Delgado. M. Sc. Ingeniería de Petróleo y Gas.

Title: Study of the use of sonic waves in the dehydration of heavy crude oils (ESOTM)^{3*}

Authors: Angela Stefany Tarazona Robles, Danna Vanessa Noguera Llanos^{4*}

Key Words: Dehydration, sonic waves, emulsions, heavy oil, ultrasonic.

Description:

During production operations, crude oil leaves the field with a certain percentage of water in emulsion, this, although natural, represents a problem for the process, since it reduces the quality of the crude, making its sale and transportation difficult since it does not comply with the regulations stipulated for such purposes. To solve this problem, there are different methods of crude dehydration, the most used is the chemical method, although this usually has high costs due to the amount of chemicals needed to achieve the objective.

The purpose of this research is focused on studying the mechanical method of heavy crude oil dehydration using ultrasonic waves and determining if this method has the necessary efficiency to be implemented as the main dehydration method. To achieve this, an extensive literature review was carried out on the fundamental concepts of the method and several experimental case studies carried out worldwide on the implementation of ultrasonic irradiation for the deemulsification and dehydration of heavy crude oil.

Among the results found in the literature, this method was able to obtain deemulsification efficiencies from 73.33% to 99.7%, as well as a reduction in the time required for droplet settling and a significant reduction in the use of chemicals in the system.

This has favorable implications for the use of ultrasound waves, since it can be considered an efficient and functional method for the dehydration of heavy crudes, considering that it must be maintained in optimal ranges of frequency, intensity, and power.

^{3*} Degree Work

^{4*} Faculty of Physicochemical Engineers. Petroleum Engineer School. Director: Julio César Pérez Angulo. M.Sc. © Engineering Emphasis On Hydrocarbons. Codirector: Jimena Lizeth Gómez Delgado. M. Sc. Oil & Gas Engineering

Glosario

ESOTM: Estimulación sónica

PTZS: Piezoeléctrico de zircotitanato de plomo

CRUDO PESADO: Comprende los crudos con gravedades API entre los 22,3° y los 10°.

Introducción

El petróleo es un hidrocarburo oscuro y aceitoso, una sustancia compleja, resultado de la mezcla de muchos compuestos químicos que, luego de ser sometido a varios procesos fisicoquímicos logra convertirse en materia prima de varias industrias que soportan el bienestar de la humanidad.

El petróleo, se encuentra almacenado en rocas porosas, puede localizarse a diferentes pies de profundidad y coexiste con otros fluidos como el agua y el gas; de tal manera que, una vez se inicia la extracción del petróleo, se producen también los fluidos antes mencionados.

El aceite debe ser tratado con el propósito de que cumpla con las condiciones establecidas para la venta y transporte, para ello se realizan diversos tratamientos y uno de los más importantes es la deshidratación, la cual ayuda a reducir la cantidad de agua libre o en emulsión que puede encontrarse asociada al aceite, la primera se separa fácilmente por acción de la gravedad y la segunda tiene diversos factores que dificultan la desemulsificación. Para tratar las emulsiones se aplican diferentes métodos de acuerdo con el tipo de crudo, dentro de los que se encuentran los métodos mecánicos, químicos, eléctricos y térmicos, así como diversas combinaciones entre ellos. En el desarrollo de este trabajo se presenta una recopilación de la información disponible en la literatura referente a los tipos de emulsiones presentes en los crudos, así como los factores que afectan positiva y/o negativamente al rompimiento de estas, además se exponen los diferentes métodos existentes en la industria para la deshidratación de crudos y posteriormente se da introducción al tema de las ondas sónicas, explicando las características con las que cuentan, su clasificación e indicando algunas aplicaciones que estas han tenido en la industria Oil & Gas.

1 Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos generales y específicos de la investigación.

1.1 Objetivo General

Estudiar el uso de las ondas sónicas en la deshidratación de crudos pesados.

1.2 Objetivos Específicos

- Investigar las diferentes metodologías que se están aplicando en la actualidad para la deshidratación de crudos pesados.
- Revisión del estado del arte de las ondas sónicas y sus efectos sobre los crudos pesados.
- Identificar las características de las ondas sónicas que posibilitan la deshidratación de los crudos pesados.
- Seleccionar el tipo de onda sónica que contenga las características adecuadas y permita la deshidratación de crudos pesados.

2 Marco Teórico.

En este capítulo, se expondrán los fundamentos teóricos y conceptos básicos para el desarrollo y entendimiento de este trabajo; como el concepto de emulsiones, su clasificación, factores que afectan su estabilidad, y las ondas sónicas y su respectiva caracterización.

2.1 Emulsiones

Para que exista la emulsión es necesario aplicar suficiente agitación mecánica a mínimo dos sustancias inmiscibles líquidas las cuales en presencia de un tensoactivo lo cual genera la emulsión; hay diferentes agentes que actúan como tensoactivos entre los cuales se resalta de manera general dos tipos, los naturales del aceite y de la roca de igual modo los artificiales, estos últimos son inyectados para diversas funciones al yacimiento o al proceso de producción, lo que favorece la estabilidad de la emulsión debido a los tensoactivos presentes, además dependiendo del método de recobro aplicado, existe mayor o menor cantidad de energía aplicada lo que genera turbulencia en el sistema, produciendo mejores condiciones para la generación emulsión en el yacimiento, además, al sistema se le debe adicionar las condiciones de turbulencia de las facilidades de producción lo que en consecuencia da como resultado emulsiones al producir el crudo.

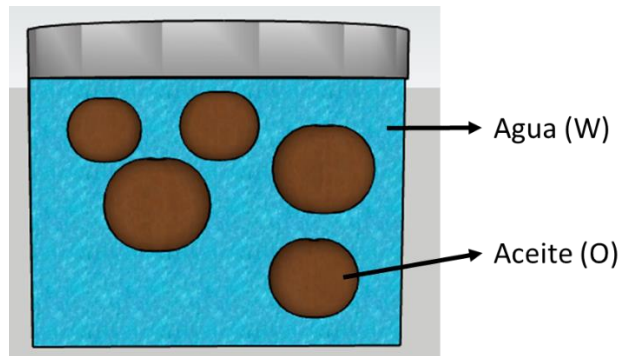
2.1.1 Clasificación de las Emulsiones

Las emulsiones se clasifican de acuerdo con varias características, las más comunes encontradas en la literatura son:

2.1.1.1 La fase continua de la emulsión. De acuerdo con lo planteado por (Martínez Rodríguez, 2014) es posible clasificar las emulsiones según la fase continua de la siguiente manera:

2.1.1.1.1 Directas. En las emulsiones directas, la fase continua es el agua y la fase dispersa es el aceite (O/W), lo cual hace referencia a que el aceite se encuentra disperso en forma de gotas dentro del agua como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Emulsiones Directas O/W

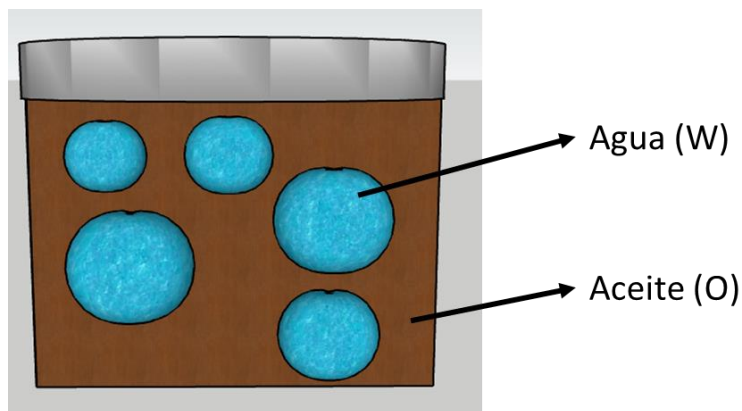


Nota. Representación gráfica de una emulsión directa, gotas de aceite dentro de una fase continua de agua.

Elaboración propia

2.1.1.1.2 Inversas. En este caso la fase continua es el aceite y el agua es la fase dispersa como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Emulsiones Inversas W/O.

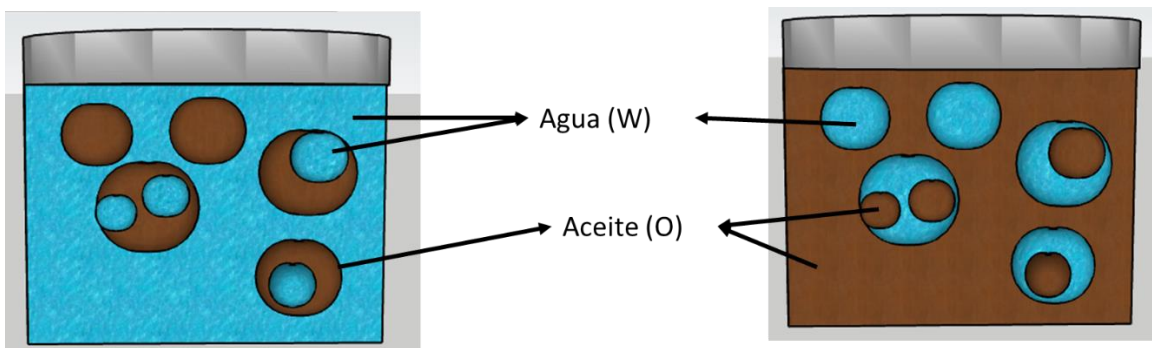


Nota. Representación gráfica de una emulsión inversa, gotas de agua dentro de una fase continua de aceite.

Elaboración propia

2.1.1.1.3 Múltiple. Este tipo de emulsiones son mucho más complejas, se dan cuando las gotas de aceite de una emulsión O/W, contiene en su interior gotas de agua (W/O/W) o en el interior de las gotas de agua en una emulsión W/O aparecen gotas de aceite (O/W/O), como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Emulsiones Múltiples W/O/W y O/W/O.



Nota. Representación gráfica de una emulsión múltiple, gotas de agua dentro de una gota de aceite, que a su vez está contenida en una fase continua de agua. Elaboración propia

2.1.1.2 Tamaño de la gota presente en la emulsión. Dependiendo del tamaño de la fase dispersa se origina diferentes tipos de estabilidad. Según Sheng, J. J. (2010) y Gómez Vega, (2014), se pueden clasificar en:

2.1.1.2.1 Macroemulsión. Son las emulsiones que poseen un tamaño de gotas mayor a $0.5 \mu\text{m}$ (500nm). Este es el tipo de emulsión que se encuentra más comúnmente en la industria del petróleo.

2.1.1.2.2 Nanoemulsiones. Son las que tiene el tamaño de gota menor a $0.5 \mu\text{m}$.

2.1.1.2.3 Microemulsión. Estas son las emulsiones que poseen un tamaño de partícula comprendido entre 0.05 y $0.002 \mu\text{m}$, aunque están en el rango del nanodominio no es una

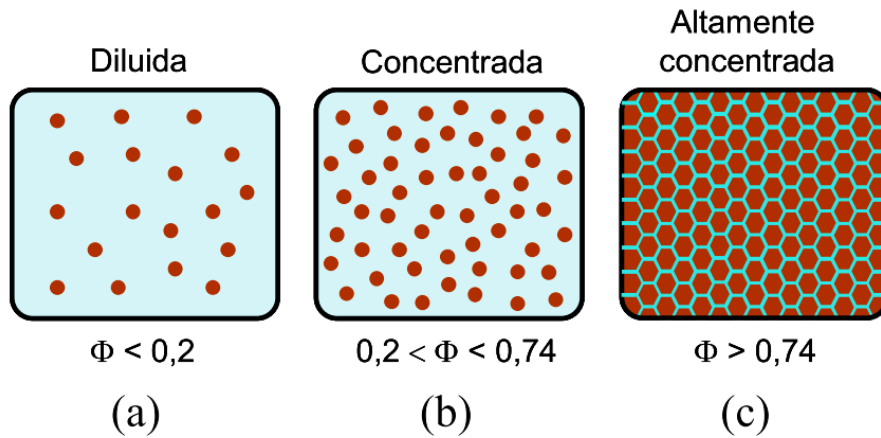
subcategoría de la nanoemulsión y se diferencian porque cuando el sistema tiene las condiciones termodinámicas y de composición adecuadas, se forman de manera casi espontánea debido a que no requieren un alto cizallamiento para su formación, mientras que la macro y nano emulsión sí necesitan mayor aporte de energía para su formación. Así mismo, los sistemas con estas características son considerados termodinámicamente estables.

2.1.1.3 La concentración volumétrica de la fase dispersa (Φ). Según Martínez Rodríguez, M., (2014) y Gómez Vega (2014) se refiere a la concentración de las gotas dispersas de una nanoemulsión en términos de la fracción en volumen de fase dispersa (ϕ). y se dividen en 3 categorías:

2.1.1.3.1 Emulsión diluida. Se consideran emulsiones diluidas si la concentración de la fracción en volumen de fase dispersa es inferior a 0,2.

2.1.1.3.2 Emulsión concentrada. Este tipo de emulsión tiene una concentración de la fase dispersa entre 0,2 y 0,74. Son emulsiones con comportamiento plástico o pseudoplástico.

2.1.1.3.3 Altamente concentradas. Son las emulsiones que poseen una fracción volumétrica superior a 0.74. Debido a la alta concentración, las gotas se deforman a estructuras poliédricas similares a las estructuras de la espuma y con aspecto sólido.

Figura 4. Clasificación de emulsiones según la concentración de la fase dispersa.

Nota: Tomado de Martínez Rodríguez, M., (2014), *Formación y caracterización de emulsiones altamente concentradas de betún en agua*.

2.1.1.4 El grado de estabilidad. De acuerdo a lo planteado por Guzmán López, (2018), el grado de estabilidad hace referencia a la dificultad de rompimiento de una emulsión, por lo que es posible clasificarlas en tres grupos:

2.1.1.4.1 Inestables. Son aquellas emulsiones que consiguen separarse fácilmente en cuestión de minutos.

2.1.1.4.2 Medias. Este tipo de emulsiones tarda un poco más en separarse, el tiempo de separación se aproxima a varias horas.

2.1.1.4.3 Estables. Son las emulsiones más difíciles de romper, el tiempo de separación necesario es de días o meses. Normalmente se requiere la intervención de químicos u otro factor externo para inducir la separación.

2.1.2 Agentes que afectan una emulsión

La evaluación química y detallada del crudo es necesaria para comprender el comportamiento dentro del yacimiento y predecir el tipo de emulsión que se generará, cada método de recobro transmite diferente energía al yacimiento por ende algunos tienen mayor facilidad para generar emulsiones más apretadas que otros. Los agentes presentes en el crudo que afectan la emulsión pueden llegar a ser de tipo tensoactivo y sólidos finamente divididos, los cuales afectan a la emulsión en estabilidad o en la reología. Dichos agentes naturales son:

2.1.2.1 Los ácidos nafténicos. Son interfacialmente activos y se absorben en las interfases agua-aceite para formar una monocapa y otras estructuras coloidales en la interfase (Ese & Kilpatrick, 2004)

2.1.2.2 Los asfáltenos. Producen la formación de películas interfaciales elásticas que evitan la floculación y la coagulación de la fase dispersa de la emulsión (Orea et al., 2017; Ese & Kilpatrick, 2004). Son crudos generalmente ácidos y pesados. Estos se forman naturalmente en el yacimiento por biodegradación del petróleo, ya sea en la roca generadora o en el viaje hacia la roca almacén. Los asfáltenos se distinguen generalmente por tener anillos aromáticos rodeados por algunos heteroátomos, como azufre (S), nitrógeno (N) y oxígeno (O) (Velásquez y Pereira, 2014), Los asfáltenos están como sólidos finos o como coloides y dada la presencia de resinas se produce la relación resinas-asfáltenos, que genera la agregación de estos últimos.

2.1.2.3 Resinas. Las resinas son propensas a perder oxígeno y azufre, átomos que se pierden a través de la desulfuración, descarboxilación y craqueo, mientras que los asfáltenos muestran una fuerte tendencia en adquirir estos heteroátomos. Son polares y por lo tanto menos capaces de estabilizar asfáltenos los cuales a su vez se vuelven más polares y se agreguen. Este

aspecto es muy importante en la estabilización de la emulsión, ya que, se ha demostrado que los asfáltenos agregados forman una capa viscosa o red tridimensional reticulada con alta rigidez mecánica que rodea el agua dispersa previniendo su coalescencia (Velásquez y Pereira, 2014).

2.1.2.4 Ácidos carboxílicos. Tienden a formar emulsiones muy estables, pero también pueden formar micro emulsiones debido a cambios en la movilidad y en la densidad en la interfase w/o, este reduce el pH del sistema. Se generan en altas temperaturas (540 ° C), por la oxidación generada por el craqueo térmico y la disponibilidad de oxígeno dentro del yacimiento (Salazar Barrero, 2016).

2.1.2.5 Ácido sulfúrico. Al igual que el ácido carboxílico reducen el pH, ocasionando un aumento en el carácter ácido en la fase acuosa, la cual al interactuar con algunos componentes litológicos del reservorio genera la floculación de los asfáltenos. Este ácido se produce en condiciones de combustión in situ cuando el oxígeno reacciona con el sulfuro de hidrógeno y el azufre orgánico (Orea et al., 2017).

2.1.2.6 Las partículas. Pueden ser de arcilla finas como la caolinita, la ilita y/o la dolomita (arcilla encontrada en las areniscas), óxidos metálicos y óxido de silicio (SiO₂) estabilizan las emulsiones interfacialmente, así mismo hay adsorción con asfáltenos que mejoran fuertemente la emulsificación de agua en aceite. La efectividad como tensoactivo depende de la concentración de sólidos y del tamaño de la partícula, ya que, hay una relación de la concentración de finos. (Sullivan y Kilpatrick, 2002; Sztukowski y Yarranton, 2004).

2.2 Ondas Sónicas

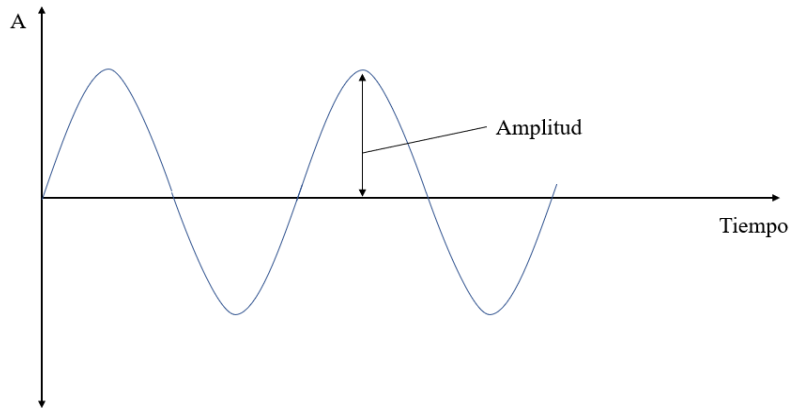
Valdés (2014) define una onda como la propagación de una perturbación desde un punto X a un punto Y, en el que sólo se transporta energía, esto debido a que el movimiento realizado por las partículas es oscilatorio hacia adelante y atrás, pero al final vuelven a quedar en su posición inicial.

Una onda sonora o sónica es una onda mecánica, esto quiere decir que necesita de un medio material elástico para poder propagarse, un medio que se pueda dilatar y comprimir como lo son los gases, líquidos y sólidos. Aunque es bien sabido que la distancia entre las moléculas de los gases permite un mayor movimiento de las moléculas, a nivel microscópico, esa distancia también existe entre las moléculas que conforman un sólido y un líquido, con la diferencia de que dicha distancia es mucho menor, pero es precisamente esto lo que permite que la velocidad con la que se desplaza el sonido sea mayor en sólidos y líquidos que en los gases, ya que al tener poco espacio para moverse, las moléculas chocan rápidamente unas con otras permitiendo que la onda sónica viaje, mientras que en el caso del gas, deben desplazarse una distancia mayor, provocando velocidades de desplazamiento más bajas.

2.2.1 Parámetros que caracterizan una Onda

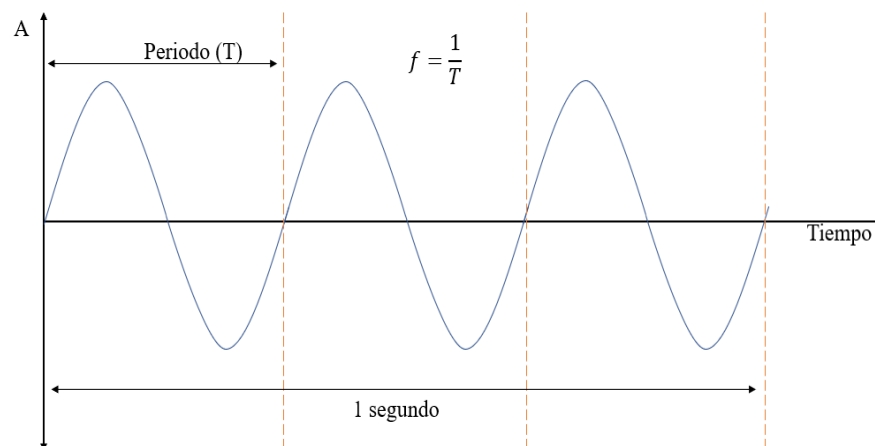
De acuerdo con Nava (2005), las ondas sonoras están caracterizadas por los siguientes parámetros:

2.2.1.1 Amplitud (A). Es la diferencia existente entre los valores máximos y mínimos en un punto del movimiento de la onda, este representa también una variación de la presión en ese punto como se grafica en la Figura 5.

Figura 5. Amplitud de una onda.

Nota. En la figura se muestra gráficamente la forma en la que se puede medir u observar la amplitud de una onda. Elaboración propia.

2.2.1.2 Frecuencia (f). Hace referencia al número de veces que un fenómeno se repite así mismo en un segundo, en el caso de las ondas, representa el número de oscilaciones por segundo. Es medido en Hertz (Hz) así mismo matemáticamente es el inverso del periodo (T), se puede observar en la Figura 6.

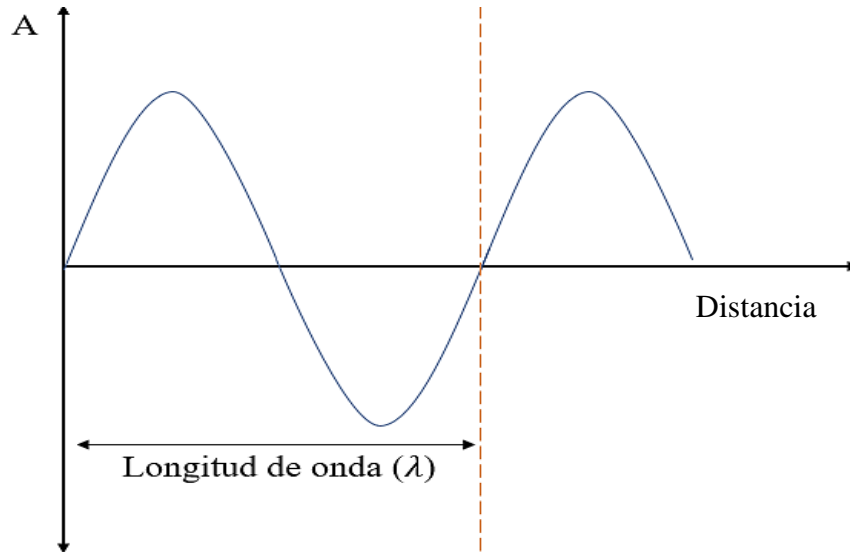
Figura 6. Periodo y Frecuencia de una onda.

Nota. En la figura se muestra gráficamente la forma en la que se puede determinar el periodo y la ecuación que permite calcular la frecuencia de una onda. Elaboración propia.

2.2.1.3 Velocidad (c). hace referencia a la velocidad a la que se mueve la onda y depende del material en el que se mueve y de la temperatura.

2.2.1.4 Longitud de onda (λ). se define como la distancia perpendicular entre dos frentes de onda que tienen la misma fase, se puede observar en la Figura 7.

Figura 7. Longitud de una Onda.



Nota. En la figura se muestra gráficamente la forma en la que se puede conocer la longitud de una onda.
Elaboración propia.

2.2.2 Espectro acústico

Se le llama espectro acústico a la representación de las amplitudes o intensidades relativas frente a las frecuencias de las ondas sonoras simples que lo componen. La perceptibilidad del sonido está determinada por cuatro características (Nava, 2005):

2.2.2.1 Intensidad (I). Está relacionada con la amplitud de la onda sonora y la cantidad de energía transportada. Nos ayuda a determinar si el sonido es alto o bajo.

2.2.2.2 Tono. Se refiere a la cualidad del sonido que permite distinguir los sonidos entre

graves y agudos. Este aumenta al aumentar la frecuencia. Una mezcla de sonidos simultáneos en diferentes tonos forma lo que conocemos como armonía.

2.2.2.3 Timbre. Es una cualidad subjetiva, nos ayuda a diferenciar sonidos con igual tono e intensidad, pero una forma de onda distinta, es decir, distinta evolución temporal.

2.2.2.4 Evolución Temporal. Es la secuencia con que se emiten o reciben los sonidos, así como la evolución de sus intensidades en el tiempo. Define la forma de la onda y su contenido armónico.

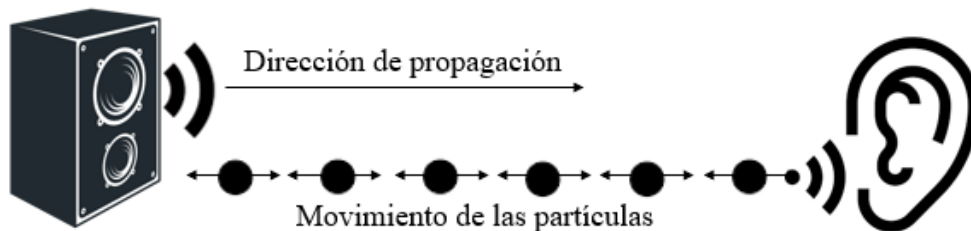
2.2.3 Clasificación de las ondas sónicas

Las ondas sonoras se pueden clasificar de diferentes formas:

2.2.3.1 Según el desplazamiento de las partículas. Las ondas pueden clasificarse dependiendo de cómo se desplazan las partículas por el medio de la siguiente manera:

2.2.3.1.1 Ondas longitudinales. En este tipo de ondas, el movimiento de las partículas es paralelo a la dirección de propagación, se puede observar en la Figura 8.

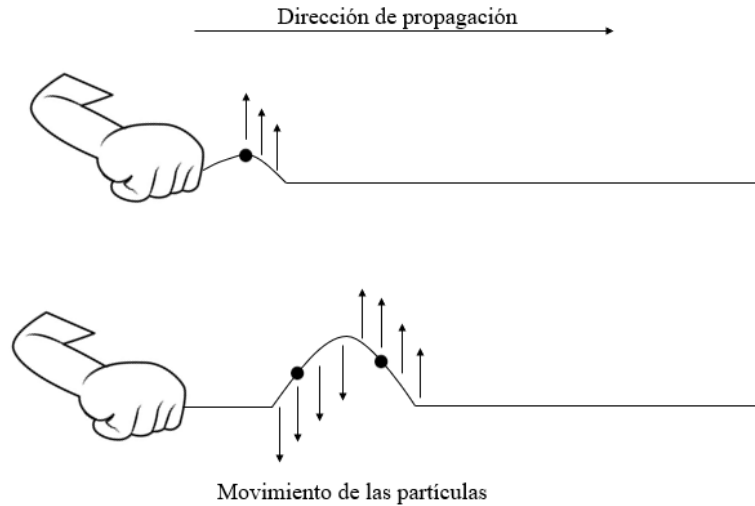
Figura 8. Ondas longitudinales.



Nota. Elaboración propia.

2.2.3.1.2 Ondas transversales. En este, por el contrario, el movimiento de las partículas es perpendicular de la dirección en la que se propaga la onda, se puede observar en la Figura 9.

Figura 9. Ondas Transversales.



Nota. Elaboración propia.

2.2.3.2 Según la frecuencia de la onda. De acuerdo con Montes (2010), las ondas se pueden clasificar de la siguiente manera según su frecuencia:

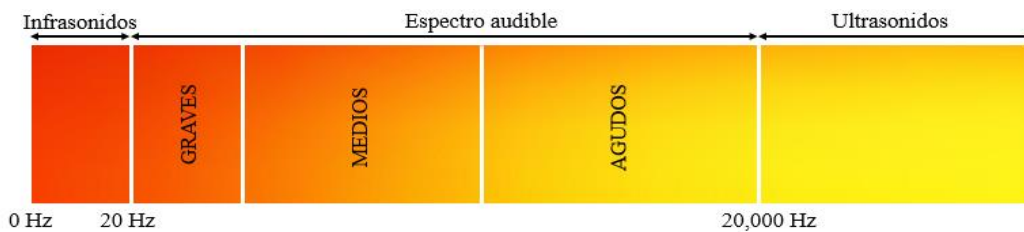
2.2.3.2.1 Infrasonidos. Son aquellas cuya frecuencia es inferior a los 20 Hz.

2.2.3.2.2 Espectro audible. Estas comprenden frecuencias desde los 20 Hz hasta los 20.000 Hz, son las frecuencias de onda que el oído humano puede percibir. Estas a su vez pueden dividirse en graves, medias y agudas.

2.2.3.2.3 Ultrasonidos. Son aquellas ondas cuya frecuencia supera los 20.000 Hz.

En la Figura 10 se muestra gráficamente la clasificación anteriormente mencionada.

Figura 10. Espectro Sonoro.



Nota. Elaboración propia.

2.2.4 Ultrasonido y sus características.

De acuerdo con Rodríguez et al., (2007) el ultrasonido tiene grandes cualidades que permiten su aplicación en diferentes procesos de diferentes industrias, entre estas se encuentra su capacidad de penetración y propagación en casi cualquier medio, aunque es limitada si se habla de propagación en gases, también el hecho de poder ser dirigida como un haz y de poder ser reflejado por objetos de menor tamaño. Así mismo, el ultrasonido cumple con las leyes de reflexión y refracción, aunque depende de las desigualdades acústicas del medio para tener cierta cantidad de energía acústica reflejada. Como información complementaria, cualquier tipo de sonido es una onda de presión, lo que permite que se generen ciclos de onda de alta presión (compresión) y baja presión (rarefacción). La propagación de la presión unidireccional estará dada por la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial P}{\partial x^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (1)$$

En donde C es la velocidad de la onda y depende de las propiedades acústicas del medio, resaltando el hecho de que tiene mayor facilidad de propagación si el medio es un sólido, seguido de los medios líquidos y, por último, con mayor dificultad de propagación, los gases. La solución a la anterior ecuación está determinada por la siguiente expresión.

$$P(x, t) = P_0 \cos(kx - wt) \quad (2)$$

En la que P_0 corresponde al valor absoluto de la amplitud de presión, k es la constante de propagación y se relaciona con la longitud de onda mediante la siguiente expresión $k = 2\pi/\lambda$, y w la frecuencia angular que viene dada por la frecuencia cíclica según la expresión $w = 2\pi f$.

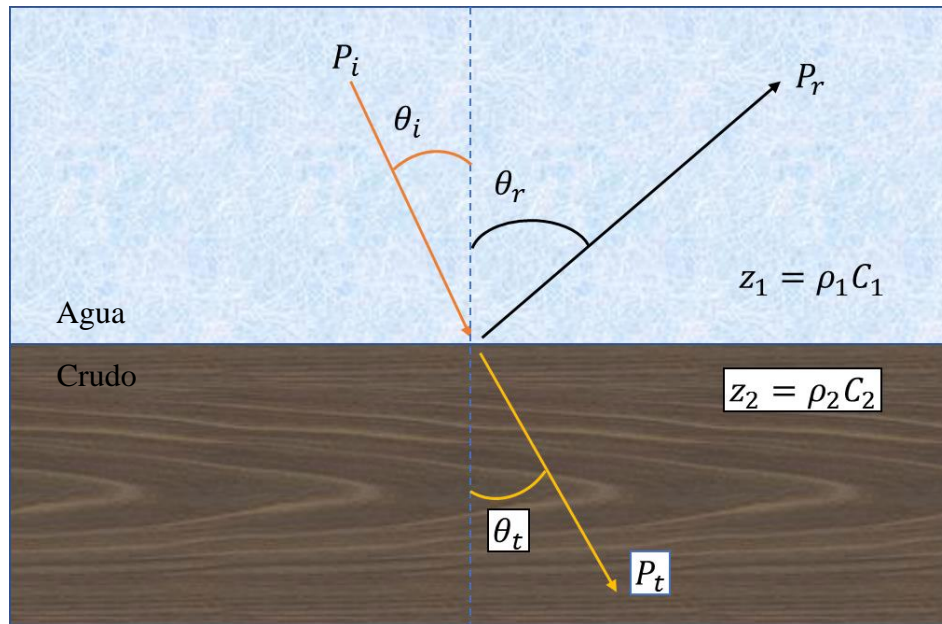
Otro concepto a tener en cuenta, es la reflexión o eco, que se refiere a la energía acústica que regresa de la frontera de un medio con cierta impedancia, en segundo lugar, se tiene la refracción o transmisión lo que hace alusión al cambio de dirección de la onda cuando ingresa a un medio diferente con impedancia diferente, siendo la impedancia acústica una propiedad que depende de la densidad del medio en el cual se propaga la onda ultrasónica, es así que cuando un medio tiene mayor densidad tiene un valor mayor de impedancia y viceversa.

La ecuación se puede ver a continuación.

$$z = \rho C \quad (3)$$

En la Figura 11 se puede observar de manera más clara los conceptos anteriormente expuestos.

Figura 11. Desigualdad acústica en la frontera de dos medios diferentes.



Nota. Representación de reflexión y refracción de una onda ultrasónica. Modificado de (Rodríguez et al., 2007).

Fundamentos teórico-prácticos del ultrasonido.

Donde P_i es la onda que incide, P_t es la onda que se transmite y P_r la onda que se refleja del mismo modo se pueden obtener expresiones matemáticas en forma de la solución de la ecuación diferencial para las ondas anteriormente mencionadas, en las cuales se deben cumplir con las condiciones de frontera en donde las presiones acústicas de la onda de ambos lados de la desigualdad y la velocidad debe ser iguales, al mismo tiempo deben cumplir con la ley de Snell y la ley de reflexión de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

$$C_1 \text{sen} \theta_i = C_1 \text{sen} \theta_2$$

$$\text{y } C_2 \text{sen} \theta_i = C_2 \text{sen} \theta_t \quad (4)$$

Para la parte de reflexión (R) y transmisión (T) en termino de ángulos, las expresiones quedan de la siguiente manera:

$$R = \frac{\frac{z_2}{\cos \theta_t} - \frac{z_1}{\cos \theta_i}}{\frac{z_2}{\cos \theta_t} + \frac{z_1}{\cos \theta_i}}, \quad T = 1 + R = \frac{\frac{2z_2}{\cos \theta_t}}{\frac{z_2}{\cos \theta_t} + \frac{z_1}{\cos \theta_i}} \quad (5)$$

Hay que resaltar que en las ecuaciones anteriormente mencionadas no se tomaron en cuenta la pérdida de energía y por tanto la pérdida de potencia, por lo que si se tiene en cuenta esto se espera que la intensidad (presión acústica) ultrasónica decaiga de forma exponencial de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (6)$$

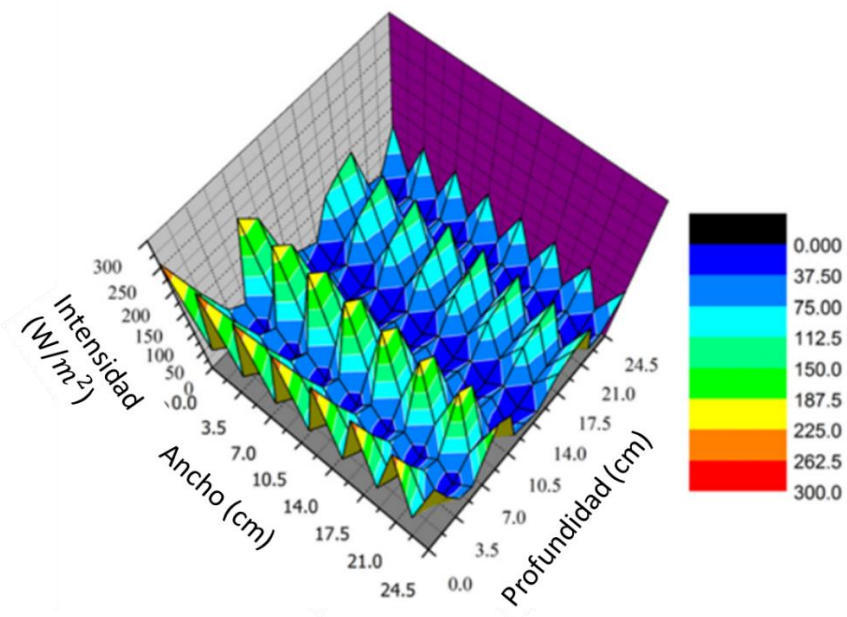
Donde " α " es el coeficiente de atenuación y "x" es la distancia recorrida por la onda.

Es así que, para el diseño de los equipos de deshidratación es necesario tener esto en cuenta durante la transmisión de la onda desde el transductor hacia la emulsión para evitar la atenuación acústica generada en la onda, así mismo se hace necesario contemplar cuánta intensidad se refleja

en los límites del contenedor de la emulsión ya que, el objetivo es minimizar la pérdida de energía en la propagación de la onda de presión en el medio puesto que esta ayuda en la coalescencia de las gotas (Atehortúa et al., 2019).

Del mismo modo, (Xie et al., (2015) menciona que cuándo se tiene un campo de ondas incidentes el cual no se comporta de manera estacionaria se pierde intensidad en los antinodos y se tarda más tiempo en conseguir un mejor efecto de la onda en la deshidratación. Este comportamiento de la onda puede observarse en la Figura 12 donde se pierde intensidad a medida que se aleja de la fuente (Profundidad).

Figura 12. Distribución de un campo de onda incidente en una cámara rectangular.



Nota: Adaptado de (Xie et al., (2015) Acoustically aided coalescence of water droplets and dehydration of crude oil emulsión.

3 Panorama actual de las metodologías usadas en la deshidratación de crudos pesados

Según Benavides y Núñez (2011), el principal objetivo en el proceso de deshidratar un crudo es lograr separar de la mezcla tanto el agua libre como la emulsionada. Benavides y Núñez (2011) también explican que la importancia de la eliminación del agua presente radica en que esta contiene sales inorgánicas, como los cloruros y sulfatos; metales pesados como vanadio, plomo y cadmio; carbonatos de sodio, calcio o magnesio, pero principalmente dióxido de carbono, el cual se encuentra en solución y al reaccionar con las sales genera ácido carbónico (HCO_3) y carbonato de calcio (CaCO_3), los cuales provocan corrosión e incrustaciones respectivamente en las tuberías de transporte y en las instalaciones de superficie y refinería, ocasionando también una reducción en la capacidad de almacenamiento, producción y transporte del aceite.

3.1 Métodos de deshidratación de crudo pesado a nivel mundial

De acuerdo con lo planteado por Yovera (2014), son tres los métodos más usados para lograr deshacer una emulsión de agua en petróleo, los cuales son empleados dependiendo del tipo de emulsión, las características del crudo a deshidratar, etc. Estos son:

- Método químico
- Método mecánico
- Método eléctrico

3.1.1 Método químico. Este método consiste en la aplicación de un producto desemulsionante sintético (Química deshidratante) ya sea en superficie o en fondo de pozo, tan temprano como sea posible. Si se inyecta el desemulsionante antes de que el crudo tenga contacto

con la bomba, minimizará las posibilidades de que la acción de la bomba forme emulsiones y permitirá que el crudo tenga un mayor contacto con el químico (Marfisi, S., y Salager, J.L., 2004).

En su tesis, Yovera (2014) expone que el tratamiento químico se divide generalmente en tres clases:

- Tratamiento en el pozo.
- Tratamiento en las líneas.
- Tratamiento por intervalos.

La diferencia entre los tres métodos radica en el punto de aplicación del químico y la naturaleza del problema que se quiere solucionar.

En el tratamiento en el pozo, los reactivos químicos se inyectan en la emulsión en el pozo o en el fondo de este, en el tratamiento en las líneas, el compuesto químico se agrega a la emulsión después de que ésta haya llegado al cabezal del pozo, usualmente se inyecta antes de llegar al separador y al calentador; y en el tratamiento por intervalos, el reactivo se inyecta cuando la emulsión ya está en los tanques, luego se agita, a veces se calienta y posteriormente se deja que se asiente.

En la industria, los tratamientos más usados son los de fondo de pozo y el de la línea de flujo, esto debido a que la mayoría de las plantas de tratamiento se diseñan para operación continua en lugar de tratamientos por intervalos.

3.1.2 Método Mecánico. También conocido como separación gravitacional. Es caracterizado por el uso de equipos de separación que permiten la disociación de las fases y equipos que aceleran el proceso de la separación gravitacional en las emulsiones (Vázquez, 2015).

Para Yovera (2014), la deshidratación mecánica de crudos se clasifica en dos: separación por gravedad o asentamiento, la cual consiste en lograr la separación de las fases de una emulsión mediante el reposo en un tanque de almacenamiento; y por centrifugación, el cual es un proceso en el que, para lograr romper la emulsión se acelera la fuerza de gravedad en una centrífuga permitiendo que la separación agua-petróleo se de en un periodo más corto de tiempo.

La efectividad de este método depende directamente de las densidades de los líquidos en cuestión, es decir, para fluidos con densidades muy diferentes, la separación por centrifugado sería rápida, pero en emulsiones en donde las densidades son similares, el método debe ser implementado con ayuda de calor, para asegurar que se dé una separación rápida y sin arrastre de crudo por parte del agua.

3.1.3 Método Eléctrico. Yovera (2014) expone que este método consiste en usar un campo eléctrico para lograr separar la emulsión. Es un método rápido y efectivo, aunque la inversión inicial es mayor a los dos métodos descritos con anterioridad.

De acuerdo con algunos experimentos realizados, este proceso logra su objetivo ya que, el campo eléctrico polariza las gotas de agua, las cuales luego de encontrarse se unen inmediatamente, sin embargo Yovera (2014) también aclara que hay situaciones en las que el campo eléctrico no es suficiente y se hace necesario el uso de un químico desemulsificante, en esta variación del método eléctrico se le conoce como “tratamiento químico-eléctrico”, el desemulsificante, que es adicionado a la emulsión en pocas cantidades, magnifica su efecto en presencia del campo eléctrico logrando de esa manera disgregar las fases. Este tratamiento, al igual que el método eléctrico normal, tiene un alto costo de inversión inicial.

Por otro lado, Mulky (2010) expone que además de los tres métodos descritos anteriormente: método químico, método mecánico y método eléctrico, existe también el método térmico.

3.1.4 Método Térmico. De acuerdo con Mulky (2010), este método consiste en el calentar el crudo haciendo uso de equipos de intercambio de calor como lo son los calentadores y los hornos.

Los calentadores, pueden funcionar de manera directa o indirecta, eso depende de la forma en la que se aplique el calor; en el tratamiento directo se hace pasar el crudo directamente por los calentadores, este tratamiento se aplica a crudos pesados que requieran temperaturas iguales o superiores a los 180 °F, mientras que en el tratamiento indirecto se inyecta agua caliente a la línea de crudo, este es aplicado en crudos medianos o incluso crudos pesados que requieran temperaturas de calentamiento de alrededor de 160 °F.

3.2 Métodos de deshidratación de crudo pesado en Colombia

En Colombia, no se implementa un único método para lograr la deshidratación de crudos pesados, ya que ninguno logra buenos resultados por su cuenta, es por esto por lo que, este tipo de crudos son sometidos a tres procesos combinados: tratamiento químico, tratamiento térmico y tratamiento eléctrico.

Según lo expuesto por Galvis Portilla, Y. (2007), en el tratamiento químico se le aplican desemulsificantes al crudo, cuya función es neutralizar la emulsión, contrarrestando el efecto de la sustancia emulsificante. Un desemulsificante tiene tres acciones principales (Galvis Portilla, 2007):

- ✓ Neutralizar y/o desplazar los emulsificadores presentes en la interfase agua/aceite.

- ✓ Permitir el contacto entre las gotas de agua, contrarrestando las cargas eléctricas repulsivas presentes entre las gotas dispersas en el crudo, lo cual se conoce con el nombre de Floculación.
- ✓ Permitir la unión entre esas gotas dispersas de tal manera que se creen gotas más grandes con el peso suficiente para asentarse. A esto se le conoce como Coalescencia.

El tratamiento térmico, consiste básicamente en calentar la emulsión, este junto con el tratamiento químico según Ayala Matus, (2003) son los métodos más utilizados, incluso expresa que se acostumbra agregar algunos químicos a la emulsión antes de calentarla. A continuación, se mencionan algunos de los sistemas que pueden utilizarse para llevar a cabo el tratamiento térmico (Aguirre et. al, 2009):

- ✓ Mediante el uso de un intercambiador de calor.
- ✓ Inyección de vapor o aire caliente comprimido.
- ✓ Haciendo uso de una capa de agua caliente.
- ✓ Implementando un re-hervidor u otro tipo de caldera.

Teniendo en cuenta lo expuesto por Aguirre et. al, (2009), el intercambiador de calor se utiliza para realizar un calentamiento previo al crudo antes de ingresar a un calentador y la inyección de aire o vapor es poco usada. Lo más común a la hora de realizar el tratamiento térmico de un crudo, es una capa de agua caliente, la cual es calentada con un fogón ubicado en el fondo del tanque.

Y en lo concerniente al tratamiento eléctrico, también conocido como electrostático, el crudo o emulsión es sometida a un campo eléctrico de corriente alterna o continua, luego de haber sido precalentada. El campo electrostático ocasiona una elongación en las moléculas de agua,

distorsionando la película en la superficie de la gota y facilitando la coalescencia de estas, como resultado se obtiene la precipitación por gravedad de gotas de agua de mayor tamaño (Ayala Matus, 2003).

El tratamiento eléctrico no solo es combinado con el tratamiento térmico, de acuerdo con Yovera Sosa, (2014), el tratamiento químico-eléctrico es una variación del eléctrico, y consiste básicamente en la aplicación de un agente desemulsificante a la mezcla, que incrementa el efecto del campo electromagnético, facilita la coalescencia de las gotas de agua y con esto su precipitación por gravedad.

Además de los tres métodos antes mencionados, (MORA MORALES et al., 2020) mencionan que también se usa el tratamiento mecánico, en este se hace uso de equipos que aceleran la separación gravitacional de las fases de la emulsión y permiten la dispersión de las mismas.

Es importante mencionar que, durante la revisión bibliográfica realizada se encontró que en el año 2014 le fue otorgada una patente a la empresa ECOPETROL por un nuevo método de deshidratación de crudos conocido como *“Proceso de deshidratación de crudos pesado y extrapesados mediante un esquema de dilución”* (GUARIN ARENAS et al., 2014), este método consiste en la inyección de un hidrocarburo liviano de baja viscosidad en uno o más puntos entre la cabeza de pozo y las etapas de separación. El hidrocarburo inyectado, forma una fase aceitosa dentro de la emulsión facilitando la separación de la fase acuosa y oleosa por gravedad. Según lo mencionado por Trujillo & Tellez, (2015), funcionarios de esta empresa, el método en cuestión se ha implementado en todas las estaciones de deshidratación del campo Castilla constantemente y con éxito.

Cada uno de estos métodos descritos anteriormente posee ciertas ventajas y desventajas, las cuales serán presentadas a continuación en la tabla 1.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los métodos de deshidratación más usados en Colombia.

Método	Ventajas	Desventajas
Químico	<ul style="list-style-type: none"> • Con una aplicación temprana de los desemulsificantes se puede prevenir completamente la formación de emulsiones. • La emulsión puede tratarse en frío lo que reduce costos en el calentamiento del crudo. 	<ul style="list-style-type: none"> • En caso de excederse en la cantidad de desemulsificante, se puede generar una emulsión mucho más difícil de romper. • Los químicos usados suelen tener precios elevados, por lo que comúnmente se combinan con otros métodos de deshidratación como el térmico o el eléctrico. • El uso de químicos contamina el agua deshidratada que posteriormente será reinyectada al yacimiento, lo que promueve la formación de emulsiones en el subsuelo.
Térmico	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementa el movimiento de las partículas de la fase dispersa, facilitando el choque entre ellas y, por lo tanto, generando mayores posibilidades de unión. • Disminuye la viscosidad del crudo o fase continua. • Reduce la tensión superficial del agua facilitando la unión entre las gotas. (Aguirre et. al, 2009) 	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementa los costos de tratamiento de emulsiones debido a corrosión y mantenimiento de los equipos. • El uso de calentadores representa un incremento en el riesgo de accidentes. Un excesivo calentamiento podría ocasionar la pérdida de los componentes más livianos del crudo (Aguirre et. al, 2009)
Eléctrico	<ul style="list-style-type: none"> • Es amigable con el medio ambiente • Menos consumo energético que el térmico. • No hay una contaminación química de las emulsiones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Está limitado a tratar bajas concentraciones de agua emulsionada. • Puede formar gotas de agua secundarias al tratamiento de emulsiones. • Requerimiento constante de supervisión. • El equipo podría verse afectado por las propiedades conductoras de los fluidos, al incrementar la salinidad,

		cantidad de agua y presencia de sólidos.
Mecánico/ Gravitacional	<ul style="list-style-type: none"> • Permite eliminar fácilmente el agua libre. • Funcionales para emulsiones con gotas de agua de diámetros grandes. • Al estar regido por la ley de Stokes, funciona mejor cuando la diferencia de densidades es mayor entre los fluidos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita de la intervención de otro tratamiento para liberar el agua emulsionada, normalmente químico. • Deshidratación lenta del crudo. La separación de fases es directamente proporcional al tiempo de retención. • Necesita de calentamiento para mejorar el rendimiento. • Al funcionar bajo el principio de la ley de Stokes, no funciona muy bien para emulsiones de crudos pesados.
Dilución	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce el consumo energético ya que no requiere aplicación de calor para deshidratar. • Reduce las emisiones atmosféricas de CO₂, material particulado, etc. Al suprimir el calentamiento del proceso. • Aumenta la densidad API del crudo y reduce su viscosidad. • No requiere de aditivos químicos extra. 	<p>* No se encontró información sobre las desventajas de este método de deshidratación, sin embargo, esto NO significa que no las posea. La información sobre este método es limitada.</p>

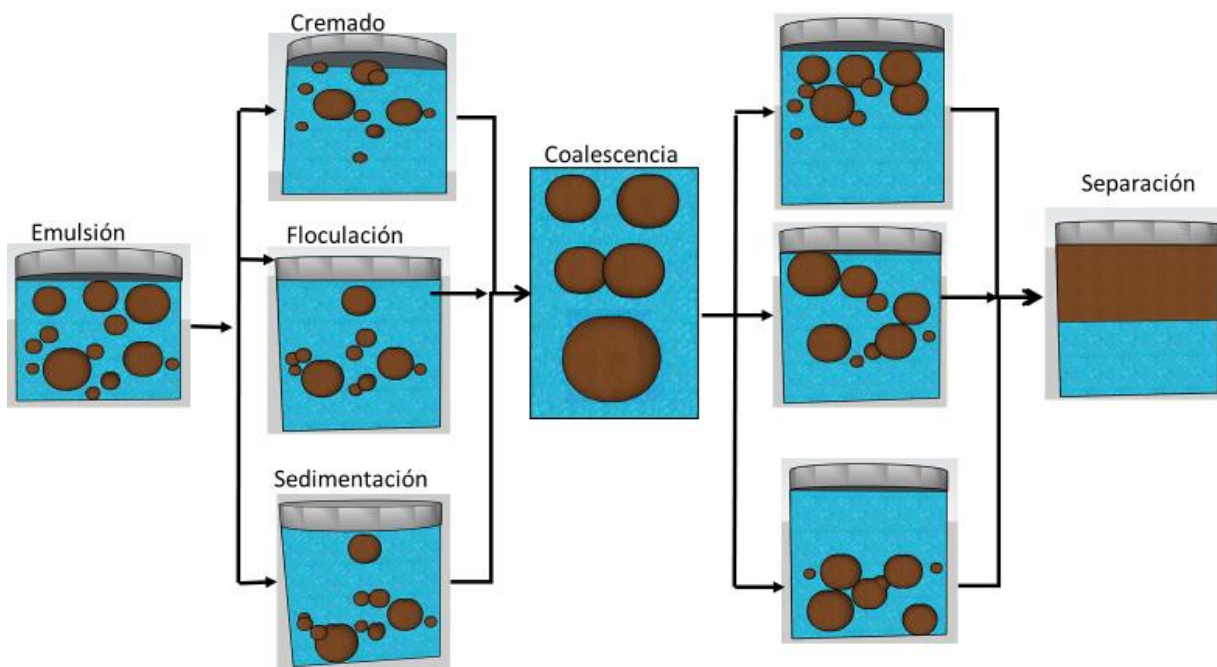
Nota. Tomado de Galvis Portilla, y. C. (2007). *Estudio de los procesos de deshidratación de crudo y tratamiento de aguas de producción en la estación pf2 del campo caño limón*; Ayala Matus, M. A. (2003). *Optimización del equipo de deshidratación Natco de crudo pesado en una empresa petrolera*; Guzmán López, d. J. G. (2018). *Análisis del comportamiento de las emulsiones y su influencia en la cadena de producción de hidrocarburos*. Hernández Ramírez, G. X. (2011). *Métodos de deshidratación del petróleo en el campo sacha norte 01*; Guarín Arenas, F., González Barbosa, J. E., Rodríguez Alteros, C., García Chinchilla, C. A., Gómez Bayona, R., González Pascuas, A., Sánchez, Villamizar, J., & Delgado Jaimes, E. A. (2014). *Proceso De Deshidratación De Crudos Pesados Y Extrapesados Mediante Un Esquema De Dilución* ; Yovera Sosa, M. A. (2014). *Tecnología Del Tratamiento De Desalado De Crudos*; Hernández Ramírez, G. X. (2011). *Métodos de deshidratación del petróleo en el campo Sacha norte 0*; Arnold, K., & Stewart, M. (2008). *Surface Production Operations* (3rd ed.). Elsevier Inc.

3.3 Conceptos clave para la deshidratación

3.3.1 Mecanismos de desestabilización de la emulsión.

Según Lim et al., (2020) es muy importante conocer los métodos de desestabilización antes de empezar cualquier prueba experimental, así mismo Martínez Rodríguez, (2014) menciona que existen 4 mecanismos principales los cuales son: la sedimentación, el cremado, la coalescencia y la floculación, una representación gráfica de los métodos mencionados se puede observar en la Figura 13.

Figura 13. Esquema de los mecanismos de desestabilización de una emulsión.



Nota. Esquema adaptado de (Lim et al., 2020, quien citó Dalmazzone et al., 2007) Study on the effect of ultrasonic wave amplitude on de-emulsification of crude oil to enhance production process y (Martínez Rodríguez, 2014) Formación y caracterización de emulsiones altamente concentradas de betún en agua .

La sedimentación, según lo expuesto por Martínez Rodríguez, (2014) en su tesis, se da cuando la densidad del crudo es superior a la del agua, promoviendo la acumulación de las gotas de aceite en la parte inferior formando de esta manera un sedimento, esto suele suceder cuando se trata de emulsiones bituminosas, aunque Martínez Rodríguez, (2014) también manifiesta que este tipo de desestabilización es reversible, puesto que solo hace falta imprimir algo de agitación a la emulsión para que esta vuelva a su estado original; cuando hablamos del caso contrario, es decir, cuando la densidad del crudo es inferior a la densidad del agua, estamos hablando de lo que se considera cremado, en este caso las gotas de aceite se acumularán en la superficie del agua, formando una capa o crema. En lo concerniente a la coalescencia, Martínez Rodríguez, (2014) expone que esta unión es irreversible, puesto que las paredes de las gotas que se encuentran pegadas se rompen, permitiendo que estas se fusionen y formen una gota más grande, por el contrario, menciona que en la floculación las paredes de las gotas no se rompen y siguen estando separadas por una delgada capa de la fase continua (agua), por lo que la floculación puede llegar a ser reversible, sin embargo, aunque las gotas estén separadas, pueden llegar a comportarse como una sola. Arnold & Stewart, (2008) definen la floculación en su libro *Surface Production Operations* como “el proceso de reunir las partículas desestabilizadas o coaguladas para formar un aglomerado o flóculo más grande”.

3.3.2 η_w la tasa de deshidratación

La tasa de deshidratación se puede definir como la cantidad de agua que puede ser retirada de una muestra de petróleo crudo, y está dada por la siguiente ecuación:

$$\eta_w = \frac{V_{wo} - V_w}{V_{wo}} \quad (7)$$

En donde V_{wo} representa el volumen del agua en la muestra inicial de crudo y V_w representa el volumen de agua en la muestra de crudo después de la deshidratación. Es válido mencionar que la tasa de deshidratación (η_w) se ve afectada por el tiempo que demore el tratamiento que se esté aplicando para deshidratar la muestra en cuestión. (Wang et al., 2017)

4 Ondas sónicas en la industria Oil & Gas

Las ondas usadas comúnmente en la industria oil & gas son las ultrasónicas, ya que en comparación con las sonoras ordinarias, las ultrasónicas tienen gran capacidad de penetración, gran energía y buena direccionalidad, de igual modo el rango de frecuencias comúnmente usadas van desde 20 kHz hasta 2000 kHz y dentro de este, existe el rango del ultrasonido de potencia o baja frecuencia, que comprende el rango más usado en la industria, con frecuencias desde 20 kHz hasta 100 kHz (MENG et al., 2010), así mismo Díaz Alvarez et al., (2013) menciona que se usa el ultrasonido porque son ondas acústicas de alta energía lo cual implica alta amplitud y baja frecuencia.

En la industria, una técnica novedosa para separar emulsiones es la aplicación del ultrasonido, esto debido a que al aplicar este tipo de ondas longitudinales se logra que las partículas del medio se muevan en la misma dirección de propagación de la onda, generando choques constantes entre sí, y la emulsión, al ser un medio elástico se comprime y se expande generando inestabilidad en las gotas de agua, lo que a su vez provoca una inestabilidad en la interfase suscitando la separación de la emulsión y de acuerdo a su tesis las frecuencias cercanas a 800 kHz reducen la tensión interfacial en un factor de 2.6 (Montes, 2010). Del mismo modo según lo expuesto por Sun et al., (2014) al aplicar deshidratación por ultrasonido se alcanza un 96% de separación de la emulsión, generando así valores iguales o inferiores al 0.4% de agua en el aceite usado.

De acuerdo a los capítulos anteriores los métodos usados de forma más cotidiana son los métodos térmicos, químicos y eléctricos para tratar las emulsiones, aun así son necesarios nuevos métodos debido a que las emulsiones son cada vez más difíciles de tratar y los tiempos de tratamiento aumentan, por este motivo en los últimos años se ha buscado nuevas tecnologías y una

de estas es la aplicación de ondas ultrasónicas ya que tiene un gran potencial para el tratamiento de emulsiones (Lim et al., 2020). Se han realizado diversas pruebas para el tratamiento del crudo y de estas se han concluido que las ondas ultrasónicas tienen la capacidad de realizar diversos cambios físicos y químicos dentro del medio en el cual se propaga (Díaz Alvarez et al., 2013). Estos estudios se han llevado a cabo tanto en laboratorio como en campo en China, Brasil, Corea, Malasia, Rusia, Irán, Estados Unidos, etc.

Magomadov, (2004) menciona que la información arrojada de la velocidad de propagación del ultrasonido en la sustancia genera mayor confiabilidad en los resultados de las investigaciones si se unen los resultados de las propiedades térmicas y la velocidad del ultrasonido ya que genera un alto conocimiento de las propiedades termodinámicas de la sustancia. Así mismo, el cambio de las propiedades termodinámicas de los líquidos al relacionarse con la cavitación acústica genera un espacio ideal para reacciones químicas en las cuales se produce la sonoquímica ya sea para medios líquidos homogéneos o heterogéneos, o para un medio líquido-sólido (Suslick & Price, 1999),

Hay que mencionar también que algunos de los procesos de la industria en los cuales se ha investigado la aplicación del ultrasonido son, por ejemplo los mencionados por Díaz Alvarez et al., (2013), quien citó a Lin & Yen, (1993) en el que se evaluó la degradación de asfáltenos a condiciones atmosféricas y los resultados fueron positivos dado que se redujo un 7.5% de asfáltenos, de igual forma Díaz Alvarez et al., (2013), citando a Chackma & Berruti, (1993) mencionó uno de los primeros estudios en el cual la viscosidad del bitumen se ve afectada al aplicar ultrasonido obteniendo una reducción del 12%, a su vez Palaev et al., (2019) en su trabajo recalca la popularidad de este método para las áreas de producción, refinación y para el transporte a causa

del cambio que genera en la viscosidad y temperatura del petróleo, resaltando el hecho de que al generar mayor exposición se generan mejores resultados.

De la misma forma al aplicar ondas ultrasónicas se obtienen gastos de operación menores al reducir los aditivos químicos usados para el tratamiento de deshidratación convencional (GUZMÁN LÓPEZ, 2018), junto a esto Palaev et al., (2019) afirma que la simplicidad de los componentes y estructuras genera un método prometedor. Ya para finalizar Wang et al., (2018) indica en su investigación que una de las nuevas tecnologías que cumple con las necesidades actuales respecto al bajo costo y poca contaminación es el ultrasonido.

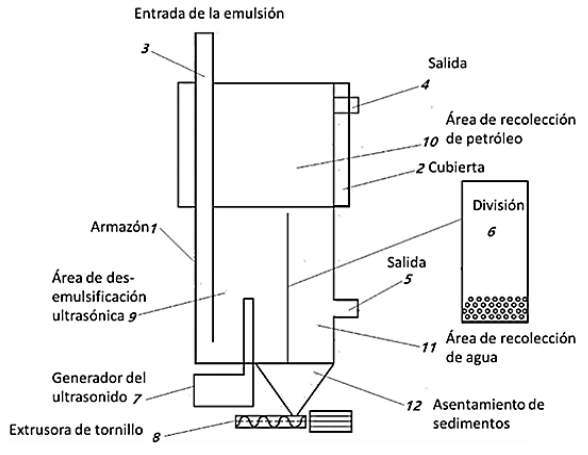
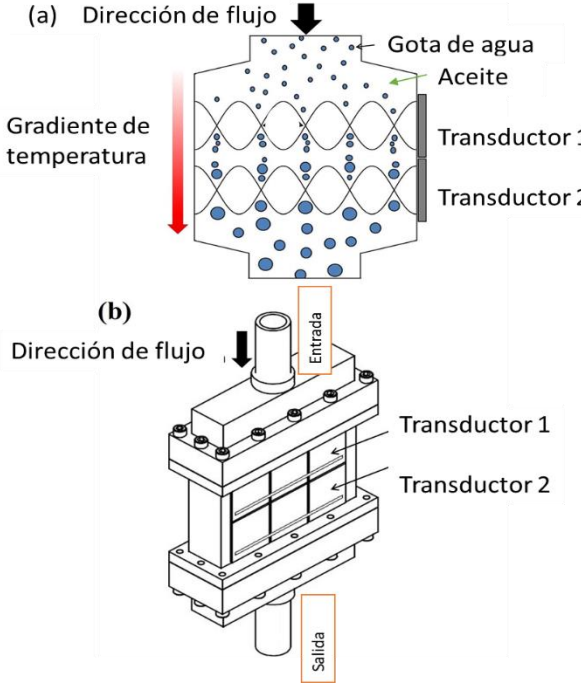
4.1 Componentes para generar una onda ultrasónica.

Para generar una onda ultrasónica se necesita una serie de elementos los cuales son usados en la mayoría de los diseños, entre estos se encuentran la fuente de poder, el generador y el transductor electromecánico el cual trasmite al medio las ondas ultrasónicas (Díaz Alvarez et al., (2013), quien citó Gopinath (1993) et al., y Chakma et al., (1993)), asimismo, el transductor es un dispositivo que transforma un tipo de energía en otra, para el caso del ultrasonido transforma la energía eléctrica en energía mecánica (Rodríguez et al., 2007),

Además de los elementos antes mencionados, también es importante mencionar que al aplicar un proceso de deshidratación con ultrasonido se necesita un contenedor para la emulsión y obviamente el medio (emulsión) por el que se transmitirá la onda ultrasónica, la cual puede ser irradiada de forma directa o indirecta.

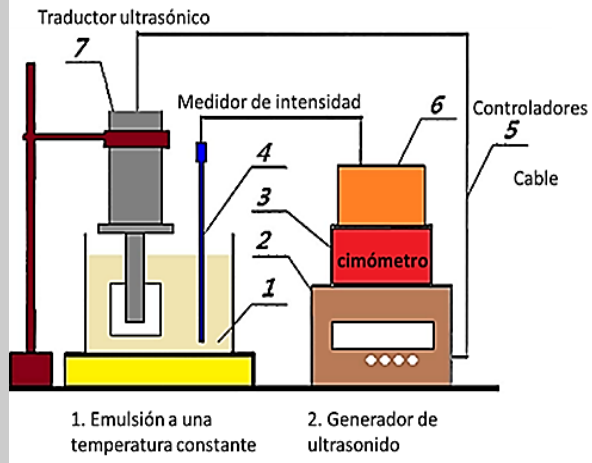
Algunos ejemplos de equipos usados en campo y en laboratorio se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Equipos usados en la industria del petróleo para deshidratar con ultrasonido.

Aplicación en	Descripción	Representación
<p>Campo</p> <ul style="list-style-type: none"> • La onda ultrasónica es transmitida de forma directa. • Diagrama de uno de los varios diseños encontrados para deshidratar crudos en campo mediante el uso de ondas ultrasónicas, las pruebas realizadas en el equipo revelan que mejora la eficiencia de deshidratación y además tiene gran capacidad de procesamiento. 		 <p>Nota: Adaptado de Wang et al., (2017) quien citó a Wu et al., (2018).</p>
<p>Campo</p> <ul style="list-style-type: none"> • La onda ultrasónica es transmitida de forma directa. • Diagrama de una cámara de coalescencia con 2 transductores y un reflector en el lado opuesto, esto genera la migración de las gotas a los nodos y su debida coalescencia. Los transductores tienen diferentes frecuencias para mantener el comportamiento estacionario de onda, ya que la fluctuación de la temperatura cambia la velocidad de la onda. 		 <p>Nota: Adaptado de (Atehortúa et al., 2019)</p>

Laboratorio

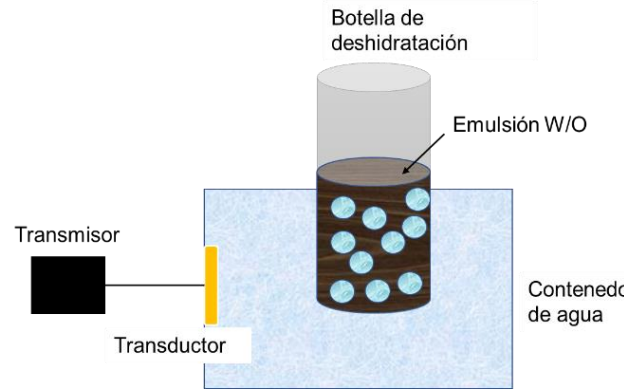
- La onda ultrasónica es transmitida de forma directa.
- Esta es la representación de un experimento en laboratorio en el cual el transductor está en contacto directo con la emulsión y se encuentra a temperatura constante.



Nota: Adaptado de Wang et al., (2017).

Laboratorio

- La onda ultrasónica es transmitida de forma indirecta.
- La emulsión después de unos minutos comienza a separarse, las gotas de agua bajan al fondo de la botella.



Nota: Adaptado de Chenggao, Y et al., (1997).

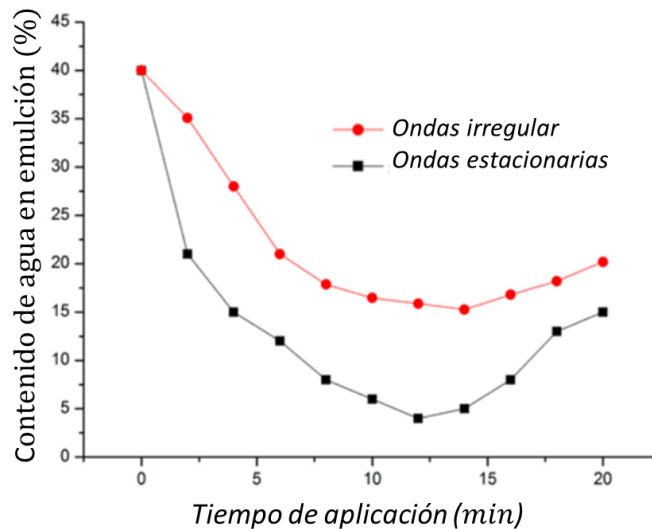
Nota. Adaptado de Chenggao, Y et al., (1997). *Ultrasonic crude oil dehydration experiment*[J]. *Oilfield Surface Engineering*; Wang et al., (2017). *Research on the static experiment of super heavy crude oil demulsification and dehydration using ultrasonic wave and audible sound wave at high temperatures*; (Atehortúa et al., 2019) *Water-in-oil emulsions separation using an ultrasonic standing wave coalescence chamber*.

Lo más importante al aplicar el ultrasonido a la emulsión ya sea de forma directa, cuando la emulsión está en contacto directo con el transductor de la onda (usada tanto en campo y laboratorio) o indirecta, cuando la onda pasa por un fluido auxiliar antes de entrar en contacto con la emulsión contenida en un recipiente diferente, sumergido el fluido auxiliar (usada más

comúnmente en laboratorio), es generar un comportamiento estacionario de la onda, ya que se produce la mayor intensidad posible del ultrasonido en los antinodos, por lo que esta puede ser hasta cuatro veces mayor que la onda incidente original (Lim et al., 2020) (Xie et al., 2015, quien citó a Abe et al., 2002 y a Xi et al., 2011), de esta forma según el estudio realizado por Xie et al., (2015) la coalescencia de las gotas es mucho mejor y el tiempo de tratamiento es menor.

En la Figura 14 se pueden observar los resultados de la aplicación de ondas estacionarios y ondas no estacionario para las mismas condiciones de deshidratación de una emulsión. La onda estacionaria logra reducir el contenido de agua en emulsión de un 40% a un 3.8%.

Figura 14. Contenido de agua respecto a un campo estacionario y no estacionario de al aplicar ultrasonido.

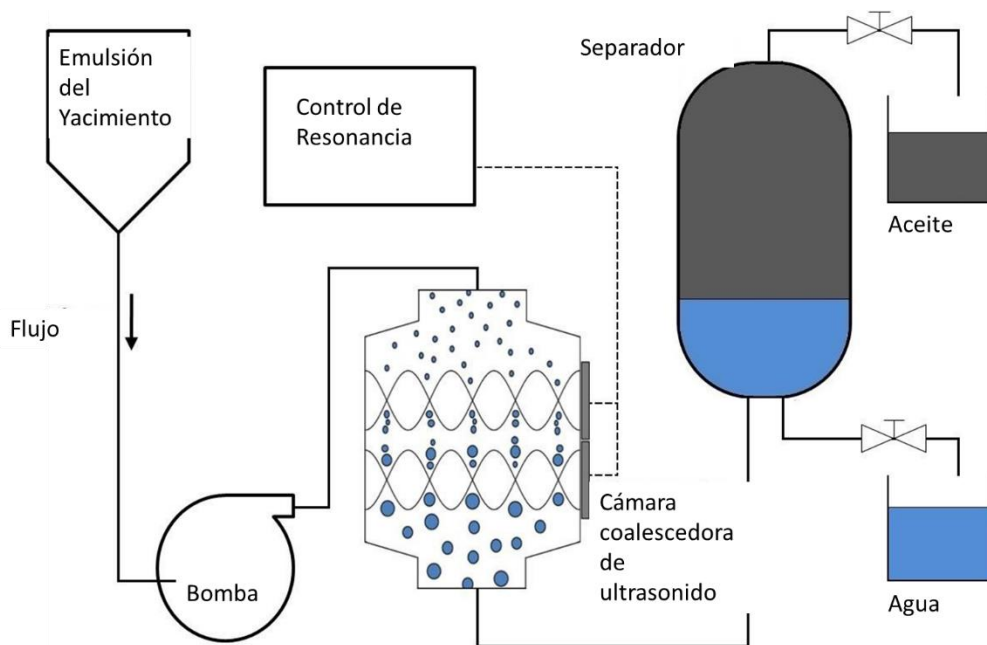


Nota: Adaptado de (Xie et al., (2015) Acoustically aided coalescence of water droplets and dehydration of crude oil emulsión.

En lo concerniente a la posición del equipo de ultrasonido en un sistema de deshidratación de crudos, se encontró que puede ubicarse en diferentes posiciones, por ejemplo del estudio de Atehortúa et al., (2019) para un crudo pesado de offshore en Brasil se tiene un esquema de proceso

representado en la Figura 15 en donde se coloca una cámara de ultrasonido con orientación vertical para crear un flujo en ese sentido y evitar acumulación, esta cámara recibe el crudo inmediatamente sale del yacimiento, genera la coalescencia de las gotas de agua y luego el fluido continúa al separador por gravedad, los autores mencionan que el proceso no se limita a emulsiones que tiene una concentración de agua específica como sí lo hacen otros equipos, por ejemplo los separadores electrostáticos los cuales trabajan de forma eficiente el contenido de agua en emulsión es inferior al 20%.

Figura 15. Sistema de Deshidratación con Ultrasonido.



Nota. (Atehortúa et al., 2019) *Water-in-oil emulsions separation using an ultrasonic standing wave coalescence chamber.*

4.2 Fenómenos físicos causados por las Ondas Ultrasónicas al interactuar con el crudo durante la deshidratación.

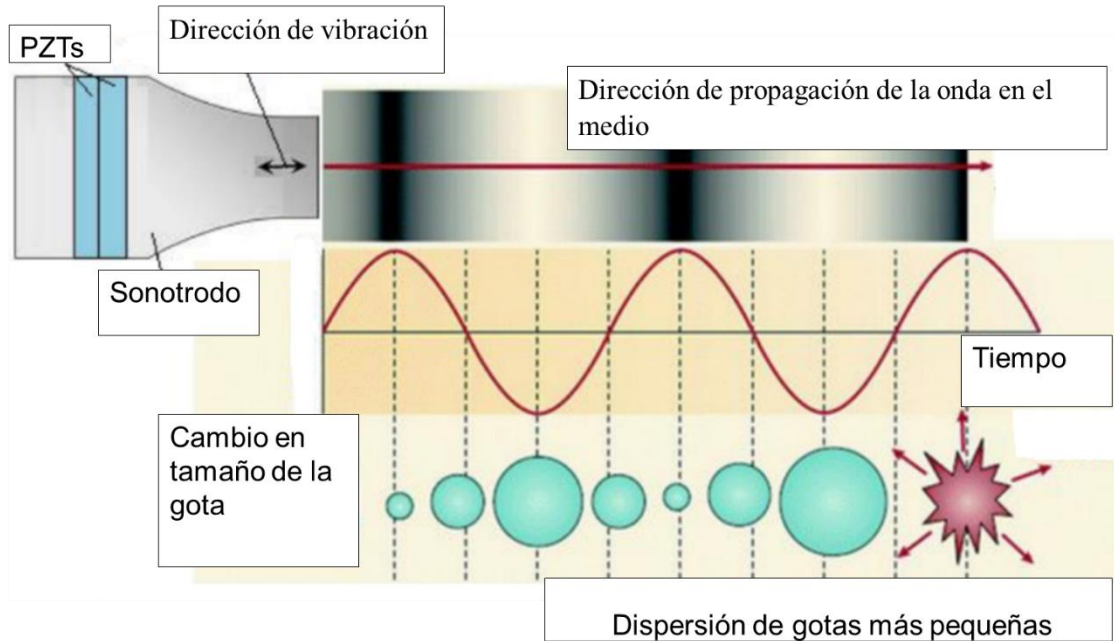
En cuanto a los diversos fenómenos causados al aplicar ondas ultrasónicas, se encuentran principalmente:

4.2.1 Transferencia de presión acústica.

La onda se propaga a través del medio en forma de una onda de presión, lo cual implica una fuerza acústica (Lim et al., 2020, quien citó a Luo et al.,2016), es así que la presión ejercida molecularmente por la vibración a lo largo de la dirección de propagación de la onda (Khajehesamedini et al., 2018), genera semiciclos de alta presión y cuando la presión del medio continuo es menor que la presión de la gota en emulsión, el tamaño de gota aumenta ya que, teniendo en cuenta lo expuesto en la ecuación (8), donde p es la presión exterior, p_B es la presión interior de la gota, γ la tensión interfacial y R el radio, este último depende directamente de p_B , (Modarres-Gheisari et al., 2019, quien citó a Fang et al.,2018).

$$p_B - p = \frac{2\gamma}{R} \quad (8)$$

Por lo tanto, la fuerza de presión ejercida sobre las gotas de agua dependen directamente del medio continuo y de las características de las gotas (Lim et al., 2020), así, durante los semiciclos de presión la gota se comprime y se expande, y cuando se alcanza una presión lo suficientemente alta la burbuja colapsa generando micro gotas, lo que a su vez genera puntos calientes y micro turbulencias locales, resultando en una mayor estabilidad para emulsión como se observa en la Figura 16. (Modarres-Gheisari et al., 2019). Este fenómeno es conocido como cavitación y durante la deshidratación con ondas sónicas, se debe evitar llegar a ese punto.

Figura 16. Cambio de tamaño en la gota al aplicar la onda ultrasónica

Nota: Tomado de (Modarres-Gheisari et al., 2019) Ultrasonic nano-emulsification—A review.

4.2.2 Fuerza acústica

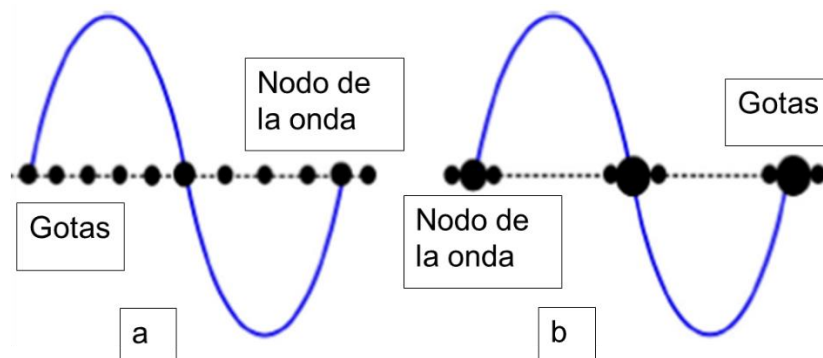
De acuerdo a Wang et al., (2018) la onda ultrasónica aplica una fuerza de radiación acústica, lo que genera que las gotas de agua comiencen a moverse del estado estacionario respecto al aceite, de igual forma Lim et al., (2020) menciona también que esta fuerza acústica es capaz de alterar las partículas que están presentes en el medio suspendidas.

Las gotas están expuestas a dos tipos de fuerzas, las cuales son la fuerza acústica primaria y la fuerza acústica secundaria. La fuerza primaria es aquella que actúa sobre las gotas y las impulsa a moverse hacia los nodos y antinodos del campo acústico donde hay mayor presión, esta fuerza es importante para toda la fase dispersa, pero sobre todo para las gotas de menor tamaño ya que al ser más pequeñas demoran más desplazarse por sí mismas y por lo tanto en separarse del crudo. (Xie et al., 2015), la fuerza secundaria por su parte actúa en la zona del nodo como tal, esta

favorece la aglomeración y la coalescencia de dos o más gotas por compresión, esta es menor que la fuerza primaria al inicio de la irradiación porque las gotas están alejadas, pero cuando se comienza la aglomeración crece rápidamente al ser proporcional al volumen de las gotas (Xie et al., 2015) y (Lim et al., 2020, quien citó a Luo et al., 2016).

En la Figura 17 se representa el comportamiento de las gotas cuando se aplica el ultrasonido. Más adelante se desarrollan las expresiones matemáticas de los conceptos de Fuerza primaria y secundaria.

Figura 17. Diagramas esquemáticos de las gotas de agua en aceite al aplicar ultrasonido.



Nota: (a) distribución inicial de las gotas, (b) distribución de las gotas después de la irradiación ultrasónica.

Tomado de (Lim et al., 2020) Study on the effect of ultrasonic wave amplitude on de-emulsification of crude oil to enhance production process.

4.2.2.1 Fuerza acústica primaria

A continuación, se muestra a detalle la ecuación de la fuerza acústica primaria de un campo unidireccional:

$$F_{1,ac} = 4\pi R^3 k E_{ac} F \text{sen}(2kx) \quad (9)$$

Donde R es el radio de la gota (m), k es el número de onda de campo acústico, E_{ac} es la densidad de energía promedio del campo acústico (J / m^3), x es la posición relativa a un antinodo de presión y F es el factor de contraste acústico que cuantifica la diferencia de compresibilidad y densidad de la fase continua (Crudo) y la fase dispersa (Gotas de agua) y está dada por la siguiente ecuación. (Xie et al., 2015 , quien citó a McLean y Kilpatrick, 1997)

$$F = \frac{A + \left(\frac{2}{3}\right)(A - 1)}{1 + 2A} - \frac{1}{3\partial^2 A} \quad (10)$$

Donde A es la relación de densidades de la gota y la fase continua en este caso el crudo, ∂ es la relación de velocidad del sonido longitudinal en las gotas con respecto a la fase continua, teniendo en cuenta que este movimiento puede ser afectado por la intensidad y el tamaño de la gota (Xie et al., 2015).

De forma resumida la fuerza primaria conduce a las gotas a posiciones de equilibrio cerca de los nodos y antinodos de la onda, esto ocurre de manera rápida por acción de la gravedad y la fuerza acústica primaria. (Xie et al., 2015).

4.2.2.2 Fuerza acústica secundaria

A continuación, se muestra la ecuación de la fuerza acústica secundaria de un campo unidireccional:

$$F_{2,ac} = \frac{kE_{ac}}{2\pi} * \left(1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_f}\right)^2 * \frac{V_2 V_1}{r^2} \quad (11)$$

Donde V_i es el volumen de la gota, r es la distancia desde el centro de una gota hasta el centro de otra gota, γ_f la compresibilidad de la gota y γ_d es la compresibilidad del fluido. (Xie et al., 2015)

De forma resumida cuando las gotas se acercan empiezan a coalescer y colisionar debido a la combinación de la fuerza acústica secundaria y las fuerzas de van der Waals.

4.2.3 Cambio en la temperatura

De manera general, la rarefacción y la compresión provocada en el fluido por el ultrasonido genera un aumento de temperatura lo cual conlleva a la disminución de la viscosidad (Khajehesamedini et al., 2018) esto debido a que la energía acústica parcial absorbida por el crudo se convierte en energía térmica lo que favorece la separación gravitacional (Wang et al., 2018, quien citó a Trujillo et al., 2014), así mismo el efecto térmico generado por la onda produce la disminución de la tensión interfacial de la emulsión, debido a que la fricción que se genera en la interfase aumenta la temperatura del crudo y del agua lo que favorece la ruptura de la película de la gota. (Wang et al., 2018)

Adicionalmente, teniendo en cuenta lo descrito en el trabajo de Atehortúa et al., (2019), en el que se estudió el comportamiento de dos muestras de una misma emulsión luego de que una se tratara con ultrasonido a 60 ° C y la otra a 70 ° C, se puede decir que es posible disminuir el suministro externo de calor al proceso de deshidratación cuando se usa ultrasonido, ya que el contenido de agua deshidratado en ambas muestras de esta investigación fue muy similar sin importar la temperatura, esto implica una reducción en la energía necesaria para calentar el crudo.

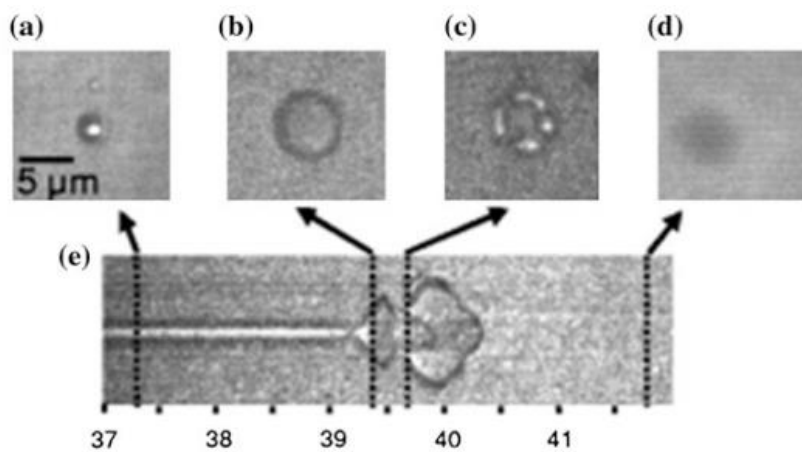
4.2.4 Cavitación acústica

Es cuando una gota de la fase dispersa inicia la ruptura de la interfase, registrando un aumento de temperatura en el lugar de la ruptura, este proceso toma apenas algunos microsegundos. (Modarres-Gheisari et al., 2019, quien citó a Kanthale et al., 2013).

De forma más precisa, se crean una o más cavidades en un líquido, esto puede referirse tanto a la creación de una cavidad como a la expansión del gas preexistente. La cavitación ocurre como respuesta a la disminución de la presión por debajo de la presión de vapor del líquido o el aumento de la temperatura por encima del punto de ebullición, además, también es posible inducir la cavitación por medio de electricidad, sustancias químicas y radiaciones.

La cavitación comprende dos etapas generales las cuales son la nucleación o formación de la cavidad y la dinámica de la burbuja. Estos dos eventos ocurren a amplitudes de presión diferentes, a la primera se le llama el umbral de nucleación y la segunda se conoce como umbral de colapso. En la Figura 18 se representa todo el proceso de cavitación. (Xu et al., 2015)

Figura 18. Destrucción de una microburbuja.

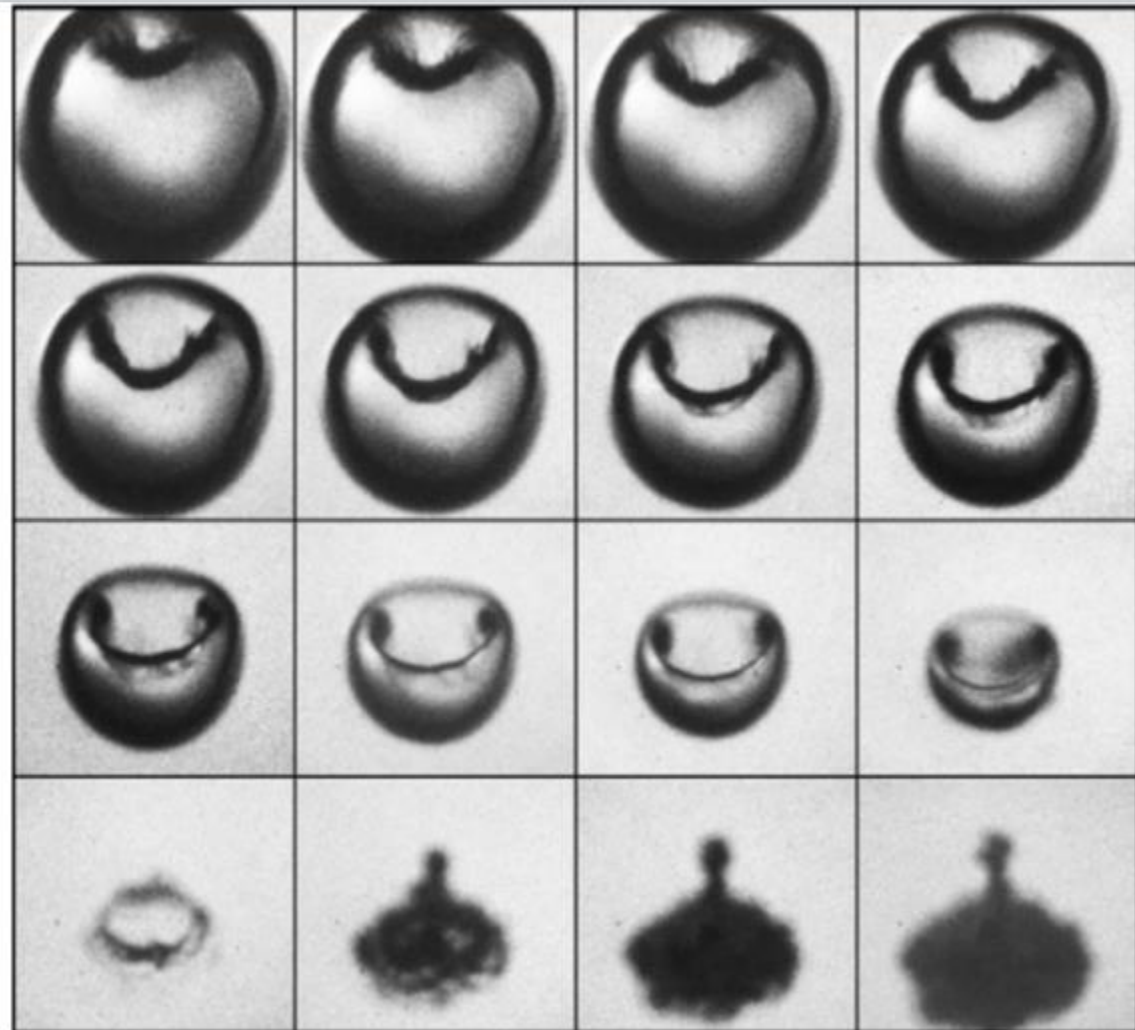


Nota: las imágenes de (a-e) representan el antes, durante y después de la explosión en función del tiempo. Tomado de (Xu et al., 2015, quien citó a Blonch et al., 2004) Cavitation in Biomedicine.

La cavitación también puede dividirse en cavitación inercial y cavitación no inercial, donde la cavitación no inercial provoca que las gotas de las fases dispersa debido al cambio de presión oscilen de forma y tamaño, y en la cavitación inercial la gota es sometida a mayor cantidad de presión, generando la implosión de está, generando al mismo tiempo ondas de choque de alta intensidad (Modarres-Gheisari et al 2019), la representación está dada por la Figura 19.

De acuerdo con lo planteado por Chenggao, Y et al., (1997) la cavitación es afectada por:

- La pureza del medio.
- Las propiedades inherentes del medio (como tensión superficial, viscosidad, etc.).
- La frecuencia acústica debido a que el umbral de cavitación aumenta de forma parabólica con el crecimiento de esta.
- La intensidad de la fuente
- Tiempo de duración del sonido.
- Presión estática del medio.
- La temperatura del medio ya que el aumento de esta hace que el umbral de cavitación disminuye.

Figura 19. Colapso de una burbuja.

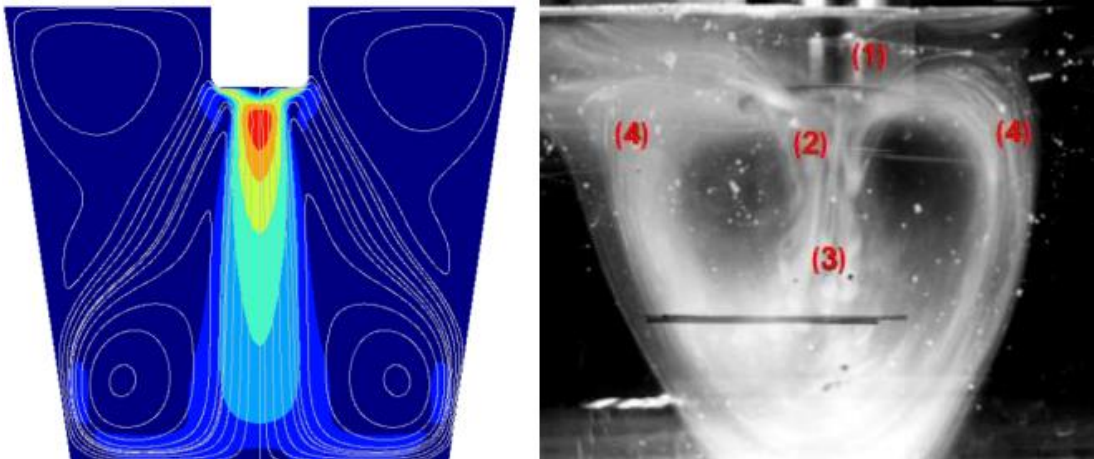
Nota: Tomado de (Xu et al., 2015, quien citó a Lauterborn y Kurz 2010) Cavitation in Biomedicine.

4.2.5 Flujo acústico

Según el trabajo de Modarres-Gheisari et al., (2019) la irradiación de ultrasonido produce presión acústica, lo que provoca una transmisión acústica al sistema generando un gradiente de presión, lo que a su vez da inicio al flujo acústico de alta velocidad, proporcionando el ambiente perfecto para el aumento del flujo de masa, calor y momentum de flujo.

Como se puede observar en la Figura 20 el flujo comienza como un chorro cercano al sonótrodo y continua hasta la parte inferior, cuando llega allí se refleja y vuelve a la parte superior.

Figura 20. Dirección del flujo acústico.



Nota: La imagen derecha: (1) Dirección de flujo acústico al aplicar el ultrasonido a 20Hz con un sonotrodo de titanio, (2) Zona de cavitación, (3) flujo acústico, (4) flujo recirculado; La imagen Izquierda muestra la dirección de flujo acústicos modelados con COMSOL Multiphysics. Tomado de (Modarres-Gheisari et al., 2019 quien citó a Eskin, 1998) Ultrasonic nano-emulsification—A review.

4.2.6 Acción en el medio

En primer lugar, el medio permite la propagación de la onda resultando en emulsificación, desemulsificación y/o dispersión de las gotas (Lim et al., 2020), por otra parte el ultrasonido mejora el transporte de masa y la velocidad de colisión de las gotas en el medio (Suslick & Price, 1999), ya que cuando la onda atraviesa el medio, lo fuerza a vibrar mecánicamente de forma violenta ocasionando que absorba cierta cantidad de energía sonora, este hecho, también provoca un aumento de la temperatura y permite la reducción de la viscosidad del crudo (Chenggao, Y et al., 1997), esto se da debido a que el crudo absorbe la energía sonora y la convierte en energía térmica, lo que aporta positivamente a la sedimentación por gravedad de las gotas. (Yang & Fu, 2014).

4.2.7 Acción en la interfase

De acuerdo a Yang & Fu, (2014) la vibración provocada por el ultrasonido puede dispersar uniformemente los agentes emulsionantes naturales del crudo y aumentar la solubilidad de estos, lo que provoca que la resistencia mecánica de la interfaz entre el petróleo y el agua se reduzca, y esto a su vez mejora las condiciones de separación de la emulsión. Así mismo la fricción en la interfaz aumenta la temperatura local de esta, provocando su ruptura.

La cavitación provoca diversos efectos en la interfaz, ya que esta región tiene diversos cambios en los gradientes de temperatura, presión y posiblemente en el campo eléctrico, así mismo se generan cambios en las partículas presentes respecto a su morfología, composición y la reactividad, debido a las colisiones entre partículas y el efecto de la sonoquímica, debido a que el ultrasonido aumenta las reacciones químicas cuando el sistema es heterogéneo (sólido-líquido) (Suslick & Price, 1999). Del mismo modo, la interfaz se ve afectada también por factores como la viscosidad, la tensión interfacial y la presión de vapor saturada. (Khajehesamedini et al., 2018, quien citó a Leong et al., 2007)

4.2.8 Acción en la Gota

La diferencia en el factor de compresibilidad de los dos fluidos presentes en la emulsión afecta la gota, es así como al aplicar diferentes fuerza a los dos fluidos, se genera una fuerza neta sobre la fase dispersa y cuando la distancia entre las gotas es menor que la longitud de onda del ultrasonido, las gotas empiezan a moverse al nodo y al antinodo de la onda estacionaria (Khajehesamedini et al., 2018), por lo tanto, comienzan a actuar las fuerzas hidrodinámicas y en conjunto con las vibraciones producidas por la onda ultrasónica cuando atraviesa el petróleo, las

gotas de agua en suspensión se unen, generando la sedimentación y separación de las fases. (Wang et al., 2018, quien citó a Check y Mowla, 2013)

Del mismo modo la aglomeración de gotas se divide en dos regímenes. El primero es cuando las gotas son llevadas rápidamente a las posiciones de equilibrio de presión más cercano (nodo o antinodo) debido a la gravedad y la fuerza acústica primaria, y el segundo es cuando las gotas están cerca y comienzan a colisionar lentamente debido a la combinación de fuerzas de van der Waals y la fuerza secundaria. (Xie et al., 2015, quien citó a Pangu y Feke, 1972)

4.3 Efectos de las ondas ultrasónicas sobre el crudo en el proceso de deshidratación, encontrados en la literatura

Los estudios encontrados en la literatura se enfocan tanto en procesos de laboratorio, diseños de equipos de alto volumen de crudo y en procesos completos usados en campo para la deshidratación por medio de ondas ultrasónicas y debido a los resultados óptimos obtenidos de este método se sigue investigando a nivel mundial, en especial en la deshidratación de crudos pesados de Asia y en lugares donde quieren mejorar la eficiencia de deshidratación al aplicar nuevas tecnologías.

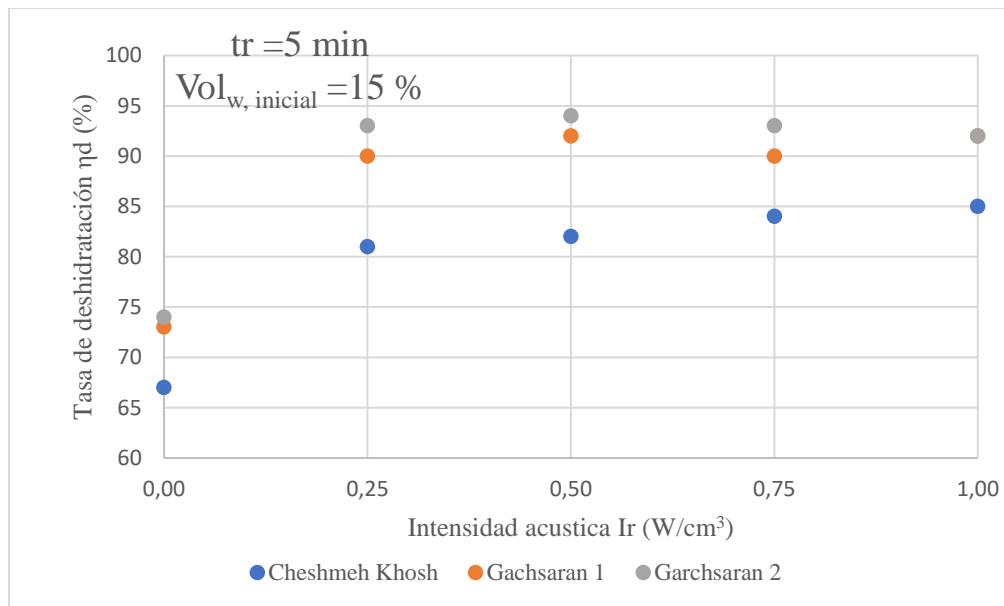
Es así como la siguiente sección se expondrán los resultados de algunos casos experimentales hallados en la literatura en los cuales se han evaluado los parámetros implicados en la deshidratación por medio de ondas ultrasónicas, así como los diversos comportamientos registrados en emulsión luego de su exposición al ultrasonido y algunas condiciones de trabajo de los diversos casos.

4.3.1 Intensidad Vs Deshidratación.

Según el estudio realizado por Khajehesamedini et al., (2018), la intensidad es una característica que es directamente proporcional a la deshidratación, puesto que, a mayor intensidad el tiempo requerido para la deshidratación de los crudos es menor, de igual forma, se menciona que existe una intensidad de óptima en la que la eficacia de separación es la ideal, también menciona que, si la intensidad acústica llegara a superar en algún momento el umbral de cavitación, se crearían turbulencias locales con fuerzas de cizallamiento que terminarían rompiendo las gotas y generando nuevamente la dispersión de estas en el crudo, imposibilitando la deshidratación de este.

La Figura 21, representa el comportamiento de la deshidratación de tres muestras de crudo diferentes, al ser irradiados con ultrasonido en diferentes intensidades. En los anexos se encuentra información detallada de las características de cada una de las muestras de crudo usadas (Anexo A).

Figura 21. El efecto de la intensidad acústica en la tasa deshidratación de la emulsión.



Nota: Cheshmeh Khosh: 21°API, Gachsaran 1: 28°API y Gachsaran: 31.5° API, crudos de Irán. Adaptado de Khajehesamedini et al., 2018. Experimental and theoretical study of crude oil pretreatment using low-frequency ultrasonic waves.

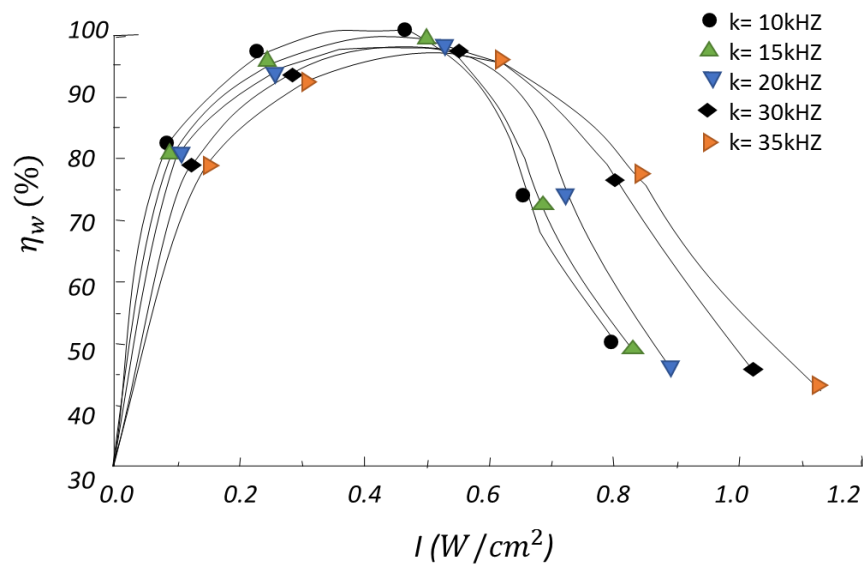
Como se puede observar en la gráfica, al aumentar la intensidad de la onda, la tasa de deshidratación aumenta, sin embargo, en un punto determinado en dos de las tres muestras, la tasa de deshidratación empieza a disminuir, ese punto de inflexión en la gráfica representa lo que se conoce como cavitación. La muestra en la que ese punto aun no es visible gráficamente todavía no ha alcanzado la cavitación, pues este aumenta con el aumento de la viscosidad de la fase continua

(Khajehesamedini et al., 2018). Este comportamiento permite inferir entonces que, aunque la intensidad sea directamente proporcional a la deshidratación, grandes valores para esta característica no significa siempre buenos resultados.

De igual forma, Wang et al., (2017), en su estudio, también encontraron que la tasa de deshidratación aumenta conforme aumenta la intensidad del sonido, y así mismo que se debe mantener en un rango óptimo puesto que, a niveles excesivos de intensidad, se producirá el efecto de cavitación haciendo la emulsión mucho más estable y difícil de romper (Ver

Figura 22).

Figura 22. Curva de relación entre la intensidad del sonido y la tasa de deshidratación.

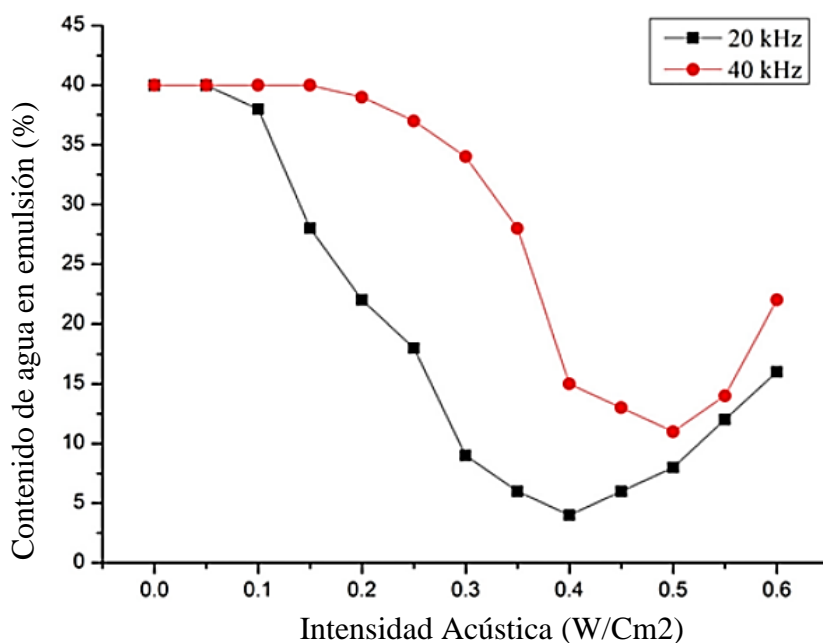


Nota: K corresponde al valor de la frecuencia usada en el momento de registrar los valores de cada curva.

Tomado de Wang et al., (2017) Research on the static experiment of super heavy crude oil demulsification and dehydration using ultrasonic wave and audible sound wave at high temperatures.

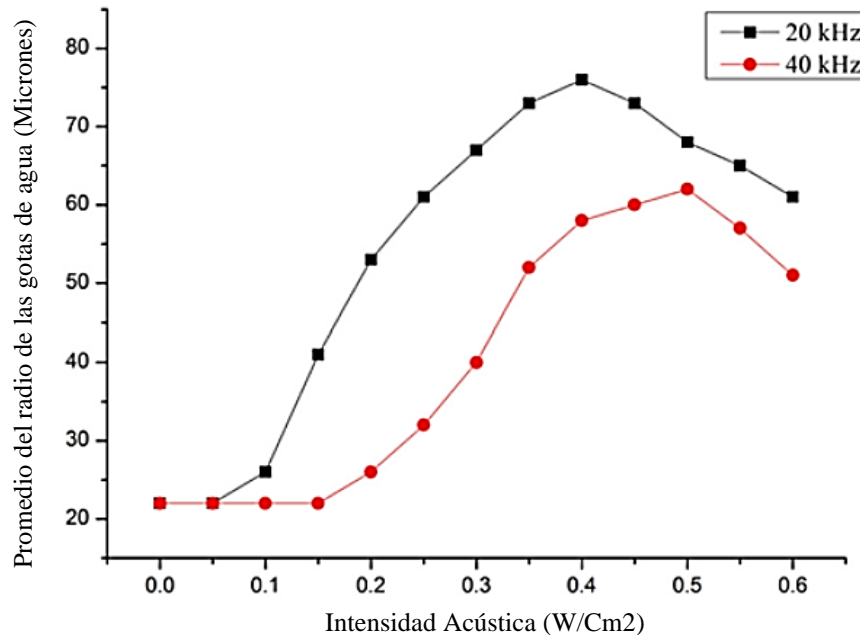
Así mismo, Xie et al., (2015) realizaron un estudio en el que midieron el efecto de la intensidad de la onda sobre la deshidratación de crudos en términos de porcentaje (%) de contenido de agua en emulsión y variación del tamaño de las gotas de agua, los resultados de esta investigación apoyan los hallazgos de Wang et al., (2017) y Khajehesamedini et al., (2018). En los anexos se encuentra una tabla con las características del crudo utilizado (Anexo F). La intensidad favorece a la deshidratación de los crudos hasta cierto punto, luego de ahí inicia el proceso de cavitación y rompiendo las gotas de agua en gotas aún más pequeñas, esto puede observarse en la Figura 23 y la Figura 24, mostradas a continuación. De estas gráficas también se puede concluir que entre mayor sea la frecuencia utilizada, mayor será la intensidad requerida.

Figura 23. Variación del contenido de agua en emulsión Vs la Intensidad Acústica



Nota: Estudio realizado a 60°C y con 12 minutos de exposición a la onda de ultrasonido. Tomado de (Xie et al., (2015). *Acoustically aided coalescence of water droplets and dehydration of crude oil emulsion*. Korean Journal of Chemical Engineering, 32(4), 643–649. <https://doi.org/10.1007/s11814-014-0253-6>.

Figura 24. Efecto de la Intensidad Acústica sobre el tamaño de las gotas de agua en emulsión.



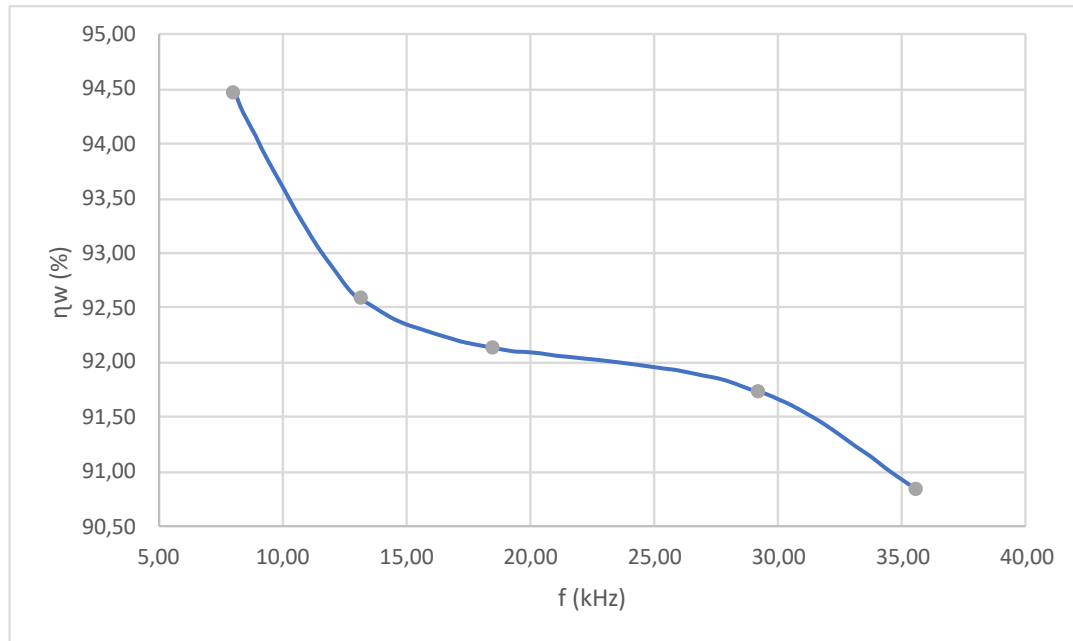
Nota: Estudio realizado a 60°C y con 12 minutos de exposición a la onda de ultrasonido. Tomado de (Xie et al., (2015) *Acoustically aided coalescence of water droplets and dehydration of crude oil emulsion*. Korean Journal of Chemical Engineering, 32(4), 643–649. <https://doi.org/10.1007/s11814-014-0253-6>.

4.3.2 Frecuencia Vs Deshidratación.

En lo concerniente a la frecuencia, Wang et al., (2017) exponen que ésta y la tasa de deshidratación son inversamente proporcionales, puesto que el comportamiento que se observó en los resultados de los estudios (Ver Figura 25), es que la deshidratación del crudo disminuye con el incremento de la frecuencia del sonido irradiado, la coalescencia de las gotas es mucho menor en

presencia de una frecuencia muy alta. Con ayuda de esta investigación se logró definir que una frecuencia optima razonable a nivel experimental podría estar alrededor de los 20kHz.

Figura 25. Curva de relación entre la frecuencia del sonido y la tasa de deshidratación.

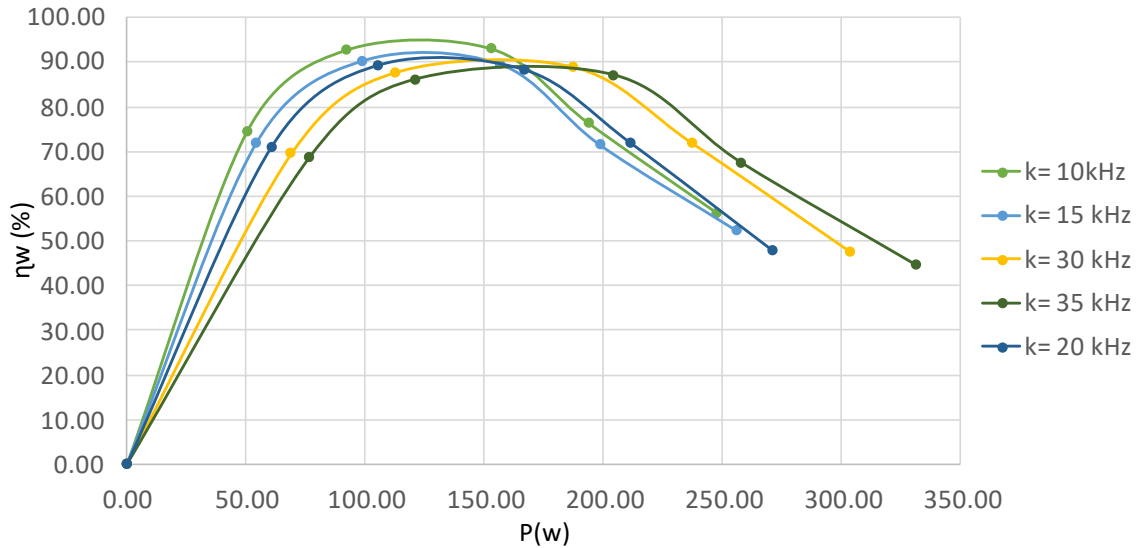


Nota: Tomado de Wang et al., (2017) Research on the static experiment of super heavy crude oil demulsification and dehydration using ultrasonic wave and audible sound wave at high temperatures.

4.3.4 Potencia Vs Deshidratación.

Para favorecer o fomentar la deshidratación de los crudos no siempre es mejor usar valores altos de potencia y al igual que en la intensidad, estos valores deben ser controlados dentro de un rango óptimo para evitar que ocurra el fenómeno de la cavitación (Wang et al., 2017).

Figura 26. Curva de relación entre la potencia del sonido y la tasa de deshidratación.



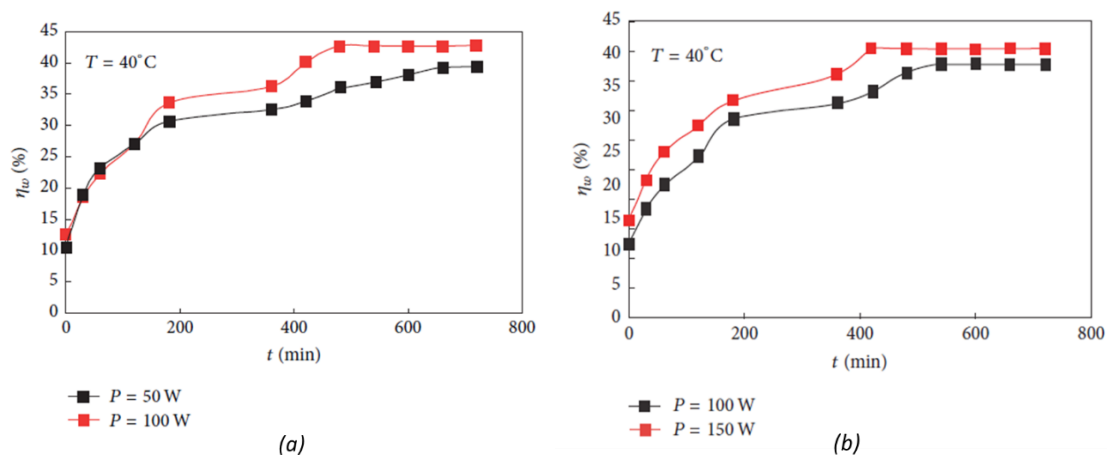
Nota: K corresponde al valor de la frecuencia usada en el momento de registrar los valores de cada curva.

Tomado de Wang et al., (2017) Research on the static experiment of super heavy crude oil demulsification and dehydration using ultrasonic wave and audible sound wave at high temperatures.

Teniendo en cuenta lo expuesto en la Figura 26, es válido deducir que no existe un rango óptimo para la potencia, pues dicho rango variará dependiendo de la frecuencia del sonido que se esté usando. El punto de inflexión observado en cada una de las curvas de la imagen es el inicio del fenómeno de cavitación (Wang et al., 2017): a mayores frecuencias, la potencia usada puede ser mayor y el punto de cavitación más alto, sin embargo, la tasa de deshidratación no sería la mejor, puede optarse por potencias más bajas, con frecuencias más bajas para tener mejores tasas de deshidratación pero se debe ser cuidadoso con los valores de operación para evitar entrar en la cavitación.

Del mismo modo, en los estudios realizados por Yi et al., (2017) se pretendía ver el impacto de la potencia si se mantenía una temperatura constante de 40°C, al igual que la concentración de desemulsionante y el tiempo de tratamiento con ultrasonido. Los resultados de la investigación se muestran en la Figura 27, en la que es posible observar que efectivamente la tasa de deshidratación final aumenta al aumentar la potencia del ultrasonido, teniendo en cuenta que en este caso se le aplicó un desemulsionante químico al sistema. Las vibraciones mecánicas aumentan al aumentar la potencia, y esto genera mayor contacto entre las gotas, fomentando así una mayor deshidratación.

Figura 27. El impacto del ultrasonido a diferentes potencias.



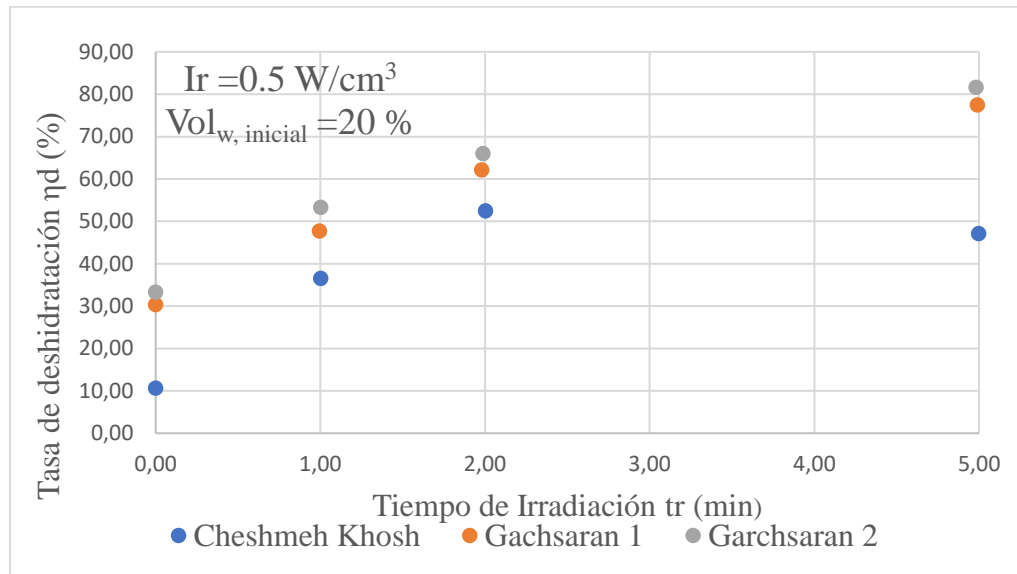
Nota: (a) potencia de 50W y 100 W, (b) potencia de 100W y 150W, Tomado de Yi et al., (2017), Research on Crude Oil Demulsification Using the Combined Method of Ultrasound and Chemical Demulsifier.

4.3.5 Tiempo de irradiación Vs Deshidratación.

El tiempo de irradiación de ultrasonido, es otra de las características que es directamente proporcional a la tasa de deshidratación de crudos, es decir que entre mayor sea el tiempo en que se le irradie ultrasonido a un crudo, la tasa de deshidratación será mayor. Khajehesamedini et al.,

(2018) también incluyeron en su estudio, el análisis del tiempo de irradiación por lo que, la Figura 28 ilustra el comportamiento anteriormente descrito.

Figura 28. Efecto del tiempo de irradiación en la tasa de deshidratación de la emulsión.



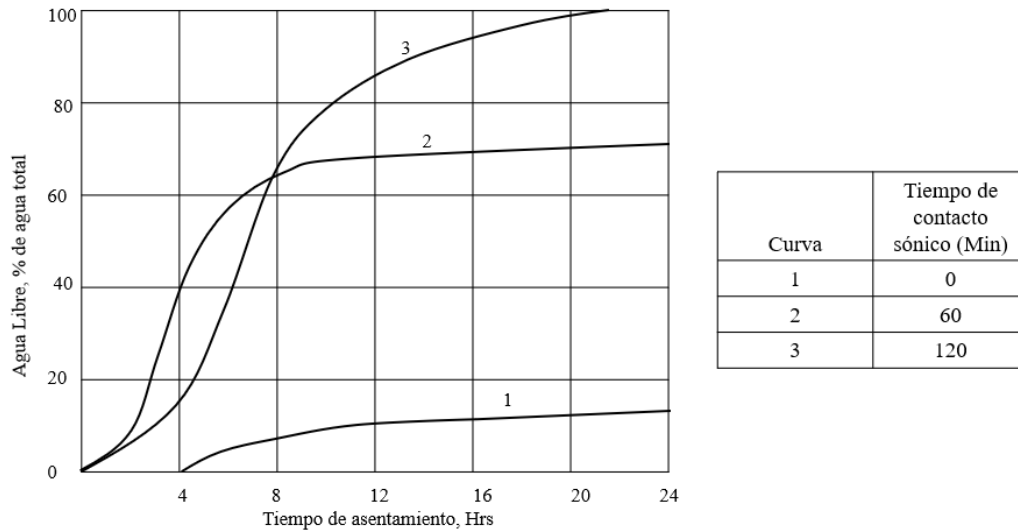
Nota: Cheshmeh Khosh: 21°API, Gachsaran 1: 28°API y Gachsaran: 31.5° API. Adaptado de Khajehesamedini et al., (2018) Experimental and theoretical study of crude oil pretreatment using low-frequency ultrasonic waves.

Teniendo en cuenta la anterior figura, se confirma el hecho de que al tener tiempos de irradiación mayores se obtiene mejores resultados de agregación de la fase dispersa, sin embargo, también se observa que si se tienen tiempos de irradiación muy largos la tasa de deshidratación empieza a disminuir, esto ocurre debido a que la emulsión empieza a aumentar su temperatura provocando que el umbral cercano a la cavitación sea menor, ocasionando así que esta disperse las gotas agregadas y reduzca la eficacia del tratamiento de separación. (Khajehesamedini et al., 2018)

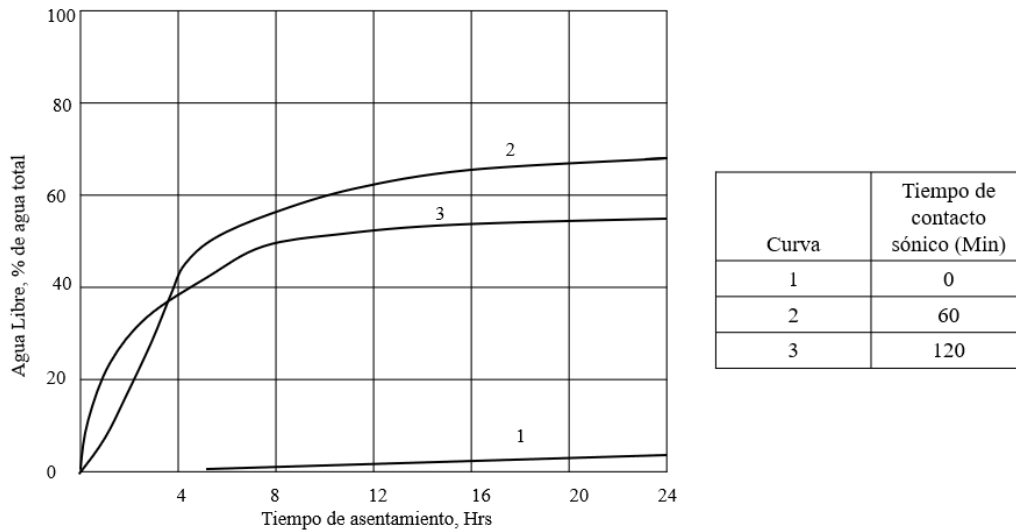
Así mismo, Schoepel & Howard, (1996) en su investigación también encontraron que la tasa de deshidratación mejora con la irradiación de ultrasonido y el tiempo que esto tarde, como

resultado de las pruebas que le hicieron a otras tres muestras, distintas entre ellas, en los anexos se encuentra la información de la caracterización de las muestras (Anexo B). A continuación, se mostrarán los resultados de las pruebas realizadas a dos de ellas.

Figura 29. Resultados de la desemulsificación ultrasónica del crudo 1.



Nota: Los resultados mostrados en la figura, son libre de químicos. Modificado de Schoepel & Howard, (1996), Effect and of Ultrasonic of Irradiation Crude on Coalescence Emulsions Separation

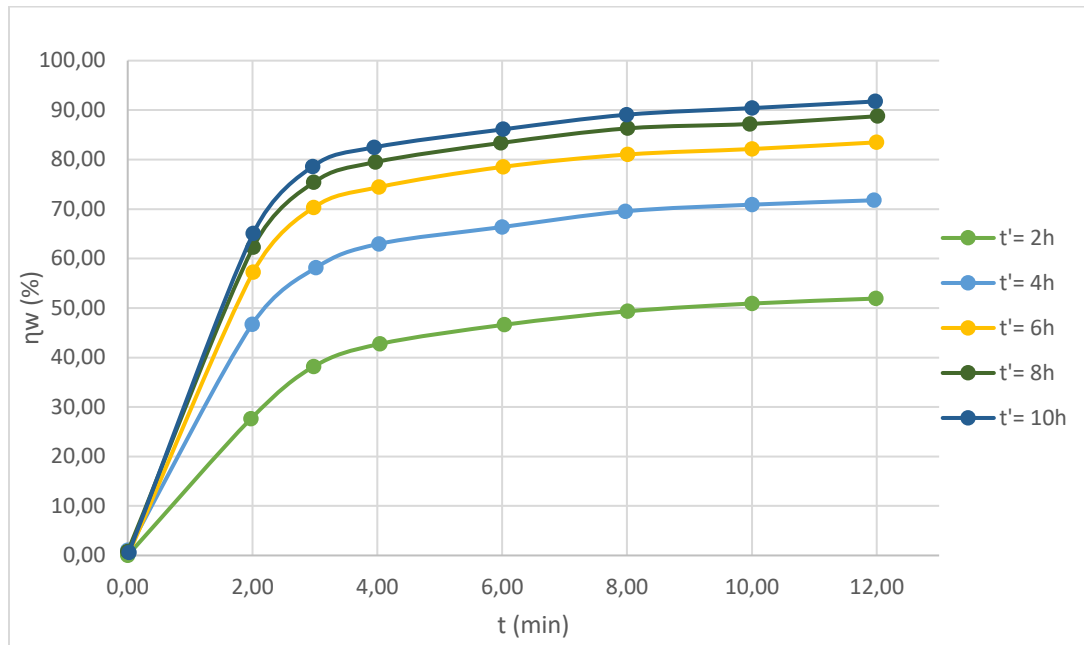
Figura 30. Resultados de la desemulsificación ultrasónica del crudo 2.

Nota: Los resultados mostrados en la figura, son libre de químicos. Modificado de Schoeppel & Howard, (1996), Effect and of Ultrasonic of Irradiation Crude on Coalescence Emulsions Separation

La Figura 29 y la Figura 30, muestran la efectividad de la irradiación de ondas ultrasónicas en el tratamiento de deshidratación con incrementos de entre 500% y 700% en volumen, así mismo, permite evidenciar el hecho de que, en el mayor tiempo de irradiación (120 minutos) se obtuvieron los mejores resultados (Schoeppel & Howard, 1996).

Los autores Wang et al., (2017) también estudiaron el efecto del tiempo de irradiación sobre la efectividad de la deshidratación con ultrasonido, de esto encontraron que los valores de la tasa de deshidratación son directamente proporcionales al tiempo de irradiación del ultrasonido, sin embargo, llega un punto en el que la gráfica se aplana (Ver Figura 31), por lo que valores muy grandes en el tiempo de irradiación no necesariamente son los mejores, esto debido a que a medida que el tiempo avanza, el número de partículas pequeñas disminuye y con ellas la probabilidad de que las gotas choquen permitiendo la coalescencia.

Figura 31. Curva de relación entre el tiempo de irradiación ultrasónica y la tasa de deshidratación.

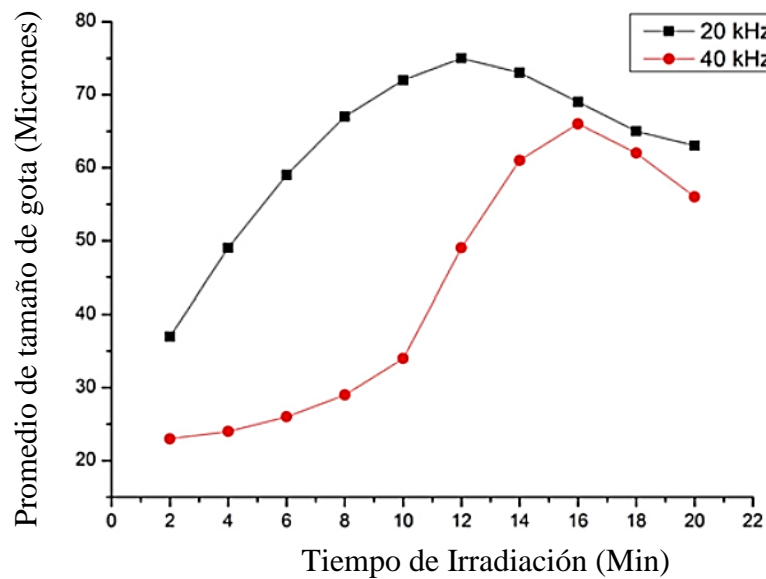


Nota: t' corresponde al tiempo de sedimentación de las gotas, t es el tiempo de irradiación ultrasónica y n_w es la tasa de deshidratación. Tomado de Wang et al., (2017) Research on the static experiment of super heavy crude oil demulsification and dehydration using ultrasonic wave and audible sound wave at high temperatures.

Así mismo Xie et al., (2015) realizaron una investigación cuyos hallazgos respaldan los resultados obtenidos por los autores antes mencionados. El tiempo de irradiación afecta positivamente a la deshidratación hasta cierto punto, en su investigación desde el inicio de la irradiación ultrasónica hasta el minuto 12, se observa un crecimiento en el tamaño de la gota de agua en emulsión, pero al dejar la irradiación por más tiempo, el efecto es contrario al deseado, el tamaño de las gotas empieza a disminuir volviendo la emulsión mucho más estable, esto se debe

al proceso de cavitación mencionado ya en otras ocasiones. En la siguiente gráfica se pueden observar los resultados obtenidos durante el estudio de Xie et al., (2015).

Figura 32. Variación del tamaño de la gota de agua en emulsión Vs El tiempo de irradiación de ultrasonido.



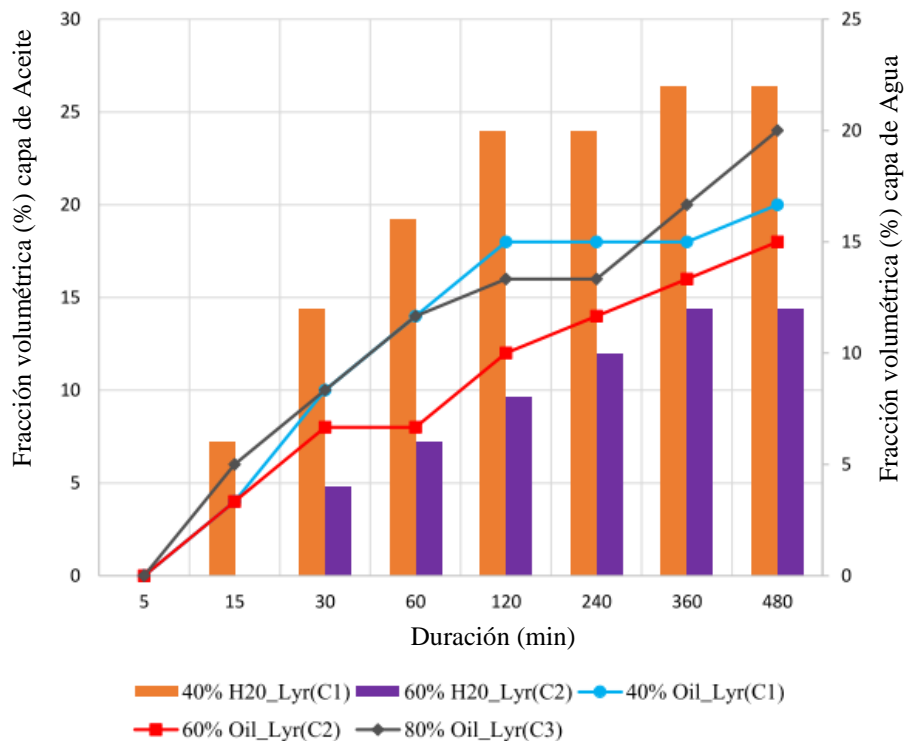
Nota: tomado de (Xie et al., (2015) *Acoustically aided coalescence of water droplets and dehydration of crude oil emulsion*. Korean Journal of Chemical Engineering, 32(4), 643–649. <https://doi.org/10.1007/s11814-014-0253-6>

4.3.6 Amplitud Vs Deshidratación.

Para el estudio de esta propiedad Chun Haur, (2016) utilizó 3 muestras de un mismo crudo a ciertas condiciones, variando el porcentaje de la amplitud en cada escenario, en los anexos, se encuentra una tabla con la información detallada de cada uno de los escenarios (Anexo C).

Los mejores resultados se dieron en el tercer grupo de muestras. Estos pueden observarse en la Figura 33.

Figura 33. Fracción de volumen (%) de la capa de aceite y la capa de agua a diferentes amplitudes ultrasónicas – Grupo 3.



Nota: El estudio se hizo a una temperatura de 60°C. Tomado de Chun Haur, (2016) Study on the effect of ultrasonic wave amplitude on de-emulsification of crude oil to enhance production process.

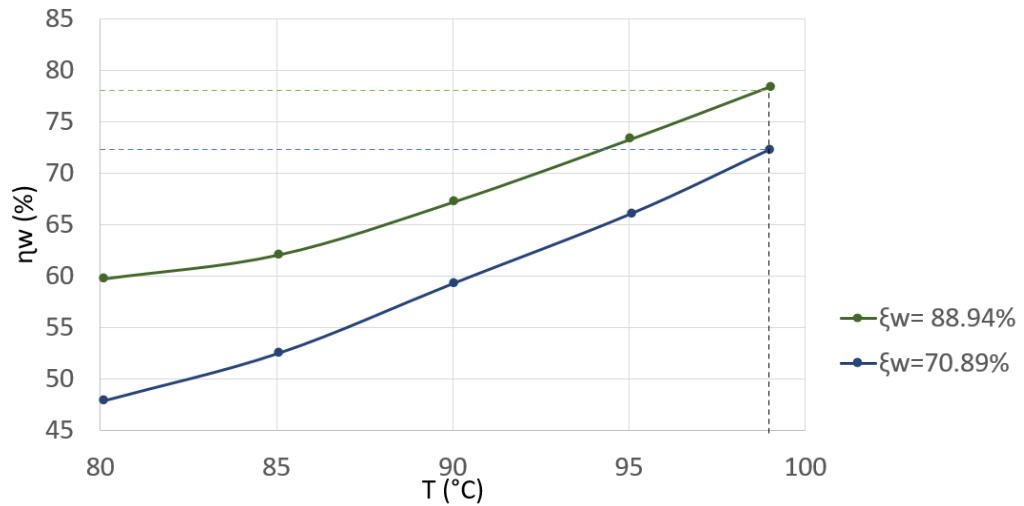
De acuerdo con la anterior figura, se puede decir que la amplitud de una onda es inversamente proporcional a la deshidratación, por lo que, para conseguir deshidratar una muestra, se prefieren amplitudes más pequeñas. La muestra C1, con un 40% de amplitud logró tener el mejor resultado del grupo 3, aunque tiene el menor porcentaje de separación de aceite libre de la emulsión (20% en fracción de volumen), consiguió liberar la mayor cantidad de agua de esta (22% en fracción de volumen), le sigue la muestra C2 con una producción poco menor de aceite, pero con una capa de agua libre mucho menor, y por último la muestra C3, quien no tuvo producción

de una capa libre de agua, esto debido a que los valores de los parámetros utilizados en este estudio no eran los adecuados y la muestra entró en cavitación (Chun Haur, 2016). Según los criterios del estudio, el experimento se puede considerar satisfactorio si la capa emulsión (emulsión) conseguía un porcentaje en fracción de volumen inferior al 80%, en el caso de la muestra C1, si se suman los % de agua y aceite libres (42% en fracción volumen), dejaría un restante de 58% en fracción de volumen para la capa emulsionada, por lo tanto, el método funciona con éxito para amplitudes bajas.

4.4 Otros factores que influyen en la deshidratación de los crudos, hallados en la literatura.

4.4.1 Temperatura.

La temperatura del crudo o del sistema, es otro factor que se encontró que afectaba positivamente la efectividad de la deshidratación con ondas ultrasónicas, independientemente de la cantidad de agua que se encuentre en emulsión (Wang et al., 2017). En la Figura 34 se puede observar gráficamente este comportamiento.

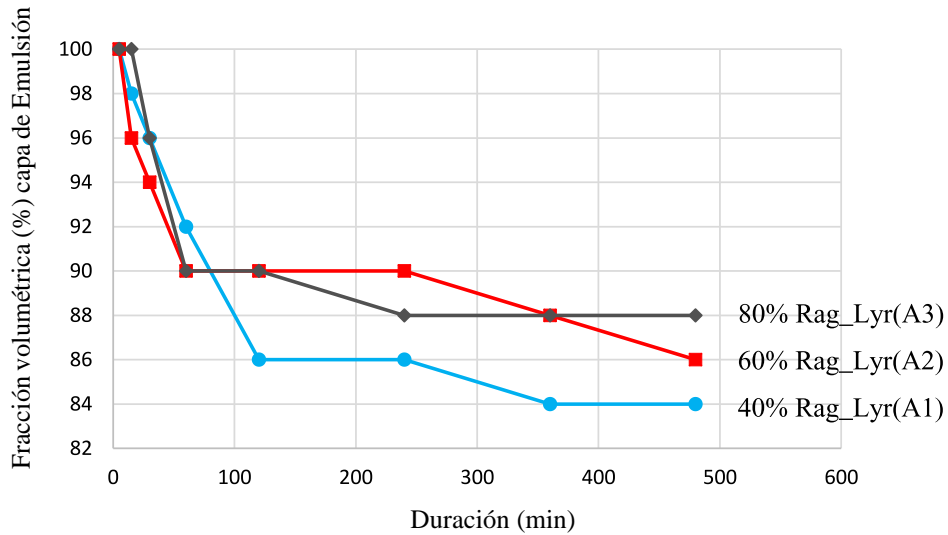
Figura 34. Curva de relación entre la temperatura y la tasa de deshidratación.

Nota: la frecuencia y potencia del ultrasonido usado es 20kHz y 200w respectivamente, el tiempo por el que se irradió el ultrasonido corresponde a 5 minutos y el tiempo de asentamiento es de 8 horas. ξ_w representa la relación de agua. Tomado de Wang et al., (2017) Research on the static experiment of super heavy crude oil demulsification and dehydration using ultrasonic wave and audible sound wave at high temperatures.

La temperatura reduce la densidad de la fase continua ocasionando que la diferencia de densidades entre el agua y el petróleo sea mayor, lo que permite un mayor movimiento de las gotas y con esto una mayor velocidad de sedimentación, además las probabilidades de que las gotas choque unas con otras aumenta lo que favorece positivamente a la coalescencia de estas, sin mencionar que la emulsión sería mucho más inestable (Wang et al., 2017).

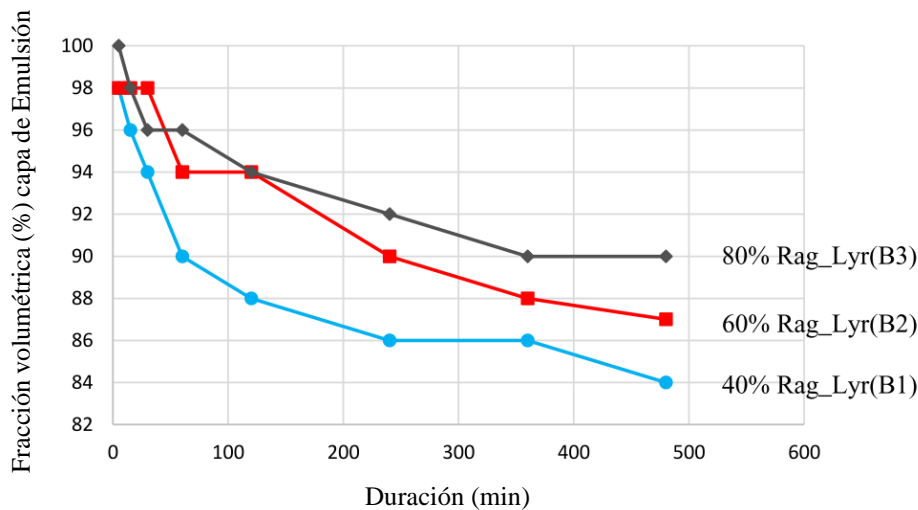
Chun Haur, (2016), también estudió el impacto de la temperatura en la deshidratación de crudos pesados durante su investigación, midiendo la cantidad de agua y aceite liberados de la emulsión y registrando la cantidad de emulsión restante en términos de fracción volumétrica. Como resultado obtuvo los siguientes comportamientos.

Figura 35. Fracción de volumen (%) de la capa de emulsión para diferentes amplitudes de ultrasonido – Grupo 1



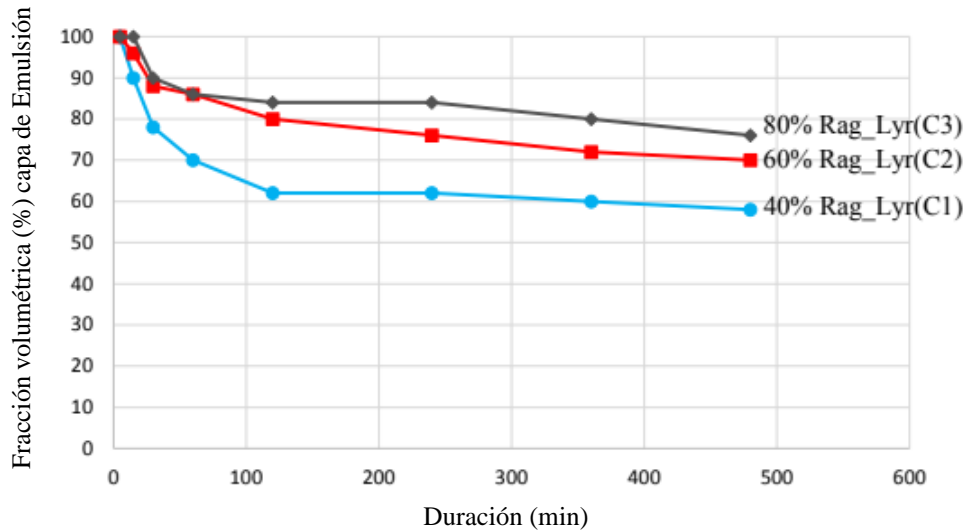
Nota: Estos resultados se obtuvieron con una temperatura de 30°C. Tomado de Chun Haur, (2016) Study on the effect of ultrasonic wave amplitude on de-emulsification of crude oil to enhance production process.

Figura 36. Fracción de volumen (%) de la capa de emulsión para diferentes amplitudes de ultrasonido – Grupo 2.



ta: Estos resultados se obtuvieron con una temperatura de 45°C. Tomado de Chun Haur, (2016) Study on the effect of ultrasonic wave amplitude on de-emulsification of crude oil to enhance production process.

Figura 37. Fracción de volumen (%) de la capa de emulsión para diferentes amplitudes de ultrasonido – Grupo 3.



Nota: Estos resultados se obtuvieron con una temperatura de 60°C. Tomado de Chun Haur, (2016) Study on the effect of ultrasonic wave amplitude on de-emulsification of crude oil to enhance production process.

Se debe tener en cuenta, que las muestras están compuestas en una proporción 70:30 de aceite y agua respectivamente, comparando la Figura 35, la Figura 36 y la Figura 37, es posible determinar que a medida que se va incrementando la temperatura del sistema, los resultados en cuanto a la cantidad de agua y aceite liberados mejoran. Recordando lo mencionado por Chun Haur, (2016), lo ideal es que la capa de emulsión esté por debajo del 80% en fracción de volumen, y con los resultados mostrados en las gráficas anteriores, se puede notar cómo a medida que la temperatura aumenta, el % de la capa emulsionada disminuye también, es así que con una temperatura de 30°C en el grupo 1, la muestra con menor capa de emulsión tienen un 84% de fracción volumétrica, en el grupo 2, la muestra con mejores resultados a 45°C tiene una capa de emulsión de 84% de fracción volumétrica, pero sin estabilizarse por lo que se esperaría que a

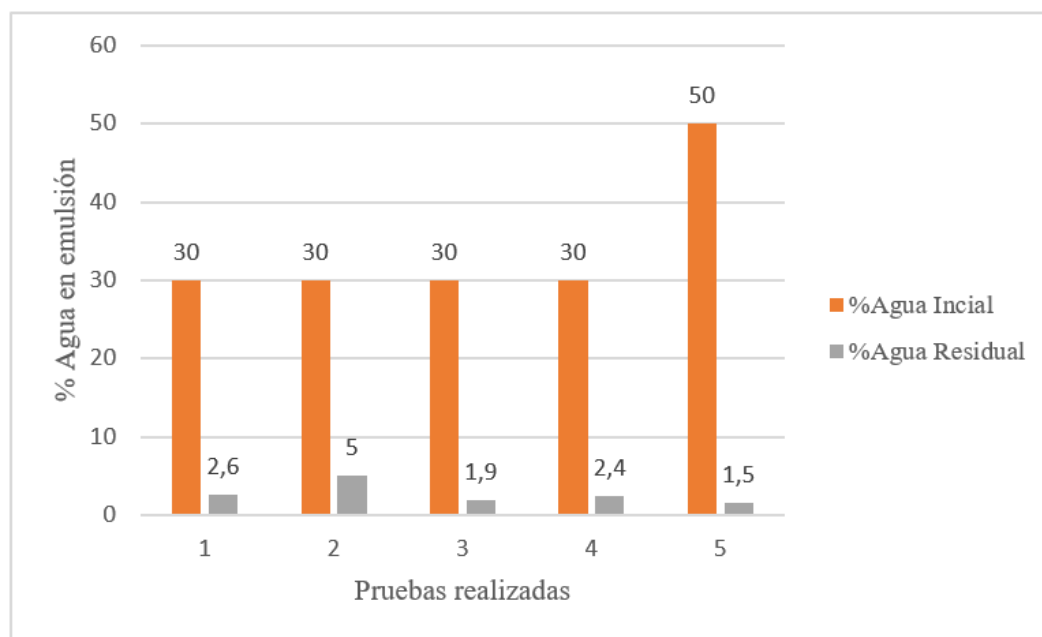
mayor tiempo ese valor disminuya, y por último, en el tercer grupo, con una temperatura de 60°C se logró una capa emulsionada del 58% en fracción de volumen, lo que permite concluir que la temperatura es un aliado importante a la hora de deshidratar un crudo (Chun Haur, 2016). En los anexos (Anexo D) se encuentra una tabla donde se registra la efectividad del tratamiento ultrasónico para fomentar la floculación y coalescencia, en términos del aumento de las medidas de las gotas de agua dispersas.

4.4.2 Agua en emulsión.

El efecto de la cantidad de agua en emulsión en la efectividad de la deshidratación de crudos algunas veces puede ser complicada, ya que, según los estudios realizados por Wang et al., (2017) para valores inferiores al 70% de la proporción de agua en emulsión, la tasa de deshidratación disminuye a medida que va aumentando la relación de agua porque, al tener un tiempo de sedimentación estable, hay más cantidad de agua que se debe separar en el mismo tiempo, así que es lógico que se de esta disminución, pero para valores superiores al 70% las emulsiones W/O y O/W coexisten en el sistema, facilitando la coalescencia y la sedimentación de las gotas.

Así mismo, el estudio realizado por Wang et al., (2017) permitió identificar que el tamaño de las gotas de agua y la dispersión de estas también afecta de cierta forma en la deshidratación de crudos, pues las gotas pequeñas dispersas interactúan fácilmente entre sí, mientras que a medida que van creciendo se van alejando entre sí, disminuyendo la posibilidad de contacto entre ellas y por lo tanto se genera una reducción en la eficiencia del ultrasonido.

Figura 38. Relación entre la proporción de agua inicial y el porcentaje de agua residual en la emulsión.



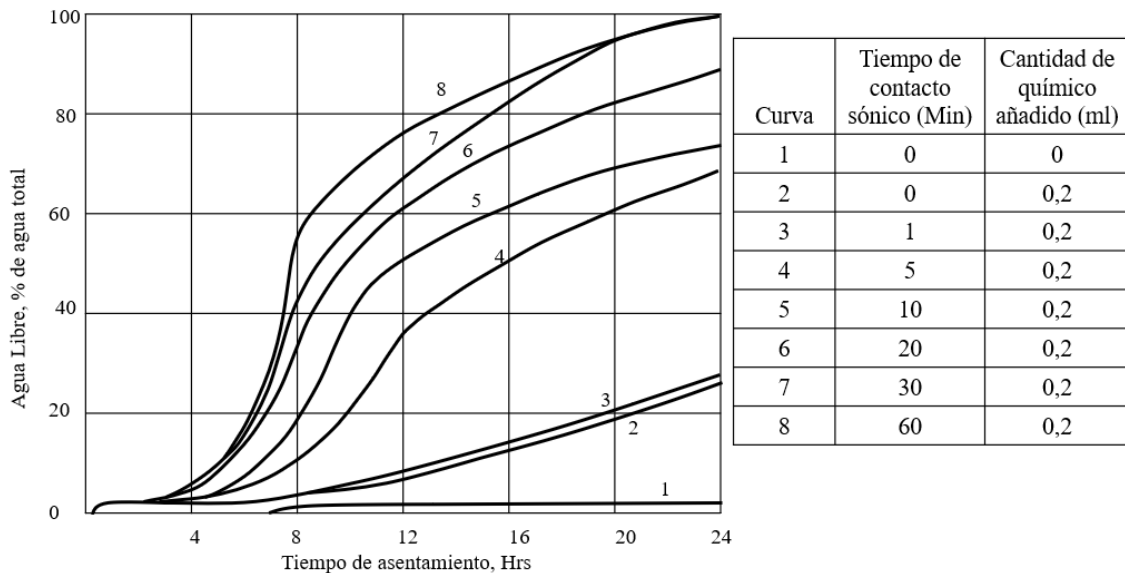
Nota: La pruebas 1, 2, 3, 4 y 5 se realizaron a 70°C, 70°C, 70°C, 60°C y 70°C respectivamente. Modificado de Giraldo Atehortúa, C. M., Pérez, N., Andrade, M. A. B., Pereira, L. O. V., & Adamowski, J. C. (2019). Water-in-oil emulsions separation using an ultrasonic standing wave coalescence chamber. *Ultrasonics Sonochemistry*, 57(April), 57–61. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.04.043>

Giraldo Atehortúa et al., (2019) realizaron también una investigación en la que estudiaron el efecto que tenía la cantidad de agua inicial en la emulsión y la dispersión de esta (ver Figura 38), arrojando como resultado que ambas influyen de forma positiva en la deshidratación, ya que, al haber más contenido de agua dispersa, la interacción entre las gotas es mucho mayor lo que promueve la floculación y coalescencia de las gotas. Las condiciones iniciales de la investigación realizada por Giraldo Atehortúa et al., (2019) se encuentran especificadas en los anexos (Anexo G).

4.4.3 Adición de químicos.

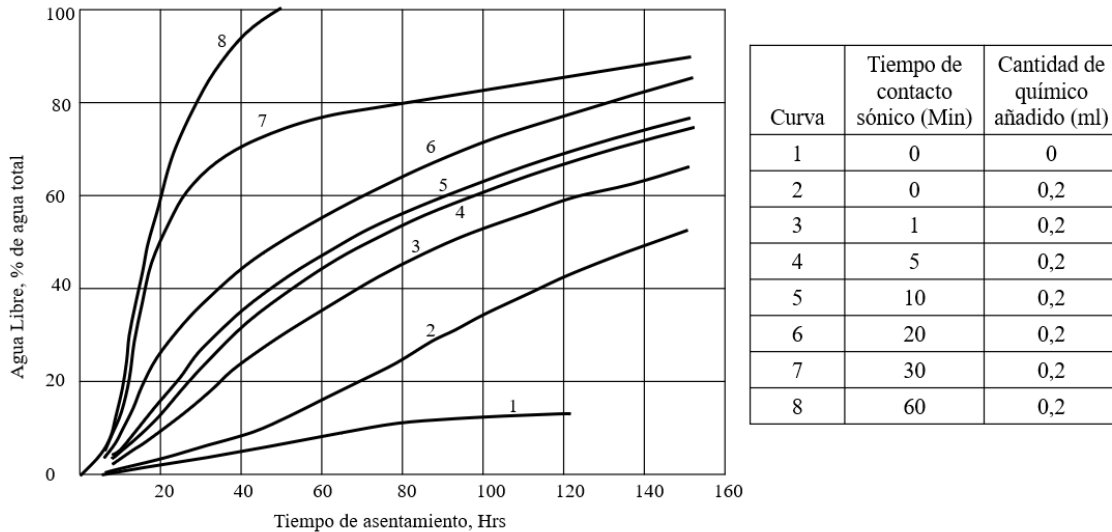
En el trabajo investigativo de Schoepel & Howard, (1996), dos de sus muestras respondieron bien al tratamiento con ultrasonidos sin intervención de químicos, sin embargo, una de ellas, la tercera, aunque la tasa de deshidratación mejoró con la irradiación ultrasónica, el incremento no fue tan significativo, caso contrario a lo sucedido con la aplicación de dos desemulsificantes (ver Figura 39 y Figura 40).

Figura 39. Resultados de la deshidratación química con irradiación ultrasónica del crudo N°3 con el químico 1.



Nota: Modificado de Schoepel & Howard, (1996), Effect and of Ultrasonic of Irradiation Crude on Coalescence Emulsions Separation

Figura 40. Resultados de la deshidratación química con irradiación ultrasónica del crudo N°3 con el químico 2.



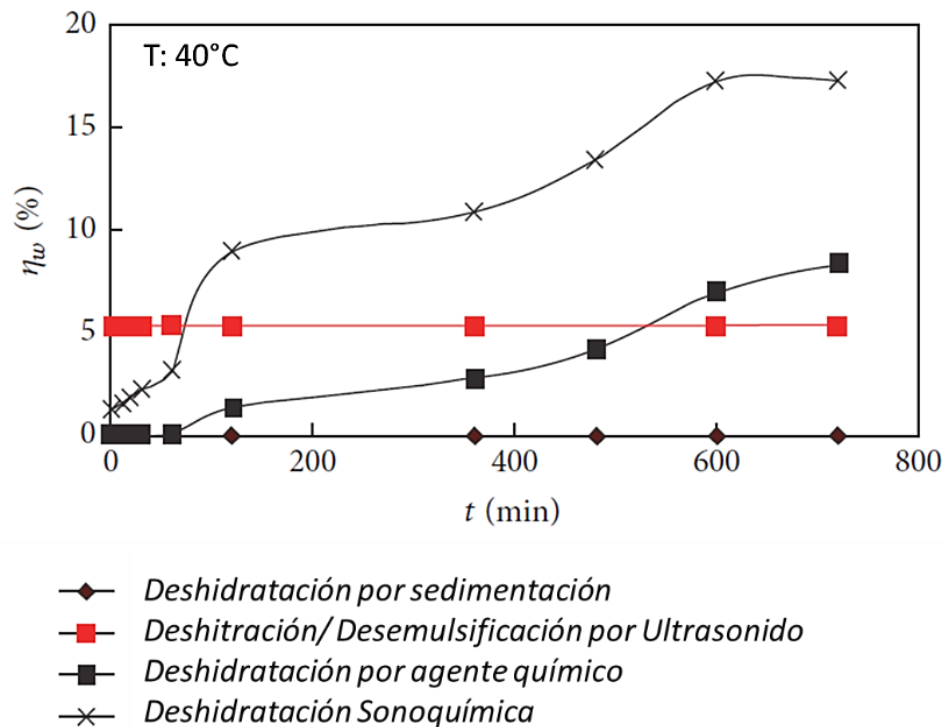
Nota: Modificado de Schoepel & Howard, (1996), Effect and of Ultrasonic of Irradiation Crude on Coalescence Emulsions Separation

Con los resultados obtenidos de estos estudios, se evidencia que la efectividad del método de deshidratación con ultrasonido se potencializa aún más con la presencia de un desémulsificante, por lo tanto, es válido deducir que, la efectividad del tratamiento ultrasónico no podría depender solo de las características de la onda, sino también de las propiedades físicas del crudo y del tratamiento químico que se le aplique (Schoepel & Howard, 1996).

Del mismo modo en el estudio de Yi et al., (2017) se investigó el comportamiento de la sedimentación normal, con un desémulsionante químico, ultrasonido y la combinación de ultrasonido y química para un crudo pesado la propiedades de este se encuentran en el Anexo E, se mantuvo constante una potencia de 500W y frecuencia de 20 kHz del mismo modo se realizaron algunas tomas de datos cambiando la temperatura, el comportamiento obtenido se observa en la

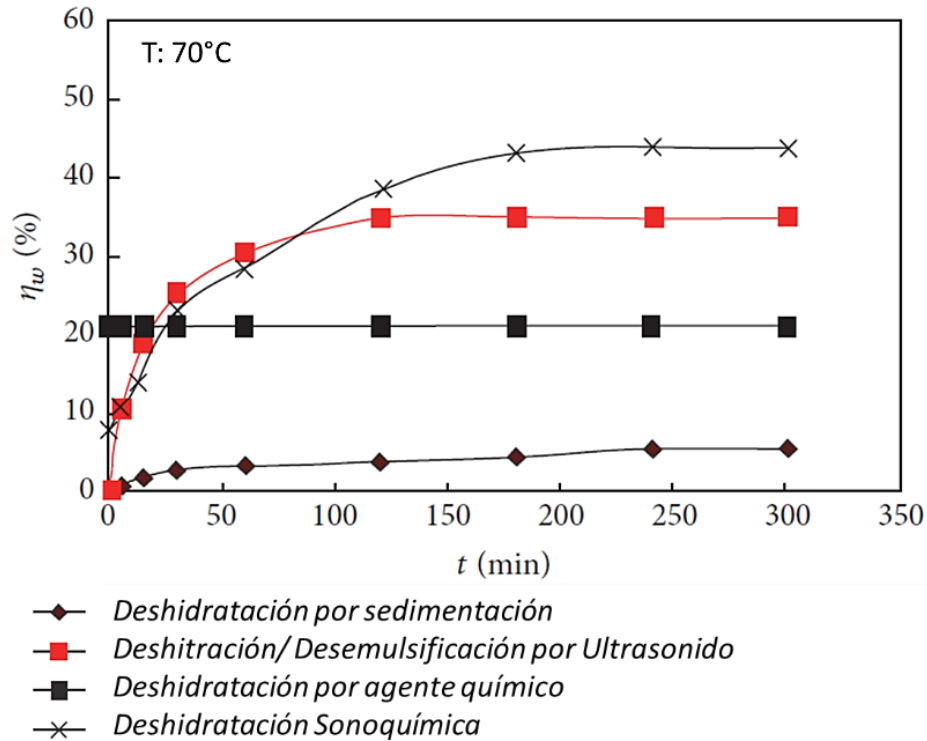
Figura 41 y la Figura 42 , estos resultados muestran que a 40°C la deshidratación comienza inmediatamente pero se mantienen invariables con el tiempo así mismo este método es menor que los resultados de la química o de la combinación de la química con el ultrasonido, ya si observan los resultados a 70°C la tasa de deshidratación cuando se usa un químico desemulsionante y el ultrasonido es casi el doble que la tasa del ultrasonido solo.

Figura 41. Comparación de los diversos comportamientos de la emulsión al aplicar diferentes métodos de deshidratación a 40°C.



Nota: Modificado de Yi et al., (2017), Research on Crude Oil Demulsification Using the Combined Method of Ultrasound and Chemical Demulsifier

Figura 42. Comparación de los diversos comportamientos de la emulsión al aplicar diferentes métodos de deshidratación a 70°C.

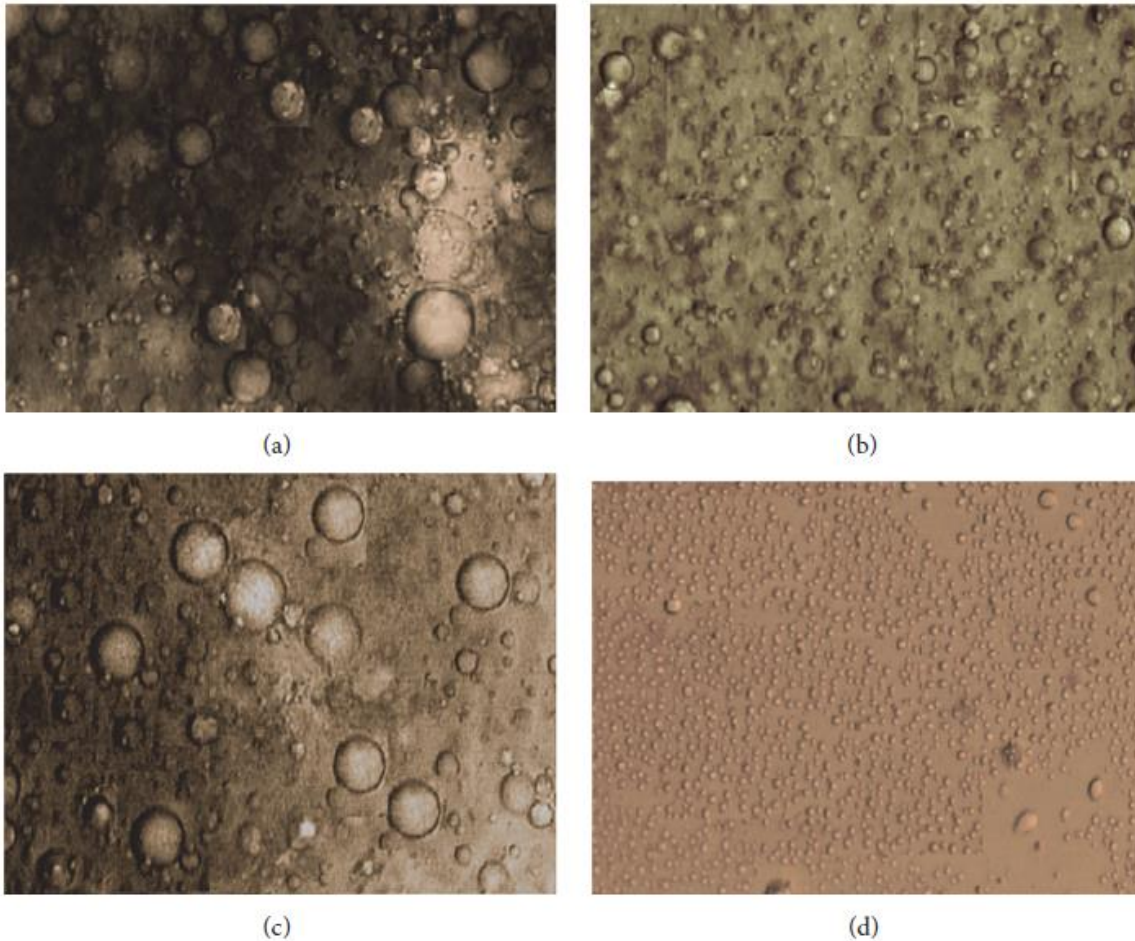


Nota: Modificado de Yi et al., (2017), Research on Crude Oil Demulsification Using the Combined Method of Ultrasound and Chemical Demulsifier

Es así como puede concluirse que al combinar un desemulsificante con ultrasonido se obtiene un mejor efecto en la deshidratación, así mismo si se aumenta la temperatura se mejora la tasa de deshidratación, ya que, la temperatura es importante para la desemulsificación.

En el mismo estudio Yi et al., (2017) registró en fotografías la distribución de las gotas en la emulsión según las condiciones del estudio a 70°C, en la Figura 43 se puede ver la diferencia de los diámetro de gotas de agua presentes en la emulsión.

Figura 43. Distribución de gotas de agua a diferentes condiciones de deshidratación a 70°C.



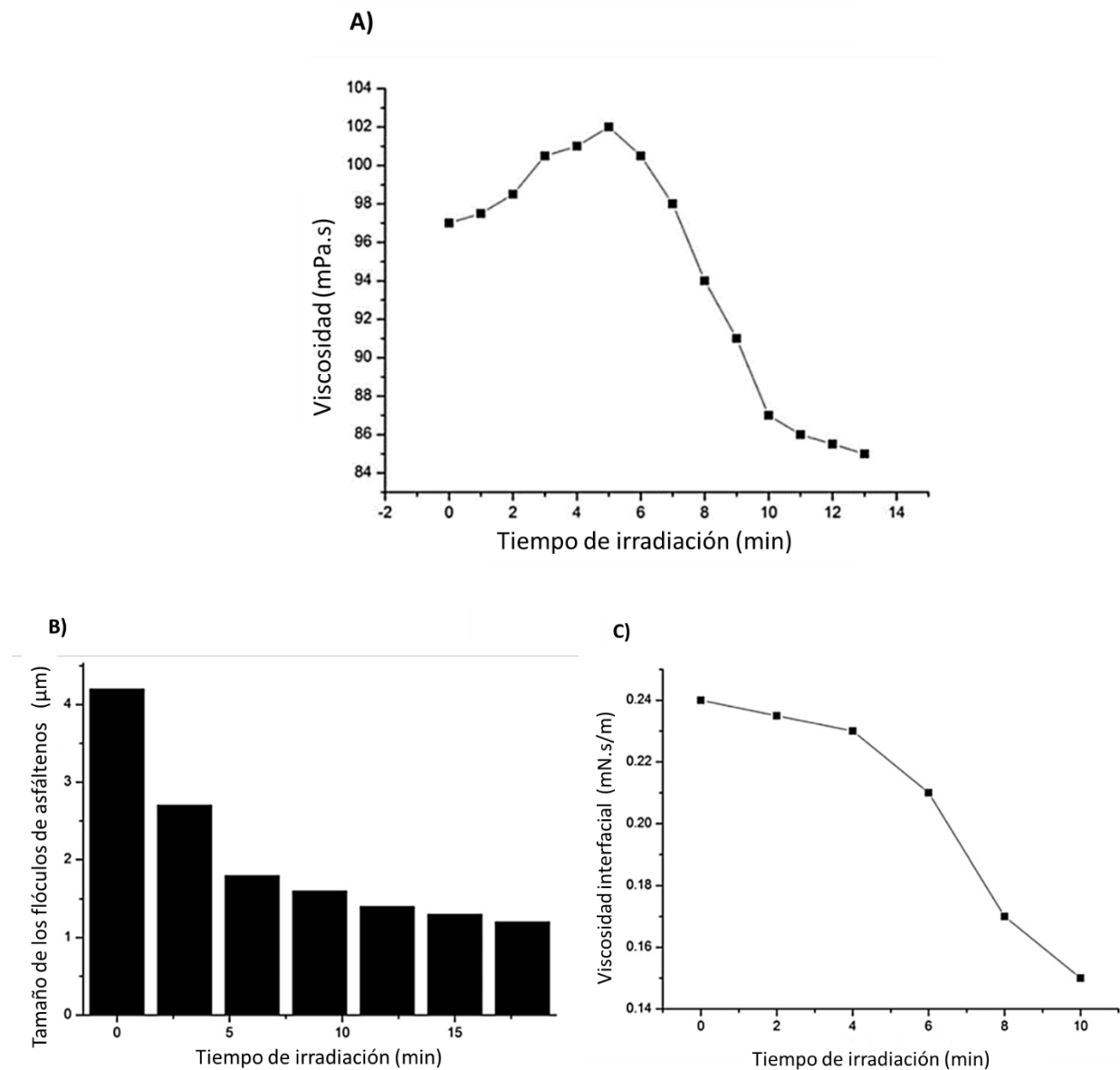
Nota: (a) Distribución de gotas antes de la deshidratación, (b) La distribución usando químico, (c) Distribución usando solo ultrasonido y (d) Distribución combinando ultrasonido y desemulsionante químico, Tomado de Yi et al., (2017), Research on Crude Oil Demulsification Using the Combined Method of Ultrasound and Chemical Demulsifier

4.4.4 Presencia de tensoactivos.

Como se menciona anteriormente, es muy importante tener en cuenta la estabilidad de la interfase para el proceso de deshidratación y de acuerdo con lo encontrado en la literatura, cuando

se aplica ultrasonido se pueden presentar diversos cambios dependiendo del tipo de tensoactivo presente en la emulsión.

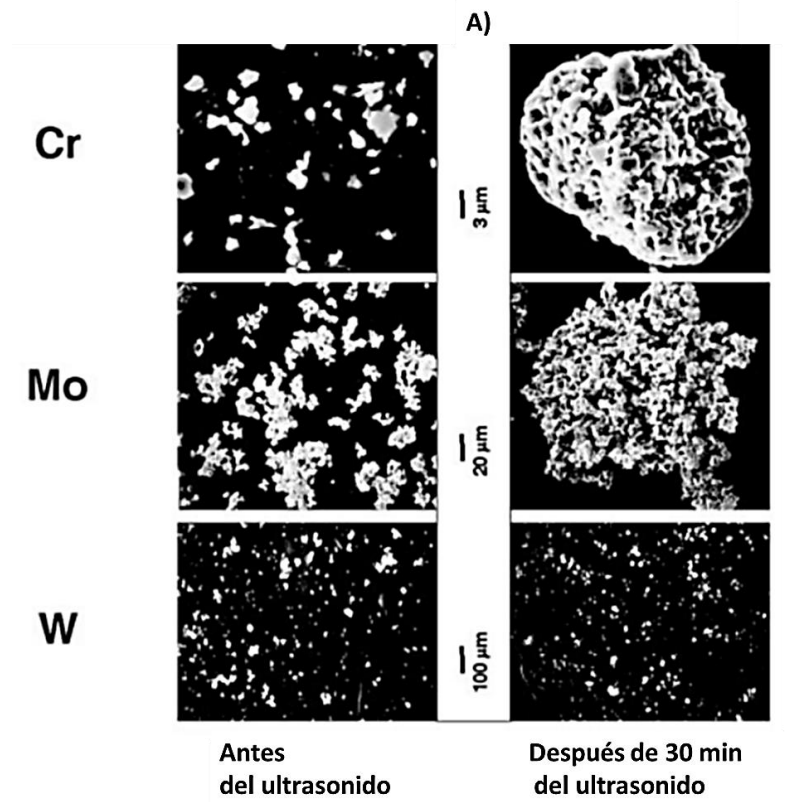
Según el estudio de Xie et al., (2015) cuando se aplica ultrasonido a una emulsión con presencia de asfaltenos y ceras hay un cambio tanto en la viscosidad de la emulsión O/W como en la interfase de la misma, el cambio de la viscosidad se puede observar en la Figura 44 (A) en donde el autor menciona que aumenta en el primer minuto porque los componentes pesados se encuentran en suspensión, pero después disminuye por la reducción del tamaño de los flóculos de asfaltenos el cual puede variar de acuerdo al tipo de exposición a la onda, por ejemplo en la Figura 44 (B) se puede ver el cambio de tamaño de 4,2 μm hasta 1,8 μm de los flóculos de asfaltenos, lo cual es posible debido a que el ultrasonido puede cambiar la cinética de agregación de estos, posteriormente, aunque los asfaltenos y ceras sigan presentes en la emulsión, al ser más pequeños provocan la disminución de la viscosidad de cizallamiento interfacial ayudando a coalescer las gotas, ya que al reducir el tamaño de los asfaltenos se reduce la dureza de la interfaz debido a que allí es donde se acumulan, esto puede observarse en la Figura 44 (C).

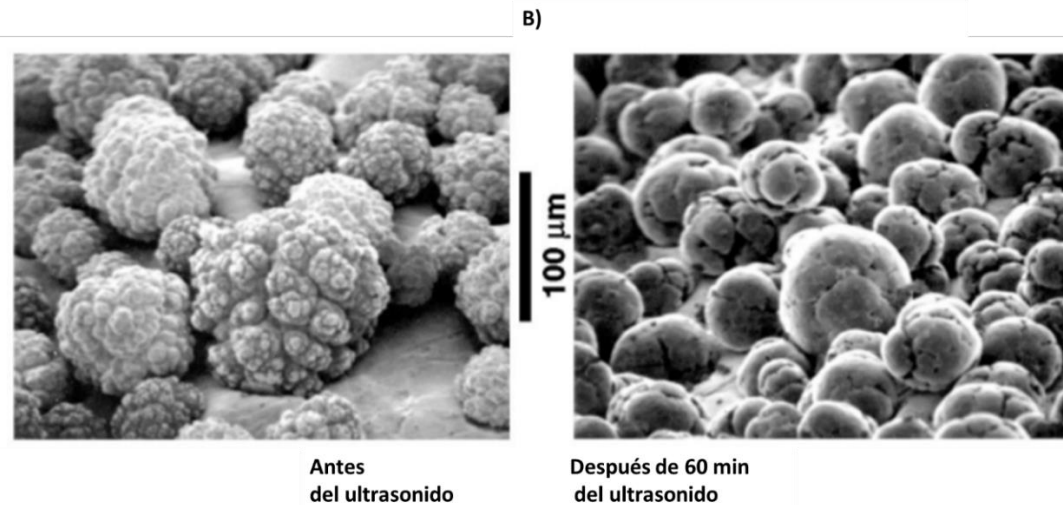
Figura 44. El efecto de la irradiación ultrasónica cuando hay presencia de asfáltenos.

Nota: Esta dado para una emulsión W/O con una frecuencia de 20 kHz, 0.4 W/cm^2 , temperatura de 60°C , un campo estacionario, por último la figura (C) tiene una tasa de corte igual a 0.2 rad/s . Adaptado de (Xie et al., (2015) Acoustically aided coalescence of water droplets and dehydration of crude oil emulsion.

De igual forma Suslick & Price, (1999) mencionan que cuando se tiene partículas sólidas en un fluido, tanto la cavitación como las ondas de choque puede generar colisiones entre estas resultando en cambios en la morfología, composición y reactividad, es así que cuando se generan colisiones de forma directa se puede inducir la fusión de las partículas en el punto donde colisionaron, del mismo modo se puede inducir fragmentación en las partículas frágiles, un ejemplo de esto se presenta en la Figura 45 en la sección a, de igual forma en la sección b de la misma figura se puede notar el cambio de la morfología en la superficie debido a colisiones entre partículas a alta velocidad.

Figura 45. El efecto de la irradiación ultrasónica en algunas partículas sólidas.





Nota: (a) Micrografía electrónica de barrido de diferentes partículas al colisionar, (b) Cambio en la morfología de la superficie de las partículas de Ni, modificado de Suslick & Price, (1999). Applications of ultrasound to materials chemistry. Annual Review of Materials Science, 29(1), 295–326.

Por último cuando se tiene una alta estabilidad en la interfaz ya sea por un tensoactivo natural o uno inyectado, es necesario aplicar desmenuzantes químicos para neutralizar los tensoactivos y generar un debilitamiento en la estabilidad de la interfaz, ya que al aplicar el ultrasonido se genera la aglomeración de las gotas, pero es necesario disminuir la resistencia mecánica de la interfaz para que estas puedan coalescer y se genere la deshidratación. (Yi et al., 2017)

5 Principales características de las ondas que posibilitan la deshidratación.

Teniendo en cuenta los resultados encontrados en los casos de estudio presentados anteriormente, en la siguiente sección se mencionan las principales características de las ondas sónicas que afectan a los crudos pesados promoviendo la deshidratación, así mismo se muestra un diagrama donde se mencionan los principales efectos causados por estas.

5.1 Intensidad del sonido.

De acuerdo a Wang et al., (2017) cuando se alcanza cierto valor de la intensidad se mueven las gotas y esta intensidad se llama intensidad del sonido crítica baja, de igual forma al acercarse las gotas de agua empiezan a coalescer y generar los diferentes métodos de desestabilización de la emulsión, luego de que la intensidad del sonido sobre pasa cierto valor, las gotas de agua comienzan a moverse violentamente y dispersarse lo que genera mayor estabilidad de la emulsión, ese momento se llama intensidad del sonido crítico superior también llamado umbral de cavitación por lo tanto la intensidad debe estar por debajo de este valor, aun así para mejores resultados de deshidratación es preferible acercarse a la intensidad del sonido crítica superior.

5.2 Frecuencia.

De forma en general el ultrasonido se puede clasificarse en ultrasonidos de alta y de baja frecuencias, estos tienen los rangos de (20 kHz a 100 kHz) para la baja frecuencia y cuando esta sobre los 100 kHz es alta frecuencia, el rango principal usado para la deshidratación es el ultrasonido de baja frecuencia debido a que induce el efecto mecánico en lugar que el ultrasonido de alta frecuencia que induce efectos sonoquímicos en la emulsión; La baja frecuencia promueve la compresión y rarefacción de las gotas en la emulsión generando así que los efectos de cavitación

en esta zonas son mayores que en la alta frecuencia ya que la gota tiene un periodo largo de crecimiento de gota y cuando la gota colapsa dispersa mayor energía, la zona de alta frecuencia induce efectos de coalescencia. (Lim et al., 2020, quien citó a Jin & Lin ,2012)

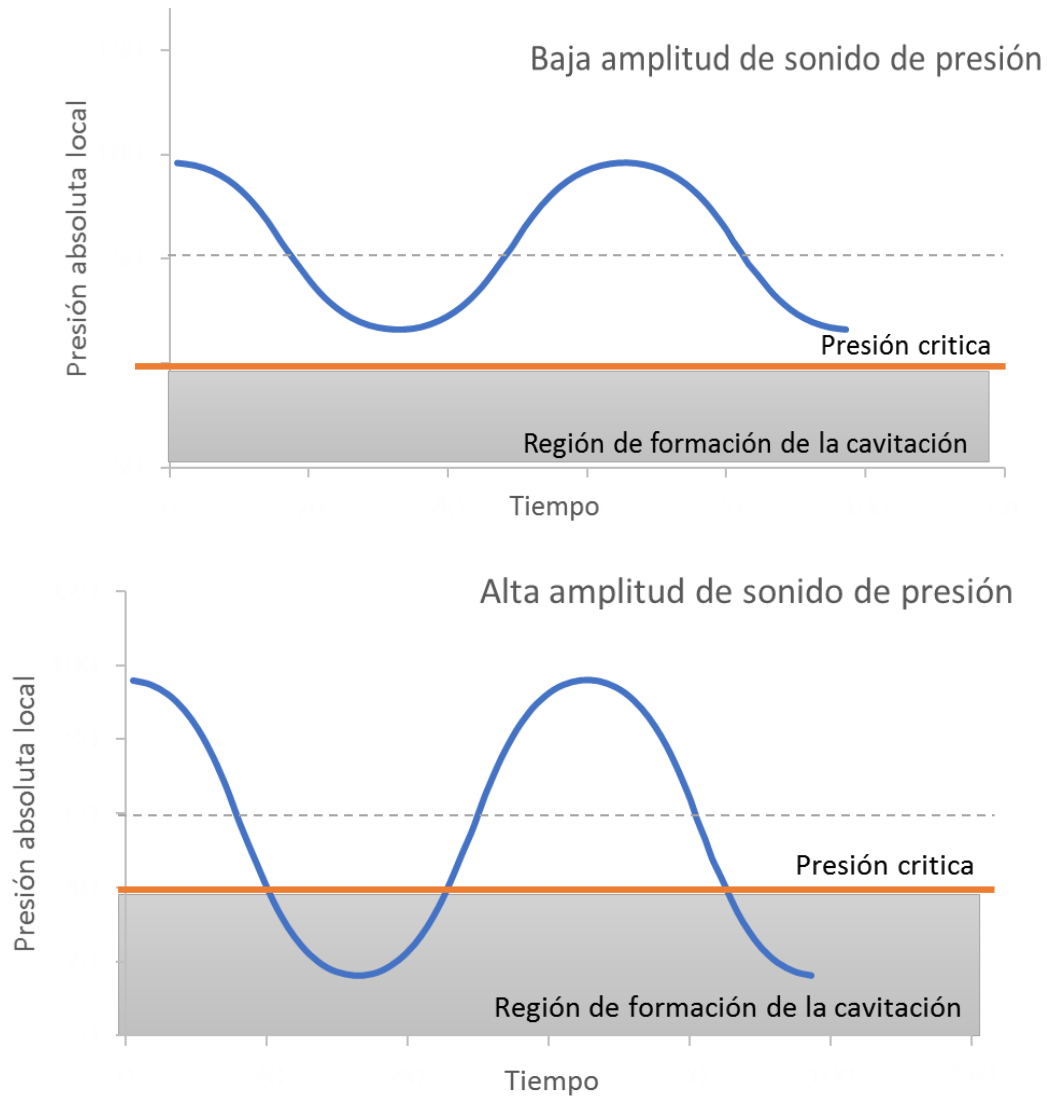
5.3 La potencia.

Según Wang et al., (2018) al tener una potencia de ultrasonido más alta resulta en una fuerza acústica mayor lo que genera la coalescencia de gotas de forma más significativa, pero cuando el potencial excede el rango optimo ocurre la cavitación, así mismo el rango de potencia optima aumenta junto con el aumento de la frecuencia ultrasónica sin llegar al punto de cavitación, al mismo tiempo según el autor el efecto de la intensidad en la tasa de deshidratación es consistente con el efecto que causa la potencia ultrasónica sobre la tasa de deshidratación.

5.4 Amplitud.

La amplitud es una función de disipación de la energía al sistema y depende de la viscosidad del sistema debido a que genera mayor desplazamiento longitudinal en el sistema, es así que es deseable que la amplitud este en un rango adecuado ya que cuando tiene un umbral óptimo de amplitud mejora los procesos de coalescencia de la gota y del mismo modo cuando se elige mal puede inducir la cavitación cuando está es alta (Lim et al., 2020), en la Figura 46 se puede observar la representación del anterior enunciado, así mismo según Modarres-Gheisari et al., (2019) el efecto de la amplitud es similar al de la potencia así mismo cuando se aumenta la amplitud se aumenta potencia y viceversa. Para terminar GUZMÁN LÓPEZ,(2018) destaca que al aplicar un valor de amplitud cercano a la cavitación se genera una mejor exposición a la onda lo que genera una mayor eficiencia de deshidratación en menor tiempo.

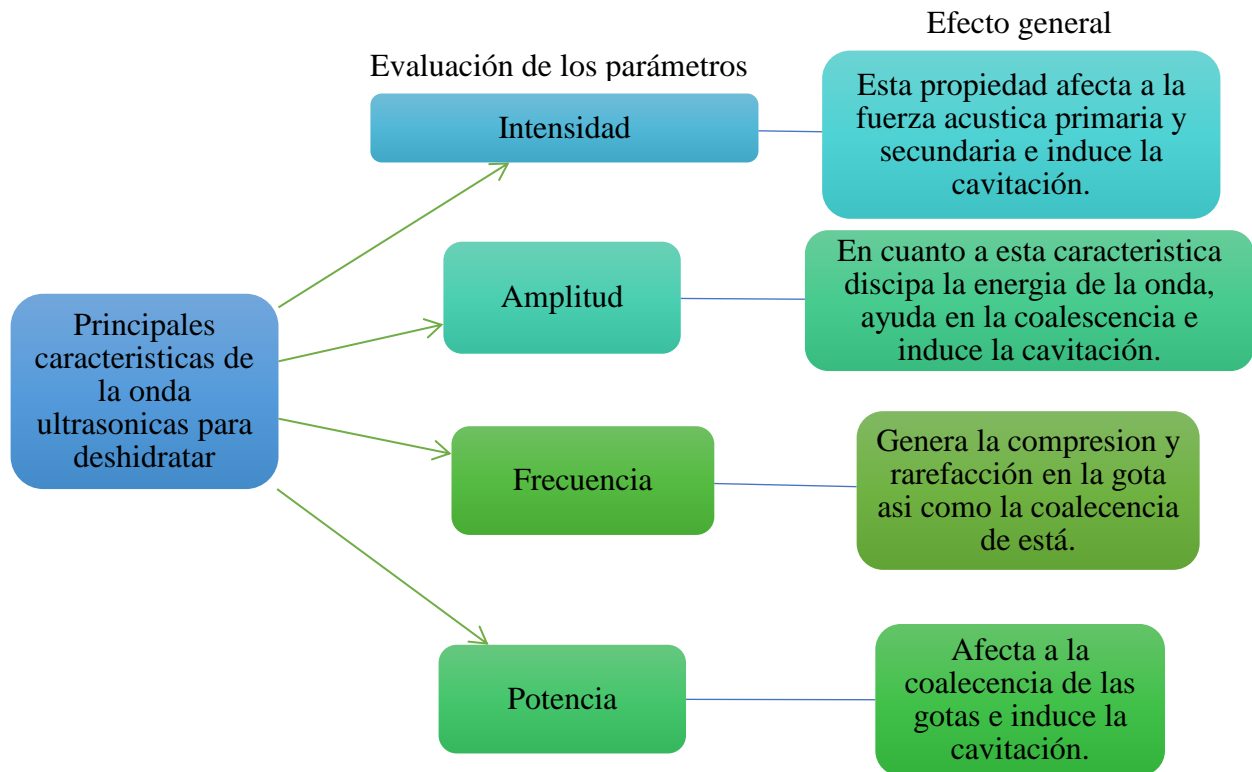
Figura 46. Esquema de una onda acústica cuando se induce la cavitación en términos de la amplitud de presión.



Nota: Adaptado de Chun Haur, (2016) Study on the effect of ultrasonic wave amplitude on de-emulsification

A continuación, en la Figura 47, se presenta un breve resumen de la información compartida anteriormente, en donde se resaltan los datos más relevantes sobre el efecto que cada una de las características principales halladas en la literatura, tiene sobre un crudo pesado durante el proceso de la deshidratación.

Figura 47. Diagrama de los parámetros más importantes de la onda ultrasónica para deshidratar un crudo.



Nota. Elaboración propia.

6 Tipo de onda sónica que permite la deshidratación de crudos pesados: Rangos operacionales recomendados.

De acuerdo con lo hallado en la revisión de la literatura, las características de la onda que más afectan en el proceso de deshidratación de un crudo pesado son: intensidad, frecuencia, potencia y amplitud de onda, por lo que se hace necesario conocer el rango en el que estas características mostraron mejores resultados durante la deshidratación.

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre las propiedades de la onda ultrasónica usada en cada uno de los casos de estudio encontrados en la bibliografía consultada y los rangos en los que fueron aplicados.

Tabla 3. Cuadro comparativo de los mejores resultados hallados en la literatura para deshidratación al aplicar ultrasonido.

Tipo de crudo y ⁰ API	Des-emulsionante	Parámetros de deshidratación				% Agua Inicial (Promedio)	% Agua Removida (Promedio experimental)	% Agua Residual (Promedio)
		Frecuencia kHz	Intensidad w/cm ²	Amplitud %	Potencia W			
21 ^{*1}	RP-6348	s.i.	1*	s.i.	s.i.	16,25%	77,87%	3,6%
28 ^{*1}	V-4654	s.i.	0.5	s.i.	s.i.	17,92%	83,35%	2,98%
31.5 ^{*1}	V-4654	s.i.	0.5	s.i.	s.i.	18,33%	86,78%	2,42%
20.8 ^{*2}	No se aplicó	40	s.i.	s.i.	500	7,5%	85%	1,125%
20.9 ^{*2}	No se aplicó	40	s.i.	s.i.	500	40%	62%	15,2%
18.7 ^{*2}	Sí se aplicó, s.i.	40	s.i.	s.i.	500	6%	78,67%	1,28%
Pet. Acuoso SAGD – pesado ^{*3}	s.i.	10	0.4	s.i.	200	25,22%	73,33%	6,73%

Crudo ceroso. Costa este de Malasia-pesado ^{*4}	s.i.	20	s.i.	40% de 40 μ m	500	30%	73%	8,10%
watery crude oil del campo Daqing en China ^{*5}	Tipo SP	20	s.i.	s. i	150	48,5 %	61,86%	18,5%
22 ^{*6}	s. i	20	0.4	s. i	s. i	40%	90,5%	3,80%

Nota: Los datos usados son una recopilación de los resultados algunos casos de consultados, la sigla s.i

significa sin información, (*) corresponde al dato máximo de mejor rendimiento durante el estudio, pero el autor explica que se espera que ese valor sea mayor. Elaboración propia. Fuentes: ^{*1}Khajehesamedini et al., (2018); ^{*2}Schoeppel & Howard, (1996); ^{*3}Wang et al., (2017); ^{*4}Chun Haur, (2016); ^{*5}Yi et al., (2017); ^{*6}Xie et al., (2015).

Teniendo en cuenta las características que más afectan el proceso de deshidratación ultrasónica de crudos y de acuerdo con los resultados registrados en la tabla anterior, se procedería a definir la mejor configuración de la onda sónica para implementar en un proceso de deshidratación, sin embargo, durante la revisión bibliográfica realizada se encontró que no existe una única configuración posible para la onda ultrasónica que permita la deshidratación de un crudo, esto debido a que el tipo de emulsión puede variar dependiendo de las características del crudo, la cantidad de agua, el tipo de tensoactivo y demás, afectando el resultado del tratamiento con ultrasonido por lo que estas variaciones de la emulsión también influyen en cada una de las características principales de la onda ultrasónica.

Es por esto que lo más acertado es mencionar un rango de aplicación para cada una de dichas características en lugar de un único valor, esto permite implementar el ultrasonido en diversas combinaciones dentro de los rangos de la onda y así tratar una variedad de crudos pesados y obtener buenos resultados, teniendo en cuenta que el valor que tome cada característica variará dependiendo de factores del proceso de deshidratación como los mencionados en capítulos anteriores, por lo que se debe hacer un estudio para identificar los valores adecuados que debe tener cada característica para su implementación en la deshidratación de un crudo pesado en particular.

A continuación, en la Tabla 1Tabla 4, se muestran los rangos óptimos dentro de los que se debería mantener una onda de ultrasonido para lograr un buen margen de deshidratación en un crudo pesado teniendo en cuenta lo hallado en la literatura.

Tabla 4. Rangos de aplicación sugeridos de ultrasonido para deshidratar crudos pesados.

Parámetros sugeridos para la deshidratación.			
Frecuencia kHz	Intensidad w/cm²	Amplitud %	Potencia W
10 - 40	0.4 - 1	(40% - 80%) de 40 μ m	150 - 500

Nota: Elaboración propia.

Es importante agregar que cuando ya se tienen las características adecuadas de la onda se debe generar un campo estacionario de la ondas ultrasónica en el medio ya que esto ayuda a potencializar los efectos de deshidratación de este método, además de lo ya mencionado, se debe tener en cuenta que este método también es afectado en gran medida por la estabilidad de la

emulsión, ya que esto determina si se puede lograr llegar al porcentaje de agua requerido según las condiciones de venta únicamente con la aplicación de ultrasonido o es necesario complementar el tratamiento con la adición de químicos, además se sabe que el químico ayuda a disminuir la estabilidad de la interfaz y el ultrasonido apoya la aglomeración y coalescencia por la aplicación de ondas de presión producidas en el sistema, por lo que se hace necesario calcular de nuevamente la cantidad adecuada de químicos, ya que según lo observado en capítulos anteriores la cantidad requerida al aplicar una combinación de estos dos métodos será menor.

7 Conclusiones

El ultrasonido es un método cuya función principal es ayudar a mejorar la aglomeración y coalescencia de las gotas de agua, lo cual es posible debido a la vibración y transferencia de energía que se aplica al sistema, esto permite que se generen espacios de presión en los nodos de la onda, a los que migran las gotas provocando la floculación y coalescencia de estas, lo que afecta positivamente la tasa de separación.

Los efectos causados por las características de la onda ultrasónica se pueden maximizar si se complementa con el estudio correcto de las propiedades de onda como la intensidad, frecuencia, potencia y amplitud, ya que, si se selecciona el rango inadecuado, se corre el riesgo de generar la cavitación de las gotas presentes lo que ocasionaría gotas más pequeñas, resultando en una emulsión mucho más estable por la re-dispersión de las gotas en la emulsión.

La correcta transmisión del campo ultrasónico al medio y la elección de los parámetros son importantes, pero es igualmente importante tener en cuenta que los rangos de la onda pueden variar de acuerdo con la cantidad de agua inicial de emulsión, el tipo de tensoactivo, el tiempo de aplicación entre otros factores, pero así mismo para maximizar la deshidratación, se puede estudiar la posibilidad de complementar este método con química y temperatura, ya que puede generar mejores efectos en la deshidratación, esto de acuerdo a los resultados obtenidos en la literatura.

La selección de los valores adecuados para cada una de las características principales de la onda sónica se menciona en términos de rangos por qué no se puede generalizar un solo tipo onda para deshidratar crudos, las emulsiones presentes en los crudos pesados varían en cada caso dependiendo de la cantidad de agua presente, la composición del crudo, así como de la presencia de agentes estabilizantes en la emulsión como sólidos, asfáltenos o surfactantes, sin embargo, estos

rangos sirven como una buena guía para identificar el valor adecuado para cada una de las características de la onda en cada caso particular de deshidratación.

8 Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de este estudio, el uso de ondas de ultrasonido en la deshidratación de crudos pesados ha demostrado dar excelentes resultados tanto en la aplicación individual como en la combinada con temperatura y químicos, potencializando los efectos de estos último y reduciendo considerablemente la cantidad de desemulsificante necesarios para tal fin, por lo que se considera importante continuar y profundizar en el estudio de la combinación de estos tres métodos ya que, puede tener efectos positivos en el ámbito económico del tratamiento, así como en el tiempo de tratamiento empleado en la deshidratación de crudos pesados.

Así mismo, se recomienda realizar otras pruebas a nivel de laboratorio, en la que se varíen la temperatura, los tipos y cantidades de químicos usados, la fracción de agua en emulsión y el tiempo de irradiación del ultrasonido en muestras de crudos con diferentes procedencias y gravedades API, también se recomienda complementar los estudios con una comparativa entre los diferentes equipos y posiciones de los transductores de ultrasonido, para identificar el impacto que esto tendría sobre la deshidratación, además de realizar un estudio económico buscando determinar la relación costo-beneficio de la aplicación de este método, en términos de gastos energético y mantenimiento de equipos.

Por último, todos los estudios encontrados en la literatura pertenecen a investigaciones de otros países, por lo que sería recomendable realizar un estudio a nivel de laboratorio con los crudos pesados colombianos, para analizar la aplicabilidad y eficiencia de esta metodología con las características de los hidrocarburos nacionales.

Referencias Bibliográficas

- Aguirre, D., Vásquez, E., Guacaneme, J., & Guzmán, W. (2009). Tratador térmico didáctico [E-book]. Puerto López, Meta: Corporación Internacional del Petróleo "Coinspetrol." Retrieved from https://issuu.com/jonathanbarrios/docs/proyecto_final
- Arnold, K., & Stewart, M. (2008). *Surface Production Operations* (3rd ed.). Elsevier Inc. <https://drive.google.com/file/d/1h6V1L1kq318WNIVZVyCji-RepsseXnI5/view>
- Atehortúa, C. M. G., Pérez, N., Andrade, M. A. B., Pereira, L. O. V., & Adamowski, J. C. (2019). Water-in-oil emulsions separation using an ultrasonic standing wave coalescence chamber. *Ultrasonics Sonochemistry*, 57(April), 57–61. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.04.043>
- Ayala Matus, M. A. (2003). *OPTIMIZACIÓN DEL EQUIPO DE DESHIDRATACIÓN NATCO DE CRUDO PESADO EN UNA EMPRESA PETROLERA* [Universidad San Carlos de Guatemala]. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0368_M.pdf
- Benavides, X., & Nuñez S. (2011). *Estudio técnico económico del tratamiento químico para la deshidratación de crudo en el campo Shushufindi*. (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito.
- Carlos, J., Alvarez, D., Rey, R. M., Javier, E., & Reyes, P. (2013). Estudio experimental sobre la eficiencia de un tratamiento de ultrasonido en un sistema de flujo continuo para la reducción de viscosidad de crudo pesado. *Revista Ion*, 26(2), 47–63.
- Chenggao, Y., Feng, L., & Xiaofang, M. (1997). Ultrasonic crude oil dehydration experiment[J]. *Oilfield Surface Engineering*, 16(6), 41–43.
- Chun Haur, L. (2016). Study on the effect of ultrasonic wave amplitude on de-

emulsification of crude oil to enhance production process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 863(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/863/1/012004>

Corugedo, A. C., Montero, Y. A., Harriett, J. D., & Beltrán, Y. R. (2013). *Efecto corrosivo del agua acompañante del petróleo contaminada con CO₂ sobre el acero de los ductos*. *Revista Cubana de Ingeniería*, 4(3), 47-52.

Ese, M., & Kilpatrick, P. K. (2004). Stabilization of water-in-oil emulsions by naphthenic acids and their salts: Model compounds, role of pH, and soap: acid ratio. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 25(3), 253–261.

GALVIS PORTILLA, Y. C. (2007). *ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN DE CRUDO Y TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN EN LA ESTACIÓN PF2 DEL CAMPO CAÑO LIMÓN*. Universidad Industrial de Santander.

Gómez Vega, A., 2014. *Formulación Y Caracterización De Nano-Emulsiones De Aceite De Parafina Tipo Agua-En-Aceite (W/O)*. Maestría en Ciencias en Nanotecnología. CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS POSGRADO.

GUARIN ARENAS, F., GONZÁLEZ BARBOSA, J. E., RODRIGUEZ ALTEROS, C., GARCÍA CHINCHILLA, C. A., GÓMEZ BAYONA, R., GONZÁLEZ PASCUAS, A., SÁNCHEZ, VILLAMIZAR, J., & DELGADO JAIMES, E. A. (2014). *PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE CRUDOS PESADOS Y EXTRAPESADOS MEDIANTE UN ESQUEMA DE DILUCIÓN* (Patent No. WO 2014/083416 A2). Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. <https://patentimages.storage.googleapis.com/51/e8/26/50aa46713cb85c/WO20140834>

16A2.pdf

Guzmán López, D. J. (2018). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS EMULSIONES Y SU INFLUENCIA EN LA CADENA DE PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS*. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

Hernandez Ramírez, G. X. (2011). *Métodos de deshidratación del petróleo en el campo Sacha norte 01* (Bachelor's thesis), UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL. FACULTAD: CIENCIAS DE LA INGENIERÍA.

Khajehesamedini, A., Sadatshojaie, A., Parvasi, P., Rahimpour, M. R., & Naserimojarad, M. M. (2018). Experimental and theoretical study of crude oil pretreatment using low-frequency ultrasonic waves. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 383–395.

Ledesma, F. R. (2015). *Análisis de costos para la toma de decisiones en la industria petrolera* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Económicas).

Lim, C. H., Sulaiman, S. A., Japper-Jaafar, A., & Bhaskoro, P. T. (2020). Study on the effect of ultrasonic wave amplitude on de-emulsification of crude oil to enhance production process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 863(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/863/1/012004>

Magomadov, A. S. (2004). Velocity of ultrasound in high-viscosity oils in a wide range of state variables. *Acoustical Physics*, 50(2), 232–234.

Marfisi, S., & Salager, J.L., (2004). *deshidratación de Crudo - Principios y Tecnología*. (Cuaderno FIRP N° 853PP). Laboratorio FIRP. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

Martínez Rodríguez, M. (2014). *Formación y caracterización de emulsiones altamente*

concentradas de betún en agua. Universidad de Barcelona.

MENG, J., ZHANG, Q., CHEN, Y., HU, P., RAN, G., & ZHANG, Y. (2010). The Effects of Ultrasound on Heavy Oil Emulsion. *Guangzhou Chemical Industry*, 6.

Modarres-Gheisari, S. M. M., Gavagsaz-Ghoachani, R., Malaki, M., Safarpour, P., & Zandi, M. (2019). Ultrasonic nano-emulsification—A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 52, 88–105.

MONTES, E. (2010). *Tecnologías de tratamiento de emulsiones en campos petroleros*. (Tesis de especialización). Universidad Industrial de Santander (UIS). Bucaramanga, Colombia.

MORA MORALES, H. C., GARAY CORTÉS, S., & LARA CORREA, M. D. (2020). *PLAN DE OPTIMIZACIÓN EN EL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE CRUDO INSTALANDO TANQUE DE ALTA EFICIENCIA PARA EVITAR EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LA PLANTA PLTC*.
<https://repository.ean.edu.co/bitstream/handle/10882/10372/MoraCamilo2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mulky, F. (2010). *Estudio de determinación de las condiciones de operación de un deshidratador electrostático en el centro de facilidades de producción petrolera de la estación Lago Agrio N° 1, 2009*. (Tesis de pregrado). Universidad tecnológica Equinoccial. Quito, Ecuador.

Nava, G., (2005). *Caracterización acústica de un material compuesto a base de HDPE-CaCO3-Fibra corta de henequén*. (Tesis de Maestría). Centro de Investigación Científica de Yucatán. Yucatán, México.

- Orea, M., Bruzual, J., Diaz, A., Árraga, T., Benítez, N., Castillo, J., *Formation of stable emulsions under in-situ combustion conditions: An assessment of the injected gas–crude oil–water–rock interplay in Quifa oilfield, Los Llanos Basin, Colombia*, Journal of Petroleum Science and Engineering (2017)
- Palaev, A. G., Dzhemilev, E. R., & Chipura, S. I. (2019). Overview of the main methods of ultrasound application in the oil and gas industry. *Передовые Инновационные Разработки. Перспективы и Опыт Использования, Проблемы Внедрения в Производство*, 78–83.
- Rodríguez, J. A. M., Oyaga, J. V., & Cantor, S. D. P. S. (2007). Fundamentos teórico-prácticos del ultrasonido. *Tecnura*, 10(20), 4–18.
- Salazar Barrero, H. (2016). *EVALUACIÓN DE LA FORMACIÓN DE EMULSIONES EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN-SITU BAJO CONDICIONES DE EXCESO DE OXÍGENO*. MsC. Ingeniería de Petróleos. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- Schoepel, R. J., & Howard, A. W. (1966). Effect of ultrasonic irradiation on coalescence and separation of crude oil-water emulsions. In *Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. Society of Petroleum Engineers.
- Sheng, J. J. (2010). *Modern chemical enhanced oil recovery: theory and practice*. Gulf Professional Publishing.
- Society of Petroleum Engineers,(2007). *PETRÓLEO Y GAS NATURAL*. (pp. 16-18) New York, Estados Unidos: Dorling Kindersley Limited.

- Sztukowski, D. M., & Yarranton, H. W. (2004). *Characterization and Interfacial Behavior of Oil Sands Solids Implicated in Emulsion Stability*. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 25(3), 299–310.
- Schoepfel, R. J., & Howard, A. W. (1996). Effect and of Ultrasonic of Irradiation Crude on Coalescence Emulsions Separation. *Society of Petroleum Engineer of AIME*.
- Sullivan, A. P., & Kilpatrick, P. K. (2002). *The Effects of Inorganic Solid Particles on Water and Crude Oil Emulsion Stability*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(14), 3389–3404.
- Sun, L., Han, P., Yang, L., & Lu, X. (2014). The dehydration and demulsification of waste oil by ultrasound. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 36(17), 1843-1849.
- Sun, L., Han, P., Yang, L., & Lu, X. (2014). The dehydration and demulsification of waste oil by ultrasound. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 36(17), 1843–1849.
- Suslick, K. S., & Price, G. J. (1999). Applications of ultrasound to materials chemistry. *Annual Review of Materials Science*, 29(1), 295–326.
- Tarrag, H. L. R., Palma, H. J. A., & Hernández, J. F. (2015). *Comportamiento reológico de las emulsiones empleando productos del pirólisis*. *Tecnología Química*, 35(3), 412-423.
- Trujillo, C., & Tellez, J. M. (2015). *Ecopetrol recibe patente por tecnología para deshidratación de crudo pesado*.

- Valdés, F., (2014). *Hacia una definición de los indicadores de la calidad sonora del ambiente exterior y su aplicación al SIG, casos: El ensanche de Barcelona y Vilnius*. (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Cataluña, España.
- Velásquez, I. and Pereira, J. (2014). *Emulsiones de agua en crudo. Aspectos Generales*. Revista Ingeniería UC, [online] (Vol 21, No3).
- Vázquez, A., (2015). *Deshidratación y desalado de crudo implementando microondas: Aplicación en pemex exploración y producción campos Tamaulipas-Constituciones, Altamira Tamaulipas*. (Tesis de Doctorado). Instituto Politécnico Nacional. Altamira, Tamaulipas.
- Wang, Z., Gu, S., & Zhou, L. (2017). Research on the static experiment of super heavy crude oil demulsification and dehydration using ultrasonic wave and audible sound wave at high temperatures. *ELSERVIER*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.037>
- Xie, W., Li, R., Lu, X., Han, P., & Gu, S. (2015). Acoustically aided coalescence of water droplets and dehydration of crude oil emulsion. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(4), 643–649. <https://doi.org/10.1007/s11814-014-0253-6>
- Xu, S., Qiao, Y., Liu, X., & Church, C. C. (2015). Cavitation in Biomedicine. In *Cavitation in Biomedicine*. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7255-6>
- Yang, W., & Fu, X. (2014). *The Effects of Ultrasound on Heavy Oil Emulsion*. 32(2). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-5539.2014.02.007>
- Yi, M., Huang, J., & Wang, L. (2017). Research on Crude Oil Demulsification Using the Combined Method of Ultrasound and Chemical Demulsifier. *Journal of Chemistry*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9147926>
- Yovera Sosa, M. A. (2014). *TECNOLOGIA DEL TRATAMIENTO DE DESALADO DE*

CRUDOS [Universidad Nacional de Piura].

<https://repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/UNP/987/MIN-YOV-SOS-14.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Anexos.

Anexo A. Característica de los crudos usados en el estudio de Khajehesamedini et al., (2018).

Aceite	Cheshmeh Khosh	Gachsaran 1	Gachsaran 2
⁰ API (ASTM D4052)	21	28	31.5
Viscosidad cinemática mm ² /s @25 °C (ASTM D445)	19.1	20.3	21.4
Resinas %w/w (análisis SARA)	22.6	20.7	18.1
Asfáltenos %w/w (análisis SARA)	2.4	1.1	0.5
Tensión interfacial mN/m (Tensiómetro DSA100, Krauss)	19.3	15.9	14.1
Conductividad nS/m (ASTM D2624)	21	18	23
Concentración de salinidad ppm (IP 77-72)	28	21	19

Nota: Tomado de Khajehesamedini et al., 2018) Experimental and theoretical study of crude oil pretreatment using low-frequency ultrasonic waves.

Anexo B. Caracterización de las muestras usadas en el estudio de Schoepel &

Howard, (1996)

Propiedad	Crudo N° 1	Crudo N° 2	Crudo N° 3
Gravedad API	20.8	20.9	18.7
Viscosidad @60°F, Cp	15.7	9.0	70.4
GOR, SCF/Bbl	107	108	33
Presión de saturación, Psig	960	520	190
Contenido de agua en muestras de laboratorio, %	7-8	30-50	5-7

Nota: Tomado de Schoepel & Howard, (1996), Effect and of Ultrasonic of Irradiation Crude on

Coalescence Emulsions Separation

Anexo C. Nomenclatura de descripción de las características de los escenarios de estudio para deshidratación con ultrasonido, para el estudio realizado por Chun Haur, (2016).

Grupo	Nomenclatura	Capa	Muestra	Temperatura (°C)	Amplitud de onda (%)
1	40% Oil_Lyr	Aceite	A1	30	40
	60% Oil_Lyr	Aceite	A2	30	60
	80% Oil_Lyr	Aceite	A3	30	80
	40% Rag_Lyr	Emulsión	A1	30	40
	60% Rag_Lyr	Emulsión	A2	30	60
	80% Rag_Lyr	Emulsión	A3	30	80
2	40% Oil_Lyr	Aceite	B1	60	40
	60% Oil_Lyr	Aceite	B2	60	60
	80% Oil_Lyr	Aceite	B3	60	80
	40% Rag_Lyr	Emulsión	B1	60	40
	60% Rag_Lyr	Emulsión	B2	60	60
	80% Rag_Lyr	Emulsión	B3	60	80
3	40% Oil_Lyr	Aceite	C1	80	40
	60% Oil_Lyr	Aceite	C2	80	60
	80% Oil_Lyr	Aceite	C3	80	80
	40% Rag_Lyr	Emulsión	C1	80	40
	60% Rag_Lyr	Emulsión	C2	80	60
	80% Rag_Lyr	Emulsión	C3	80	80
	40% H2O_Lyr	Agua	C1	80	40
	60% H2O_Lyr	Agua	C2	80	60

Nota: Adaptado de Chun Haur, (2016) Study on the effect of ultrasonic wave amplitude on de-emulsification

of crude oil to enhance production process

Anexo D. Tamaño de gota de agua en capa de emulsión. Estudio realizado por Chun

Haur, (2016).

Muestra	Después del Ultrasonido (μm)	Después de 8 hrs en prueba de botella (μm)
A1	2.41	4.06
A2	2.06	3.15
A3	2.12	7.78
B1	2.90	2.82
B2	3.44	3.81
B3	4.75	2.36
C1	5.22	11.13
C2	37.89	13.82
C3	2.73	3.76

Nota: Tomado de Chun Haur, (2016) Study on the effect of ultrasonic wave amplitude on de-emulsification of crude oil to enhance production process.

Anexo E. Caracterización de la muestras usada en el estudio de Yi et al., (2017).

Propiedad	Crudo
Tipo de crudo	watery crude oil del campo Daqing en China
Viscosidad, mP*s	145000
Punto de congelación, °C	67.2
Densidad, g/cm³	0.9247
Contenido de agua inicial, %	25.23
Contenido de sal, mg/L	250
Volumen de crudo, ml	70
Volumen total de la muestra, ml	100

Nota: Tomado de Yi et al., (2017), Research on Crude Oil Demulsification Using the Combined Method of Ultrasound and Chemical Demulsifier

Anexo F. Características del crudo usado durante el estudio de Xie et al., (2015)

Concepto	Valor
°API	22
Densidad (20°C) (g/cm³)	0,92
Viscosidad Cinemática (50°C) (mm²/s)	108
Punto de fluidez (°C)	19
Acidez (mg KOH/g)	1,92
Contenido de sal (mg NaCl/L)	31,93
Contenido de agua (%V)	0,25
Residuo de Carbono (%v)	6,41
Cenizas (%v)	0,02
factor K	11,75

Nota: Adaptado de (Xie et al., (2015) Acoustically aided coalescence of water droplets and dehydration of crude oil emulsión.

Anexo G. Condiciones iniciales y resultados de la investigación realizada por Giraldo

Atehortúa, et al., (2019).

°API del crudo utilizado en el estudio:					24,2°	
Prueba	Cantidad de agua inicial (%)	Cantidad de desemulsificante (ppm)	Tasa de fujo (cm ³ /min)	Temperatura (°C)	Cantidad de agua residual (%)	
					Con ultrasonido	Sin ultrasonido
1	30	25	50	70	2,6	4
2	30	25	100	70	5	15,1
3	30	50	50	70	1,9	2,5
4	30	25	50	60	2,4	4,2
5	50	25	50	70	1,5	2,3

Nota: Modificado de Giraldo Atehortúa, C. M., Pérez, N., Andrade, M. A. B., Pereira, L. O. V., &

Adamowski, J. C. (2019). Water-in-oil emulsions separation using an ultrasonic standing wave coalescence chamber.