

Análisis de la inhibición en la precipitación de parafinas mediante el uso de la
estimulación sónica (ESOTM)

Dana Marcela Ramírez Niño y Luis Alberto Chinomes Gualdrón

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Msc. Julio César Pérez Angulo

Maestría En Ingeniería Énfasis En Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A mi familia quienes me inspiran cada día a crecer en el ámbito personal y profesional, por siempre brindarme su apoyo incondicional, sus buenos deseos, su amor infinito. Por ser ese constante pilar en mi vida que fortalece los cimientos de mis valores y virtudes, y por sus loables deseos. A mis padres quienes siempre brindan su apoyo sin buscar nada a cambio, quienes son responsables de lo que soy y seré, por su inmenso corazón y esa bondad que irradian en todo momento y ha hecho que me sienta la persona más afortunada de llamarlos padres.

A mi hermano quien tiene la habilidad de sacarme sonrisas en los momentos más oportunos y quien comparto los recuerdos más bellos de mi vida.

A mis amigos, colegas de choco aventuras y de invaluable aprendizajes, hermanos de alma que han sido la mayor motivación para aprender y arriesgarme a nuevos retos que enriquecen mi ser.

A SPWLA UIS Student Chapter, espacio único e increíble que ha sido el motor para el desarrollo de mis habilidades y competencias, y por darme amigos y experiencias magnificas.

A Dios por iluminarme con sabiduría y derramar su amor en cada momento

A mi perrito quien siempre con ternura me irradia tranquilidad y paz.

Dana Marcela Ramírez Niño

Dedicatoria

Agradezco primeramente al Señor Dios todo poderoso por darme la oportunidad de ser parte de esta maravillosa carrera, pude conocer y valorar las amistades durante este trayecto universitario, también desarrollar habilidades y destrezas en lo técnico como a nivel personal, aportar nuevas ideas en equipos de trabajo y liderar en diferentes proyectos académicos.

El siguiente proyecto de grado se lo dedico especialmente a mis padres Orlando y Yaneth, mis abuelos Luis, Helena y en especial esa personita que siempre me da consejos de superación está ahí en todo momento y quién admira el esfuerzo realizado, es mi segunda madre ella se llama Emilce, también al amor de mi vida Valentina, mi familia y aquellos seres queridos con quienes he contado en los momentos buenos y difíciles.

Durante estos años de mi carrera fui guía y participé proactivamente en diferentes actividades con el capítulo estudiantil SPWLA UIS (Society of Petrophysicists and Well Log Analysts) a quién también hago esta dedicatoria porque me brindó las herramientas para ser primeramente una persona de ética y un mejor profesional. Allí pasé por diferentes cargos de liderazgo como Chair del Student Paper Contest donde obtuvimos con el equipo el **2^{do} puesto a nivel internacional en investigación en Canadá**, también ocupé el cargo de Vicepresidente y logramos obtener el premio distinguido como mejor capítulo estudiantil SPWLA a nivel **MUNDIAL** “Outstanding Student Chapter Award” y finalmente llegué a ser Presidente de esta sociedad ampliando el conocimiento en el área de la exploración a nivel global y preparando al equipo para obtener nuevos logros mundiales.

Luis Alberto Chinomes Gualdrón

Agradecimientos

Los autores expresan un especial agradecimientos a:

A Dios por iluminar nuestro ser, de experiencias enriquecedoras y gratificantes día tras día.

A nuestras familias por ser maestros en nuestro trayecto personal y profesional.

A nuestro director de trabajo de grado Julio Cesar Pérez Angulo por su valioso apoyo e incondicional sabiduría ante del desarrollo de este proyecto y muchos más aprendizajes.

A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería de Petróleos, a SPWLA UIS Student Chapter, por darnos la oportunidad de dar a conocer nuestro potencial, vivir las mejores experiencias de nuestra vida universitaria y permitirnos a ambos llegar a ser presidentes de esta asombrosa sociedad en nuestra aclamada alma mater, junto a un equipo fuerte que vela por traer conocimiento de la industria con la academia.

Tabla de Contenido

Glosario	16
Introducción	17
1. Objetivos	19
1.1 Objetivo General.....	19
1.2 Objetivos Específicos.....	19
2. Base teórica	20
2.1 Antecedentes	21
3. Propiedades y características de las parafinas	24
3.1 Parafinas.....	24
3.1.1 Aceites parafínicos.....	24
3.1.2 Parafina industrial.....	24
3.1.3 Parafina dentro del campo petrolífero	25
3.1.4 Composición molecular	25
3.1.5 Cera.....	26
3.2 Clasificación de las parafinas.....	27
3.2.1 Clasificación según su estructura molecular.....	27
3.2.2 Clasificación por empaquetamiento	28
3.3 Precipitación de parafinas	30
3.3.1 Fenómeno de cristalización en las parafinas:	31
3.3.2 Punto de cristalización	32
3.3.3 Punto de fluidez.....	32
3.3.4 Distinción entre precipitación y deposición de parafinas	33

3.4 Estudio de la formación de depósitos parafínicos en campo	33
3.4.1 <i>Cristalización por transferencia de calor a tubería</i>	34
3.4.2 <i>Acumulación de parafinas en tanque</i>	36
3.4.3 <i>Acumulación de parafinas en oleoducto</i>	38
3.4.4 <i>Depósitos de parafina en cara de pozo</i>	40
4. Fundamento de las ondas sónicas	41
4.1 Ondas ultrasónicas	41
4.2 Características de las ondas ultrasónicas	42
4.2.1 <i>Amplitud</i>	42
4.2.2 <i>Periodo y frecuencia</i>	42
4.2.3 <i>Ciclo</i>	43
4.2.4 <i>Longitud de onda</i>	43
4.2.5. <i>Sensibilidad</i>	44
4.2.6 <i>Atenuación</i>	44
4.2.7 <i>Reflexión y transmisión del sonido</i>	45
4.2.8 <i>Velocidad de propagación</i>	45
4.2.9. <i>Impedancia acústica</i>	47
4.2.10 <i>Haz ultrasónico</i>	48
4.3 Tipos de ondas ultrasónicas	49
4.3.1 <i>Ondas longitudinales</i>	49
4.3.2 <i>Ondas transversales o de corte (Shear)</i>	50
4.3.3 <i>Ondas Rayleigh o superficiales</i>	50
4.3.4 <i>Ondas Lamb o laminares</i>	50

4.3.5 Ondas P y S.....	50
5. Descripción de la interacción entre moléculas parafínicas y el ultrasonido (ESOTM) por origen de la cavitación	52
5.1 Fenómeno de cavitación (Efecto mecánico).....	53
5.1.1 Picos de presión.....	53
5.1.2 Principio físico de operación en la cavitación	54
5.1.3 Cavitación acústica.....	58
5.1.4 Cavitación acústica dentro del crudo	58
5.1.5 Parámetros de cavitación en superficie.....	59
5.2 Fenómeno molecular (Efecto químico y térmico)	61
5.3 Interacción de las parafinas con ultrasonido en superficie	63
5.4 Interacción de las parafinas con ultrasonido en subsuelo	65
5.4.1 Daño a la formación	65
5.4.2 Inhibición de parafinas con ultrasonido en limpieza del pozo	66
6. Analisis de investigaciones a nivel mundial enfocadas a la reducción del punto de fluidez y a la inhibición de parafinas por medio de la estimulación sónica (ESOTM)	68
6.1 Investigaciones de ultrasonido en superficie	72
6.1.1 Tecnología generador ultrasónico IL10, en muestras de crudo parafínicos de tanque, Universidad Minera de San Petersburgo (Rusia).....	72
6.1.2 Prueba piloto planta GPR-2 con muestras de crudo parafínico de los campos East Zhetybai y Ashchisai (Rusia)	77
6.1.3 Prueba de tratamiento ultrasónico (TSU) transductor MSP 1/24, Universidad Politécnica de Tomsk (Rusia)	83

6.1.4 Configuración experimental deshidratación ultrasónica, Universidad de Ciencia y Tecnología de Shanghai, Shanghai (China).....	85
6.1.5 Desarrollo reciente de equipos de producción de aceite por ultrasonidos con parafinas, (Universities of China), Wonkwang University (South Korea)	93
6.2 Cuadro comparativo de las investigaciones a nivel mundial en superficie	97
6.3 Investigaciones de ultrasonido en pruebas de subsuelo.....	99
6.3.1 Pruebas en núcleos, Universidad del Petróleo (China)	99
6.3.2 Resonadores ultrasónicos, Pulsos Ultrasónicos PU (México).....	100
6.3.3 Dispositivo experimental de tratamiento ultrasónico con Generador y Transductor supersónico, Universidad de Shanghai (China).....	104
6.3.4 Aumento de movilidad del crudo por interacción ultrasonido-Roca, SPE Annual Technical Conference and Exhibition Texas (Estados Unidos)	108
6.4 Cuadro comparativo de las investigaciones a nivel mundial en subsuelo.	111
7. Análisis de la estimulación sónica más óptima y efectiva en la inhibición de parafinas	113
7.1 Parámetros operativos determinantes para una estimulación sónica exitosa en superficie y subsuelo.....	113
7.1.1 Efectividad de la frecuencia ultrasónica	116
7.1.2 Factor de la potencia ultrasónica.....	119
7.1.3 Efecto del tiempo en el tratamiento	119
7.1.3.1 Tiempo aplicado en subsuelo.....	119
7.1.3.2 Tiempo aplicado en tuberías de superficie.....	121
7.1.3.3 Coincidencia resultados tiempo de tratamiento subsuelo y superficie	122
7.1.4 Eficacia del ultrasonido con respecto a la permeabilidad del núcleo.....	122

<i>7.1.5 Efecto de la estimulación sónica sobre la viscosidad.....</i>	<i>124</i>
<i>7.1.6 Comparación tratamiento ondas ultrasónica y agentes químicos.....</i>	<i>126</i>
<i>7.1.7 Combinación de técnica ultrasónica e inyección de agentes químicos.....</i>	<i>127</i>
7.2 Cuadros de los valores óptimos de los factores que afectan la eficiencia de la estimulación sónica en la inhibición de parafinas.....	129
8. Conclusiones	132
9. Recomendaciones	135
Referencias Bibliográficas.....	136

Lista de tablas

Tabla 1. Características del generador ultrasónico IL10.	74
Tabla 2. Tiempo para alcanzar la temperatura de fusión y la eficiencia del ultrasonido.....	76
Tabla 3. Composición de aceites parafínicos en los campos East Zhetybai y Ashchisai	78
Tabla 4. Parámetros del experimento ortogonal.	87
Tabla 5. Comparación en superficie.	97
Tabla 6. Pozos en los que se hicieron pruebas con ultrasonido.	103
Tabla 7. La frecuencia y potencia de diferentes transductores de ultrasonido.	106
Tabla 8. Cuadro comparativo de investigaciones en subsuelo	111
Tabla 9. Efecto del tiempo en la permeabilidad.	120

Lista de figuras

Figura 1. Parafina macrocristalina.	29
Figura 2. Parafina microcristalina.	30
Figura 3. Tramo de oleoducto afectado por depositación de parafina cristalizada.	35
Figura 4. Esquema del proceso de formación de depósitos de parafina en tubería.	36
Figura 5. Cristales de cera ante un enfriamiento abrupto.	38
Figura 6. Ciclo de onda.	43
Figura 7. Onda transversal y longitudinal.	47
Figura 8. Haz ultrasónico.	49
Figura 9. Ondas tipo S y P.	51
Figura 10. Picos de presión.	54
Figura 11. Diagrama P-T para una sustancia.	55
Figura 12. Proceso de cavitación en tubería.	56
Figura 13. Cavitación en válvula de mariposa.	56
Figura 14. Cavitación en válvula anular.	57
Figura 15. Cavitación en válvula de compuerta.	57
Figura 16. Cavitación acústica.	59
Figura 17. Parámetros de un proceso de cavitación.	60
Figura 18. Crackeo de moléculas.	62
Figura 19. Crecimiento e implosión de burbujas.	69
Figura 20. Black and white oil bubbles.	69
Figura 21. Contracción y expansión.	70
Figura 22. Emisión de calor.	70

Figura 23. Esquema subsuelo y superficie.....	72
Figura 24. Diagrama del generador principal ultrasónico	73
Figura 25. Vista externa del generador de ultrasonidos IL10.....	74
Figura 26. Depósitos de aceite parafínico.....	75
Figura 27. Crudo parafinico al ser expuesto al ultrasonido	76
Figura 28. Diagrama de flujo de la planta piloto.	78
Figura 29. Planta piloto GPR-2.....	80
Figura 30. Viscosidad dinámica del petróleo del campo East Zhetybai	81
Figura 31. Viscosidad dinámica del petróleo del campo Ashchisai.	82
Figura 32. Configuraciones experimentales deshidratador ultrasónico.....	86
Figura 33. Microscopio electrónico de barrido tipo MAI1.....	87
Figura 34. Cambio de la morfología de los cristales de parafina.....	88
Figura 35. Efectos de eliminar el tapón de parafina para el crudo deshidratado.	89
Figura 36. Curva experimental de reducción de viscosidad ultrasónica.....	90
Figura 37. Efectos de la intensidad del sonido y el tiempo.	91
Figura 38. Cambio de la morfología de los cristales de parafina a lo largo del tiempo.	92
Figura 39. Equipo patente de Biqi Wang y col anti parafinas.	94
Figura 40. Estructura del dispositivo electromagnético ultrasónico anti-incrustante.	95
Figura 41. Dispositivo patente Ping Zhou anti-cera-parafinas.	96
Figura 42. Configuración experimental.	99
Figura 43. Diagrama tecnología PU Pemex.....	101
Figura 44. Herramienta ultrasónica estimulación vertical del pozo.	103
Figura 45. Estructura diagrama experimental.	105

Figura 46. Seis transductores.	106
Figura 47. Efecto de tiempo y permeabilidad.	107
Figura 48. Los principales componentes del experimento de inmersión: a) la celda de inmersión, b) el baño de ultrasonidos y la bocina de ultrasonidos.	111
Figura 49. Factores determinantes en la efectividad de la estimulación sónica en inhibición de parafinas en superficie.	113
Figura 50. Factores determinantes en la efectividad de la estimulación sónica en inhibición de parafinas en subsuelo.	114
Figura 51. Escenario de comparación.	115
Figura 52. Análisis del proceso de investigación.	115
Figura 53. El efecto de la frecuencia ultrasónica.	118
Figura 54. Espesor parafina vs tiempo.	122
Figura 55. Efecto de la permeabilidad.	123
Figura 56. Cuadro comparativo técnicas de inhibición de parafina.	126
Figura 57. Comparación agente químico, tratamiento ultrasónico y la combinación.	128
Figura 58. Potencia.	129
Figura 59. Rango tiempo, presión, temperatura e intensidad.	130
Figura 60. Aumento de frecuencia, potencia, tiempo y PU.	131

Resumen

Título: Análisis de la inhibición en la precipitación de parafinas mediante el uso de la estimulación sónica (ESOTM).

Autores: Dana Marcela Ramírez Niño y Luis Alberto Chinomes Gualdrón**

Palabras Clave: Precipitación de parafinas, ondas ultrasónicas, cavitación, inhibición de cristales parafínicos, daño a la formación, punto de fluidez.

Descripción: La precipitación de parafinas es un problema de producción que afecta frecuentemente a la mayoría de los pozos en el mundo, la acumulación y posterior incrustación de las parafinas obstruyen el paso de los hidrocarburos a través de las líneas de flujo en superficie, del mismo modo ocurre en los poros de la cara de pozo y el yacimiento, dando paso al análisis de técnicas de estimulación ultrasónica que prevenga y controle el daño a la formación en los pozos con bajo costo e impacto con el medio ambiente como los descritos en la presente investigación.

El objetivo de la investigación busca analizar el comportamiento de la estimulación ultrasónica al inhibir la precipitación de las parafinas teniendo en cuenta las características y propiedades fisicoquímicas involucradas en el proceso. La descripción se basa en cuatro etapas fundamentales donde se analizan diferentes factores que influyen en la cristalización de ceras parafínicas, como la cavitación acústica y la aplicación que tiene a nivel mundial para inhibir las parafinas y aumentar la producción. Asimismo, se comparó la técnica ultrasónica con la convencional dando a conocer la eficacia que exhibe un nuevo panorama de aplicación de ondas ultrasónicas junto agentes químicos.

* Análisis de la inhibición en la precipitación de parafinas mediante el uso de la estimulación sónica (ESOTM).

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería de Petróleos. Director: Julio César Pérez Angulo. Magister en Ingeniería de Hidrocarburos.

Abstract

Title: Analysis of inhibition in paraffin wax precipitation using sonic stimulation (ESOTM)*

Authors: Dana Marcela Ramírez Niño y Luis Alberto Chinomes Gualdrón¹

Key Words: Paraffin precipitation, ultrasonic waves, cavitation, paraffin crystal inhibition, formation damage, pour point.

Description: Paraffin precipitation is a production problem that frequently affects most wells in the world, the accumulation and subsequent encrustation of paraffin obstruct the flow of hydrocarbons through the surface flow lines, as well as in the pores of the near wellbore and reservoir, giving access to the analysis of ultrasonic stimulation techniques that prevent and control the damage to the formation in wells with low cost and impact on the environment as those described in this research.

The objective of the research is to analyze the behavior of ultrasonic stimulation in inhibiting the precipitation of paraffins considering the physicochemical characteristics and properties involved in the process. The description is based on four fundamental stages where different factors that influence the crystallization of paraffin waxes, such as acoustic cavitation, are analyzed and their worldwide application to inhibit paraffins and increase production was studied. Likewise, the ultrasonic technique was compared with the conventional one, showing the efficacy of a new panorama of application of ultrasonic waves together with chemical agents.

* Analysis of inhibition in paraffin wax precipitation using sonic stimulation (ESOTM)

** Faculty of Physicochemical Engineering, Petroleum Engineering Department. Director: Julio César Pérez Angulo. Máster in Hydrocarbon Engineering.

Glosario

- ESOTM:** Estimulación sónica
- WAT:** Temperatura de aparición de la cera
- HFR:** Reactor de tipo de flujo hidrodinámico
- GPR:** Geo Radar de penetración
- ARPD:** Asfalto-resina-parafina
- SSS:** Secondary sound source
- SP:** Spindel
- LN:** Light Neutral
- MN:** Medium Neutral
- BSD:** Bright Stock Desasfaltado
- WPC:** Curva de Precipitación de Cera
- PH:** Hidrocarburos parafínicos
- TSU:** Tratamiento ultrasónico
- PU:** Ultrasonic technology
- PRR:** Permeability recovery rate
- AIATG:** Activo Integral Aceite Terciario del Golfo

Introducción

A nivel nacional e internacional la precipitación y depositación de parafinas, en campos con un alto contenido orgánico de este compuesto, se ha convertido en una dificultad indeseable a nivel operacional en la ruta de producción, las parafinas son sustancias presentes en el crudo que pueden originar obstrucción o taponamiento en las líneas de producción, debido a su composición química las parafinas son un tipo de hidrocarburos generalmente con largas cadenas lineales o ramificadas, ante su naturaleza cristalina la incidencia de cambios de temperatura suscitan su rápida cristalización manifestándose de la siguiente manera:

1. Al interior del yacimiento y en operaciones de extracción.
 - Daño a la formación
 - Reducción de la permeabilidad en la roca
2. En la ruta de ascensión del crudo a superficie
 - Daño en la cara de la formación
 - Desgaste en tubería
3. En el trayecto de circulación en facilidades de superficie.
 - Estabilización de la emulsión
 - Obstrucción en tubería
 - Formación de depósitos tanto en tuberías como tanques
 - Deterioro de equipos
4. Por la ruta de transporte en oleoductos hacia refinerías o centros de recarga.

Postergando así el aseguramiento del flujo en los ductos, comúnmente estas falencias operacionales pueden ocasionar un monumental gasto de dinero, provocado por los nuevos

requerimientos económicos en mantenimiento y reparación, causal directa en la disminución de la rentabilidad en la producción.

Las estrategias implementadas en tecnología e investigación para responder a estos retos, ha impulsado el desarrollo y uso de sustancias químicas de un alto valor comercial y gasto de suministro, en campos donde no se amerita económicamente esta inversión, a su vez otros tratamientos envuelven procesos que implican una alta complejidad en su aplicación y desarrollo, puesto que no han logrado obtener suficientes pruebas experimentales en Colombia, que avalen su efectividad.

El presente trabajo realizo un estudio profundo sobre la base bibliográfico de la aplicación de pruebas piloto de las técnicas de inhibición de parafinas a través de la estimulación sónica nivel mundial, con el fin de proporcionar fundamentos previos para el desarrollo de futuros proyectos de investigación basados en la estimulación sónica denominada y abreviada en este documento por la sigla ESOTM, analizando los factores que inciden en los procesos de cristalización de las parafinas en las etapas de producción, a partir del estudio de los casos aplicados de esta técnica a nivel mundial en los campos de China, Rusia, Estados Unidos y México, describiendo y comparando los resultados experimentales en diferentes crudos expuestos a ondas sónicas.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar el comportamiento de la estimulación sónica al inhibir la precipitación de las parafinas teniendo en cuenta las características y propiedades fisicoquímicas involucradas en el proceso.

1.2 Objetivos Específicos

- Revisar investigaciones a nivel mundial enfocadas a la reducción del punto de fluidez y a la inhibición de los precipitados de parafinas a partir de la estimulación sónica (ESOTM).
- Estudiar las características y propiedades moleculares de las parafinas, esencialmente al interactuar con las ondas sónicas (ESOTM).
- Determinar qué estimulación sónica es la más óptima y efectiva en la inhibición de parafinas en condiciones operativas de flujo.

2. Base teórica

A lo largo de la línea de producción, se originan alteraciones en los hidrocarburos que involucran fenómenos fisicoquímicos y termodinámicos relacionados con cambios en las condiciones de operación. Estas perturbaciones generan cambios de fase, que propician la precipitación de sus partículas orgánicas parafínicas ocasionando obstrucción del flujo, con las consecuentes pérdidas de producción (En & Crudo, 2012).

En el proceso ascendente y de circulación del crudo a través de tubería, la temperatura como factor externo, altera el comportamiento de las parafinas, si la temperatura es inferior al punto de cristalización, puede favorecer el incremento de la viscosidad debido a la depositación de los cristales. El carácter urgente de proveer una solución óptima para el control de las parafinas incita el desarrollo de la técnica de inhibición de parafinas con estimulación sónica.

Para (Zhenjun Wang & Yin, 2018) el mecanismo de influencia de la herramienta ultrasónica es desencadenar la propagación de ondas a través del crudo, en su interior la acción de las vibraciones mecánicas genera el rompimiento de las moléculas de parafina, descomponiéndolas a sustancias de hidrocarburos ligeros bajo el efecto de cavitación. La excitación ultrasónica depende de parámetros relacionados al tiempo e intensidad del sonido, entre otros factores físico que son inherentes a su aplicación.

2.1 Antecedentes

El nombre petróleo en sí proviene del jaim *petra* (una roca), y *oleum*, (aceite), siendo de hecho "aceite de roca", derivando su nombre de ser encontrado en las rocas, o rezumando de ellas. En su estado natural, su composición es muy indefinida, y consiste en varios hidrocarburos oleosos, que mantienen en solución a la parafina y el betún sólido, o asfalto (Bone, 1865).

Se indica mejor refiriéndose a la respuesta de la encuesta a esta pregunta: "En su opinión, ¿se ha hecho algo realmente constructivo en los últimos 10 años para simplificar el problema del petróleo y la parafina en la producción de campos petroleros?" De los que respondieron a esta pregunta, el 40% respondió negativamente (Brown, 1940).

Por definición del problema, los compuestos orgánicos del campo denominado "parafina" deben ser aquellos que son insolubles en el crudo en las condiciones de producción. Estos serán los compuestos de alto peso molecular. En el sentido más amplio, un problema de "parafina" hace referencia a la formación de depósitos predominantemente orgánicos que obstaculiza la producción de aceite. Se considerará a la formación de depósitos orgánicos como "parafina", ya que no existe una diferencia claramente definida entre las ceras de varilla, los asfaltos y los depósitos de alquitrán (Shock et al., 1955).

A medida que el petróleo crudo fluye desde la formación productora hacia la superficie, se produce una disminución de la temperatura por lo que se puede hacer que los constituyentes cerosos se precipiten del petróleo y se acumulen en la superficie de la tubería y también en las varillas en los pozos de bombeo. Cuando esto ocurre, la acumulación de cera en la tubería disminuye progresivamente la tasa de producción de aceite y, por lo tanto, requiere que la tubería se limpie periódicamente. La frecuencia con la que debe realizarse la limpieza varía considerablemente según el carácter del petróleo crudo y las condiciones imperantes del pozo (Morris & Spalding, 1958).

La literatura de patentes describe muchos productos desarrollados para eliminar o prevenir los depósitos de parafina, pero a pesar de estas contribuciones, el problema de formación de depósitos de parafina no ha sido resuelto. La literatura informa que la inhibición por modificación de cristales es el método más prometedor y potencialmente el más económico para el control de la parafina (Bucaram, 1967).

El tratamiento de pozos con dispersantes e inhibidores en la formación de depósitos de parafina generalmente reduce o ralentiza la formación de depósitos de parafina. Sin embargo, esta inhibición suele ser de muy corta duración, porque la producción del pozo lleva rápidamente los productos químicos a la producción y superficie, más tratan los problemas relacionados con la parafina una vez que han aparecido (Woo et al., 1984).

Las siguientes técnicas de remoción de parafina son de uso común en China, métodos: Mecánico, Químico, Electrotérmico, De limpieza en pozos con aceite caliente (o agua) o vapor y microbiano. Técnicas de inhibición de parafinas: Fuerte inhibición magnética, método químico y tubo de revestimiento de vidrio compuesto (B. Wang & Dong, 1995).

Lavoisier, en 1789, observó que los compuestos de origen vegetal o animal contenían carbono. La división de la Química en Inorgánica y Orgánica ha sus orígenes en circunstancias históricas (Flores, 2000).

Roberts & col en 1994 informaron los resultados de experimentos para demostrar que la aplicación de ultrasonido representa una técnica viable para la remoción del daño cercano al pozo causado por depósitos orgánicos, incluyendo parafinas y asfaltenos, pero menos para remover el daño de los polímeros (como se cito en Champion 2004).

La herramienta rotocavitadora está diseñada para mejorar la producción y limpiar tuberías debido al efecto de limpieza combinado de cavitación y chorro de agua. La herramienta elimina suciedad, escamas, parafinas, asfaltenos y formación de depósitos mixtos y, por lo tanto, permite una limpieza eficaz de tuberías, perforaciones, pantallas envueltas de

alambre, revestimientos ranurados, accesorios de cable, arena y escombros de pozos de peces, formaciones, etc (Bakker & Ivannikov, 2002).

El ultrasonido puede reducir el punto de cristalización y la viscosidad del petróleo crudo parafínico y aumentar su fluidez incluso a baja temperatura. Los efectos del tiempo de tratamiento ultrasónico, la corriente de trabajo del transductor, el contenido de agua y otros parámetros sobre el efecto de la reducción de la viscosidad ultrasónica del petróleo crudo se estudiaron utilizando un transductor piezoeléctrico de concentración de energía en longitud de onda completa (Dong et al., 2010).

La técnica de producción de aceite por ultrasonidos es uno de los métodos de ondas más prometedores. El efecto del ultrasonido en el pozo y el yacimiento conduce a una mayor producción, se basa en dos aspectos de la sonicación mejora del flujo de petróleo a través de las rocas hacia la piscina de bombeo y reducción de la viscosidad. del aceite que facilitaría el bombeo. Como uno de los métodos de EOR físico, la técnica de producción de aceite por ultrasonidos tiene muchas ventajas, como una gran adaptabilidad, fácil operación, bajo costo y sin contaminación para el medio ambiente (Zhenjun Wang et al., 2015).

3. Propiedades y características de las parafinas

3.1 Parafinas

3.1.1 Aceites parafínicos

Según Calles Martín, (2002) en su composición prevalecen los hidrocarburos alifáticos, de fórmula general CH_{2n+2} . Comúnmente su distribución de átomos de carbono en los aceites parafínicos es: 70-80%; nafténicos, 10-20% y aromáticos, 5-10%. Sus propiedades están representadas en ser menos densos, con un elevado punto de fusión, y con un índice de viscosidad alto.

Tienden a ser escasamente volátiles, constan de una oxidación retardada (requiere un periodo de inducción) y por último carecen de poder disolvente contrario a las sustancias orgánicas originadas de la combustión.

3.1.2 Parafina industrial

La parafina industrial es una mezcla de hidrocarburos saturados (alcanos) que se obtiene como subproducto de los aceites lubricantes en la industria petroquímica. Las parafinas constituyen alrededor del 15% en peso del crudo y requieren ser aisladas del aceite para evitar su cristalización a bajas temperaturas. Los componentes de la parafina son sólidos a temperatura ambiente (puntos de fusión de 50-70 °C), mientras que los aceites deben tener un punto de congelación inferior a -10 °C para ser útiles como lubricantes (Sánchez, 2003).

El aceite y la parafina son básicamente una mezcla de hidrocarburos saturados. Por tanto, las principales diferencias químicas entre ellos dependen de la longitud y el tipo de estos

hidrocarburos. La parafina está formada por alcanos que contienen alrededor de un 80-90% de cadenas lineales (n-parafina) con 20-30 carbonos, y el petróleo es básicamente cadenas ramificadas (Isoparafinas) (Cottom, 2000; The International Group, Inc. (IGI), como se citó en Palou et al., 2014).

3.1.3 Parafina dentro del campo petrolífero

Para Addison, (1984) la definición de parafina para el científico y para el campo petrolífero es algo diferente. La parafina, tal y como se define estrictamente, son hidrocarburos alifáticos saturados de cadena lineal y ramificada, incluso el metano, CH₄, se considera una parafina. Para informar sobre el porcentaje de parafina en el petróleo crudo y en los yacimientos, se considera parafina todo lo que tenga cadenas de carbono C₁₈ y superiores. Las cadenas alifáticas inferiores a C₁₈ son líquidas o gaseosas por debajo de 23 °C y se consideran parte de los "constituyentes aceitosos".

La parafina, tal y como la definen los petroleros, se refiere a una mezcla de cera, manteca, asfaltenos, petróleo, agua, arena, óxido, hielo, sulfuro de hierro, etc. Todo lo que tapona el pozo se engloba en el término general de parafina. La dureza del tapón depende de la cantidad de petróleo y agua presentes.

3.1.4 Composición molecular

Generalmente la fracción de cera está compuesta en su mayoría por parafinas con fracciones de naftenos y aromáticos. Actualmente el conocimiento de ceras refinadas ha contribuido para la comprensión del comportamiento y las propiedades de estas sustancias. Las

parafinas normales son el origen de cristales en forma de aguja y se identifican como los principales creadores de las ceras cristalinas. Las parafinas de cadenas componen en su mayoría a las ceras microcristalinas. Los tipos compuestos nafténicos y aromáticos de estable cadena recta larga similarmente contribuyen a las ceras microcristalinas y adicionalmente tienen una marcada recopilación en la evolución de los cristales de cera macrocristalina (Misra et al., 1995).

Las componen normalmente los n-alcanos con diferentes proporciones de alcanos y ciclo alcanos de cadena un poco ramificada. Frecuentemente, los aromáticos están vigentes en un porcentaje bajo, su mayoría son del tipo monoaromático. Las ceras microcristalinas provienen de los residuos de la destilación o a partir del fondo en los tanques o de algunos destilados de un elevado rango de temperatura de ebullición. Están compuestos normalmente por alcanos de cadena ramificada, cicloalcanos y diminutas cantidades de parafinas como también aromáticos alquilados (Speight, 2015).

3.1.5 Cera

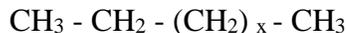
La cera de petróleo es de dos tipos generales: cera de parafina (“paraffin”) son el resultado del destilado del petróleo y cera microcristalina (“wax”) son los residuos de petróleo. El punto de fusión de la cera no está directamente relacionado con su punto de ebullición, porque las ceras contienen hidrocarburos de diferente naturaleza química. No obstante, las ceras se clasifican según su punto de fusión y su contenido en aceite (Speight, 2010).

3.2 Clasificación de las parafinas

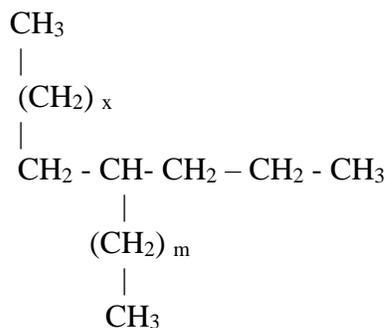
Según la división de estructura molecular de Sánchez (2003), y tomando como referencia la forma estructural de acomodación y cadena de la parafina, se prosigue a clasificar según su estructura molecular y por su empaquetamiento:

3.2.1 Clasificación según su estructura molecular

- 1. Normal parafinas o de cadena lineal (n-parafinas):** Se forman a partir de alcanos saturados, por ello su estructura molecular es lineal. Su fórmula química es $C_n H_{2n+2}$, en donde $n > 20$. En su composición x indica la longitud de la cadena, aquella cambia aproximadamente en un rango 17 a 57. Los pesos moleculares comprenden un rango de entre los 280 y 840.



- 2. Isoparafinas o de cadena ramificada:** Son hidrocarburos saturados (alcanos) en cuya estructura molecular predominan las cadenas ramificadas. Estas ramificaciones están principalmente constituidas por radicales lineales, C1-C6, o bien ciclos de 5 ó 6 carbonos.

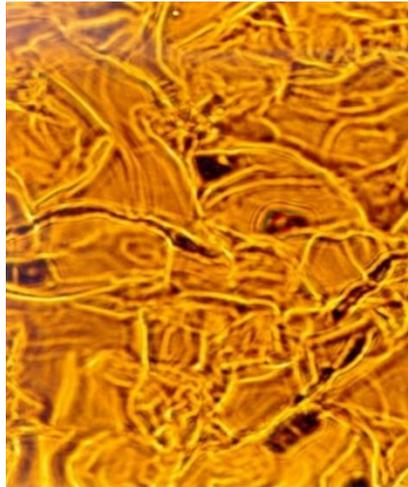


Las parafinas normales de un determinado número de átomos de carbono están acompañadas por parafinas ramificadas o Isoparafinas y por ciclo parafinas del mismo número de átomos de carbono. Por ejemplo: las cadenas con 30 átomos de carbono lineales coexisten con una o varias cadenas de otros 30 átomos de carbono totales, que se presentan en forma de estructuras ramificadas con diferentes radicales metilos, etilo y también con una o varias moléculas de 30 átomos de carbono, de los cuales 5 ó 6 están integrados como grupos ciclopentilos o ciclohexilos. El predominio de unas u otras estructuras determinará las características del producto.

3.2.2 Clasificación por empaquetamiento

- **Parafinas macrocristalinas (“paraffin wax”)**: Su estructura química la componen cadenas principalmente lineales, llamadas normal parafinas, con proporciones de cadenas ramificadas (Isoparafinas). Están formados característicamente por moléculas de 20-40 átomos de carbono. Se derivan del desparafinado de los aceites ligeros obtenidos en las unidades de vacío: “Spindel” (SP), Ligero o “Light Neutral” (LN) y Medio o “Medium Neutral” (MN). Frecuentemente su estructura cristalina es apreciable por microscopía electrónica de barrido debido a su alineamiento un poco paralelo de sus largas cadenas lineales (Figura 1).

Figura 1. Parafina macrocristalina.

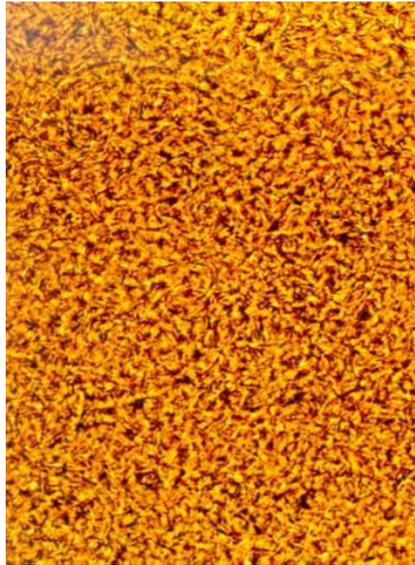


Nota. Tomado de Sánchez (2003) Purificación de Parafinas de Petróleo por Hidrogenación Catalítica.

- **Parafinas semicristalinas:** Productos en los que sus puntos de fusión cambian en un rango de entre 60-80 °C. Son hidrocarburos saturados cuyo porcentaje de n-parafinas está entre el 60 y el 40 %. Proviene de los cortes de aceites más pesados de una torre de vacío (HN o “Heavy Neutral”). Su viscosidad a 100 °C es menor de 10 cSt.

- **Parafinas microcristalinas:** Hidrocarburos saturados en ellos predominan las cadenas ramificadas de poca longitud, denominados iso-parafinas, y las cadenas con reemplazos nafténicos o ciclos saturados de 5 ó 6 carbonos. Los porcentajes de n-parafinas son menores a 30 %, el resto a Isoparafinas y Ciclo parafinas o Nafteno parafinas. Están formados por moléculas de 30-60 átomos de carbono. Se originan a partir del desparafinado de los aceites residuales del crudo en el proceso de desasfaltado (BSD o “Bright Stock” desasfaltado). Sus puntos de fusión son de alrededor de 70 a 90 °C. (Figura 2).

Figura 2. Parafina microcristalina.



Nota. Tomado de Sánchez (2003) Purificación de Parafinas de Petróleo por Hidrogenación Catalítica.

3.3 Precipitación de parafinas

Según Bern et al., (1980); Hunt Jr., (1962) la acumulación de la parafina en el sentido más amplio abarca la formación de cualquier depósito predominantemente orgánico en tuberías de pozos, líneas de flujo superficiales y otros equipos en contacto con petróleo crudo o gas. El fenómeno de enfriamiento parece ser el factor predeterminante de control en la formación de depósitos y precipitación de parafina explícitamente de la cera de parafina y su concentración en el depósito.

La relación entre la distancia radial en la tubería y la velocidad de enfriamiento del aceite se combina luego con una relación entre el punto de nube y la velocidad de enfriamiento para desarrollar el patrón de formación de una nube de cera en el aceite, esta formación de depósitos de cera puede provocar un aumento de la rugosidad y la pérdida de diámetro efectivo, aumentando la

caída de presión o reduciendo el rendimiento. La formación de depósitos de cera en una línea de tuberías, especialmente si no se trata, puede generar graves consecuencias en la eficacia operativa de un sistema de tuberías.

3.3.1 Fenómeno de cristalización en las parafinas:

Para ARIZA et al., (2008) el crudo en condiciones de yacimiento posee un estado termodinámico “estable” en que la temperatura y la presión ejercida en el fluido mantiene en armonía los componentes parafínicos y livianos, dentro del yacimiento el fenómeno de transferencia de calor a formaciones cercanas puede propiciar la formación de depósitos de parafinas y la consiguiente obstrucción de los poros, asimismo durante el trayecto de flujo del pozo a superficie el crudo se expone a un gradiente de presión, en el que la liberación de esta puede acarrear la volatilización de componentes livianos como el metano, etano, propano, butano, etc. Que a su vez alteran la mezcla de hidrocarburos hasta disminuir la solubilidad de la parafina en el aceite.

El cambio abrupto de estas condiciones dinámicas, sumado a la disminución de temperatura cuando el crudo se enfría por transferencia de calor a tubería, provoca que rápidamente se llegue al punto de cristalización en el que las parafinas se juntan y adhieran entre ellas mismas para generar estructuras de red, este proceso se reconoce como apiñamiento entre redes de cadenas lineales adyacentes que trazan la ruta de precipitación de parafinas.

Los cristales generados pueden ser depositados como placas, agujas, esférulas o mezcla de éstas, determinando fuerzas de absorción y propiedades de adhesión que mantienen el depósito de parafina fijo sobre una superficie (Rodríguez & Castañeda, 2001).

3.3.2 Punto de cristalización

La precipitación de cera durante la producción se ha atribuido principalmente al enfriamiento del petróleo crudo que se transporta desde la formación hasta su destino final de producción. La temperatura a la cual se manifiesta el primer cristal de cera en el petróleo crudo se nombra punto de cristalización: temperatura de aparición de la cera (WAT). No obstante, dado que es difícil determinar esta aparición, algunos autores la describen como la temperatura a la que la formación de cera es menor al 0,1% en el crudo, a una presión fija (Ariza-León et al., 2014, quien citó a Ball & Jones, 2009).

Algunas investigaciones han indicado que los petróleos crudos a temperaturas superiores al punto de cristalización evidencian un comportamiento newtoniano y, a temperaturas más bajas, tienen un comportamiento no newtoniano (Ariza-León et al., 2014, quien citó a Wardhaugh, Boger & Tonner, 1988; Dimitriou, 2013).

3.3.3 Punto de fluidez

Una vez que se presentan las primeras semillas o centros de nucleación de los cristales, empiezan a crecer y, determinado por las condiciones de flujo hidrodinámico, puede propiciarse la deposición de material sólido. Cuando el crudo continúa en su camino y se genera el enfriamiento, puede alcanzar una temperatura en la que se pierde movilidad (punto de fluidez) provocando una disminución del flujo y problemas operativos (Ariza-León et al., 2014, quien citó a Zhu, Walker & Liang, 2008).

3.3.4 Distinción entre precipitación y deposición de parafinas

Es importante distinguir entre la precipitación y la deposición de ceras. Cuando la temperatura desciende, la solubilidad de la cera en el crudo disminuye, y otros factores, como la presión (Ariza-León et al., 2014, quien citó a Zhu, Walker & Liang, 2008; Han et al., 2010; Kutcherov & Chernoutsan, 2006), el caudal y la composición físico-química del crudo cambia, y puede producirse el famoso fenómeno de precipitación, o mejor conocido como cristalización.

La deposición es la formación de una capa o fase sólida compuesta principalmente por cera y petróleo crudo atrapado en una superficie en contacto con el petróleo crudo, como los poros de las rocas y la superficie interna de las tuberías, válvulas o tanques de producción. En el caso de las tuberías, el depósito propende a crecer o elevar el espesor dado a factores hidrodinámicos, procesos de difusión de masa y energía, así mismo como las características físico-químicas del fluido (Ariza-León et al., 2014, quien citó a Aiyejina, Chakrabarti, Pilgrim & Sastry, 2011; Huang, Lee, Senra y Fogler, 2011).

3.4 Estudio de la formación de depósitos parafínicos en campo

Según Abramova et al., (2014), cuando se reduce la temperatura ambiente o por transferencia de calor a la tubería el crudo se enfría, esto conduce a un aumento significativo de la viscosidad debido a la formación de una fase dispersa.

La formación de la fase dispersa se asocia principalmente con la presencia de una mezcla multicomponente de parafina que contiene átomos de carbono en el crudo en el rango C₁₈-C₆₅.

Tales formaciones tienen una estructura sólida similar a un gel formada por una red tridimensional (3D) de cristales de parafina interconectados y un medio de dispersión incluido.

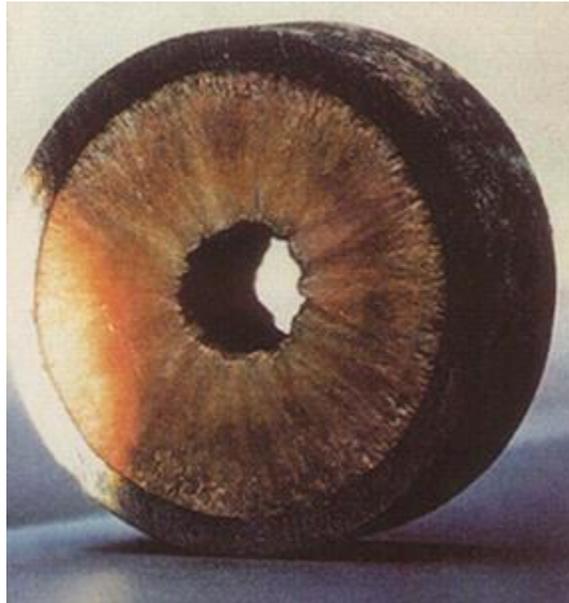
La cristalización de la parafina se produce por los mecanismos clásicos de nucleación y crecimiento que se producen en determinadas condiciones termodinámicas, especialmente temperaturas bajas y un punto de fluidez alto. Todos los sistemas de dispersión se pueden dividir en dos clases según las propiedades cinéticas de la fase dispersa: sol y gel.

3.4.1 Cristalización por transferencia de calor a tubería

Como describe Venkatesan en (2005), el aumento de la dispersión y concentración de la fase dispersa puede dar lugar a diferencias significativas en las propiedades estructurales y mecánicas de los sistemas de dispersión. En la práctica, la formación de la fase dispersa conduce a la creación de depósitos duros durante la producción y transporte por tuberías del petróleo crudo.

Se puede observar en la (Figura 3), el área disponible por la que el flujo de crudo se ha reducido drásticamente. En tales circunstancias, la parte de la tubería que está obstruida tendría que cortarse y reemplazarse, lo que resultaría en costos operativos significativos. Según el Departamento de Energía de EE. UU., aproximadamente el remplazo de tubería en offshore de 400 milla puede costar más de \$1 millón por milla.

Figura 3. Tramo de oleoducto afectado por depositación de parafina cristalizada.



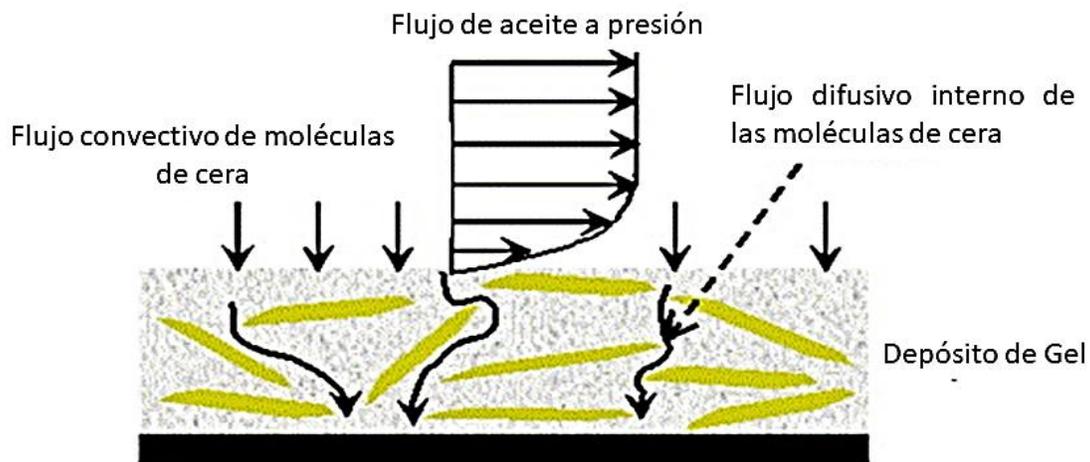
Nota. La figura muestra la vista en sección transversal de un segmento cortado de una tubería afectada por el problema de la formación de depósitos de parafina. Tomado de Venkatesan et al., (2005) The strength of paraffin gels formed under static and flow conditions.

Un caso que refleja bien esta situación fue el ocurrido por Lasso Oil Company en Reino Unido tuvieron que abandonar una plataforma petrolera costa afuera debido a problemas recurrentes de taponamiento de parafina a un costo de más de 100 millones de dólares. En general, el problema de la formación de depósitos de parafina es un problema de miles de millones de dólares en la industria petrolera.

La (Figura 4) muestra un esquema del proceso de formación de depósitos de parafina sobre una superficie fría. Se han propuesto muchas teorías, incluida la difusión molecular, la difusión browniana, la dispersión por cizallamiento y el asentamiento por gravedad, para explicar el proceso de formación de depósitos (Venkatesan quien citó a Bern et al., 1980, Burger et al., 1981, Majeed

et al., 1990, Singh et al., 2000). Los responsables del crecimiento interno de la capa de cristal con el flujo de masa convectivo externo de moléculas de cera que dirigen hacia la pared fría y un flujo difusivo interno dentro de la capa de gel.

Figura 4. Esquema del proceso de formación de depósitos de parafina en tubería.



Nota. Modificado de Venkatesan et al., (2005) The strength of paraffin gels formed under static and flow conditions.

3.4.2 Acumulación de parafinas en tanque

Según Palaev & Dzhemilev (2020) En el proceso de almacenamiento del crudo parafínico, las parafinas se convierten en un problema operacional, debido a su alto punto de fluidez tienden a formar depósitos muy viscosos en condiciones de temperatura ambiente. Los depósitos pueden generar una enorme capa en el fondo del tanque de hasta un 10% del volumen total, llegando incluso a prevalecer durante varios meses y obstaculizar el rendimiento económico del campo.

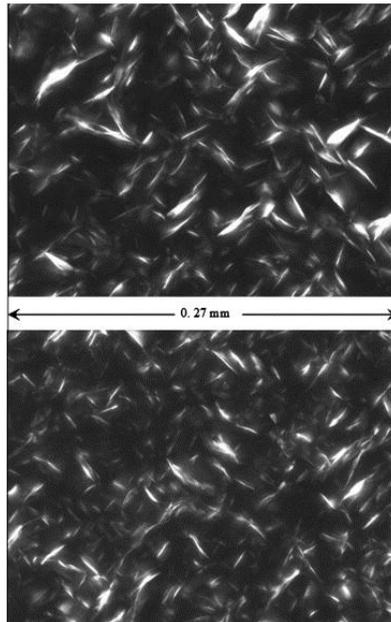
Frecuentemente, las refinerías ignoran los métodos de eliminación de depósitos de parafina y utilizan los métodos más simples para quemarla. Esto da lugar a efectos adversos en el medio

ambiente. También se utilizan diversos métodos químicos, térmicos y mecánicos para prevenir y reducir el crecimiento de depósitos de asfalto y parafinas, para eliminarlos durante el almacenamiento de aceite en tanques en estaciones de bombeo de aceite y refinerías.

Los métodos químicos se han convertido en los más comunes. Por lo tanto, aproximadamente el 10% de los pozos con depósitos complicados se tratan actualmente con varios compuestos químicos. Sin embargo, el uso de métodos de agentes químicos contra los depósitos de resina asfáltica y de parafina y las sales orgánicas aumenta significativamente el costo del petróleo y, a menudo, exacerbaban los problemas ambientales.

En campo el crudo altamente parafínico en su composición puede albergar del 5% al 70% en parafinas, y el contenido de asfaltenos y resina puede alcanzar hasta el 20%, en la (Figura 5) se puede visualizar a nivel microscópico como se visualizarían los cristales de parafina depositados en el crudo ante un enfriamiento abrupto en campo.

Figura 5. Cristales de cera ante un enfriamiento abrupto.



Nota. Tomado de Venkatesan et al., (2005) The strength of paraffin gels formed under static and flow conditions.

3.4.3 Acumulación de parafinas en oleoducto

Para Alnaimat & Ziauddin (2020) el sector de los oleoductos opera para satisfacer una elevada cantidad de demanda de energía. El mantenimiento de los oleoductos o la red de distribución es un trabajo tedioso por sí solo y el costo asociado es muy alto. El petróleo crudo contiene cera y el porcentaje de cera de parafina que puede subir es hasta la mitad del contenido del crudo, a esto se suma que la acumulación de la capa de cera en la región interior de la superficie curva en los oleoductos se considera un tema complejo y costoso. Los medidores y las sondas de detección que se utilizan en los depósitos también pueden verse afectados por la cera depositada (Alnaimat & Ziauddin (2020) quien citó a Wang et al., 2016; Ajiienka e Ikoku, 1991; Sun et al., 2016; Aiyejina et al., 2011; Jaworski y Meng, 2009).

En el flujo de la tubería, las moléculas de cera cristalizan cuando encuentran una condición de temperatura fría en la pared de la tubería, particularmente ocurre en las tuberías submarinas. La cristalización de mayor espesor provoca un bloqueo completo del suministro de aceite. Por ejemplo, como se apreció en la (figura 3), donde muestra el segmento de tubería que consta de parafina depositada que disminuyó drásticamente la sección transversal del flujo efectivo. El proceso de cristalización comienza una vez que la temperatura del petróleo crudo cae por debajo de la Temperatura de Apariencia de la Cera (WAT) (Alnaimat & Ziauddin (2020) quien citó a Oh et al., 2009; Pedersen y Rønningsen, 2003; Theyab y Diaz, 2013).

Con el tiempo, la solubilidad de la cera se ve afectada y la velocidad de formación de depósitos aumenta, lo que provoca una reducción en la región de flujo efectivo o en el área de la sección transversal de la tubería. Hay tres capas de cera depositada: 1) capa superior que es principalmente granular y blanda; 2) la capa intermedia contiene más impurezas mecánicas y contenido de cera; y 3) capa sedimentada ajustada cerca de la pared que tiene alta resistencia (Alnaimat & Ziauddin (2020) quien citó a Chala et al., 2014, 2018; Guozhong y Gang, 2010).

Cuando la temperatura del petróleo crudo está entre WAT y el punto de fluidez, la viscosidad del fluido se puede modelar utilizando la ecuación de estado virial. Cuando la temperatura del aceite desciende por debajo del valor de WAT, el aceite se comporta como un fluido no newtoniano donde la viscosidad y la viscoelasticidad se ven afectadas por el proceso de adelgazamiento por cizallamiento. La dependencia del tiempo y la temperatura debe considerarse para el análisis (Alnaimat & Ziauddin (2020) quien citó a Mansour et al., 2012; Ahmadpour et al., 2014).

Las moléculas de cera que se disuelven en el petróleo crudo cambian de fase y se solidifican con respecto a la entalpía de cristalización proporcionada y, en función de la temperatura, este fenómeno se denomina precipitación de cera. Ocurre por debajo del WAT. La temperatura frente al contenido de cera (fracción sólida) se puede obtener como Curva de precipitación de cera (WPC). Considerando que, la formación de depósitos de cera se refiere a la difusión molecular (mecanismo dominante) de partículas de cera cristalizada que se deposita en la pared de la tubería.

Con el tiempo y las condiciones de flujo, la capa de cera depositada se vuelve espesa y su acumulación se convierte en una preocupación, ya que puede afectar significativamente la sección transversal del flujo efectivo. Por lo tanto, la precipitación de cera depende de factores termodinámicos como la temperatura, la presión y la composición del aceite. Por otro lado, la formación de depósitos de cera depende de la transferencia de calor y masa, la interacción sólido-sólido y superficie-sólido y la hidrodinámica del flujo. La información sobre WAT ad WPC son parámetros esenciales para predecir la formación de depósitos de cera (Alnaimat & Ziauddin (2020) quien citó a Wang y Huang, 2014).

3.4.4 Depósitos de parafina en cara de pozo

En la línea de explotación y producción de hidrocarburos, el pozo está expuesto a fenómenos de alteración de temperatura, presión, contenido de agua y otras condiciones del yacimiento, que son inevitablemente perturbados al cambiar estado de equilibrio termodinámico dentro yacimiento al iniciar esta etapa de extracción. Las parafinas dentro del crudo que previamente se encontraban en equilibrio serán propensas a precipitar fácilmente y depositarse, reduciendo la porosidad y permeabilidad del yacimiento (ARIZA et al., 2008).

4. Fundamento de las ondas sónicas

Las ondas sónicas son ondas mecánicas que consisten en vibraciones oscilatorias de partículas atómicas o moleculares de una sustancia. Se pueden propagar a través de un medio elástico, ya sea sólido, líquido o gaseoso, pero no al vacío.

4.1 Ondas ultrasónicas

Las ondas ultrasónicas son vibraciones mecánicas que se transmiten en medios elásticos, a través de ondas de idéntica naturaleza que el sonido, pero a frecuencias mayores a los 20 [kHz], es decir fuera del rango audible para el ser humano. Castillo González & Inostroza Hernández, (2013) quien citó a Muzzioli, (1961).

Rango de frecuencias sonoras:

- Infrasonica, $f < 16$ Hz
- Sónicas, $20 < f < 20$ kHz
- Ultrasónica, $f > 20$ kHz

Las ondas ultrasónicas son ondas de presión mecánicas que se forman al accionar los transductores ultrasónicos con corriente de alta frecuencia y tensión generada por osciladores electrónicos. Recientes investigaciones han confirmado que las frecuencias más altas son más eficaces para la eliminación de ciertos contaminantes (O'Donoghue, 1984).

La tecnología ultrasónica ha demostrado ser un método efectivo de limpieza de diversos contaminantes orgánicos, inorgánicos y de partículas que se encuentran en diferentes superficies

metálicas y no metálicas, es una técnica de bajo costo, de alta eficiencia para los yacimientos y no presenta algún daño en cuanto a contaminación ambiental.

Las ondas ultrasónicas generan y distribuyen uniformemente implosiones de cavitación en un medio líquido. Las energías liberadas alcanzan y penetran profundamente en grietas, agujeros ciegos y zonas inaccesibles para otros métodos de limpieza. La eliminación de contaminantes es consistente y uniforme, independientemente de la complejidad y la geometría de los sustratos (Busnaina, 2019).

4.2 Características de las ondas ultrasónicas

Según (Barrera Suárez & Coronel Picón, 2014) dio las siguientes definiciones de características fundamentales a tener en cuenta de las ondas ultrasónicas para comprender más en detalle el fenómeno ondulatorio.

4.2.1 Amplitud

Es el máximo desplazamiento o elongación máxima obtenida por la partícula en el eje de la ordenada, producto de la vibración, partiendo desde su posición "O".

4.2.2 Periodo y frecuencia

Tiempo que tarda la partícula vibrante en realizar un ciclo completo. Se nota por la letra T y es una magnitud inversa a la frecuencia (ecuación 1).

El periodo y la longitud de onda están relacionados, ya que el periodo es el tiempo que demora una partícula en recorrer una longitud de onda. Para todos los tipos de ondas se cumple la siguiente relación (ecuación 3):

$$\lambda = V/f \quad (3)$$

Donde:

Λ = Longitud de onda

f = Frecuencia de onda

V = Velocidad de la luz en el vacío $3 \cdot 10^8$ m/s

4.2.5. Sensibilidad

La sensibilidad detecta discontinuidades pequeñas, existe una forma sencilla de calcularla en función de la longitud de onda como se muestra en la (ecuación 4), por lo que para detectar una discontinuidad es considerable y dependiente un medio de la longitud de onda.

$$dmp = \lambda/2 \quad (4)$$

Donde:

λ = Longitud de onda

dmp = Efecto más pequeño detectable

4.2.6 Atenuación

Una característica muy importante del ultrasonido viene siendo la atenuación de la vibración de las partículas dentro del material. La atenuación es la disminución de la energía

mecánica del haz del sonido al estar pasando por el material. La atenuación aumenta dependiendo del tamaño del material o aumentando la distancia que el sonido viaja. Esta condición crea un esparcimiento (divergencia) del haz. La energía de oscilación es transformada en calor, cuando pasa a través de un elemento, a causa de la fricción la intensidad de la energía aplicada disminuye, siendo amortiguada en tasas diferentes según el tipo de materia. (Barrera Suárez & Coronel Picón, 2014).

4.2.7 Reflexión y transmisión del sonido

La característica de reflexión ultrasónica permite la detección de discontinuidades. A medida que las ondas de ultrasonido avanzan a través de un material, éstas serán reflejadas por cualquier cosa que ofrezca oposición o impedancia a su propagación. La cantidad de sonido reflejado puede usarse para evaluar el tamaño de reflector (discontinuidad). El tiempo que tarde el ultrasonido en viajar al reflector y regresar al transductor puede utilizarse para determinar la distancia a este (Barrera Suárez & Coronel Picón, 2014).

4.2.8 Velocidad de propagación

La velocidad de propagación del sonido en el aire es de aproximadamente 343 m/seg. a una temperatura de 20 °C (293 kelvin). La velocidad a la que el ultrasonido se transmite por un medio determinado depende de la densidad y de la elasticidad de dicho medio. La velocidad del sonido es por lo general un parámetro ultrasónico fácil de medir, en un medio homogéneo está directamente relacionado con el módulo de elasticidad, densidad del material, módulo de Poisson, y el grado de homogeneidad. Según el tipo de onda la velocidad será diferente. La velocidad está

relacionada con la longitud y frecuencia de onda como se plantea a continuación (Barrera Suárez & Coronel Picón, 2014):

V = Velocidad de propagación de la onda

Λ = Longitud de onda

f = Frecuencia de onda

T = Periodo

$$V = \lambda * f ; V = \lambda / T \quad (5)$$

Ecuación de velocidad de propagación en un medio sólido:

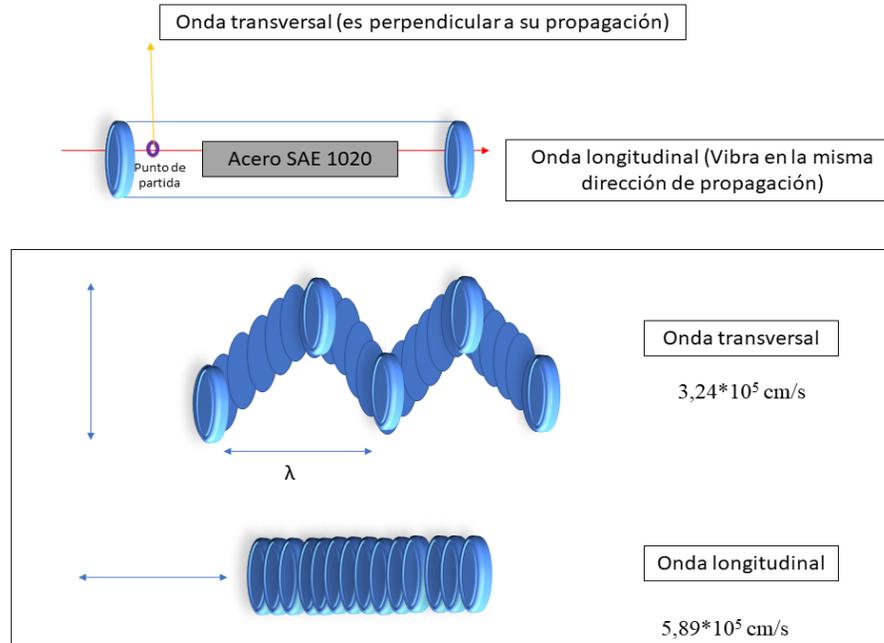
E = Módulo de Young

ρ = Densidad del cuerpo sólido a entropía constante

V = Velocidad del sonido en sólidos

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6)$$

Según (Santos De La Cruz et al., 2014) “las velocidades de las ondas longitudinales y transversales también están influenciadas por las propiedades de los materiales, así por ejemplo en el acero SAE 1020 la velocidad de la onda longitudinal es $5,89 \cdot 10^5$ cm/s y la transversal $3,24 \cdot 10^5$ cm/s”. De tal forma, se podría apreciar la propagación de la onda transversal y la longitudinal de la siguiente forma (Figura 7):

Figura 7. Onda transversal y longitudinal

Nota. Fuente autores.

4.2.9. Impedancia acústica

La Impedancia Acústica es la resistencia que opone el medio a la propagación de las ondas, siendo igual al producto de la densidad del material a inspeccionar por la velocidad de la onda en el medio. Por lo tanto, un material que posea baja impedancia acústica significa que posee baja resistencia a las deformaciones elásticas producto de las ondas sonoras (Barrera Suárez & Coronel Picón, 2014).

La expresión para la impedancia acústica (W), puede ser considerada como una propiedad característica de los materiales.

W = Impedancia acústica

C = Constante velocidad de la onda (344 m/s)

ρ = Densidad del material

E = Módulo de Young

$$W = \rho c \sim \sqrt{\rho E} \quad (7)$$

La inclusión de la impedancia acústica en esta ecuación nos da una indicación de la rigidez de los materiales. La rigidez está relacionada al módulo de Young (E), del material; en general, mientras mayor sea la rigidez del material, mayor será la velocidad de la onda.

La importancia de la impedancia acústica:

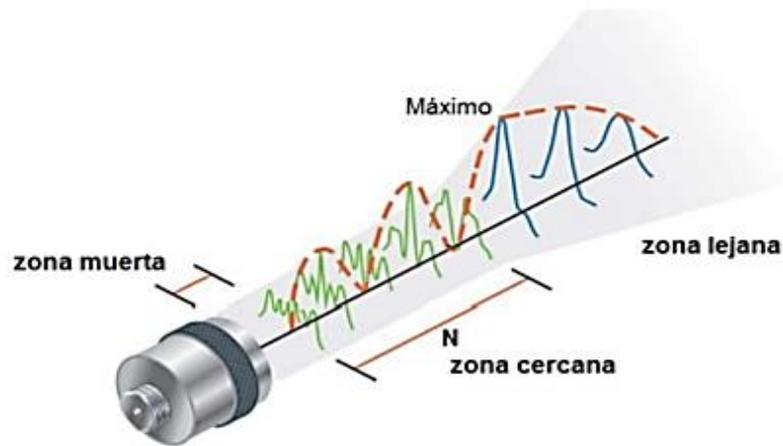
- La determinación de la transmisión y reflexión acústica en la superficie de contacto de los materiales que poseen distintas propiedades.
- El diseño de los cabezales ultrasónicos.
- Evaluación de la capacidad de absorción de sonido de un medio.

4.2.10 Haz ultrasónico

Cuando se acopla un transductor a la superficie de un metal a evaluar, se generará un flujo de ondas llamado haz de energía ultrasónica dentro de la pieza. A medida que se propaga el ultrasonido, se forman tres áreas características que corresponden a la (Figura 8), (Barrera Suárez & Coronel Picón, 2014).

- Zona muerta (dead zone)
- La zona cercana o de Fresnel (near zone o fresnel zone)
- La zona lejana o Fraunhofer (Far zone)

Figura 8. Haz ultrasónico.



Nota. Tomado de *Phased Array Characteristics*, en línea. Citado en Julio de (2011) <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/characteristics/>.

4.3 Tipos de ondas ultrasónicas

La dirección de la vibración de las partículas y la dirección de propagación de una onda ultrasónica en el interior del medio son independientes entre sí. Este hecho permite identificar los diferentes tipos de ondas dependiendo del modo de oscilación de las partículas.

4.3.1 Ondas longitudinales

Se propagan en sólidos, líquidos y gases. Son también llamadas ondas de presión, las oscilaciones ocurren en dirección de propagación, teniendo en cuenta la amplitud y el movimiento este tipo de onda se comporta de forma paralela. Las ondas longitudinales son llamadas así porque se encargan de medir espesores (Barrera Suárez & Coronel Picón, 2014).

4.3.2 Ondas transversales o de corte (Shear)

Se propaga en sólidos únicamente. La dirección de propagación y vibración se comportan de forma perpendiculares entre sí, las ondas transversales trabajan como una sucesión de crestas (máximos) y valles (mínimos) (Barrera Suárez & Coronel Picón, 2014).

4.3.3 Ondas Rayleigh o superficiales

Se propagan solamente en la periferia plana o curva de un sólido. Es un tipo especial de onda transversal y tienen un mayor alcance, son utilizadas en la tomografía a partir de correlaciones de ruido ambiente (Barrera Suárez & Coronel Picón, 2014).

4.3.4 Ondas Lamb o laminares

Se propaga en sólidos. Presentan componentes de la oscilación de partículas en ángulo recto a la superficie. Cerca de la superficie el movimiento de las partículas es elíptico (Barrera Suárez & Coronel Picón, 2014).

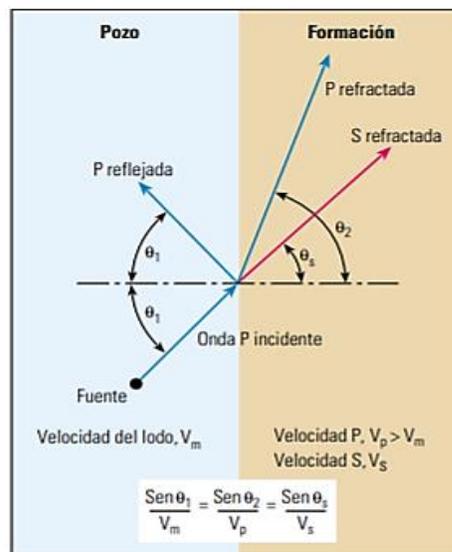
4.3.5 Ondas P y S

Una onda volumétrica elástica u onda acústica en la que las partículas oscilan en la dirección de propagación de la onda. Las ondas P son las ondas estudiadas en los datos sísmicos convencionales. Las ondas P incidentes en una interfase con una incidencia diferente a la incidencia normal pueden producir ondas S reflejadas y transmitidas (figura 9), que en ese caso se conocen como ondas convertidas (Schlumberger, 2021a).

Una onda volumétrica elástica en la que las partículas oscilan en dirección perpendicular a la dirección en que se propaga la onda. Las ondas S son generadas por la mayoría de las fuentes sísmicas terrestres, pero no por los cañones de aire. Las ondas P que chocan con una interfase con un ángulo de incidencia no normal pueden producir ondas S, que en ese caso se denominan ondas convertidas. Del mismo modo, las ondas S pueden ser convertidas en ondas P.

Las ondas S, u ondas de corte, se propagan más lentamente que las ondas P y no pueden propagarse a través de los fluidos porque los fluidos no sustentan el esfuerzo cortante. El registro de las ondas S requiere receptores acoplados al terreno sólido. La interpretación de las ondas S permite la determinación de las propiedades de las rocas, tales como la densidad de las fracturas y su orientación, la relación de Poisson y el tipo de roca, mediante la representación en gráficas de interrelación de las velocidades de ondas P y ondas S, y a través de otras técnicas. (Schlumberger, 2021b).

Figura 9. Ondas tipo S y P



Nota. Tomado de (Jokob B. U. Haldorsen, David Linton Johnson, Tom Plona, Bikas Sinha, 2006).

5. Descripción de la interacción entre moléculas parafínicas y el ultrasonido (ESOTM) por origen de la cavitación

En la siguiente sección se describe los fenómenos fisicoquímicos experimentados por el crudo pesado al ser sometido a ondas ultrasónicas. Para Granados Cáliz & Flores Avila (2013) los efectos se clasifican en:

- **Efecto mecánico:** Es la interacción entre ondas y las partículas sólidas, en los que interviene la energía cinética, cambios de tensión y presión (Cavitación).
- **Efecto químico:** Se define como la formación de reacciones fisicoquímicas de forma exotérmica.
- **Efecto térmico:** Corresponde a la transición de energía acústica a energía térmica con un aumento de temperatura.

Los tres efectos anteriormente mencionados van interconectados de tal forma que secuencialmente actúan uno sobre el otro en las moléculas de parafina; Como explica S. Suslick en (1998) se puede interpretar la química como la interacción entre energía y materia, el efecto químico producto de la exposición de un líquido con ultrasonido, no se genera por la interacción directa con sustancias moleculares. Es decir, el resultado de aquella interacción química que responde a los nombres de sonoquímica (estudio de los efectos inusuales de las ondas sonoras intensas que viajan a través de un líquido) y la sonoluminiscencia (emisión de luz debido a la exposición de líquidos con ultrasonido), surgen es a partir del efecto de la cavitación acústica.

La cavitación acústica proporciona un efecto de interacción excepcional entre energía y materia, se genera por la irradiación ultrasónica, y actual dentro del líquido impulsando reacciones químicas que emanan elevadas cantidades de energía, a menudo acompañadas de la emisión de

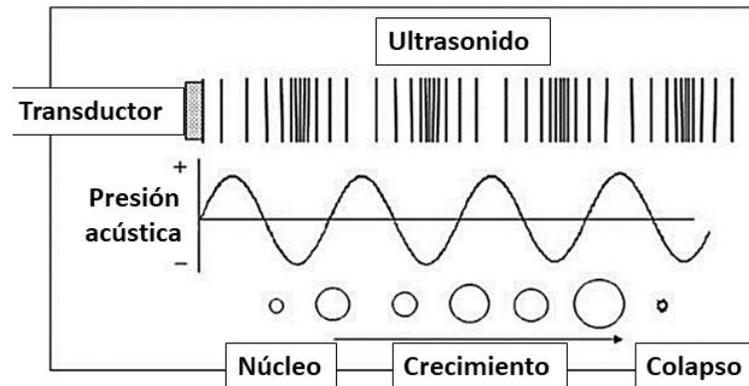
luz. El proceso de cavitación acústica se segmenta en tres etapas creación, desarrollo y colapso implosivo de burbujas dentro de un líquido. El colapso ocasionado por la cavitación genera un intenso calentamiento local (alrededor de 440.33 °F), elevadas presiones (alrededor de 14695.9 psi), junto a altas velocidades de calentamiento y enfriamiento.

5.1 Fenómeno de cavitación (Efecto mecánico)

El proceso de cavitación ultrasónica tiene un papel importante en el inicio y finalización de la eliminación de ciertos contaminantes. Las ondas de choque aceleran en gran medida la ruptura de los contaminantes dispersos en el crudo, evitando así que nuevamente se dé la formación de depósitos. El resultado es que las cavitaciones ultrasónicas aceleran el desplazamiento de los contaminantes del crudo y facilitan su dispersión por todo el sistema (Awad, 1996).

5.1.1 Picos de presión

Olaya-Escobar describe los picos de presión en (2020) como se muestra en la (Figura 10), presiones que varían en oscilaciones de baja y alta intensidad de presión, de esta forma cuando baja la presión las burbujas retienen energía incrementando su tamaño. Sin embargo, alternamente el líquido que se desplaza a su alrededor ejerce una presión compresiva sobre ellas, que propicia la drástica implosión de la burbuja (proceso de cavitación). Este hecho provoca las deseadas reacciones químicas que liberan energía localizada suscitando elevadas presiones y temperaturas en el medio de propagación.

Figura 10. Picos de presión.

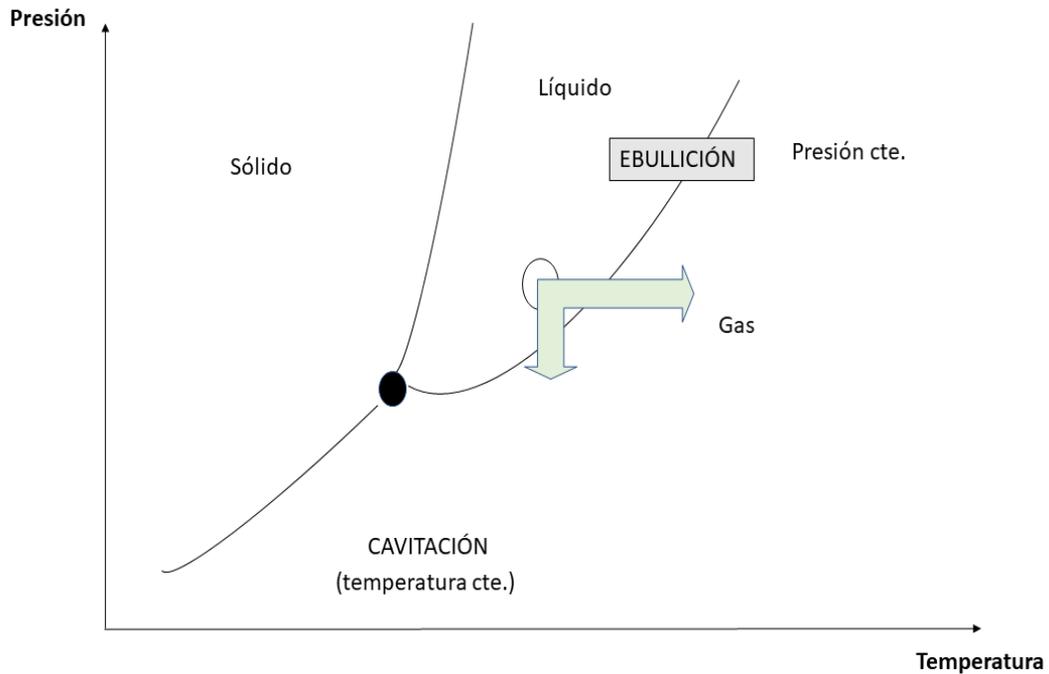
Nota. La figura 7 muestra la representación gráfica del fenómeno acústico relacionado con la dinámica de las burbujas de cavitación. Modificado de Olaya-Escobar *Ultrasound Applied in the Reduction of Viscosity Heavy Crude Oil* en (2020) que modifica la figura de H. Nomura y S. Koda "What Is Sonochemistry?"

5.1.2 Principio físico de operación en la cavitación

La cavitación en breves palabras es un fenómeno físico en el cuál un líquido en ciertos momentos pasa de ser líquido a estado gaseoso y vuelve a retomar su estado inicial al cabo de un determinado tiempo. La cavitación proviene del latín *cavus* lo que significa en español caverna y según (García, 2008) “Es la aparición de burbujas de vapor en el seno de un líquido, inicialmente de apariencia homogénea, al someterlo a presiones suficientemente bajas. La idea de rotura de la estructura macroscópicamente homogénea, con aparición de cavidades de vapor y/o gas, de tamaños, generalmente, superiores a unas pocas micras (μm) y tiempos característicos del orden de microsegundos (μs) o superiores, convierte la cavitación en objeto relevante de estudio de la mecánica de los medios continuos. En algunos casos extremos, tanto las dimensiones como los tiempos característicos de las burbujas se pueden solapar con las escalas moleculares y es necesaria una descripción de la dinámica molecular” (p.10).

La (Figura 11) muestra el diagrama presión-temperatura (P-T) teniendo en cuenta la posición en donde ocurre el proceso de la cavitación para una sustancia de forma más detallada.

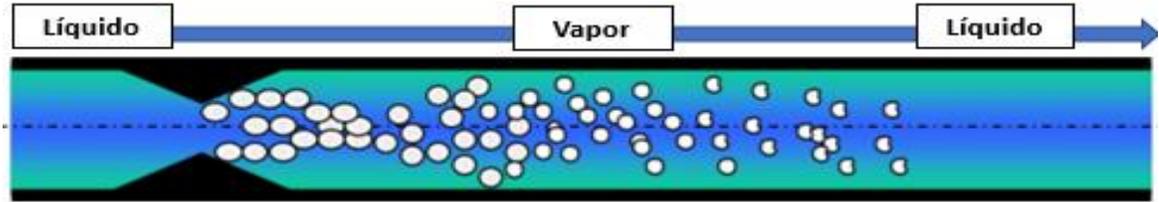
Figura 11. Diagrama P-T para una sustancia.



Nota. Fuente modificado de (García, 2008)

La siguiente (Figura 12) muestra como dentro de una tubería se produce un proceso de cavitación al pasar de estado líquido a vapor y nuevamente vuelve a su estado inicial unos instantes después.

Figura 12. Proceso de cavitación en tubería.



Nota. El proceso ocurrido involucra un cambio de fase de líquido a vapor y retorna a su estado inicial. Fuente modificado de URALITA Sistemas de Tuberías, (2003).

El proceso de cavitación ocurre a nivel operacional en partes móviles (rodetes de bombas, álabes de turbinas, hélices de barcos) y no móviles (en válvulas reguladoras, estrangulamientos bruscos, regulación mediante orificios). En las tuberías principalmente se identifica el proceso físico de la cavitación cuando existen efectos de vibraciones, ruidos dentro de la tubería y cuando hay erosiones del material, URALITA Sistemas de Tuberías, (2003). Los daños más comunes por la cavitación se muestran en las (Figuras 13, 14 y 15):

Figura 13. Cavitación en válvula de mariposa



Nota. Efecto de cavitación en válvula de mariposa por vibraciones excesivas a tiempos prolongados.

Fuente tomado de: URALITA Sistemas de Tuberías, (2003)

Figura 14. Cavitación en válvula anular.



Nota. Efecto de cavitación en válvula anular por erosión en la carcasa del material. Fuente tomado de URALITA Sistemas de Tuberías, (2003).

Figura 15. Cavitación en válvula de compuerta.



Nota. Efecto de cavitación en válvula de compuerta, se observan aperturas que dañaron la válvula totalmente. Fuente tomado de URALITA Sistemas de Tuberías, (2003)

5.1.3 Cavitación acústica

La interacción del sonido con la materia por medio del proceso de cavitación coloca a disposición una gran gama de tipos de energías a escalas de tiempo que no se encuentran comúnmente en otras fuentes. La cavitación generalmente se induce no por aplicación mecánica de presión, sino por la interacción de ondas sonoras intensas en un líquido. Las ondas anteriormente mencionadas originan regiones alternas de compresión y expansión que crean burbujas de 100 micrones de diámetro. Estas burbujas implosionan abruptamente en menos de un microsegundo, calentando su contenido hasta 5.500 grados Celsius, temperatura media de la superficie del sol, comparación hecho por Suslick en (1989).

5.1.4 Cavitación acústica dentro del crudo

Entendiendo este fenómeno aplicado a nivel de campo, la cavitación acústica que se genera gracias a la exposición del fluido a ultrasonidos, es el origen del rompimiento de compuestos de alto peso molecular que aumentan la viscosidad del crudo, comúnmente identificadas como sustancias orgánicas de ceras o parafinas. Como se explicó anteriormente la explosión de burbujas ocasiona la creación de zonas dentro de líquido, en donde se alterna la presión por ciclos debido a la propagación de ondas longitudinales.

Estas ondas al viajar a través del crudo y oscilar a cierta frecuencia, desencadenan movimientos vibratorios moleculares, que a su vez dan origen a ciclos de expansión y compresión en la partículas dentro del crudo, el comportamiento vibratorio se define por rangos de presión,

cuando la presión es baja se generan burbujas por cavitación acústica, esta presión circundante generalmente corresponde a un valor similar al de presión de vapor (Suslick, 1989).

Figura 16. Cavitación acústica.



Nota. Cavitación acústica creación, desarrollo y colapso implosivo de burbujas dentro de un líquido expuesto a ultrasonidos de alta intensidad. Tomado de S. Suslick (1998) Sonochemistry, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.

Como se muestra en la (Figura 16) la cavidad es esférica al principio y luego se contrae rápidamente. La difusión dentro de la cavidad durante los ciclos de expansión se hace ligeramente mayor que la difusión durante los ciclos de compresión. Esto quiere decir que, para cada ciclo de sonido, la cavidad se expande un poco más de lo que se contrae. Durante muchos ciclos, las cavidades crecerán lentamente para eventualmente alcanzar un tamaño crítico.

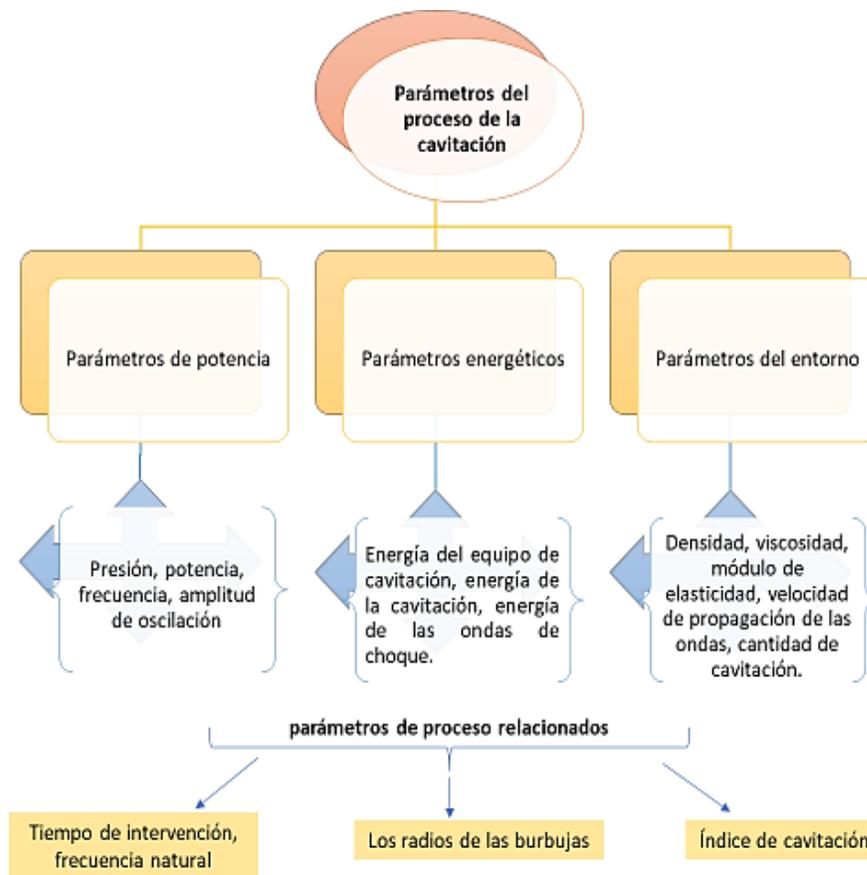
5.1.5 Parámetros de cavitación en superficie

Según Bernyk (2018) existen varios factores determinantes para la creación de cavitaciones por ultrasonido, entre ellos destacan el cambio de presión alrededor de la burbuja y el cambio de presión en su centro (Figura 17), el alcance de la sonoluminiscencia, los efectos químicos del ultrasonido, el aumento de temperatura, evaluación del contorno esférico de las burbujas

(disminución de su esfericidad), viscosidad, dinámica espacial y temporal de las burbujas, y la amplitud umbral de la presión que se divide básicamente en:

- Presión estática,
- Frecuencia del sonido
- Tipo de fluido
- Cantidad de gas disuelto e impurezas

Figura 17. Parámetros de un proceso de cavitación.



Nota. El efecto resultante de la frecuencia ultrasónica en la eliminación del tapón de formación de depósitos de cera de parafina. Modificado de Bernyk et al., (2018) Effect of rheological properties of materials on their treatment with ultrasonic cavitation.

5.2 Fenómeno molecular (Efecto químico y térmico)

Olaya-Escobar et al., (2020), interpreta que el ultrasonido al interactuar con el medio parafínico genera transformaciones fisicoquímicas que se ven evidenciadas en un rápido ascenso de temperatura y presión en el entorno, propiciando de tal modo la ruptura de moléculas de alto peso (ceras parafinas), transformándolas en sustancia derivadas con menor peso molecular (fracciones ligeras). El aumento de la proporción de moléculas de menor peso contribuye a la reducción de la viscosidad. La ruptura de fracciones de petróleo pesado con ultrasonido sigue los mecanismos de los radicales libres, similar al craqueo térmico (Figura 18), luego, los enlaces de los hidrocarburos se rompen debido a la energía liberada en el colapso de las burbujas de cavitación (Olaya-Escobar et al., 2020, quien citó a J.R. Lin, and T. F. Yen, 1993, A. I. Nesterenko, and Y. S. Berlizov, 2007).

Cabe destacar que las parafinas son compuestos responsables de la alta viscosidad de los crudos pesados, por lo que su inhibición va directamente conectada con la disminución de la viscosidad. Al rompimiento molecular de sus extensas cadenas esta dado por movimiento de colapso que genera la implosión de burbujas, estas adicionalmente provocan la liberación de radicales libre que suscitan la formación de recciones químicas consecutivamente.

Los radicales libres tienen un poder de reacción muy agresivo, capaz de degradar moléculas grandes y complejas. Su reactividad se debe a la presencia de un electrón desapareado e inicialmente, se originan a partir del agua asociada con el crudo. Dado que la energía liberada en la cavitación y la temperatura extrema favorecen la ruptura hemolítica de las moléculas de agua,

se forman dos radicales libres: el ion hidrógeno (H^+) y el radical hidroxilo (OH^-), que son altamente reactivos.

Figura 18. Crackeo de moléculas.



Nota. Modificado de Fomitchev-Zamilov (2015) Novel upgrading technology cut diluent use, capital costs.

Los enlaces CC son los más propensos al rompimiento (hidrocarburos saturados alcanos) es decir parafinas, a partir de este fenómeno se generan los radicales libres causados por la descomposición térmica de las moléculas, estos pueden ser primarios y secundarios, que reaccionan para formar alquenos de cadena más corta y sustancias gaseosas como H_2 , CH_4 y C_2H_4 . Finalmente, a partir de ello las moléculas grandes de parafina empezaran a descomponerse.

El ultrasonido induce el cambio en la estructura coloidal de los hidrocarburos, en particular, libera los compuestos de bajo peso molecular asociados con la estructura de parafinas; además, los efectos de la cavitación debilitan las interacciones intermoleculares y, en consecuencia, se reduce la viscosidad. También se ha demostrado que la asociación intermolecular se reduce bajo los efectos de las vibraciones acústicas (Olaya-Escobar et al., 2020, quien cito a F. Restrepo, J. Restrepo, and L. Vargas, 1978; K. S. Suslick, J. J. Gawlenowski, P. F. Schubert, H. H., 1983; Z. Yang, C. Zhang, S. Gu, P. Han, and X. Lu 2013).

Se pueden obtener varios efectos con la cavitación acústica, incluida la sonoluminiscencia y el aumento de la actividad química en la solución. La actividad química aumenta debido a la formación de nuevas especies químicas que son relativamente estables en solución y tienden a provocar más reacciones en cadena. También hay efectos físicos importantes, como flujos micro acústicos (microcorriente), micro chorros, microcorrientes y ondas de choque. Los efectos mencionados pueden acelerar la mezcla a escala molecular y, en consecuencia, favorecer las reacciones químicas, (Quien citó a H. Nomura y S. Koda, 2015; T. J. Mason, 1993; K. Suslick, 1989; T. Y. Wu, N. Guo, C. Y. Teh, J. X. Wen Hay, 2013).

5.3 Interacción de las parafinas con ultrasonido en superficie

Prozorova en (2018) explica que, en los últimos años, ha habido un interés creciente en la posibilidad de utilizar métodos de procesamiento físico, en particular tecnologías ultrasónicas las cuales se espera intensifiquen los procesos de producción y transporte de petróleo. La ventaja del tratamiento ultrasónico sobre numerosos métodos para mejorar las propiedades estructurales y mecánicas de los aceites y controlar los depósitos de parafina es su bajo consumo de energía, alta eficiencia y seguridad técnica y ambiental.

La extracción y transporte de aceites parafínicos suele ir acompañada de una disminución en el caudal de los pozos, el rendimiento de las tuberías, etc. Esto se debe a las características reológicas anormales de los aceites. Además, cuando la temperatura del aceite en la capa de la pared de la tubería disminuye, la solvencia de los aceites para los hidrocarburos parafínicos (PH)

también se reduce y esto promueve su adhesión a la superficie interna del equipo petrolero, lo que se acompaña de la formación de asfalto. depósitos de resina-parafina (ARPD).

Las oscilaciones ultrasónicas del medio conducen al origen cavidades de presión en el medio que desembocan a la formación de implosiones de burbujas dado al fenómeno de cavitación acústica, de la misma forma estos movimientos bruscos son determinante a la hora de proporcionar liberación de energía y reacciones químicas que provocan la rotura de las estructuras parafínicas, por lo tanto, reducen la viscosidad del aceite y dentro del crudo se ve disipada la energía liberada en un aumento de la temperatura. Aparte de eso, las ondas ultrasónicas aumentan la presión circundante, lo que a su vez también conduce a un aumento de temperatura.

El aumento de temperatura evita que el crudo llegue al punto de fluidez y no se solidifique. La irradiación ultrasónica se diferencia de las fuentes de energía tradicionales (como calor, luz o radiación ionizante) en duración, presión y energía por molécula. El ultrasonido es un medio único de interacción entre energía y materia.

Es importante mencionar que, en condiciones de pozo y superficie, el ultrasonido puede provocar la desemulsificación, y a su vez la reducción de la viscosidad. La influencia del ultrasonido tiene varios efectos sobre el crudo que pueden causar la reducción de la viscosidad del petróleo, entre lo que destaca el efecto de inhibir la formación de depósitos de parafinas (Abramov et al., 2017).

5.4 Interacción de las parafinas con ultrasonido en subsuelo

5.4.1 Daño a la formación

Según H. Xu & Pu, (2013) que referencia a Van der et al., en (2004), el daño a la formación cercana al pozo siempre es muy difícil de prevenir y puede ocurrir en casi todas las operaciones de campo, como perforación, terminación, producción y estimulación. Es un problema adverso y complejo causado principalmente por la invasión de partículas, la precipitación química y la formación de depósitos orgánicos, etc.

Según la magnitud del daño afectará fuertemente el rendimiento de producción de un pozo. Por lo tanto, la remoción del daño a la formación cercana al pozo es de interés continuo para la industria del petróleo. Las técnicas convencionales para eliminar el daño de la formación son la estimulación de la matriz y el hidro-fracturamiento, que obtienen un gran éxito en aplicaciones de campo. Sin embargo, ambos revelan limitaciones importantes.

Los fluidos de remediación, generalmente ácidos, utilizados en la estimulación de la matriz pueden causar corrosión en los aparatos y en los tubos, daños en la formación secundaria y contaminación ambiental. El hidro-fracturamiento suele ser costoso y requiere mucho tiempo. Ambos tienen condiciones de aplicabilidad estrictas de un pozo, que pueden influir fuertemente en el éxito del tratamiento. Especialmente, pueden ser técnicamente difíciles de operar en pozos horizontales.

El uso de vibraciones ultrasónicas es un método innovador y alternativo al convencional que incluso puede complementar las tecnologías existentes ampliando la gama de opciones disponibles

para la estimulación de pozos, aplicado en la producción de petróleo permite aumentar la permeabilidad de la zona de formación del fondo del pozo desencadenando un aumento de la movilidad de los fluidos del yacimiento, reducir la viscosidad, limpiar los depósitos y partes de los equipos petroleros de los sedimentos.

El tratamiento ultrasónico de aceite altamente parafínico conduce a un aumento de los parámetros reológicos (viscosidad y esfuerzo cortante), calor de activación del flujo viscoso, energía específica de destrucción del sistema de dispersión de aceite, punto de fluidez y la cantidad de depósitos de asfalto-resina-parafina, por si no fuera poco es una técnica económica y respetuosa con el ecosistema (Ануфриев & Волкова, 2016; H. Xu & Pu, 2013).

5.4.2 Inhibición de parafinas con ultrasonido en limpieza del pozo

El daño a la formación cercana al pozo puede causar efectos devastadores en las tasas de producción de petróleo debido a las severas reducciones en la permeabilidad efectiva. Esto ha dado a la búsqueda de métodos efectivos para tratar el daño a la formación o el pozo, una gran preocupación en la producción de petróleo y gas como menciono Venkitaraman en (1995). Las causas dominantes de daño cercano al pozo varían de un pozo a otro, pero el daño generalmente está asociado con el transporte de sólidos coloidales dentro o fuera del pozo.

Es muy a menudo en el sector de los hidrocarburos, los efectos de obstrucción de la materia orgánica o mejor conocida depositación de parafina en secciones cercanas al pozo o dentro de este, para tratar estas dificultades operacionales se disponen de técnicas de tratamiento químico y

mecánicos, los cuales involucran elevados gastos de inversión y a veces no la eficacia esperada, asimismo pueden generar un gran impacto ambiental.

Explico Champion en (2004) que los tratamientos químicos, suelen ser difíciles de aplicar para el tratamiento en la zona dañada debido a la tendencia natural de los productos químicos a fluir hacia las zonas limpias. Aunque las técnicas de desviación se practican ampliamente, no siempre tienen éxito. Los tratamientos químicos también pueden promover cambios indeseables en la formación a través de la precipitación de partículas insolubles, que pueden servir para tapar aún más los poros de la roca. También pueden afectar a la integridad de la formación rocosa y pueden causar daños por corrosión en las tuberías de terminación del pozo.

En la actualidad, la inyección de agentes químicos actúa con el principio de generación de calor a través de reacciones químicas y con el aumento de la solubilidad para aliviar la formación de depósitos de parafina. En el caso de los pozos inteligentes, en los que la presencia de instrumentación es relativamente costosa y delicada, el uso de agentes químico puede ser tan perjudicial y agresivo, como los ácidos fuertes. También hay implicaciones medioambientales relacionadas con la manipulación y el transporte de los productos químicos de tratamiento y la eliminación segura de los agentes químicos gastados después del tratamiento.

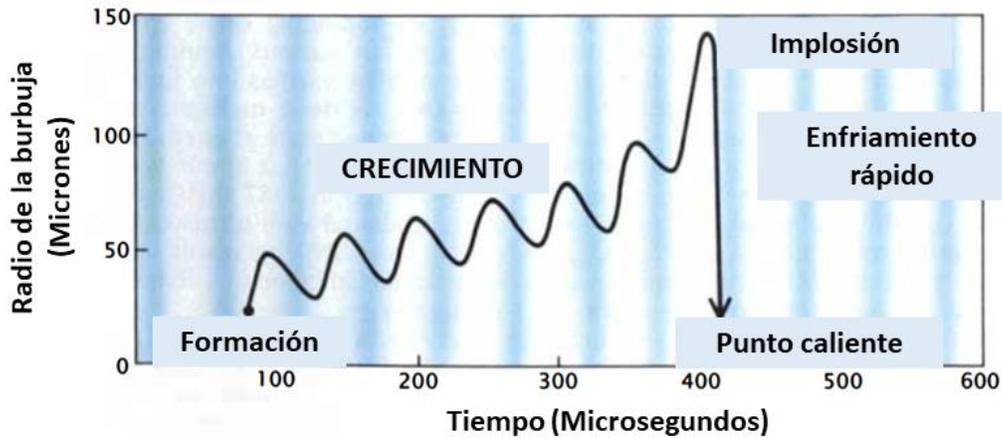
Duhon y Campbell demostraron cómo la aplicación del ultrasonido a la formación puede provocar un aumento de productividad e inyectividad como producto de una mayor actividad cavitacional en los fluidos de los poros (como se cito en Champion 2004).

6. Analisis de investigaciones a nivel mundial enfocadas a la reducción del punto de fluidez y a la inhibición de parafinas por medio de la estimulación sónica (ESOTM)

Los hidrocarburos parafínicos de alto peso molecular de los depósitos tienen una alta temperatura de fluidez, es decir forman depósitos muy viscosos en condiciones de temperatura ambiente o en épocas del año en que las condiciones climáticas descienden la temperatura, llegando incluso estos depósitos a casi un estado sólido, el proceso de estimulación ultrasónica garantiza a través de su etapa final el aumento de la temperatura del crudo, por consiguiente evita que el crudo llega al punto de fluidez.

Las vibraciones elásticas generadas por la técnica de ultrasonido producen oscilaciones en el medio con un rango de frecuencia de 16-20 kHz -108 MHz, promoviendo en las partículas y moléculas de parafina el desplazamiento de su posición de equilibrio, este movimiento ondulatorio dado por las fuerzas elásticas que actúan sobre partículas aledañas provocara que las partículas desplazadas se devuelvan a la posición de equilibrio, provocando su oscilación, todo esto gracias al fenómeno de cavitación. El movimiento ondulatorio de compresión y depresión que actúa de forma periódica produce la resonancia de las moléculas parafínicas, creando consecutivamente cavidades de presión, que desencadenan el fenómeno de implosión.

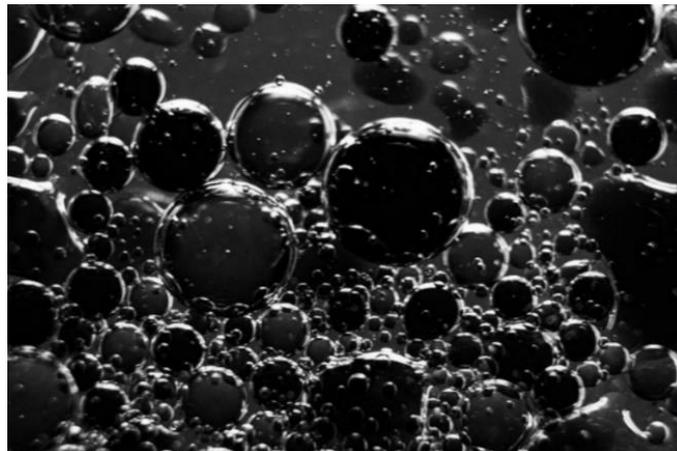
Olaya-Escobar et al., (2020) ilustra el proceso de nacimiento, crecimiento y colapso de las burbujas de cavitación, y también la ruptura de enlaces de hidrocarburos de alto peso molecular en el siguiente diagrama (Figura 19):

Figura 19. Crecimiento e implosión de burbujas.

Nota. Tomado de Suslick, (1989) The Chemical Effects of Ultrasound.

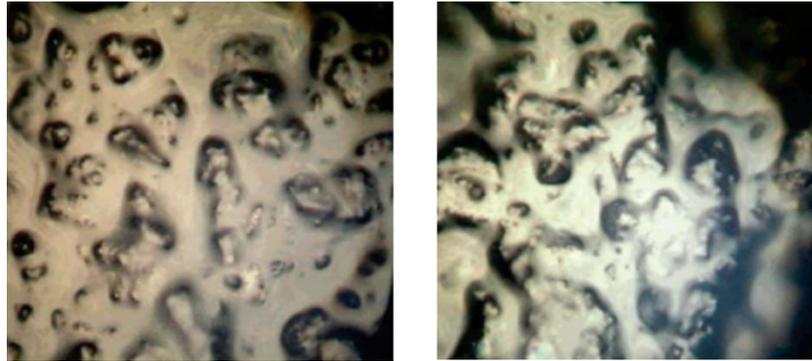
También se puede visualizar de forma esquemática en tres etapas (Figuras 20, 21 y 22):

a) Origen de burbujas

Figura 20. Black and white oil bubbles.

Nota. Tomado de Keelie Longoria (2020) Black and white oil bubbles.

b) Contracción rápida y expansión paulatina

Figura 21. Contracción y expansión

Nota. Tomado de Zhiqi Wang (2006) Effect of Ultrasonic Treatment on the Properties of Petroleum Coke Oil Slurry.

c) Emisión de calor

Figura 22. Emisión de calor.

Nota. Tomado de Planas (2020) Transmisión de la energía térmica.

La emisión de calor cambia la morfología y estructura de los cristales de cera en el crudo de una forma efectiva al reducir la viscosidad y el punto de fluidez del fluido al aumentar su fluidez a baja temperatura. Este proceso se conoce como craqueo térmico en el que la molécula de parafina

se fracciona en secciones más livianas, el procesamiento ultrasónico en ventaja al tratamiento por calentamiento térmico tiene menor costo en energía, por no mencionar que consta de un nivel más elevado de seguridad y cuidado ambiental, es destacado científicamente por su practicidad.

La técnica de inhibición de parafinas a través de ultrasonido, está en fase de investigación y prueba a nivel mundial tanto en superficie como en el subsuelo (Figura 23), en superficie se aplica con el fin de evitar la obstrucción de parafinas alrededor de las tuberías de producción y transporte, generalmente en lugares donde la temperatura ambiente es muy cercana al punto de nube y fluidez, asimismo ampliamente se han hecho pruebas de laboratorio de la técnica en el yacimiento con un alto contenido de parafinas, en esta área se ha adaptado para el proceso de limpieza del pozo en producción, específicamente en la cara del pozo y sus cercanías para evitar el daño a la formación por obstrucción de poro por la depositación de parafinas.

1) Superficie

- a) Facilidades de superficie
- b) Tuberías de producción
- c) Oleoductos

2) Subsuelo

- a) Limpieza del pozo

Figura 23. Esquema subsuelo y superficie.



Nota. El esquema explica la división esquemática que hay en la aplicación de la técnica de inhibición de parafinas con ultrasonido. Modificado de Software PERFORM v7.53.

6.1 Investigaciones de ultrasonido en superficie

En esta etapa se recopilan y analizan diferentes tecnologías en fase de pruebas e investigación a nivel mundial, con expectativa de ser usadas para impedir la formación de precipitados de parafinas en superficie.

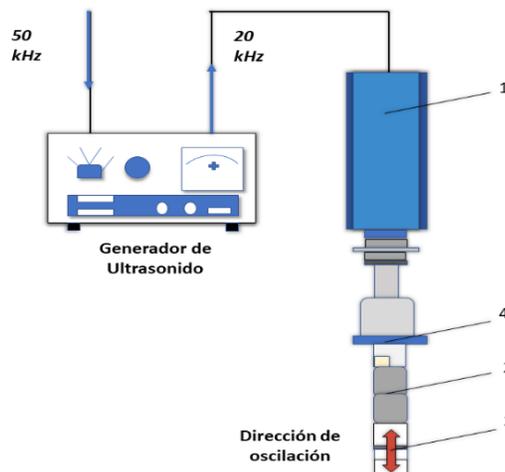
6.1.1 Tecnología generador ultrasónico IL10, en muestras de crudo parafínicos de tanque, Universidad Minera de San Petersburgo (Rusia)

Palaev & Dzhemilev, (2020) en su investigación analizaron el efecto ultrasónico sobre los depósitos de aceite de parafina y asfalto para fundirlos y, como resultado, obtener una mejor eliminación. Asegurando sus autores que este método es lo suficientemente eficaz, seguro, sencillo

y ecológico para ser usado en campo. El método usado consiste en la remoción de depósitos de resina asfáltica y parafínica, con la exposición ultrasónica sobre los mismos.

En el transcurso del trabajo se realizaron un experimento de exposición ultrasónica sobre depósitos de asfalto-resina y parafina con el fin de detectar la temperatura a la cual los depósitos sólidos de asfalto-resina y parafina se transfieren a estado líquido, así mismo para fijar el tiempo que tardan para alcanzar esta temperatura durante el tratamiento ultrasónico a capacidades acústicas determinadas. En funcionamiento, los depósitos se procesaron utilizando un emisor ultrasónico. El emisor está equipado con un convertidor magneto restrictivo. El consumo de energía del generador de ultrasonidos fue de 4000 W, la potencia acústica máxima (salida) de 2000 W. En el proceso, los estudios se realizaron a una potencia igual al 50% de la máxima (es decir, 1000 W) y al 100% (2000 W). El diagrama principal del generador ultrasónico se muestra en la (Figura 24) y el equipo (Figura 25).

Figura 24. Diagrama del generador principal ultrasónico



Nota. Diagrama de principio del generador ultrasónico. 1 - transductor ultrasónico; 2 - concentrador; 3 - emisor; 4 - brida cero. Fuente modificado de Palaev & Dzhemilev, (2020).

La acción de su generador (Palaev & Dzhemilev, 2020) de ultrasonidos consiste en la excitación de la cavitación en el líquido tratado. El voltaje de frecuencia ultrasónica se suministra desde el generador ultrasónico al transductor ultrasónico (1) en el que el voltaje se convierte en vibraciones mecánicas de frecuencia ultrasónica. Estas vibraciones se adentran más en el emisor que contiene el concentrador (2) Con su ayuda se amplifican las vibraciones a la salida del emisor (3). Las características técnicas del generador ultrasónico IL10 se muestran en la (Tabla 1).

Tabla 1. Características del generador ultrasónico IL10.

PARÁMETRO	VALORES
Potencia máxima de salida, W	2000
Frecuencia de funcionamiento, kHz	22 / más o menos 10%
Consumo de energía, no más de, W	4000
Voltaje de suministro, W	380 /más o menos 10% 3 Fases
Frecuencia de la fuente de alimentación, Hz	50, 60
Dimensiones totales, mm	480x500x175
Peso, no más de, kg	19

Nota. Modificado de Palaev & Dzhemilev, (2020).

Figura 25. Vista externa del generador de ultrasonidos IL10



Nota. Tomado de Palaev & Dzhemilev, (2020).

En la prueba realizada por Palaev & Dzhemilev los depósitos de parafina se colocaron en un vaso de precipitados, seguido de un receso de 20 mm de profundidad y 70 mm de diámetro en el centro de los depósitos (para la instalación de un emisor), que se llenó con agua (volumen de 10 ml) para hacer un contacto húmedo entre el emisor y los depósitos circundantes. La medición de la temperatura de deposición durante el experimento se llevó a cabo con un pirómetro. Los depósitos utilizados durante el experimento, así como la mesa de laboratorio para el experimento, se muestran en la (Figura 26).

Figura 26. Depósitos de aceite parafínico



Nota. Tomado de Palaev & Dzhemilev, (2020).

Los depósitos de crudo como resultado del tratamiento ultrasónico al estado líquido se ven en la (Figura 27).

Figura 27. Crudo parafinico al ser expuesto al ultrasonido

Nota. En la figura se puede evidencia como el crudo con depósitos de parafina pasa aun estado más fluido.

Tomado de Palaev & Dzhemilev, (2020).

Los resultados del cálculo de la efectividad debido al uso de exposición ultrasónica obtenidos por Palaev & Dzhemilev, (cuántas veces es el tiempo para alcanzar la temperatura de fusión con exposición ultrasónica en contrario que con exposición térmica solamente), los resultados se plasmaron en (tabla 2).

Tabla 2. Tiempo para alcanzar la temperatura de fusión y la eficiencia del ultrasonido.

Potencia acústica (de salida) del emisor, W	El tiempo para alcanzar la temperatura de fusión con solo exposición térmica, s	El tiempo para alcanzar la temperatura de fusión bajo exposición ultrasónica, s	Eficacia del ultrasonido
1000	67	52	1,29
2000	33	27	1,24

Nota. Tomado de Palaev & Dzhemilev, (2020).

Al aplicarse, durante el tratamiento ultrasónico a una potencia acústica de 1000 W, el tiempo para alcanzar la temperatura de fusión fue de 57 segundos, y a una potencia de 2000 W este tiempo fue de 27 segundos. Con solo exposición térmica, el tiempo de calentamiento a la temperatura de fusión fue de 67 segundos a una potencia de 1000 W y de 33 segundos a una potencia de 2000 W. También es importante tener en cuenta que cuando los depósitos se calientan a la temperatura de fusión, el efecto ultrasónico es en promedio 1,27 veces más efectivo que la exposición térmica solamente, lo que también confirma la efectividad del uso de tecnología ultrasónica para eliminar depósitos. La ventaja del procesamiento ultrasónico es un menor costo de energía en comparación con el calentamiento térmico, así como un mayor nivel de seguridad y respeto al medio ambiente. El uso del procesamiento ultrasónico es de gran interés científico y práctico.

Esta tecnología la probaron con los residuos de los fondos de vacío de las torres de refino, pero actualmente están explorando en crudos pesados para mejorar sus propiedades reológicas y valor comercial (Palaev & Dzhemilev, 2020).

6.1.2 Prueba piloto planta GPR-2 con muestras de crudo parafínico de los campos East Zhetybai y Ashchisai (Rusia)

Descripción de la base de investigación y experimentos realizados por Ershov et al., (2011) en los campos East Zhetbai y Ashchisai, el objetivo de este trabajo fue estudiar el impacto de la cavitación y los reactivos químicos en la viscosidad y por consiguiente inhibición de parafinas de los aceites en los campos East Zhetybai y Ashchisai en Rusia con alto contenido parafínico. Estas

pruebas las llevaron a cabo con aceites parafínicos de los campos East Zhetybai y Ashchisai, cuyas propiedades y composición de grupo se citan en la (Tabla 3).

Tabla 3. Composición de aceites parafínicos en los campos East Zhetybai y Ashchisai

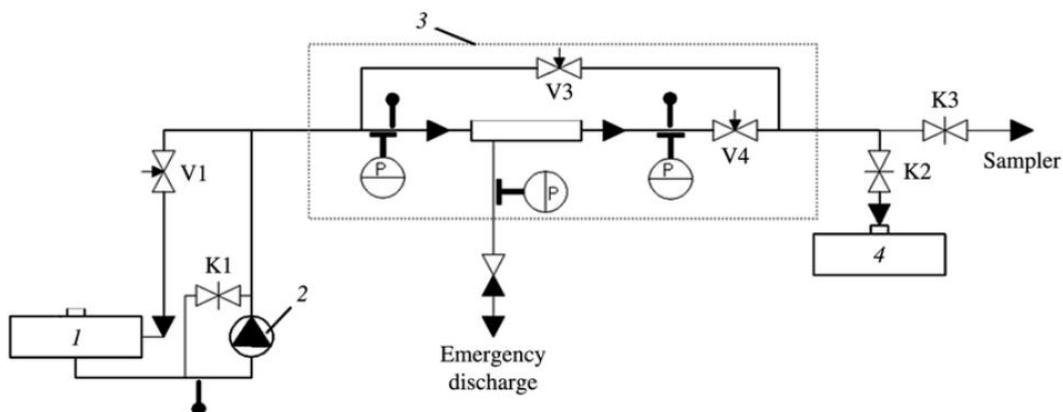
Campos	Viscosidad Dinámica a 20°C, mPa·sec	Contenido, wt %		
		Parafinas	Resinas	Asfaltenos
East Zhetybai	575	28,3	19,3	3,8
Ashchisai	360	18,9	15,2	4,0

Nota. Tomado de Palaev & Dzhemilev, (2020).

Con base en los experimentos realizados anteriormente por Ershov, Baranov, Mullakaev y Abramov en la planta piloto GPR-2 (Geo radar de penetración), estos nuevamente utilizaron el GPR-2 encargado de inducir el campo ultrasónico en los crudos, con un rendimiento de $3 \text{ m}^3 / \text{h}$, con un núcleo reactor de tipo flujo hidrodinámico (HFR). El diagrama de flujo de la planta usado se muestra en la (Figura 28) y su vista general, en la (Figura 29).

Figura 28. Diagrama de flujo de la planta piloto.

1) tanque de alimentación (arranque); 2) bomba; 3) sección de trabajo; 4) tanque receptor.



Nota. Tomado de Ershov (2011) Reducing viscosity of paraffinic oils in ultrasonic field.

A partir de la alimentación (de partida) tanque 1 (Figura 28) el aceite que fue tratado es alimentado por la bomba 2 bajo presión 8,0-12,0 MPa en el HFR donde en la carcasa de la sección de admisión se produjo una aceleración del flujo de aceite y un aumento de la presión dinámica (altura cinética), acompañado de una caída de la presión estática por debajo de la presión de vapor.

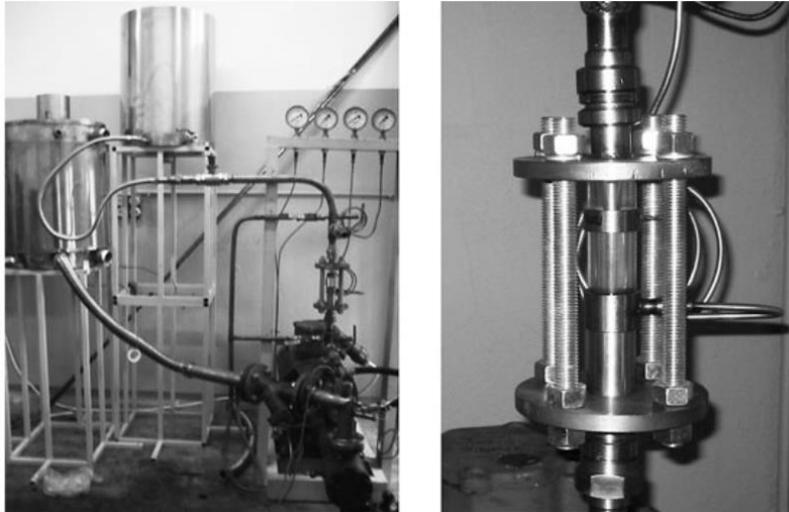
Los cambios de presión concomitantes en partes limitadas de la masa líquida o los gradientes de alta presión rompen los enlaces intermoleculares en el aceite, lo que conduce a la desintegración de las parafinas y la ruptura de los asociados del aceite, reduciendo así la viscosidad del aceite.

El tratamiento por cavitación de Ershov et al., (2011) provocó la desintegración de parafinas y estructuras supramoleculares (asociadas, micelas, etc.) y la disminución de su tamaño, lo que facilita la reducción de la viscosidad del aceite. Con el paso del tiempo después del tratamiento, las partículas desintegradas restauran los enlaces intermoleculares, provocando la relajación de la viscosidad dinámica del aceite.

La presión en el sistema se controla mediante las válvulas V1, V3 y V4 y se mide mediante manómetros. Después del tratamiento, el aceite fluye hacia el tanque receptor 4. Se usa un muestreador para recolectar muestras.

Figura 29. Planta piloto GPR-2.

a) vista general; b) reactor de flujo hidrodinámico



Nota. Tomado de Ershov (2011) Reducing viscosity of paraffinic oils in ultrasonic field.

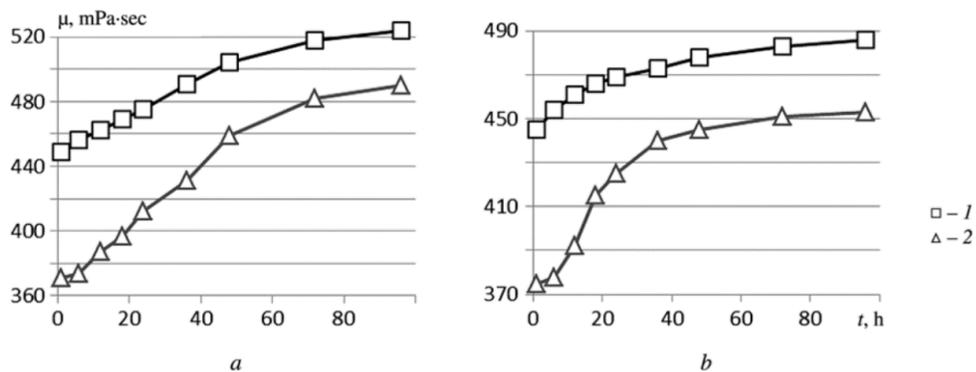
Después del tratamiento, el aceite fluye hacia el tanque receptor 4. Se usa un muestreador para recolectar muestras. La planta también proporciona descarga de emergencia. La viscosidad dinámica se determinó en un instrumento INPN SX 850 desarrollado por el Instituto de Química del Petróleo, Rama Siberiana, Academia de Ciencias de Rusia (IKhN SO RAN).

Los experimentos revelaron que, tras el tratamiento de cavitación la viscosidad dinámica del petróleo del campo East Zhetybai disminuyó en un 7-8% y del campo Ashchisai, en un 10-11%. Una característica típica de ambos aceites es la relajación de sus propiedades con el tiempo; por ejemplo, en dos días se encontró que la viscosidad volvió al valor inicial

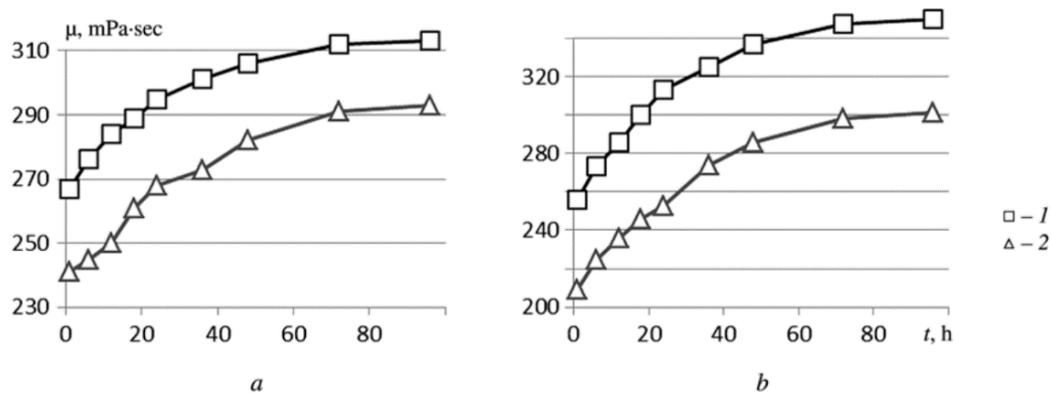
Los experimentos hechos por Ershov et al., (2011) demostraron que la adición de reactivos impide la restauración de enlaces intermoleculares y la formación de estructuras supramoleculares. Los resultados más notables sobre la reducción de la viscosidad dinámica de los aceites de prueba se obtuvieron en la primera serie de experimentos con la adición de 2% en peso de tolueno y acetato de butilo, seguido de por tratamiento de cavitación en GPR-2. Por ejemplo, la viscosidad del aceite East Zhetybail se redujo en un 35% (Figura 30) y la del aceite Ashchisai en un 42% (Figura 31).

Es bien sabido que la adición de hidrocarburos aromáticos altera la movilidad molecular de los componentes del grupo de los sistemas de aceite disperso (DOS), lo que provoca una disminución de la viscosidad y la estabilidad agregada.

Figura 30. Viscosidad dinámica del petróleo del campo East Zhetybai



Nota. Viscosidad dinámica del petróleo del campo East Zhetybai frente al tiempo de almacenamiento de la muestra: a) 2% en peso de tolueno, b) 2% en peso de acetato de butilo; 1) después de la dilución con reactivo; 2) después de la acción combinada de reactivo y tratamiento en GPR-2. Tomado de Ershov (2011).

Figura 31. Viscosidad dinámica del petróleo del campo Ashchisai.

Nota. Viscosidad dinámica del petróleo del campo Ashchisai frente al tiempo de almacenamiento de la muestra: a) 2% en peso de tolueno; b) 2% en peso de acetato de butilo; 1) después de la dilución con reactivo; 2) después de la acción combinada de reactivo y tratamiento en GPR-2. Tomado de Ershov (2011).

A diferencia de la dilución con reactivo solo, la dilución del aceite con el reactivo, seguida de cavitación el tratamiento en el GPR-2 hace que la viscosidad disminuya aún más en un 18-19%. Las mediciones de la viscosidad del aceite después de la tercera serie de experimentos mostraron que la viscosidad de los aceites aumentó en cuatro días, pero el efecto combinado de la acción del reactivo y la cavitación fue mayor que el efecto logrado por la acción de la cavitación o del reactivo individualmente: fue del 8% para el aceite de East Zhetybai y el 14% para el aceite de Ashchisai.

Resultados de la prueba piloto planta GPR-2

Según las conclusiones y resultados obtenido por Ershov et al., (2011) estos demostraron que la viscosidad dinámica del petróleo del campo East Zhetybai disminuyó:

- En un 8% tras el tratamiento de cavitación del aceite;
- En un 22% tras la dilución del aceite con un 2% en peso de acetato de butilo;

- En un 35% tras la dilución del aceite con un 2% en peso de acetato de butilo, seguido de un tratamiento de cavitación.

La viscosidad del petróleo del campo Ashchisai disminuyó:

- En un 10% tras el tratamiento de cavitación;
- En un 28% tras la dilución del aceite con un 2% en peso de acetato de butilo;
- En un 42% tras la dilución del aceite con un 2% en peso de acetato de butilo, seguido de un tratamiento de cavitación.

6.1.3 Prueba de tratamiento ultrasónico (TSU) transductor MSP 1/24, Universidad Politécnica de Tomsk (Rusia)

Según Ануфриев & Волкова en (2016) los principales recursos petrolíferos de Rusia se concentran en la provincia de petróleo y gas de Siberia Occidental. Los aceites de los campos de Siberia Occidental son bajos en azufre, pero a menudo parafínicos y altamente refinados, por lo que su viscosidad en invierno alcanza valores tales que el consumo de energía en el bombeo aumenta significativamente el costo del petróleo producido, y en algunos casos lo hace prácticamente imposible.

En su investigación en Rusia Ануфриев & Волкова, proponen utilizar el tratamiento ultrasónico (TSU), así como una acción compleja, que incluye TSU y posterior dilución con reactivos químicos o la introducción de aditivos poliméricos. para el transporte de aceites con alto punto de fluidez. Los resultados de esta técnica suelen ser contradictorios debido a diferentes condiciones experimentales: las instalaciones acústicas difieren en diseño y potencia, diferentes

tiempos de procesamiento y temperaturas y, lo más importante, porque a veces se utilizan sustancias de diferentes componentes.

El Procedimiento usado por Ануфриев & Волкова consiste en un transductor MSP 1/24 que está conectado a un generador MUG 4 / 18-27 de 4 kW. Las vibraciones elásticas se crearon mediante una guía varilla de ondas (diámetro del extremo de trabajo 20 mm) con una amplitud de vibración de 5 a 10 μm a una frecuencia de resonancia de 24 kHz. Ellos introdujeron una muestra de 300 g en un reactor discontinuo y se procesó durante un tiempo especificado (hora). La temperatura en el reactor se mantuvo a un nivel de 25 a 35 ° C. Inmediatamente después del tratamiento de la muestra, midieron la viscosidad y el punto de fluidez, y determinaron la cantidad de depósitos de asfalto-resina-parafina (ARPD).

A partir de las dependencias del esfuerzo cortante en la velocidad de corte de las carreras de avance y retroceso, se calculó la energía específica de destrucción del Secondary Sound Source SSS. El proceso de formación de precipitación se estudió utilizando una configuración que opera según el método de "dedo frío". La temperatura del dedo fue de 12 ° C, la temperatura del aceite fue de 30, 50 y 70 ° C.

En la investigación Ануфриев & Волкова, (2016) de la Universidad Politécnica de Tomsk Rusia, se procesaron aceites altamente parafínicos y parafínicos en un campo acústico con una frecuencia de 24 kHz y una intensidad de radiación de 10 W / cm^2 . El tratamiento ultrasónico de aceite altamente parafínico conduce a un aumento de los parámetros reológicos (viscosidad y esfuerzo cortante), calor de activación del flujo viscoso, energía específica de destrucción del

sistema de dispersión de aceite, punto de fluidez y la cantidad de depósitos de asfalto-resina-parafina.

En los sedimentos del aceite tratado con un alto contenido de parafina, la fracción de masa de n-alcenos de alto peso molecular aumenta y la proporción y el peso molecular medio de los asfaltenos disminuye.

El tratamiento acústico del aceite parafínico ayuda a mejorar las características de viscosidad, temperatura y energía en el tiempo de exposición óptimo. Los estudios han demostrado que el tratamiento ultrasónico, como cualquier otro método, puede ser muy eficaz y dar un resultado negativo. El procesamiento a corto plazo (30 s) de aceites parafínicos con un alto contenido de componentes resinoso-asfaltenos conduce a una disminución significativa de la viscosidad, lo que reducirá el precio de las materias primas de hidrocarburos durante la producción y el transporte.

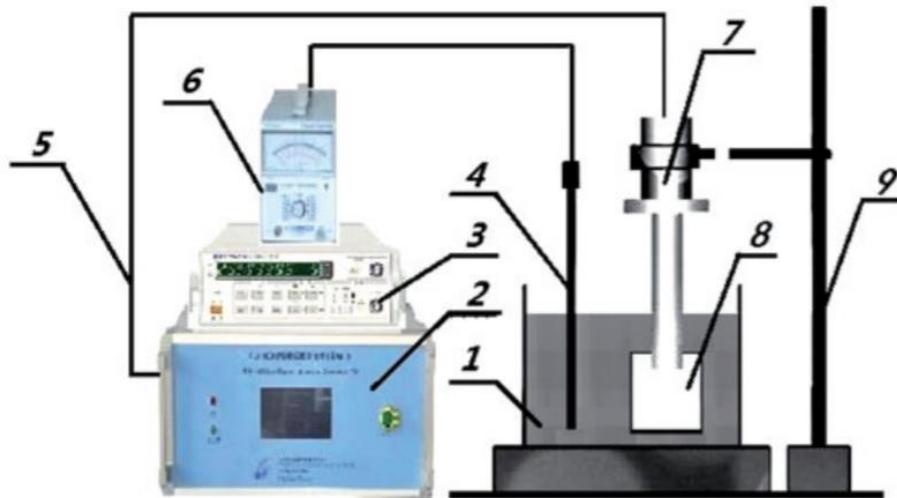
La viscosidad y el punto de fluidez del aceite altamente parafínico tratado con ultrasonidos aumentan después de que se retira la carga ultrasónica y se enfría la muestra. Pero incluso para tales aceites, es posible usar ultrasonido si el aceite calentado por ultrasonido se transporta hasta que comienza la cristalización de los hidrocarburos parafínicos.

6.1.4 Configuración experimental deshidratación ultrasónica, Universidad de Ciencia y Tecnología de Shanghai, Shanghai (China)

Wang Jingkui Li, , Dawei Qi & Zhenjun (2019) en China realizaron la siguiente configuración experimental de la deshidratación ultrasónica como se muestra en la (Figura 32),

que consta principalmente de nueve partes. El dispositivo de medición de la intensidad del sonido es producido por la compañía neumática DE-BAO en la provincia de Zhejiang en China. La potencia es de 1000 W, el rango de control de temperatura es de temperatura ambiente a 100 C, sus ventajas son un control de temperatura preciso, pantalla digital y control automático de temperatura.

Figura 32. Configuraciones experimentales deshidratador ultrasónico.



Nota. 1-baño de temperatura constante; 2-generador de ultrasonidos; 3-cymometer; 4 sondas; 5-cable especial; Controlador de medición de intensidad de 6 sonidos; Transductor ultrasónico 7; Reactor de 8 muestras; Soporte de 9 metales. Tomado de Li et al., (2019) Research on ultrasonic paraffin deposition inhibition for crude oil extraction and transportation.

Los parámetros de tres transductores Li et al., (2019) de tipo NC-M se muestran en la (Tabla 4). El microscopio electrónico de barrido tipo MA11, que se muestra en la (Figura 33), se

utiliza para observar el cambio de la morfología del cristal de parafina en el petróleo crudo antes y después del tratamiento ultrasónico. La muestra de aceite proviene del campo petrolífero de Shengli (el punto de congelación es 67.2 C).

Tabla 4. Parámetros del experimento ortogonal.

Número de transductor	Frecuencia de transductor (kHz)	Potencia nominal del transductor (W)
1	20	150
2	30	100
3	40	50

Nota. Tomado de Li et al., (2019) Research on ultrasonic paraffin deposition inhibition for crude oil extraction and transportation.

Figura 33. Microscopio electrónico de barrido tipo MAI1.

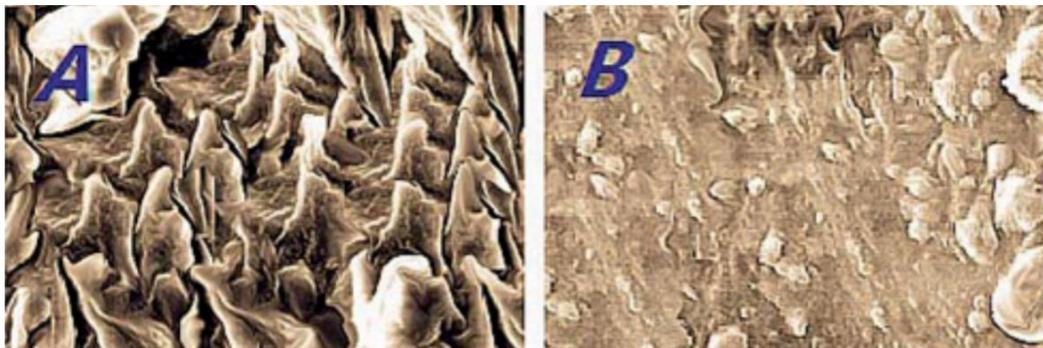


Nota. Tomado de Li et al., (2019) Research on ultrasonic paraffin deposition inhibition for crude oil extraction and transportation.

1. Cambio de la morfología de los cristales de parafina:

Como se muestra en la (Figura 34), una gran cantidad de partículas globulares dispersas homogéneas aparecen en el petróleo crudo después del tratamiento ultrasónico, lo que indica que la onda ultrasónica afecta el proceso de cristalización de la parafina. En la prueba de Li et al., (2019) los ultrasonidos pueden romper la estructura de cadena larga de las moléculas de parafina, reduciendo la nucleación de los cristales de parafina y refinando los granos cristalinos de la parafina. Cuando la temperatura disminuye, los granos cristalinos de parafina crecen bajo la fuerza combinada de la fuerza de Van Der Waals, el enlace covalente y el enlace de hidrógeno.

Figura 34. Cambio de la morfología de los cristales de parafina.



Nota. Tomado de Li et al., (2019) Research on ultrasonic paraffin deposition inhibition for crude oil extraction and transportation.

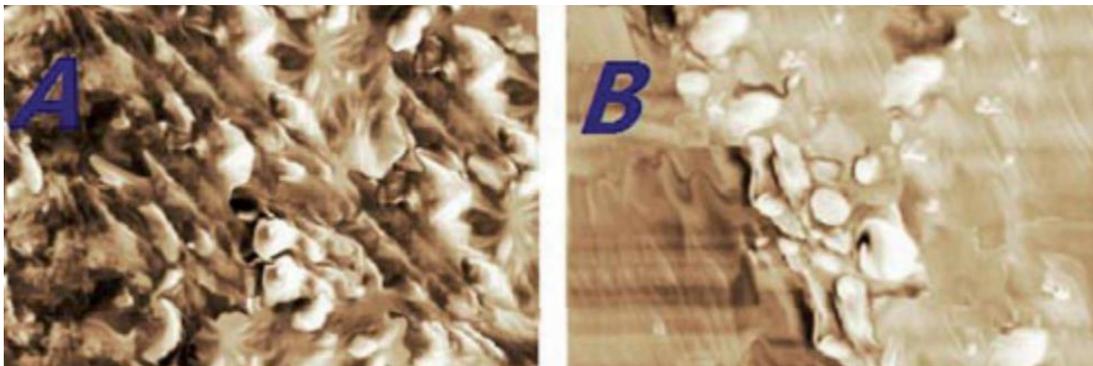
2. Inhibición ultrasónica de la formación de depósitos de parafina en crudos con diferente contenido de agua:

En la (Figura 35), el efecto de la inhibición de la formación de depósitos de parafina ultrasónica para el petróleo crudo acuoso es mejor que el del petróleo crudo deshidratado. Puede verse en la (Figura 35A) que las partículas de cristal de parafina son más grandes que las de la (Figura 35B) y están reunidas; se puede ver en la (Figura 35B) que las partículas de cristal de

parafina son pequeñas y están dispersas en luz. La razón por la cual las partículas de cristal de parafina son pequeñas y se dispersan en la luz para el petróleo crudo acuoso radica en que el efecto del fenómeno de cavitación fuerte en el petróleo crudo acuoso causado por ondas ultrasónicas es mejor que en el petróleo crudo deshidratado, y los granos de parafina grandes no se pueden juntar bajo la acción de una fuerte cavitación.

Figura 35. Efectos de eliminar el tapón de parafina para el crudo deshidratado.

(A) y eliminar el del petróleo crudo acuoso (B) por excitación ultrasónica.

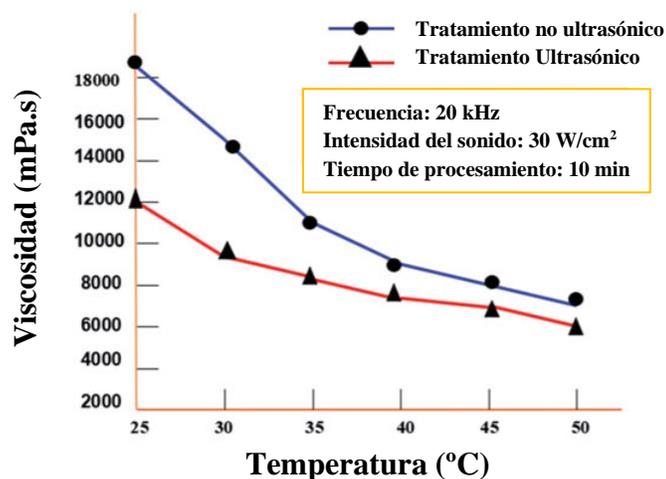


Nota. Tomado de Li et al., (2019) Research on ultrasonic paraffin deposition inhibition for crude oil extraction and transportation.

Estos resultados indican que la vibración mecánica del ultrasonido puede acelerar el movimiento relativo entre las moléculas más pequeñas en el petróleo crudo y la cadena grande de moléculas inertes grandes, aumentando así la fricción entre ellas. Cuando la fuerza de fricción es lo suficientemente grande, el enlace C-C se puede interrumpir para romper las moléculas de parafina de cadena larga, desempeñando así el papel de reducción de la viscosidad y prevención de la parafina.

La fuerza de la estructura líquida disminuye con el aumento de la temperatura y el umbral de cavitación disminuye, por lo que la cavitación es fácil de producir. Por lo tanto, elevar la temperatura adecuadamente es beneficioso para la aparición de cavitación y tiene un cierto grado de influencia sobre el efecto de reducción de la viscosidad. En todo el proceso de reducción de la viscosidad ultrasónica, la tasa de reducción de la viscosidad ultrasónica es relativamente grande a baja temperatura, y el cambio de la tasa de reducción de la viscosidad disminuye gradualmente con el aumento de temperatura. El efecto de la temperatura sobre la reducción ultrasónica de la viscosidad del petróleo crudo se muestra en la (Figura 36).

Figura 36. Curva experimental de reducción de viscosidad ultrasónica.



Nota. Tomado de Li et al., (2019) Research on ultrasonic paraffin deposition inhibition for crude oil extraction and transportation.

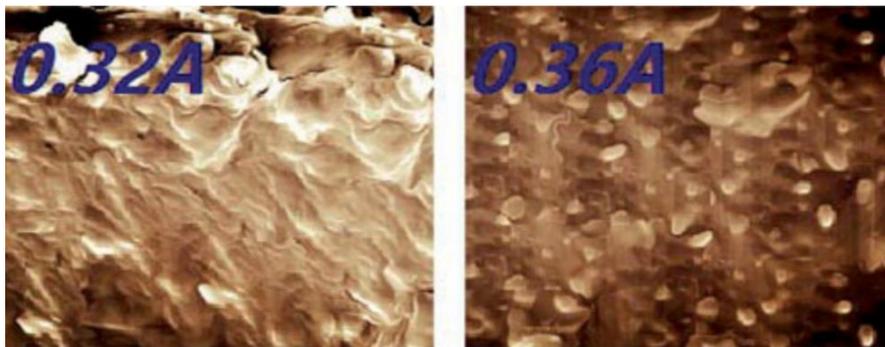
3. El efecto de la intensidad ultrasónica:

Como se muestra en la (Figura 37), con el aumento de la corriente de trabajo del transductor, el diámetro de las partículas cristalinas de parafina se hace más pequeño y el grado de

dispersión de las partículas cristalinas de parafina aumenta. Tal cambio es propicio para mejorar la fluidez del petróleo crudo.

Un sonido más alto puede provocar un fenómeno de cavitación más fuerte. El diámetro de las partículas cristalinas de parafina puede reducirse bajo un fenómeno de cavitación más fuerte. La intensidad del sonido ultrasónico es el factor directo que afecta el efecto de cavitación. En un cierto rango, el efecto de cavitación aumenta con la mejora de la intensidad del sonido.

Figura 37. Efectos de la intensidad del sonido y el tiempo.

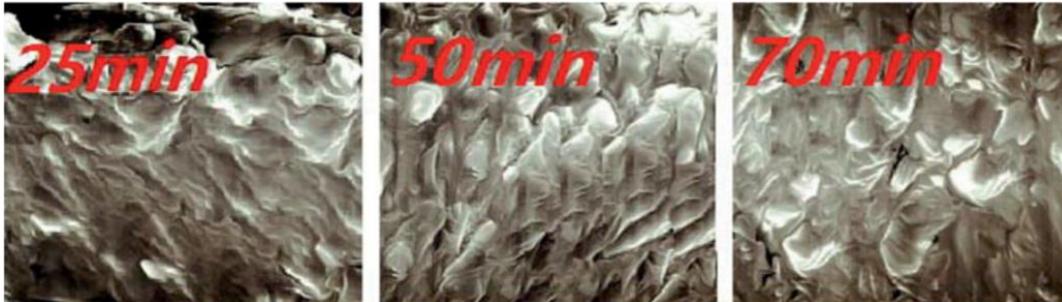


Nota. Tomado de Li et al., (2019) Research on ultrasonic paraffin deposition inhibition for crude oil extraction and transportation.

4. El efecto del tiempo en la prueba:

El cambio de la morfología del cristal de parafina después del tratamiento ultrasónico en diferentes momentos (250, 500 y 70 min) se muestra en la (Figura 38). Además, la corriente de trabajo del transductor y el tiempo de tratamiento ultrasónico también son 0.36A y 3 min, respectivamente. Como se muestra en la Figura 38, la morfología de los cristales de parafina se mantiene casi sin cambios a medida que pasa el tiempo. Esto indica que la extracción ultrasónica del tapón de parafina es factible e irrecuperable.

Figura 38. Cambio de la morfología de los cristales de parafina a lo largo del tiempo.



Nota. Tomado de Li et al., (2019) Research on ultrasonic paraffin deposition inhibition for crude oil extraction and transportation.

El suministro de energía ultrasónica aumenta con la prolongación del tiempo de tratamiento ultrasónico, las moléculas de cadena larga en el petróleo crudo se rompen constantemente en hidrocarburos de cadena corta, de modo que el contenido de hidrocarburos ligeros en el petróleo crudo aumenta continuamente. Al mismo tiempo, las micelas del petróleo crudo se destruyen constantemente. Se rompen más micelas con la prolongación del tiempo de tratamiento ultrasónico y también se liberaron los componentes ligeros de las micelas originales, aumentando así el contenido de componente ligero del petróleo crudo. En una palabra, la inhibición ultrasónica de la parafina es factible e irrecuperable.

Del análisis de la prueba se concluye que, bajo la acción de la cavitación ultrasónica, el peso molecular de la parafina de cadena larga en el petróleo crudo se rompe y el peso molecular se reduce, lo que hace que el cristal de parafina se rompa en partículas muy pequeñas, lo que puede inhibir el crecimiento del cristal de parafina. La intensa agitación mecánica de la onda ultrasónica reduce el punto de fusión de la parafina, mejora la velocidad de fusión del cristal de parafina y ayuda al petróleo crudo que fluye a eliminar el cristal de parafina.

La vibración mecánica puede causar la fuerte vibración del petróleo crudo en sí e impactar repetidamente la capa de encerado, lo que hará que la capa de encerado se fatiga y se destruya hasta que se separe de la pared de la tubería, y también es desfavorable para la precipitación de cristales de parafina en la pared de la tubería, para lograr el propósito de limpieza y prevención de la parafina.

6.1.5 Desarrollo reciente de equipos de producción de aceite por ultrasonidos con parafinas, (Universities of China), Wonkwang University (South Korea)

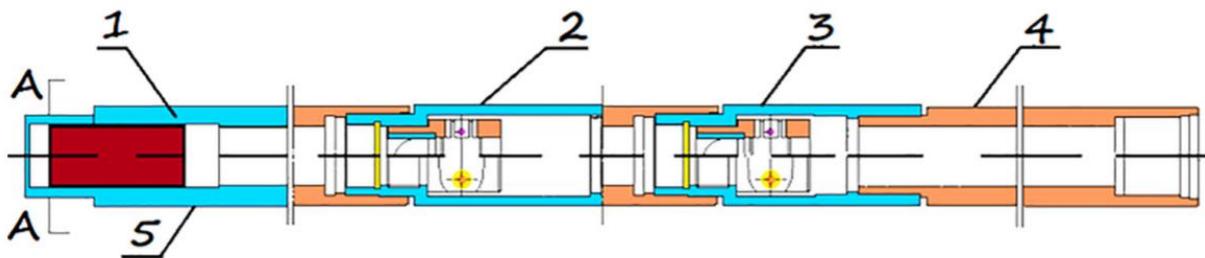
Según Zhenjun Wang et al., en (2020) actualmente, de hecho, los transductores más utilizados en el campo de la recuperación acústica de aceite son los transductores hechos de PZT. Sin embargo, dichos transductores cerámicos piezoeléctricos son propensos a una gran resistencia capacitiva en un sistema de transmisión que consta de fuentes de energía ultrasónicas, cables de transmisión y transductores cerámicos piezoeléctricos, de modo que todo el sistema de transmisión puede producir una corriente reactiva mayor, reduciendo en gran medida el sistema de transmisión.

En eficiencia esto puede resultar en un gran desperdicio de energía. Según la encuesta de Zhenjun Wang et al., en (2020), la eficiencia del sistema de transmisión existente es solo del 10% al 20%. Para superar estos problemas, Zhenjun Wang et al., en (2020) quien citó a Dekun Luo et al, este inventó una especie de transductor ultrasónico de producción de petróleo de fondo de pozo con un dispositivo de adaptación. Los resultados de las pruebas de campo indican que no solo puede mejorar la eficiencia sistema de transmisión en gran medida (la eficiencia de transmisión

del sistema de transmisión existente se puede mejorar hasta en un 70%), sino que puede liberar la mayor parte del aceite atrapado, drenar los conductos de aceite obstruidos y aumentar la cantidad de crudo.

El dispositivo tiene las ventajas de una alta eficiencia de transmisión y ahorro de energía también Zhenjun Wang et al., en (2020) quien citó a la patente de Biqi Wang y col, quienes inventaron una especie de dispositivo de reducción de la viscosidad anti-cera y anti-incrustaciones que no daña el medio ambiente y que se utiliza para el bombeo subterráneo de petróleo. Su estructura se muestra en la (Figura 39). Esta invención supera el problema de que los productos similares existentes tienen un efecto pobre sobre la prevención de la cera o parafina y la reducción de la viscosidad. Realmente tiene un fuerte efecto anti-viscosidad, depósitos de parafina y anti-incrustaciones.

Figura 39. Equipo patente de Biqi Wang y col anti parafinas.

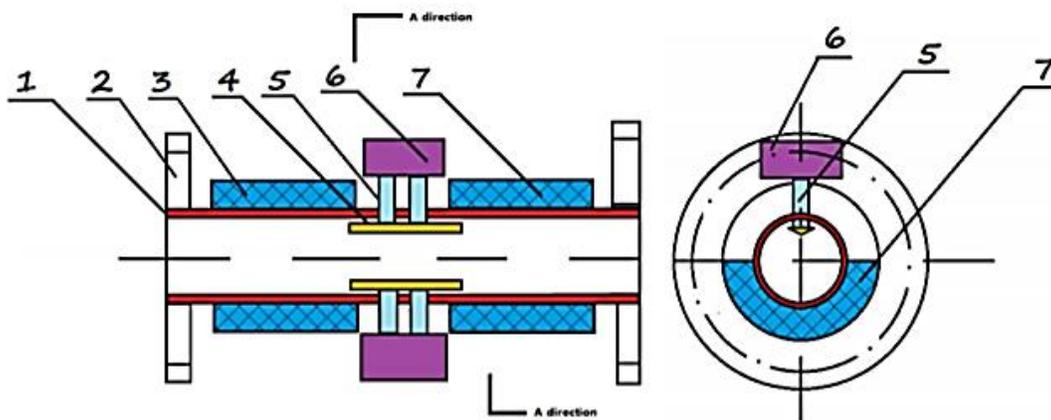


Nota: La estructura de un tipo de dispositivo de reducción de viscosidad anti-cera y anti-escalamiento ecológico 1 ciclón, transpondedor ultrasónico de 2 chorrores, oscilador ultrasónico de 3 chorrores, cámara de cavitación 4-emo, 5 tubos. Tomado de Zhenjun Wang et al., en (2020).

Los resultados de las pruebas de campo indican que puede aumentar enormemente el flujo de petróleo crudo, mejorar la eficiencia de la bomba y aumentar la producción de pozos de

petróleo. Tiene ventajas evidentes, como seguridad, no contaminación y sin energía adicional. En una palabra, este dispositivo no solo es adecuado para diferentes tipos de pozos petroleros, sino también para pozos petroleros con diferente contenido de cera y contenido de agua. La eliminación de incrustaciones de los oleoductos siempre ha sido un problema difícil en la industria del petróleo. Para resolver este problema, Zhenjun Wang et al., en (2020) quien cito a la patente de Zebing Zhang et al. Los autores de un dispositivo anti-incrustaciones ultrasónico electromagnético. Su estructura se muestra en la (Figura 40). De hecho, el dispositivo utiliza un campo magnético alterno ultrafuerte y un campo de sonido ultrasónico para procesar el fluido.

Figura 40. Estructura del dispositivo electromagnético ultrasónico anti-incrustante.



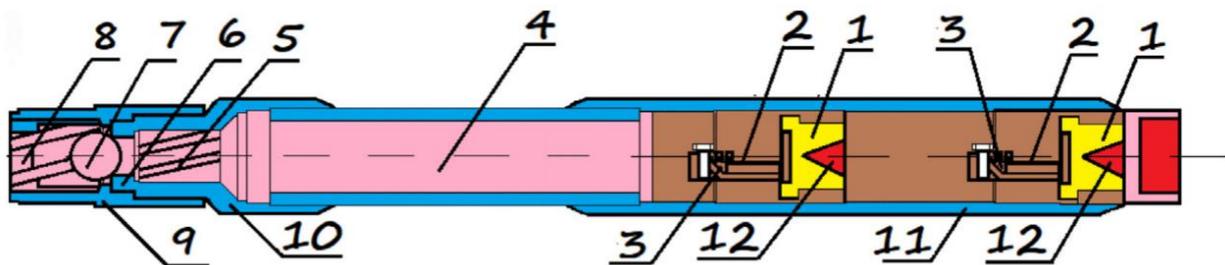
Nota. La estructura del dispositivo electromagnético ultrasónico anti-incrustante. 1-tubo interior, 2-brida, 3-anillo frontal, 4-amplificador, 5-varilla de amplificación, 6 transductor, 7-bobina de fondo. Tomado de Zhenjun Wang et al., (2020).

La morfología física y las propiedades químicas de las sustancias incrustantes en los fluidos de aceite cambiarán bajo la acción del campo magnético y el campo ultrasónico, de modo que se dispersan, trituran, sueltan y no se adhieren fácilmente a la pared de la tubería para formar

incrustaciones. Los resultados de la prueba muestran que las ventajas del dispositivo son un buen efecto de eliminación de incrustaciones, un buen efecto antiincrustante, una larga vida útil, ausencia de contaminación, mantenimiento conveniente y contaminación no ambiental.

Para resolver el problema de que el dispositivo de reducción de viscosidad anti-cera existente no se puede aplicar al contenido de cera de más del 25% de los pozos, Zhenjun Wang et al., en (2020) quien citó a la patente Ping Zhou et al. Quienes inventaron un dispositivo de reducción de viscosidad anti-cera-parafina de corriente parásita sónica doble como se muestra en la (figura 41). El punto de innovación de la invención es que el oscilador ultrasónico de dos etapas se adopta en el dispositivo para mejorar la frecuencia acústica y destruir completamente el cristal de la cera de parafina, de modo que el efecto de la inhibición de la parafina y la reducción de la viscosidad se pueda incrementar en gran medida.

Figura 41. Dispositivo patente Ping Zhou anti-cera-parafinas.



Nota: La estructura del dispositivo de reducción de viscosidad anti-cera de corriente parásita sónica doble Cabezal de 1 chorro, 2 metralla vibrante, 3 soportes, 4 cámaras vacías, 5 ranuras en espiral, 6 asientos, 7 bolas, 8 ranuras en espiral, Sección de 9 chorros, sección de flujo de 10, orificio pasante en forma de cuña de 11 carcassas. Tomado de Zhenjun Wang et al., (2020).

Además, la tecnología de corrientes parásitas se adopta en el dispositivo para mejorar la fluidez del petróleo crudo. El dispositivo puede reducir la viscosidad, prevenir la deposición de cera o formación de depósitos de parafina, aumentar su capacidad de flujo y aumentar la producción de pozos de petróleo. Es adecuado para pozos de producción de varios pozos verticales, inclinados y horizontales.

6.2 Cuadro comparativo de las investigaciones a nivel mundial en superficie

Tabla 5. Comparación en superficie.

Investigación	Analisis	Comentarios
Superficie		
Palaev & Dzhemilev, (2020), generador ultrasónico IL10 (Rusia)	<ul style="list-style-type: none"> - Expusieron crudos parafínicos a ultrasonido con el fin de detectar cuanto tiempo tardaba en calentar el crudo el ultrasonido en contraste al tiempo que tarda en llegar al punto de fusión con calentamiento directo. - La excitación de la cavitación en el líquido tratado fue tan eficiente que obtuvo una mayor eficiencia en cuanto su puesto con una ventaja de 1,29 con 1000 W y 1,24 con 2000 W. - Por su practicidad es de gran interés realizar más pruebas. 	Luego de calentarse el crudo por ultrasonido el fluido que era casi totalmente sólido pasó para estar en estado fluido.
Ershov et al., (2011), Planta GPR-2, (Rusia), campos East Zhetbai y Ashchisai	<ul style="list-style-type: none"> - Con el paso del tiempo después del tratamiento, las partículas desintegradas restauran los enlaces intermoleculares, provocando la relajación de la viscosidad dinámica del aceite. - A diferencia de la dilución con reactivo solo, la dilución del aceite con el reactivo, seguida de cavitación el tratamiento en el GPR-2 hace que la viscosidad disminuya aún más. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando pasa por el HFR después del aumento de la sección transversal del flujo en la cámara, el caudal disminuye, la presión estática aumenta y las burbujas de gas estallan, lo que se acompaña de la formación de un gran número de microburbujas caóticas. - El tratamiento por cavitación provoca la desintegración de

	- El efecto combinado de la acción del reactivo y la cavitación fue mayor que el efecto logrado por la acción de la cavitación o del reactivo individualmente.	parafinas y estructuras supramoleculares (asociadas, micelas, etc.) y disminución de su tamaño, lo que facilita la reducción de la viscosidad del aceite.
Ануфриев & Волкова en (2016), (TSU) transductor MSP 1/24, (Rusia) Campos de Siberia Occidental	Durante un tiempo especificado procesaron un crudo a través de una guía de varilla de ondas, creando vibraciones elásticas, con una frecuencia de 24 kHz y 10 W/cm ² , el tratamiento mejoro las características viscosidad, temperatura y energía en el tiempo de exposición óptimo. Crudo muy parafínico obtuvo de tiempo optimo 30 s.	- Se comprende que un crudo tratado con ultrasonido al no ser expuesto permanentemente se enfría y permite la formación de nuevamente depósitos de parafina en poco tiempo de finalizar la estimulación. - La técnica demuestra ser efectiva solo cuando se mantiene aplicada.
Li, , Dawei Qi & Zhenjun (2019), (China) Campo de Shengli	- Realizaron una configuración experimental de la deshidratación ultrasónica, la potencia usada fue de 1000 W, el equipo constaba de un control tecnológico de temperatura preciso y pantalla digital, luego de exponer el crudo aparecen partículas globulares homogéneas, indicando el efecto sobre el proceso de cristalización. - Un sonido más alto logro provocar un fenómeno de cavitación más fuerte. Para un crudo acuoso es más efectivo la inhibición de parafinas que un crudo deshidratado. - Entre mayor sea el tiempo de exposición el cambio de morfología de los cristales de parafina se mantiene estables.	Los ultrasonidos rompieron las cadenas largas de moléculas de parafina, también redujo la nucleación de los cristales de parafina y refinando los granos cristalinos de la parafina, al reducirse la temperatura los granos cristalinos crecen bajo fuerzas de Van der Waals, el enlace covalente y el enlace hidrogeno.
Desarrollo reciente de equipos de producción de aceite por ultrasonidos con parafinas, (Universities of China), Wonkwang University (South Korea) Zhenjun Wang et al., en (2020)	Tecnología novedosa para inhibir incrustaciones de parafinas en tubería a través de campos magnéticos y campos ultrasónicos, generando en los precipitados la dispersión, trituración y disolución, finalmente para evitar la adherencia de estos en tubería, no se da mayor detalle de la técnica.	Las patentes de los dispositivos indica que estos son capaces de que a partir de la acción del campo magnético alterno y el campo ultrasónico ultrafuerte o corriente sónica doble se puede inhibir las parafinas que anteriormente los equipos tenían dificultad.

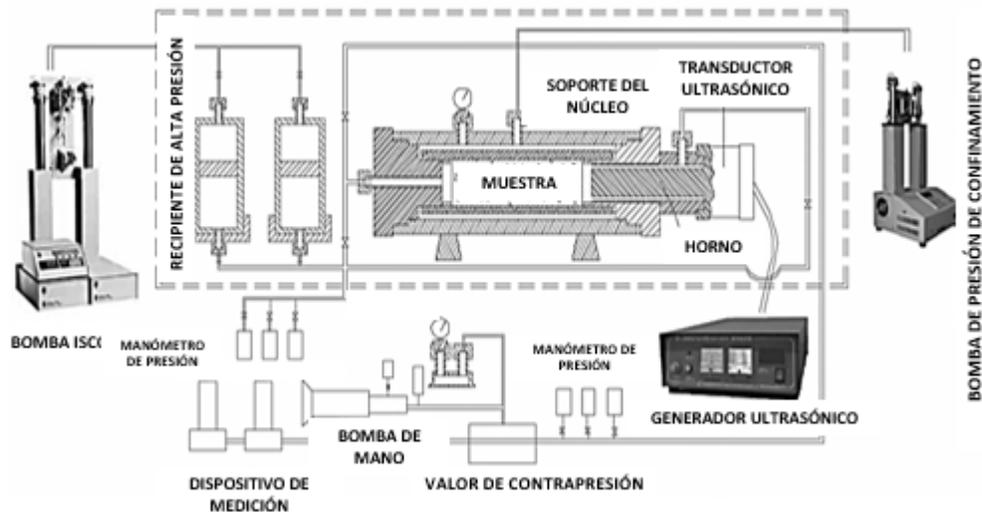
Nota. Tomado y modificado de Palaev & Dzhemilev, (2020); Ershov et al., (2011); Ануфриев & Волкова en (2016); Li, , Dawei Qi & Zhenjun (2019); Zhenjun Wang et al., en (2020).

6.3 Investigaciones de ultrasonido en pruebas de subsuelo.

6.3.1 Pruebas en núcleos, Universidad del Petróleo (China)

La Universidad del Petróleo en China, Qingdao, Xu & Pu, (2013), realizo la siguiente configuración experimental y los siguiente análisis (Figura 42):

Figura 42. Configuración experimental.



Nota. Tomado de H. Xu & Pu, (2013) Removal of Near-wellbore Formation Damage by Ultrasonic Stimulation.

El diseño fue realizado con el fin de investigar la eficiencia de la limpieza ultrasónica. El sistema de inyección incluye una bomba Teledyne ISCO (Teledyne, Lincoln, NB), que inyecta el fluido a través del núcleo. El soporte de núcleo es un soporte de núcleo de manga Hassler estándar Haiian, Jinagsu, China. Puede contener núcleos de 2,54 cm de diámetro con una longitud de 3 a 10 cm. La presión de confinamiento radial se suministra a la superficie de la goma que rodea el núcleo

mediante un sistema de seguimiento automático de presión, que tiene una bomba controlada por una computadora.

Los fluidos pueden fluir en cualquier dirección dentro del núcleo controlando las válvulas de la tubería. Se monta un transductor ultrasónico Ningbo, Zhejiang, China a cierta distancia de un extremo de la muestra del núcleo. En los experimentos se utilizan seis tipos de transductores ultrasónicos con frecuencia ultrasónica de 18, 22, 25, 30, 40 y 50 kHz y potencia nominal de 1000, 1000, 1000, 60, 60 y 20 W, respectivamente.

Para los cinco tipos de daños, el efecto de eliminación de obstrucciones mejora con el aumento de la frecuencia y potencia ultrasónicas, y el tiempo óptimo de irradiación ultrasónica que es de 80 a 100 min. Además, el efecto de limpieza aumenta con el aumento de la permeabilidad inicial del núcleo en los experimentos de finos in situ y de incrustaciones inorgánicas.

6.3.2 Resonadores ultrasónicos, Pulsos Ultrasónicos PU (México)

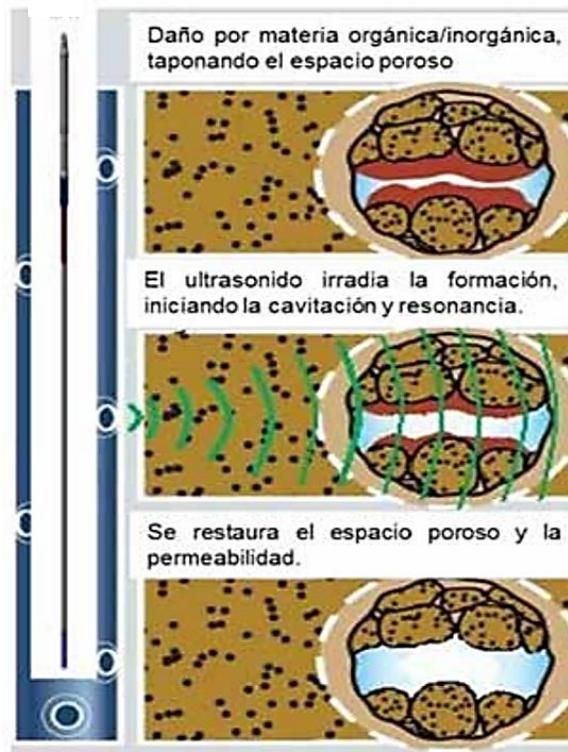
La empresa Pemex en México, Granados Cáliz & Flores Avila en (2013) para corregir el daño a la formación, emplearon la estimulación ultrasónica para crea un efecto de remoción de la capa de daño, mediante excitación con vibraciones elásticas de frecuencia ultrasónica emitidas hacia el medio líquido del espacio poroso afectado, restableciendo la permeabilidad y estimulando el flujo de aceite y gas hacia el pozo, y por ende recuperando la productividad del mismo.

La tecnología empleada PU (PULSOS ULTRASÓNICOS) está basada en la emisión de pulsos ultrasónicos que generan efectos de cavitación y resonancia, que combinados causan la

eliminación de materiales que provocan el daño en la cara de la formación, reduciendo y restaurando su permeabilidad, y por ende la productividad o inyectabilidad del pozo (Figura 43).

La tecnología PU es del tipo selectiva y ecológica, la recomiendan en campos maduros, yacimientos naturalmente fracturados, yacimientos areno arcillosos y yacimientos de crudo pesado.

Figura 43. Diagrama tecnología PU Pemex.



Nota. Tomado de Granados Cáliz & Flores Avila (2013) Prueba tecnológica de estimulación de pozos petroleros mediante la tecnología ultrasónica (PU) en pozos del AIATG.

La empresa Pemex en México Granados Cáliz & Flores Avila en (2013), realizo Prueba tecnológica de estimulación de pozos petroleros mediante la tecnología ultrasónica PU (pulsos ultrasónicos) (Figura 44) en pozos del AIATG, con las siguientes especificaciones:

- *Dimensiones del generador (PG20250):* 550x730x690 mm.
- *Alcance del ultrasonido en campos:*
20 kHz a más de 2 m desde la pared del pozo; 4.5 a 14 Kw/m³.
- *Tiempo de fallo:* +4000 horas.
- *Estimación de utilidad:* 3 años.
- Modelo TIT – 44
 - Fuente de poder: 500 W.
 - Poder de densidad: 4,5 kW/m².
 - Frecuencia: 20 KHz.
- Modelo TIT- 76
 - Fuente de poder: 1000 W.
 - Poder de densidad: 9 kW/m².
 - Frecuencia: 20 KHz.

Alimentación eléctrica: 3 Fases 400 V, 16Kw, 50-60 Hz, \pm 10%, (Energía eléctrica requerida no mayor de 10 kw).

Figura 44. Herramienta ultrasónica estimulación vertical del pozo.

Nota. Tomado de Granados Cáliz & Flores Avila (2013) Prueba tecnológica de estimulación de pozos petroleros mediante la tecnología ultrasónica (PU) en pozos del AIATG.

Tabla 6. Pozos en los que se hicieron pruebas con ultrasonido.

Criterios de selección de pozos para pruebas de estimulación ultrasónica con la herramienta "PU"								
Pozo	Porosidad >5%	RGA <10 M3/M 3 @C.y	Viscosidad < 10Cp @C.y	Corte de agua <80%	°API>20	ARCILLA > 5%	Temp <90 °C	PRESIÓN DE FONDO <255 kg/cm2
1	11.4	5.19	2	5	25	23,4(+)	60	119
2	10.5	2.4	4	74	15	19,7(+)	70	125
3	8.1	3.27	4	3	19	19,1(+)	70	144
4	9.5	2.2	4	17	29	32,6(+)	75	150

Nota. Modificado de Granados Cáliz & Flores Avila (2013) Prueba tecnológica de estimulación de pozos petroleros mediante la tecnología ultrasónica (PU) en pozos del AIATG.

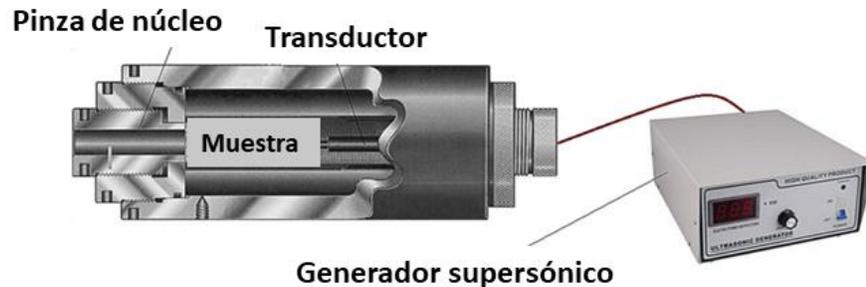
De los cuatro pozos intervenidos, en dos de estos se observó un incremento superior al 450% de producción, después de estimularlos con ultrasonido pasando de 60 bpd a 274 bpd en el

caso del **pozo 2** y se presentó un aumento del 300 % de producción pasando de 39 bpd a 116 bpd en el caso del **pozo 4**.

6.3.3 Dispositivo experimental de tratamiento ultrasónico con Generador y Transductor supersónico, Universidad de Shanghai (China)

La Facultad de Ingeniería Mecánica de Universidad de Shanghai para la ciencia y tecnología Zhou & Wang, (2020), desarrolló una investigación sistemática para el tratamiento ultrasónico con el fin de eliminar la cera de parafina. La eficacia de los factores en la eliminación de la cera de parafina del núcleo se analizó mediante experimentos. Los resultados demuestran que el agente químico y el método de tratamiento ultrasónico para la eliminación de cera de parafina combinado trabajan sinérgicamente. El efecto de eliminar la formación de depósitos de cera de parafina mediante el método químico-ultrasónico es mejor que el de un método químico único o ultrasónico único.

En la (Figura 45) un dispositivo experimental para eliminar el tapón de formación de depósitos de cera de parafina. Se compone principalmente de cuatro partes: generador supersónico, transductor, muestras de núcleo y pinza de núcleo, Zhou & Wang, (2020) quien citó a Ding, (2020).

Figura 45. Estructura diagrama experimental.

Nota. Tomado de Long Zhou & Zhenjun Wang, (2020) A comparison study on the removal of paraffin wax deposition plug by ultrasound treatment, chemical demulsifier and combination of ultrasound and chemical demulsifier.

Se usaron seis muestras de transductores de ultrasonido (Figura 46). En la (Tabla 7) se muestran las diferentes frecuencias del transductor y la potencia nominal. Se usaron tres tipos diferentes de muestras de núcleo, y la permeabilidad de registro de gas de estas es $30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ y $150 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$: La longitud y el diámetro de tres muestras de roca son de 7 cm y 2,5 cm, respectivamente.

Las composiciones químicas de las muestras de núcleo son cuarzo, arcilla, carbonato y feldespato con contenidos de 54%, 5%, 2% y 39%, respectivamente. Además, dos productos químicos esenciales para eliminar el tapón de depósito de cera de parafina son la solución de HCL al 10% y el ácido de lodo con una concentración del 5%. Los múltiplos de inyección son todos 2PV.

El efecto de la eliminación del tapón de formación de depósitos de cera de parafina puede evaluarse mediante la recuperación de la permeabilidad del núcleo (K_{RR}). $K_{RR} = (K_t - K_d) / K_0$, donde

K_0 es la permeabilidad inicial del registro del núcleo, donde K_d es la permeabilidad del registro del pozo después de eliminar la sensibilidad al agua y donde K_t es la permeabilidad del registro después del tratamiento ultrasónico.

Figura 46. Seis transductores.



Nota. Tomado de Long Zhou & Zhenjun Wang, (2020).

Tabla 7. La frecuencia y potencia de diferentes transductores de ultrasonido.

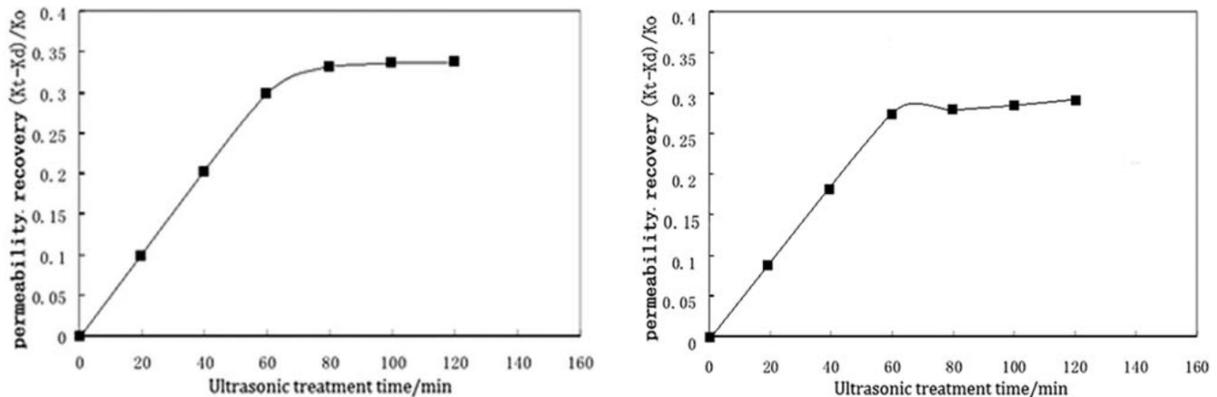
Número de transductores de ultrasonido	Potencia nominal del transductor de ultrasonido (W)	Frecuencia del transductor de ultrasonido (kHz)
1	1000	18
2	1000	22
3	1000	25
4	100	30
5	100	40
6	200	50

Nota. Tomado de Long Zhou & Zhenjun Wang, (2020)

La investigación (Figura 47) proporciona una base para la amplia aplicación de la técnica de tratamiento para ultrasonidos cerca del pozo, y los resultados que obtuvieron confirman que la

frecuencia ultrasónica es un factor importante para retirar el tapón de formación de depósitos de cera de parafina, esta no debe ser demasiado alta y debe mantenerse dentro de un límite razonable.

Figura 47. Efecto de tiempo y permeabilidad.



Nota. Efecto del tiempo de tratamiento ultrasónico en la eliminación de la formación de depósitos de parafina para el núcleo con tres permeabilidades. Tomado de Long Zhou & Zhenjun Wang, (2020).

Adicionalmente una mayor potencia del transductor usado es buena para mejorar la eficiencia del ultrasonido, entre más tiempo el tratamiento tiende a ser más estables los efectos de inhibición de parafina. La inyección de un agente químico por sí sola no tiene más efecto que el tratamiento ultrasónico para eliminar la formación de depósitos de cera de parafina.

Desde el punto de vista para reducir el costo de construcción y la protección de la formación, el método de inyección química puede ser reemplazado por la técnica de tratamiento ultrasónico. Finalmente, el efecto de una técnica de combinación de ultrasonidos y químicos es eficazmente superior al método que usa la inyección de un agente químico o el tratamiento con ultrasonido solo.

6.3.4 Aumento de movilidad del crudo por interacción ultrasonido-Roca, SPE Annual Technical Conference and Exhibition Texas (Estados Unidos)

Según Hamida & Babadagli (2005) la interacción dentro del yacimiento por medio del ultrasonido con los compuestos orgánicos de parafina está controlada por las siguientes acciones que aumentan la productividad del pozo:

Onda sísmica: Cuando una onda sísmica (de alta longitud de onda) pasa a través de un medio poroso fracturado, se dispersará en armónicos más altos generando así ondas a frecuencias ultrasónicas dentro del yacimiento.

El conocimiento del efecto del ultrasonido en el flujo a través de medios porosos es relevante para tecnologías como la pulsación de presión, la estimulación acústica de fondo de pozo y el uso de explosivos como forma de estimulación sísmica.

Cavitación dentro de los poros: Duhon y Campbell realizaron una serie de experimentos de inundación de salmuera en muestras de arenisca saturadas de petróleo bajo ultrasonido en un rango de frecuencia de 1 a 5,5 MHz. Sus observaciones mostraron que la energía ultrasónica tuvo un efecto considerable en la eficiencia del desplazamiento al crear un frente de desplazamiento más uniforme. Postularon que el ultrasonido genera picos de presión localizados durante la cavitación, que pueden forzar el aceite atrapado en los poros adyacentes.

Efecto sono-capilar en los capilares: La filtración de petróleo en diferentes tipos de rocas porosas también fue investigada por Mikhailov, Dyblenko, Nereting y Gadiev introdujeron el ultrasonido en paquetes de arena no consolidados saturados de petróleo y observaron un aumento considerable en la tasa de producción de petróleo y la producción de petróleo acumulada. Postularon que este efecto se debía a un fenómeno llamado "efecto sono-capilar", por el cual el nivel de líquido dentro de un capilar se eleva debido a una presión adicional generada por el colapso de las burbujas durante la cavitación.

Superación entrapamiento capilares: Las vibraciones proporcionan la fuerza mecánica necesaria para superar el atrapamiento capilar, movilizandando así las gotas de aceite dentro de los poros.

Movilización de aceite: Varios mecanismos como el transporte peristáltico debido a la deformación mecánica de las paredes de los poros, la reducción de las fuerzas capilares debido a la destrucción de las películas superficiales, la coalescencia de las gotas de aceite debido a las fuerzas de Bjerknes, la oscilación y excitación de las gotas de aceite atrapadas en los capilares, las fuerzas generadas por la cavitación de las burbujas y los efectos sonocapilares pueden ser responsables de mejorar el flujo de aceite a través de medios porosos en presencia de un campo acústico.

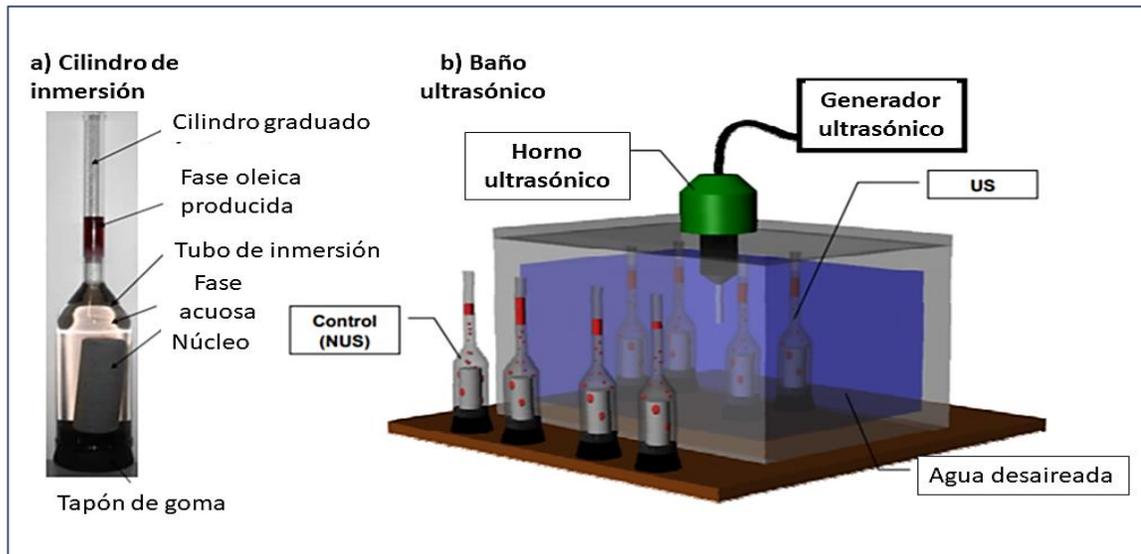
Permeabilidad efectiva: Roberts demostraron que la energía ultrasónica se puede aplicar eficazmente para reducir el daño cercano al pozo causado por depósitos orgánicos y

polímeros al suspender los depósitos de parafina y restaurar la permeabilidad efectiva de la roca.

Tiempo de exposición: El tratamiento ultrasónico conduce a un aumento del límite elástico, la energía de activación del flujo viscoso y la energía de fractura interna del sistema de dispersión se da con un aumento del tiempo de procesamiento.

En el estudio Hamida & Babadagli (2005) introdujo a manera experimental la energía ultrasónica utilizando una fuente llamada bocina ultrasónica. Algunos datos, como la frecuencia y la intensidad de salida al estar presente con ultrasonidos en esta investigación son de 40 kHz y 35 W/cm². La bocina de ultrasonidos ofrece una frecuencia de 20 kHz e intensidades de salida variables que van de 5 W/cm² a 250 W/cm². La bocina ultrasónica transmite la energía a través de una punta de aleación de titanio de 3/4 de pulgada que se calibró mediante técnicas calorimétricas tradicionales, y está controlada por un generador de ultrasonidos, equipado con un controlador de temperatura, un controlador de intensidad autoajustable, un generador de impulsos y un temporizador.

Figura 48. Los principales componentes del experimento de inmersión: a) la celda de inmersión, b) el baño de ultrasonidos y la bocina de ultrasonidos.



Nota. Montaje experimental. Modificado de Hamida & Babadagli (2005). Pg. 10.

6.4 Cuadro comparativo de las investigaciones a nivel mundial en subsuelo.

Tabla 8. Cuadro comparativo de investigaciones en subsuelo

INVESTIGACIÓN	ANÁLISIS	COMENTARIOS
En Subsuelo		
Xu & Pu, (2013), China. Pruebas en núcleos	En la universidad del petróleo en China se realizó una configuración experimental conformada por varios elementos de laboratorio que incluyen una bomba Teledyne ISCO, generador y 6 transductores ultrasónico a frecuencias de 18,22,25,30,40 y 50 kHz y potencia nominal de 1000,60 y 200 W, equipo de presión e inyección, entre otros, para analizar muestras que se exponían al ultrasonido. Hubo 5 tipos de skin y se determinó que el efecto de eliminación de obstrucciones mejora con el aumento de la frecuencia y potencia ultrasónicas.	Se debe tener en cuenta el tiempo de irradiación ultrasónica en el cual se encontrarán las muestras. También que el equipo donde se realiza la prueba con ultrasonido puede contener núcleos de 2,54 cm de diámetro y con longitud de 3 a 10 cm.

<p>Granados Cáliz & Flores Avila en (2013), México. Tecnología ultrasónica PU.</p>	<p>Para corregir el daño a la formación, la empresa Pemex empleó la estimulación sónica. La tecnología que se manejó es la llamada PU la cual está basada en la emisión de pulsos ultrasónicos que generan efectos de cavitación y resonancia que combinados causan eliminación de ceras que provocan daño en la cara de la formación reduciendo y mejorando su permeabilidad. PU es económica y se recomienda en campos maduros, yacimientos naturalmente fracturados, areno arcillosos y de crudo pesados. De 4 pozos en los que se aplicó la técnica, en 2 pozos se observó un incremento de producción.</p>	<p>La estimulación sónica, básicamente pulveriza las partículas de parafina que impiden el desarrollo de un pozo en producción, se irradia a la formación ultrasonido que después genera el proceso de cavitación y resonancia para luego restaurar el espacio poroso y la permeabilidad.</p>
<p>Zhou & Wang, (2020), China. Dispositivo experimental, tratamiento ultrasónico</p>	<p>Desarrollaron una investigación para el tratamiento ultrasónico con el fin de eliminar la cera parafina. Se usaron 6 muestras de transductores de ultrasonido a diferentes frecuencias y potencias nominales, se usaron tres diferentes muestras de núcleo, se usaron dos productos químicos esenciales para eliminar el tapón de parafina. Según los resultados obtenidos las frecuencias no deben ser demasiado altas para retirar el tapón de formación de depósitos de parafina.</p>	<p>Una mayor potencia del transductor usado en la investigación es buena para mejorar la eficiencia del ultrasonido. Para reducir costos, el método de inyección química podría ser reemplazada por el tratamiento ultrasónico y para tener aún una mayor eficiencia se recomienda implementar ambos métodos combinados para inhibir con éxito la parafina que ocasiona obstrucción en las líneas de flujo, yacimiento y cara de pozo.</p>
<p>Hamida & Babadagli (2005), USA. Aumento de movilidad de crudo por interacción Ultrasonido-Roca.</p>	<p>La interacción del yacimiento por medio del ultrasonido con los compuestos orgánicos de parafina se controla por las siguientes acciones que aumentan la productividad del pozo: onda sísmica, Cavitación dentro de los poros, efecto sonocapilar, superación por entrapamiento capilares, movilización de aceite, permeabilidad efectiva, tiempo de exposición.</p>	<p>La frecuencia de la onda es un factor muy importante ya que no debe ser tan alta, pero debe mantenerse en un rango para lograr la inhibición de parafinas. Lo más importante es comprender el principio de la cavitación, que conlleva a el efecto sonocapilar en rocas porosas aumentando de la tasa de producción de petróleo ya que el líquido presente se eleva debido a una presión generada por el colapso de las burbujas de la cavitación.</p>

Nota. Tomado y modificado de Xu & Pu, (2013); Granados Cáliz & Flores Avila en (2013); Zhou & Wang, (2020);

Hamida & Babadagli (2005).

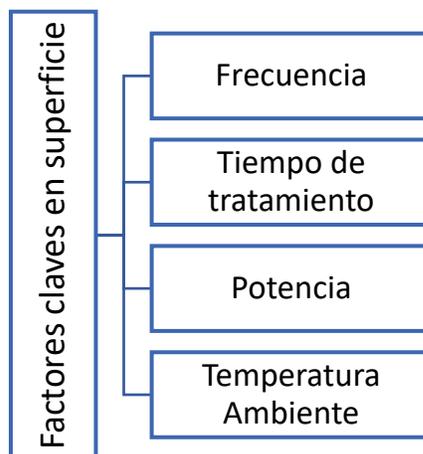
7. Análisis de la estimulación sónica más óptima y efectiva en la inhibición de parafinas

A partir de la información proporcionada previamente de investigaciones en la aplicación de la técnica de ultrasonido en inhibición de parafinas a nivel experimental para ser probadas a futuro en cara del pozo, tuberías y tanques, se recolecto el siguiente análisis general, en primer lugar, se determinó los factores fundamentales que determinan la efectividad de la técnica de estimulación ultrasónica en precipitados de parafina, entre estas:

7.1 Parámetros operativos determinantes para una estimulación sónica exitosa en superficie y subsuelo

A partir del análisis de las pruebas recopiladas en esta investigación realizadas en muestras de crudo con estimulación sónica a nivel mundial, se definieron los siguientes factores como trascendentales para obtener el rango adecuado los óptimos resultados (Figura 49).

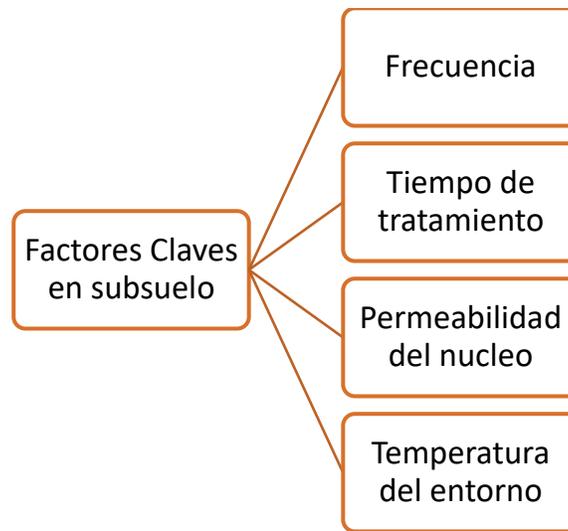
Figura 49. Factores determinantes en la efectividad de la estimulación sónica en inhibición de parafinas en superficie.



Nota. Fuente autores

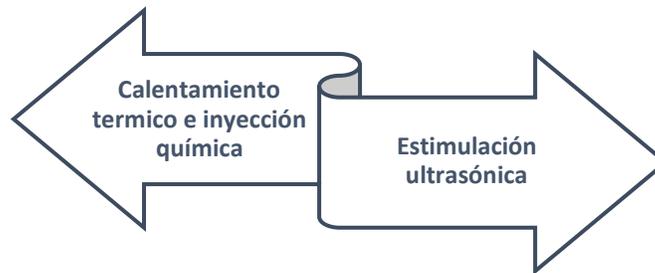
En el caso de las pruebas a miras de ser aplicadas a la cara del pozo para evitar daño a la formación por incrustaciones orgánicas de parafinas (las pruebas experimentales estudiadas a nivel mundial en su mayoría fueron hechas en muestras de núcleos) se determinaron los siguientes factores fundamentales en el éxito de la estimulación sónica (Figura 50):

Figura 50. Factores determinantes en la efectividad de la estimulación sónica en inhibición de parafinas en subsuelo.



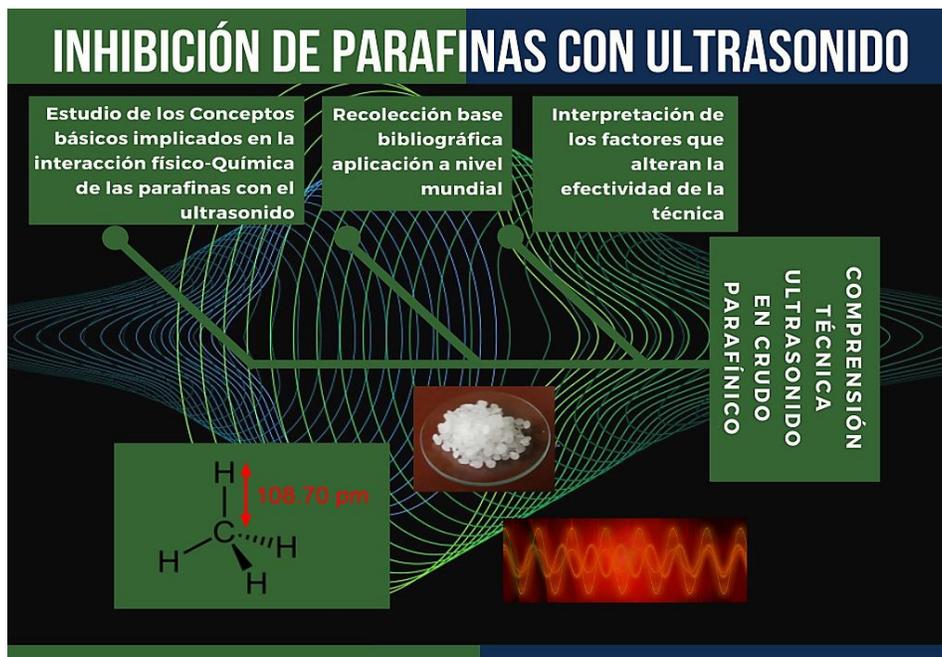
Nota. Fuente autores

Escenario de comparación y contraste con el fin de evaluar la efectividad y viabilidad de las técnicas de estimulación ultrasónica con la técnica frecuentemente usada en campo inyección de químicos (Figura 51).

Figura 51. Escenario de comparación.

Nota. Fuente autores

Se espera que con los resultados de la investigación se proporcione una base de comprensión más lucida de la versatilidad que tiene aplicación de la técnica de inhibición de parafinas con ultrasonidos a nivel mundial, y proporciones los principios básicos para su posible aplicación en campos colombianos (Figura 52).

Figura 52. Análisis del proceso de investigación.

Nota. Fuente Autores

7.1.1 Efectividad de la frecuencia ultrasónica

Según las pruebas y análisis hecho por H. Xu & Pu, en (2013), la frecuencia es un factor determinante para la efectividad de la pruebas aplicadas de estimulación sónica con ultrasonido para inhibir el precipitado de parafina, en especial esta investigación explica como la frecuencia afecta el daño a la formación que puede generar el precipitado orgánico de parafina en los poros cercanos a la cara del pozo.

En las pruebas realizadas con muestras de diferentes incrustaciones en contenido inorgánico, precipitado de parafina, lodo de perforación y polímeros, se hicieron para evaluar el efecto de las propiedades físicas en la roca, parámetros técnicos y parámetros ultrasónicos sobre los resultados de remoción de tapones.

En los experimentos se utilizaron seis tipos de transductores ultrasónicos con frecuencia ultrasónica de 18, 22, 25, 30, 40 y 50 kHz y potencia nominal de 1000, 1000, 1000, 60, 60 y 200 W, respectivamente. Manteniendo un mismo tiempo de exposición (60 min) la irradiación ultrasónica dio como resultado un aumento del PRR (Permeability Recovery Rate) en incrementos de 0.3, 0.27 y 0.25. Los mecanismos claves de la limpieza ultrasónica de precipitado de parafinas son la liberación de partículas causadas por la vibración mecánica ultrasónica y la mejora del flujo debido a la transmisión acústica.

Para los transductores con una alta potencia (1000 W) y frecuencias variadas (18, 22 y 25 kHz), al aumentarse los valores de frecuencia se obtuvieron los valores más altos de PRR es decir

la frecuencia más alta (25 kHz) dio los mejores resultados PRR de 0,3 de igual forma, al usar potencias más bajas (30 kHz y 600 W), (40 kHz y 600 W) y (50 kHz y 200 W) la frecuencia mas alta de 50 kHz obtuvo el mayor valor de PRR de 0,1.

Estos resultados revelan que el aumento de frecuencia conduce a tres cambios importantes en las superficies rocosas, incluida una mayor severidad de la rugosidad de la superficie, un incremento de la profundidad de las micro cavidades y también la creación de microfracturas que conectan estas cavidades, se puede concluir que los mecanismos dominados de la limpieza son la vibración mecánica y la cavitación.

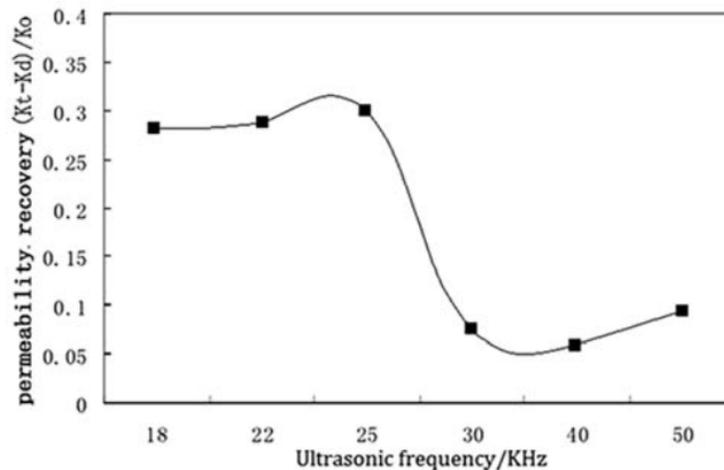
Adicionalmente, se evidencia que al aumentar la frecuencia y potencia la combinación de estos dos factores propician la eficacia de método acústico. Posiblemente el mecanismo parece ser el aumento de la re-suspensión o la dispersión de la parafina debido a la agitación mecánica. En los poros se puede generar una intensidad acústica a través de microcorrientes acústicas el cual es el mecanismo origen de esta agitación mecánica.

Según la prueba y análisis hechos por Zhou & Wang, en (2020), también confirman las conjeturas propuestas anteriormente, en esa investigación se usaron tres tipos de núcleos específicamente con daño de formación de únicamente precipitados de parafinas, los resultados en los núcleos fue similar al exponerse al tratamiento ultrasónico, se expusieron a 6 transductores (18 kHz y 1000 W), (22 kHz y 1000 W), (25 kHz y 1000 W), (30 kHz y 100 W), (40 kHz y 100 W) y (50 kHz y 200 W) el transductor #3 con una menor frecuencia obtuvo los mejores resultados en remoción de depósitos de parafina, con una recuperación de permeabilidad de las muestras 31,0%,

27,6% y 23,5%, respectivamente. En su análisis indicaron que una frecuencia ultrasónica más alta es beneficiosa para la evitar la depositación de parafinas.

Debido a que la pérdida de energía ultrasónica es directamente proporcional a la frecuencia, para los investigadores fue sorprendente ¿Por qué el transductor #3 tiene un mejor efecto para inhibir las parafinas? esto quiere decir que la frecuencia ultrasónica es un factor determinante para la efectividad de la técnica. Sin embargo, su rango debe no ser demasiado alto y mantenerse dentro de un límite razonable. Como se ve en la gráfica (Figura 53) el rango en donde se obtuvo mejor recobro de permeabilidad.

Figura 53. El efecto de la frecuencia ultrasónica.



Nota. El efecto resultante de la frecuencia ultrasónica en la eliminación del tapón de formación de depósitos de cera de parafina. Tomado de Zhou & Wang (2020) A comparison study on the removal of paraffin wax deposition plug by ultrasound treatment, chemical demulsifier and combination of ultrasound and chemical demulsifier.

7.1.2 Factor de la potencia ultrasónica

En los documentos investigados los resultados dados al exponer la muestra un ultrasonido de alta potencia fueron más efectivos, según los análisis y resultados hechos por Zhou & Wang, (2020) describen que los tres transductores con mayor valor de potencia (1000 W) arrojaron los mejores resultados, estos valores de potencia evidenciaron que la potencia nominal del transductor es otro factor importante para determinar la efectividad del tratamiento ultrasónico para inhibir la formación de depósitos de cera de parafina. En consecuencia, los resultados muestran que una forma de mejorar la eficiencia de eliminación de depósitos de cera parafínica es aumentar la potencia nominal del transductor de ultrasonido.

7.1.3 Efecto del tiempo en el tratamiento

De las pruebas estudiadas cuando se emplea un mayor tiempo de tratamiento se encuentran diversos resultados sin embargo, en conjunto al postergar el tiempo de exposición para la inhibición de parafinas se tiende a estabilizar el aumento de temperatura, que proporciona en resumidas palabras la habilidad de “alejarse” del punto de fluidez, es decir cuando el calor generado por el ultrasonido aumenta, la temperatura central del fluido suministra el calor suficiente para evitar que el la temperatura descienda al punto de fluidez, proporcionando al crudo la reincorporación de su habilidad para fluir y no solidificarse.

7.1.3.1 Tiempo aplicado en subsuelo

Según las prueba y análisis de H. Xu & Pu, (2013) el efecto de la onda ultrasónica sobre la eliminación de la formación de depósitos de parafina fue mejor con el aumento del tiempo de tratamiento acumulado. Esto está relacionado con las propiedades de la parafina. A su vez una

temperatura elevada en el crudo facilita su movilización internamente por dentro de los poros interconectados, y la alta temperatura del núcleo mantiene estable la permeabilidad. Reflejando una vez más que el efecto de la inhibición de depósitos de parafina en la muestra es proporcional a la energía ultrasónica suministrada.

Finalmente, en las pruebas de H. Xu & Pu, (2013) el calor aumenta en el núcleo a medida que se posterga el tiempo de tratamiento ultrasónico. También se concluye que una mejora del PRR se produce a partir de un rango de tiempo mayor a 60 min, pero menor a 100 min, ya que no se produce mejora real en fluidez luego de los 100 min. En la (Tabla 9) H. Xu & Pu, (2013) se puede evidenciar como al superar los 100 min la efectividad del método se ve opacada por atenuación de la energía ultrasónica a partir de la cavitación severa ocasionada en la columna de agua entre el extremo de la fuente del núcleo y el transductor ultrasónico.

La irradiación prolongada provoca un efecto de ebullición, junto a de cavitación brusca, que puede producir una alta presión en el extremo de salida del núcleo. El resultado lleva a la conclusión de que el intervalo de tiempo óptimo de la aplicación de la irradiación ultrasónica debe seleccionarse no más de 100 m UST.

Tabla 9. Efecto del tiempo en la permeabilidad.

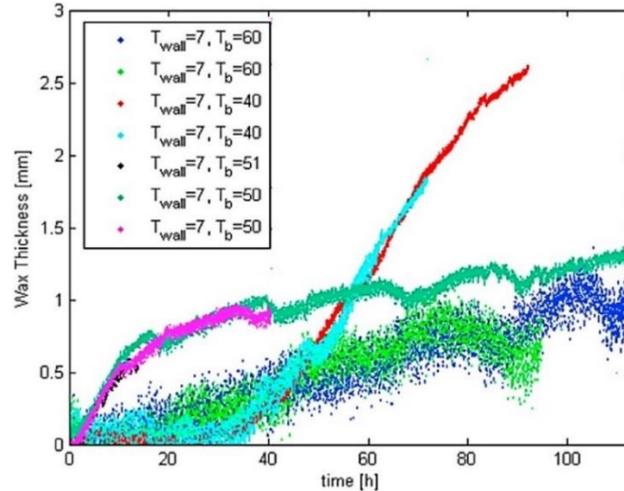
Efecto del tiempo ultrasónico en la tasa de recuperación de la permeabilidad						
PRR	20 min	40 min	60 min	80 min	100 min	120 min
Tipo de daño						
$30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$						
Escama inorgánica	0.1278	0.2384	0.3407	0.347	0.3592	0.3515
Formación de depósitos de parafina	0.182	0.241	0.2995	0.332	0.3371	0.332

Lodo de perforación	0.158	0.234	0.2639	0.2795	0.2864	0.2796
Finos In situ	0.136	0.175	0.213	0.2434	0.2526	0.2499
Polímero	0.087	0.131	0.1986	0.2126	0.2173	0.2137
80x10⁻³ μm²						
Escama inorgánica	0.15	0.2535	0.3625	0.3749	0.3755	0.3551
Formación de depósitos de parafina	0.142	0.232	0.2738	0.2889	0.2882	0.2951
Lodo de perforación	0.1201	0.182	0.2389	0.245	0.2576	0.2481
Finos In situ	0.11	0.15	0.227	0.2216	0.2442	0.2414
Polímero	0.101	0.122	0.164	0.1732	0.1767	0.1727
150x10⁻³ μm²						
Escama inorgánica	0.1721	0.2758	0.3738	0.4304	0.4389	0.4461
Formación de depósitos de parafina	0.096	0.167	0.2536	0.2675	0.2789	0.294
Lodo de perforación	0.0606	0.113	0.2014	0.211	0.2145	0.2024
Finos In situ	0.0902	0.135	0.2432	0.2323	0.2419	0.2379
Polímero	0.068	0.087	0.1466	0.1499	0.1535	0.1553

Nota. Tomado de H. Xu & Pu, (2013) Removal of Near-wellbore Formation Damage by Ultrasonic Stimulation.

7.1.3.2 Tiempo aplicado en tuberías de superficie

Según la reproducción experimental y los análisis de Van Der Geest et al., (2018), en el tiempo de 80 a 100 minutos se puede evidenciar una disminución del espesor de cera parafínica en tuberías debido a la acumulación del tiempo en el tratamiento ultrasónico, dado ello se evidencia similitud en el rango de tiempo común para tratar la depositación de parafinas y que sea efectiva, como se muestra en la (Figura 54).

Figura 54. Espesor parafina vs tiempo.

Nota. Obtenido de Alnaimat & Ziauddin, (2020) Wax deposition and prediction in petroleum pipelines quien cito a Isono et al., (1991).

7.1.3.3 Coincidencia resultados tiempo de tratamiento subsuelo y superficie

Tanto en las pruebas hechas para inhibición de parafinas con ultrasonido en subsuelo por H. Xu & Pu, (2013) y superficie por Van Der Geest et al., (2018), Según el análisis se encontraron coincidencia alentadoras en la determinación de la duración de tiempo óptima para la aplicación de la técnica de ultrasonido en parafinas, con lo que se demuestra que la acumulación de tiempo para aumentar el calentamiento del crudo, es efectiva para evitar que la temperatura del crudo sea cercana al del punto de fluidez.

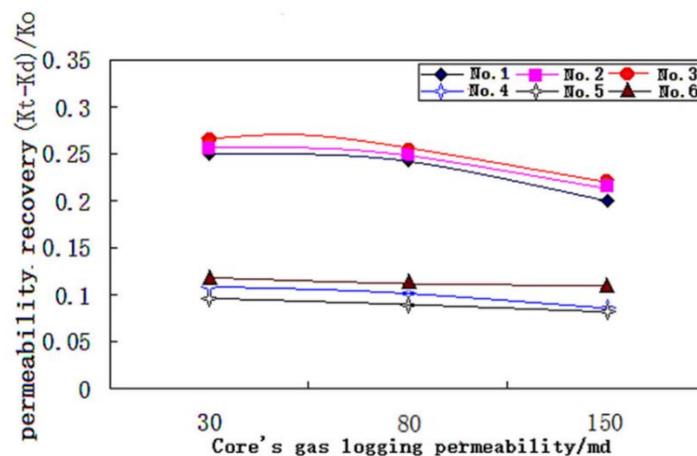
7.1.4 Eficacia del ultrasonido con respecto a la permeabilidad del núcleo

Según H. Xu & Pu, (2013) después de la radiación ultrasónica, las permeabilidades se restauran casi a su estado inicial sin daños. La posible explicación es que el tratamiento ultrasónico al ocasionar altas temperaturas y presiones pueden descomponer cadenas largas de parafina y

desalojar las partículas finas que bloquean los poros de la garganta, estas partículas de los precipitados fluyen lo que resulta en el aumento de la permeabilidad y disminución de viscosidad para aumentar la movilidad.

En los resultados de pruebas obtenidos por Zhou & Wang, (2020), se estudiaron los efectos del registro de permeabilidad-gas-inicial sobre núcleos para la eliminación de tapones de cera de parafina utilizando diferentes transductores ultrasónicos. Los resultados del experimento se muestran en la gráfica (Figura 55).

Figura 55. Efecto de la permeabilidad.



Nota. Efecto de la permeabilidad del registro de gas inicial del núcleo sobre la eliminación del tapón de cera de depósito de parafina utilizando diferentes transductores ultrasónicos. Obtenido de Zhou & Wang (2020) A comparison study on the removal of paraffin wax deposition plug by ultrasound treatment, chemical demulsifier and combination of ultrasound and chemical demulsifier.

Según la gráfica (Figura 55), los efectos de la remoción en el tapón de formación de depósitos de parafina después del tratamiento ultrasónico se agravan a medida que se aumenta la

permeabilidad. Esto se debe a que el estado físico de la cera de parafina después del tratamiento ultrasónico se encuentra prácticamente en estado fluido en vez de partículas sólidas.

Citando al efecto de Bernoulli se comprende que la presión del fluido es inversamente proporcional a la velocidad del desplazamiento del fluido en los poros, esto cuando la energía total del fluido en movimiento es constante, lo que podría explicar el fenómeno de la disminución de la velocidad de flujo del fluido, luego del tratamiento ultrasónico se ocasiona el aumento del diámetro de los poros del núcleo que provoca una disminución en la velocidad de flujo y por consiguiente se reduce el efecto de limpieza del pozo y se tiende a precipitar la parafina.

De la misma manera se promueve la reacción entre líquido / líquido y líquido / medio poroso. Por lo tanto, la estructura del material de taponamiento será más estable, lo que aumenta la dificultad de eliminar el daño (Xu & Pu, 2013). Dadas las deducciones anteriores se puede ayudar a entender mejor la repercusión de la permeabilidad en la operación de campo con la técnica de tratamiento ultrasónico en la zona cercana al pozo.

7.1.5 Efecto de la estimulación sónica sobre la viscosidad

Según Zhiqi Wang et al., (2006) el efecto del tratamiento ultrasónico sobre las propiedades reológicas del crudo parafínico son muy importante para la comprensión del manejo y tratamiento de la técnica en crudos parafínicos de parafinas. Por ello es crucial caracterizar la reología del fluido.

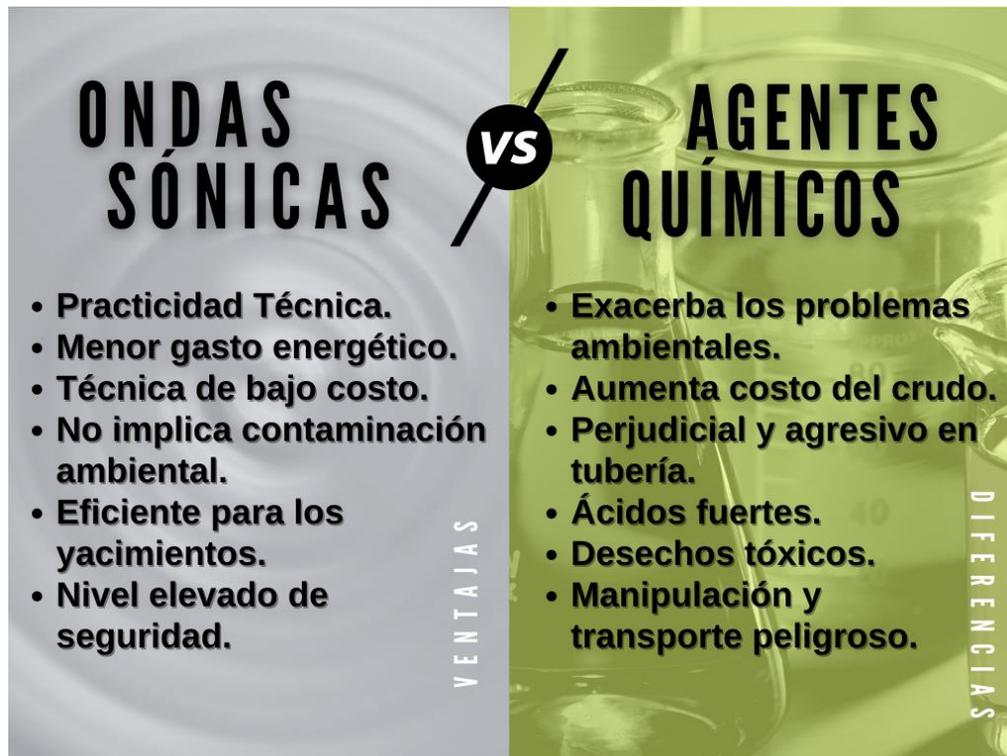
En la investigación se prepararon dos tipos de lechadas de coque de petróleo y aceite de parafina sin aditivos a 50 ° C, y se investigó el efecto del tratamiento ultrasónico en la viscosidad aparente y la estabilidad estática. A partir de los resultados se discernió que el tratamiento ultrasónico propicio la disminución de la viscosidad aparente de ambas suspensiones, pero mejoró su estabilidad estática evidentemente y con bajo efecto en el comportamiento reológico.

La eficacia de la irradiación ultrasónica sobre la viscosidad aparente y la estabilidad estática fue más notable con una mayor concentración de coque de petróleo. Además, se encontró que la viscosidad aparente decayó y la estabilidad estática se optimizó cada vez que aumentaba la duración del tratamiento. En las condiciones experimentales, una duración de 4 min de tratamiento ultrasónico fue un valor óptimo para disminuir la viscosidad aparente y mejorar la estabilidad estática.

De acuerdo y a la recopilación de las técnicas investigadas se deduce que, al reducir la precipitación de parafinas, la red cristalina de la unión de las moléculas de parafinas no actúa sobre el crudo para aumentar su viscosidad y reducir su fluidez, por lo que están intrínsecamente relacionados la inhibición de parafinas a través de estimulación sónica con respecto a la reducción de viscosidad en el crudo.

7.1.6 Comparación tratamiento ondas ultrasónica y agentes químicos

Figura 56. Cuadro comparativo técnicas de inhibición de parafina.



Nota. Fuente Autores

A pesar de los resultados óptimos que genera la inyección de agentes químicos, se han evidenciado falencias recurrentes al aplicar esta técnica que en campo se convierten tediosa su aplicación, ya que sus repercusiones en los daños que puede propiciar en yacimiento, tuberías y facilidades generan costos excesivos de mantenimiento y reemplazo, sumado a las desventajas que se visualizan en el diagrama comparativo (Figura 56), por no mencionar que no es amigable con el medio ambiente, todo ello sumado aumenta la urgencia irrevocable de su reemplazo en tiempos en donde la transición energética y la rentabilidad de la producción son factores fundamentales en el ejercicio actual de la explotación petrolera.

Sumado a los gastos generados por el almacenamiento de las sustancias químicas, su almacenamiento en tanques y la infraestructura de transporte, más el servicio prolongado de ellos que sin duda afecta la estabilidad y duración de los dispositivos subterráneos por corrosión y la permeabilidad de la formación.

Esta necesidad de inventar nuevas técnicas físicas inhibición de parafinas, son un alcance óptimo que evita la contaminación ambiental. La ventaja significativa de estas técnicas es que requiere una sustancial reducción de energía en comparación a las técnicas químicas convencionales con inyección de agentes químico.

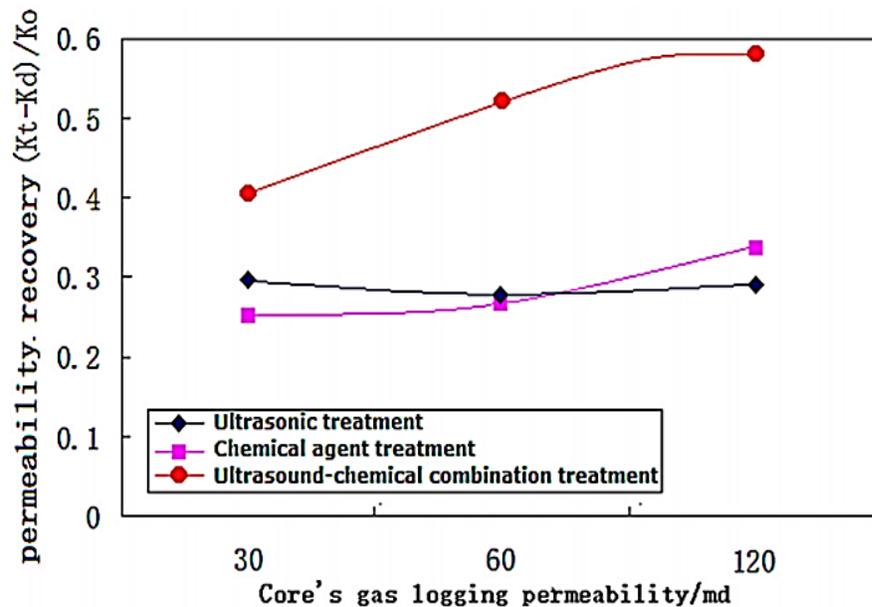
El mecanismo de acción del ultrasonido puede cambiar las fuerzas capilares, es decir se puede cambiar la adherencia entre la roca y el fluido, además tiene la habilidad eliminar el daño de la formación alrededor del pozo mediante el uso de vibraciones generadas por estimulación por ultrasonido en el yacimiento, lo que favorece la explotación petrolera, y su efectividad en tuberías para reducir la precipitación de cristales de parafinas que generan una esquema alrededor de la carcasa interior de la tubería evitando la obstrucción de estas en ambientes fríos.

7.1.7 Combinación de técnica ultrasónica e inyección de agentes químicos

Según las pruebas y análisis de (Zhou & Wang, 2020) la inyección de agentes químico como única técnica de aplicación, no tiene mayor efecto que el tratamiento ultrasónico para eliminar el depósito de parafina. Asimismo, desde el punto de vista de reducir el costo operacional y rentable el método de inyección química puede ser reemplazado por la técnica de tratamiento ultrasónico para la remoción del tapón de formación de depósitos de parafina, ya que debido al

análisis de los resultados que se muestran en la (Figura 57). El efecto de la eliminación de los depósitos de parafina mediante la combinación de la técnica de ultrasonidos y productos químicos es superior al método que utiliza la inyección de un agente únicamente químico o solo el tratamiento ultrasónico.

Figura 57. Comparación agente químico, tratamiento ultrasónico y la combinación.



Nota. Comparación del agente químico, el tratamiento ultrasónico y la técnica de combinación para eliminar el tapón de formación de depósitos de cera de parafina. Tomado de (Zhou & Wang, 2020) A comparison study on the removal of paraffin wax deposition plug by ultrasound treatment, chemical demulsifier and combination of ultrasound and chemical demulsifier.

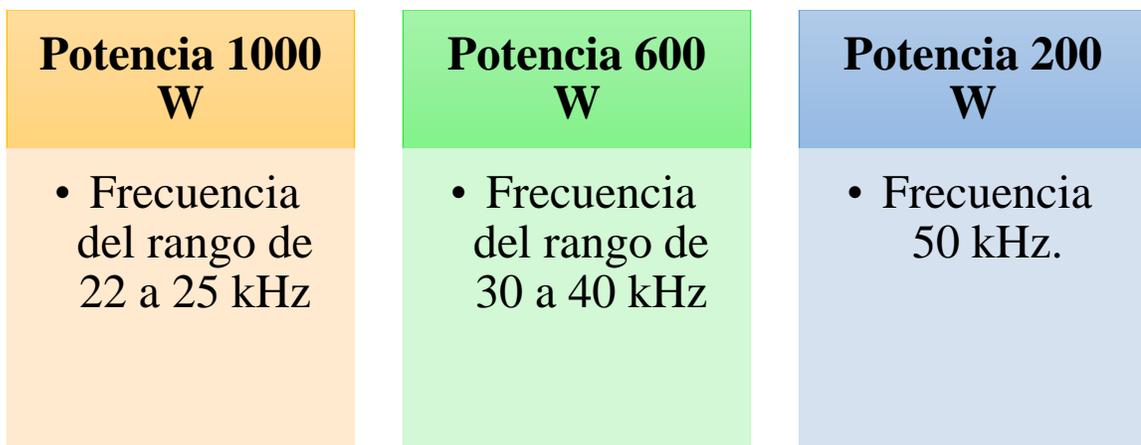
7.2 Cuadros de los valores óptimos de los factores que afectan la eficiencia de la estimulación sónica en la inhibición de parafinas.

A partir de la revisión, análisis e investigación de las tecnologías y pruebas usadas para crear ondas sónicas ESOTM, se determina que las ondas ultrasónicas (mayores a 20 kHz) son las efectivas para estimular los cristales de parafina e inhibirlos.

Así mismo en el presente capítulo se mencionaron los rangos adecuados de operación de las tecnologías generadoras de ondas ultrasónicas:

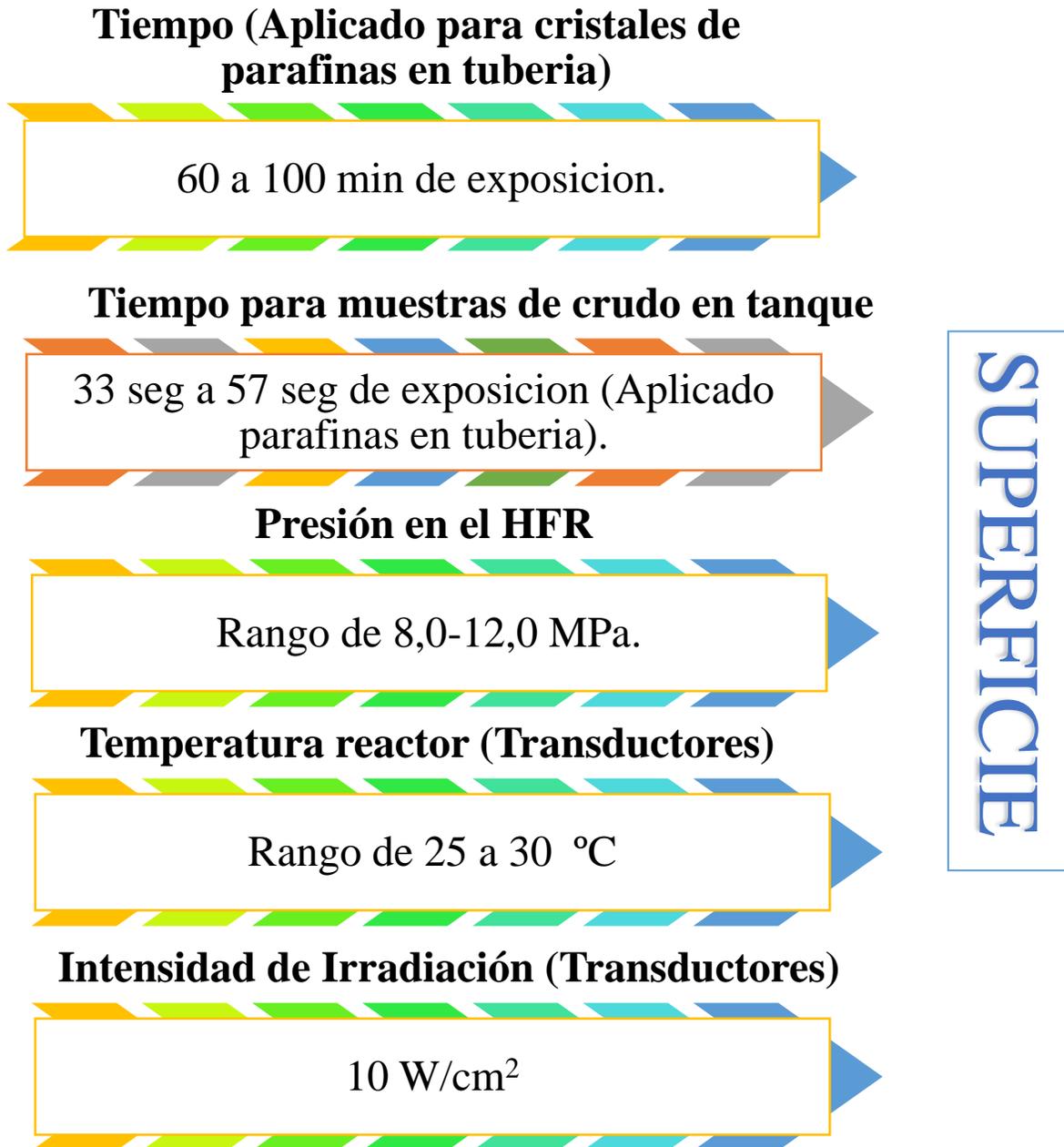
- Valores óptimos de los parámetros para tener en cuenta en la interacción ultrasónica con las parafinas, deducidos por el análisis de las pruebas a nivel mundial en prospecto a ser aplicadas en Superficie:

Figura 58. Potencia.



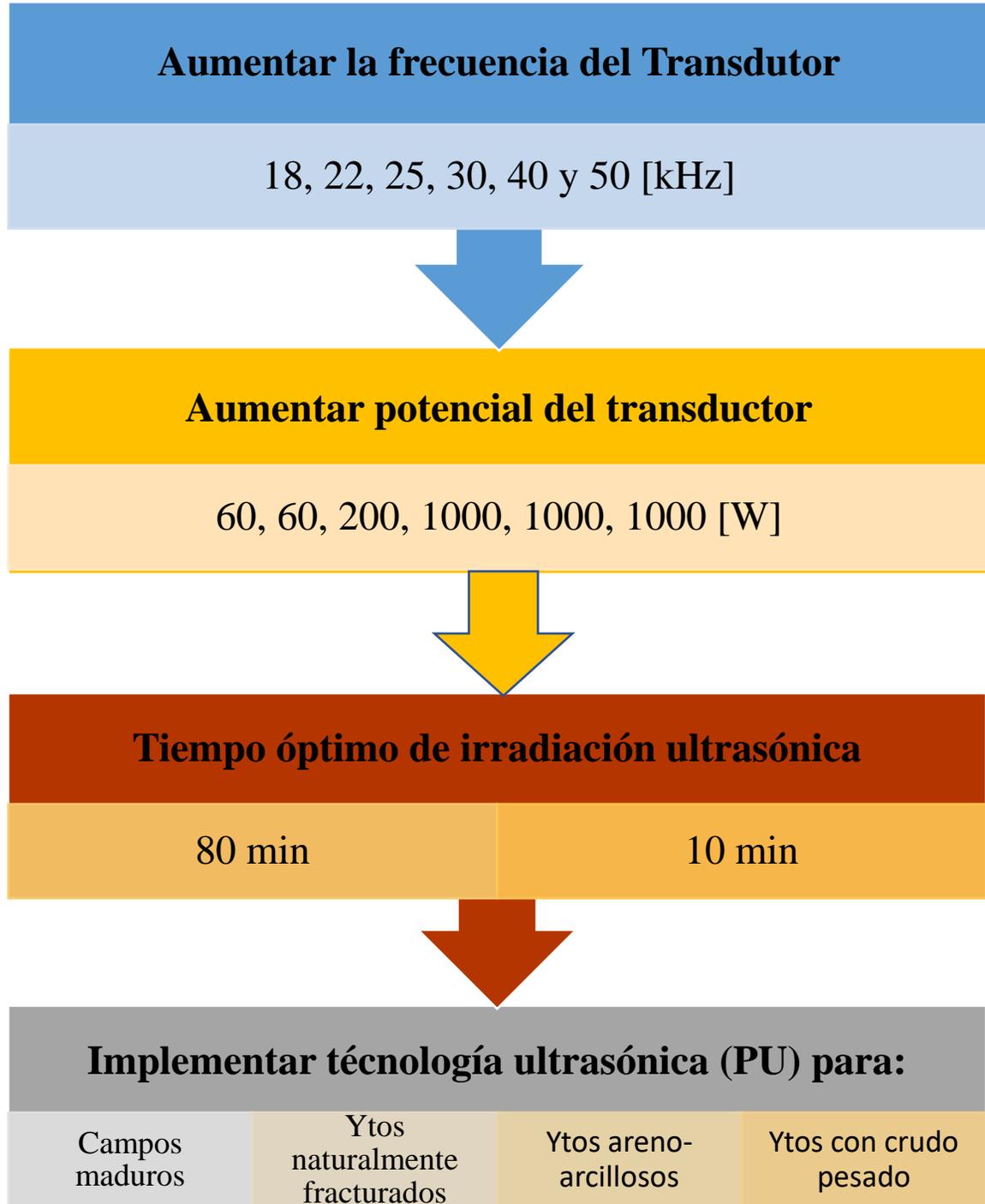
Nota. Fuente autores

Figura 59. Rango tiempo, presión, temperatura e intensidad.



Nota. Fuente autores

- Valores óptimos de los parámetros a tener en cuenta en la interacción ultrasónica con las parafinas, deducidos por el análisis de las pruebas a nivel mundial en prospecto a ser aplicadas en subsuelo:

Figura 60. Aumento de frecuencia, potencia, tiempo y PU.

Nota. Fuente autores

8. Conclusiones

El estudio de las características moleculares de las parafinas permitió comprender como su estructura molecular con tendencia a formar largas cadenas y su aparente sensibilidad a los cambios de temperatura y presión cercanos al punto de cristalización y fluidez, son la principal causa de su natural tendencia a precipitarse y formar redes cristalinas ante cambios termodinámicos del ambiente que la circunda.

El análisis del proceso físico químico que origina la inhibición ultrasónica en parafinas. proporciono la base teórica para la comprensión del fenómeno de cavitación acústica, el cual es el mecanismo con mayor poder en el proceso de inhibición, desencadenando transformaciones y alteraciones en el crudo parafínico, como los picos de presión e implosiones abruptas que sucesivamente provocan la liberación de energía y el rompimiento molecular de los cristales y depósitos de parafina.

En síntesis, la cavitación acústica provoca la liberación de energía masiva en el medio, emulando un método de calentamiento del crudo de “forma térmica”, pero a través de la estimulación sónica ESOTM, ya que el resultado es el mismo; un crudo que puede llegar en un tiempo corto a su punto de fusión, reduciendo por consiguiente su viscosidad por el rompimiento de los enlaces moleculares de la parafina hasta recuperar su fluidez.

Por medio del análisis de tecnologías a nivel mundial en inhibición de parafinas con estimulación sónica a partir de pruebas experimentales, se identificó que varios autores coincidían en la repetición de similares datos de valores para parámetros de aplicación de las pruebas, estos

resultados se detallan generalmente como el uso de una frecuencia en un rango de 20 a 25 kHz, potencia entre el rango de 200 a 2000 W, tiempo de aplicación en pruebas de flujo en tubería 60 a 100 min y en pruebas de muestras de crudo en tanque en un rango de 33 a 57 s, usando estos valores referenciales y teniendo en cuenta la tecnología usada, estos podrán ser clave a futuro para ser utilizados a miras de desarrollar proyectos similares en campos colombianos con alto crudo parafínico.

La estabilidad de las parafinas en transporte por oleoductos es frecuentemente afectada por la transferencia de calor que esta realiza a las tuberías en las que se transporta enfriándose y propiciando así su cristalización y formación de depósitos.

Según la revisión de la investigaciones analizadas a nivel mundial, la tecnología PU fue reconocida por los autores de este proyecto como la más optima en desempeño al estimular con ultrasonido, debido a que con su condiciones de operación (20 kHz de frecuencia, 1000 W de potencia y con un poder de densidad: 9 kW/m^2), obtuvo resultados magistrales evidenciando un aumento considerable en la producción de petróleo a prueba en un 300% y 450 % para dos pozos que se estimularon con esta tecnología.

Entre mayor sea la energía invertida por potencia, frecuencia y tiempo de exposición la alteración en el crudo será más efectiva debido a su compenetración.

Se observo a nivel mundial, avances de investigación en la técnica de inhibición de parafinas con ultrasonido, destacándose las investigaciones realizadas por los estudiantes y profesionales de países como China, Rusia, Estados Unidos y México.

La técnica del ultrasonido aplicada exclusivamente en la industria puede generar resultados efectivos de inhibición en parafinas, adicionalmente su efectividad se incrementaría al combinar la técnica con la incorporación de agentes químicos al proceso de inhibición de parafinas.

La practicidad de la técnica le concede beneficios económicos y ambientales, llamativos para la industria a partir de su implementación en campos de producción maduros.

De los efectos desatados en el crudo parafínico debido a la interacción del ultrasonido, se destaca el fenómeno fisicoquímico que, en su conjunción proporcionan una alteración termodinámica de la temperatura central del crudo, elevándola a tal punto que imposibilita que aquella descienda al punto de fluidez, al ser expuesto a ondas sónicas con una alta intensidad de energía.

9. Recomendaciones

A partir de las conclusiones de la investigación se recomienda indagar en los temas a continuación relacionados a la técnica de inhibición de parafinas con ultrasonido, con un mecanismo de acción y objetivos de aplicación diferentes al investigado en el documento, pero a fin a la teoría y tecnología:

- Se recomienda buscar más investigaciones a nivel mundial que promuevan el control de las parafinas a través de la estimulación sónica.
- Técnica de aplicación de ultrasonidos para mejorar y optimizar la solubilidad de surfactante y reducir la adsorción del surfactante en la matriz de la roca.
- Mecanismos precisos de emulsificación y desemulsificación causados por el ultrasonido en medios porosos, con el fin de ser usados como nueva técnica de recobro mejorado EOR.
- El ultrasonido es una de las técnicas que se utilizan en la industria petrolera para la desemulsificación de la emulsión de aceite / agua. Por lo tanto, las condiciones en las que la emulsificación se vuelve dominante sobre la desemulsificación son parámetros cuestionables de gran interés y de los cuales podría generar investigaciones que aporten al desarrollo de la técnica en procesos de inyección de polímeros y recobro mejorado.

Referencias Bibliográficas

- Abramov, V. O., Abramova, A. V., Bayazitov, V. M., Mullakaev, M. S., Marnosov, A. V., & Ildiyakov, A. V. (2017). Acoustic and sonochemical methods for altering the viscosity of oil during recovery and pipeline transportation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 35, 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.017>
- Abramova, A., Abramov, V., Bayazitov, V., Gerasin, A., & Pashin, D. (2014). Ultrasonic Technology for Enhanced Oil Recovery. *Engineering*, 06(04), 177–184. <https://doi.org/10.4236/eng.2014.64021>
- Addison, G. E. (1984). *Paraffin Control More Cost-Effective*. <https://doi.org/10.2118/13391-MS>
- Alnaimat, F., & Ziauddin, M. (2020). Wax deposition and prediction in petroleum pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 184(August), 106385. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106385>
- Ariza-León, E., Molina-Velasco, D.-R., & Chaves-Guerrero, A. (2014). Review of studies on asphaltene-wax interaction and the effect thereof on crystallization. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 5(5), 39–53.
- ARIZA, E., Calvete, G., & Zapata, J. (2008). Determinación del umbral de cristalización de las parafinas en el crudo del Campo Colorado. *Director: Fernando Enrique Calvete Gonzalez. Tesis de Maestría. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería de Petróleos.*
- Awad, S. B. (1996). Ultrasonic cavitations and precision cleaning. *Precision Cleaning*, 4(11), 12–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10916466.2013.831873>
- Bakker, T., & Ivannikov, V. (2002). *Cavitation for Effective Well Cleaning*. <https://doi.org/10.2523/75352-MS>
- Barrera Suárez, L. P., & Coronel Picón, M. M. (2014). *Desarrollo y procedimientos para la*

utilización de técnicas de ensayos no destructivos con ultrasonido para inspección de tuberías.

Bern, P. A., Withers, V. R., & Cairns, R. J. R. (1980). *Wax Deposition in Crude Oil Pipelines* .
<https://doi.org/10.2118/206-1980-MS>

Bernyk, I., Luhovskyi, O., & Nazarenko, I. (2018). Effect Of Rheological Properties Of Materials On Their Treatment With Ultrasonic Cavitation. *Materiali in Tehnologije*, 52(4), 465–468.
<https://doi.org/10.17222/mit.2017.021>

Bone, J. H. A. (1865). *Petroleum and petroleum wells, with a complete guide book and description of the oil regions of Pennsylvania, West Virginia, Kentucky, and Ohio* (pp. vi, 153 p.). J. B. Lippincott. <file://catalog.hathitrust.org/Record/011609621>

Brown, W. Y. (1940). *Prevention and Removal of Paraffin Accumulations* .

Bucaram, S. M. (1967). An Improved Paraffin Inhibitor. *Journal of Petroleum Technology*, 19(02), 150–156. <https://doi.org/10.2118/1544-pa>

Busnaina, A. A. (2019). *1994 Precision-Cleaning Ultrasonic-Megasonic-Theory-and-Experiment. April 1994.*

Calles Martín, J. A. (2002). *Hidroisomerización de n-parafinas con catalizadores tipo zeolita.* Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones.

Castillo González, S. A., & Inostroza Hernández, M. J. (2013). *Ensayos No Destructivos Mediante.*

Champion, B., van der Bas, F., & Nitters, G. (2004). The Application of High-Power Sound Waves for Wellbore Cleaning. *SPE Production & Facilities*, 19(03), 113–121.
<https://doi.org/10.2118/82197-PA>

Dong, H., Zhang, J., Zhu, B., Zhang, G., & Wu, J. (2010). Experimental study on ultrasonic viscosity-reduction method of crude oil. *Shiyou Xuebao/Acta Petrolei Sinica*, 31(3), 486–489.

- En, P., & Crudo, E. L. (2012). Aplicación De Un Tratamiento Químico Para El Control De Parafinas En La Tubería De Producción En El Crudo Del Campo Escuela Colorado. *Revista Fuentes*, 10(1), 5–12.
- Ershov, M. A., Baranov, D. A., Mullakaev, M. S., & Abramov, V. O. (2011). Reducing viscosity of paraffinic oils in ultrasonic field. *Chemical and Petroleum Engineering*, 47(7–8), 457–461. <https://doi.org/10.1007/s10556-011-9492-0>
- Fomitchev-Zamilov, M. (2015). Novel upgrading technology cut diluent use, capital costs. *Oil Gas J*, 113(2), 66.
- García, C. D. (2008). ¿CAVITAR O NO CAVITAR LA INEVITABLE UBICUIDAD DE LAS BURBUJAS? 90.
- Granados Cáliz, J., & Flores Avila, F. S. (2013). Prueba tecnológica de estimulación de pozos petroleros mediante la tecnología ultrasónica (PU) en pozos del AIATG. *Ingeniería Petrolera*, 53(1), 6–26.
- Hamida, T., & Babadagli, T. (2005). *Effects of Ultrasonic Waves on Immiscible and Miscible Displacement in Porous Media* . <https://doi.org/10.2118/95327-MS>
- Hector Mahecha (Uralita Sas. (2003). La cavitación en sistemas de tuberías. *Uralita Folio*, 1, 36.
- Hunt Jr., E. B. (1962). Laboratory Study of Paraffin Deposition. *Journal of Petroleum Technology*, 14(11), 1259–1269. <https://doi.org/10.2118/279-PA>
- Jokob B. U. Haldorsen, David Linton Johnson, Tom Plona, Bikas Sinha, H.-P. V. and K. winkler. (2006). Acústica de pozo Las ondas acústicas de los pozos pueden ser tan simples o tan complejas como las. *Oilfield Review*, 18(2), 36–45.
- Li, J., Qi, D., & Wang, Z. (2019). Research on ultrasonic paraffin deposition inhibition for crude oil extraction and transportation. *Petroleum Science and Technology*, 37(1), 61–67.

<https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1493500>

Longoria, K. (2020). *fineartamerica*. Black and White Oil Bubbles.

<https://fineartamerica.com/featured/black-and-white-oil-bubbles-keelie-longoria.html>

Misra, S., Baruah, S., & Singh, K. (1995). Paraffin problems in crude oil production and transportation: a review. *SPE Production and Facilities*, 10(1), 50–54.

<https://doi.org/10.2118/28181-pa>

Morris, B., & Spalding, J. J. C. (1958). *Process for controlling wax deposition*. Google Patents.

O'Donoghue, M. (1984). The ultrasonic cleaning process. *Microcontamination*, 2 (5).

Olaya-Escobar, D. R., Quintana-Jiménez, L. A., González-Jiménez, E. E., & Olaya-Escobar, E. S.

(2020). Ultrasound Applied in the Reduction of Viscosity of Heavy Crude Oil. *Revista Facultad de Ingeniería*, 29(54), e11528.

<https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.11528>

Palaev, A. G., & Dzhemilev, E. R. (2020). Research of efficiency of influence of ultrasonic treatment on asphalt and paraffin oil deposits. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 862(3). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/3/032081>

Palou, A., Cruz, J., Blanco, M., Larraz, R., Frontela, J., Bengoechea, C. M., González, J. M., &

Alcalà, M. (2014). Characterization of the composition of paraffin waxes on industrial applications. *Energy and Fuels*, 28(2), 956–963. <https://doi.org/10.1021/ef4021813>

Phased array characteristics. (n.d.).

Planas, O. (2020). *Energia Nuclear*. Transmisión de La Energía Térmica. <https://energia-nuclear.net/energia/energia-termica>

Prozorova, I. V., Litvinets, I. V., Volkova, G. I., Morozova, A. V., & Kazantsev, O. A. (2018).

Effect of ultrasonic treatment and polymer additive on structural-mechanical properties of

- solutions of paraffinic hydrocarbons. *AIP Conference Proceedings*, 2051(December), 3–7.
<https://doi.org/10.1063/1.5083489>
- Rodriguez, L., & Castañeda, M. (2001). Estudio de los Fenómenos de Cristalización de Parafinas en el Comportamiento Fluidodinámico de Crudos Parafinicos-Fase 1. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 2(2), 65–79.
- S. Suslick, K. (1998). Sonochemistry. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (Fourth, pp. 516–541). Jhon Wiley & Sons.
<https://suslick.scs.illinois.edu/documents/koencyc1998516.pdf>
- Sánchez, J. (2003). *Purificación de parafinas de petróleo por hidrogenación catalítica*.
<http://biblioteca.ucm.es/tesis/qui/ucm-t26589.pdf>
- Santos De La Cruz, E., Cancino Vera, N., Yenque Dedios, J., Ramírez Morales, D., & Palomino Pérez, M. (2014). El Ultrasonido Y Su Aplicación. *Industrial Data*, 8(1), 025.
<https://doi.org/10.15381/idata.v8i1.6153>
- Schlumberger. (2021a). Onda P. In *Oilfield Glossary*.
- Schlumberger. (2021b). Onda S. In *Oilfield Glossary*.
- Shock, D. A., Sudbury, J. D., & Crockett, J. J. (1955). Studies of the Mechanism of Paraffin Deposition and Its Control. *Journal of Petroleum Technology*, 7(09), 23–28.
<https://doi.org/10.2118/384-g>
- Speight, J. G. (2010). *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes* (1st ed.). Oxford: Elsevier Science & Technology.
- Speight, J. G. (2015). *Handbook of petroleum product analysis* (2nd ed., Vol. 1). Somerset: Wiley.
- Suslick, K. S. (1989). The Chemical Effects of Ultrasound. *Scientific American*, 260(2), 80–86.
<https://doi.org/10.1038/scientificamerican0289-80>

- Van Der Geest, C., Guersoni, V. C. B., Merino-Garcia, D., & Bannwart, A. C. (2018). Wax Deposition Experiment with Highly Paraffinic Crude Oil in Laminar Single-Phase Flow Unpredictable by Molecular Diffusion Mechanism. *Energy and Fuels*, 32(3), 3406–3419. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b00269>
- Venkatesan, R., Nagarajan, N. R., Paso, K., Yi, Y.-B., Sastry, A. M., & Fogler, H. S. (2005). The strength of paraffin gels formed under static and flow conditions. *Chemical Engineering Science*, 60(13), 3587–3598. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.02.045>
- Venkitaraman, A., Roberts, P. M., & Sharma, M. M. (1995). Ultrasonic Removal of Near-Wellbore Damage Caused by Fines and Mud Solids. *SPE Drilling & Completion*, 10(03), 193–197. <https://doi.org/10.2118/27388-PA>
- Wang, B., & Dong, L. (1995). *Paraffin Characteristics of Waxy Crude Oils in China and the Methods of Paraffin Removal and Inhibition* . <https://doi.org/10.2118/29954-MS>
- Wang, Zhenjun, Fang, R., & Guo, H. (2020). Advances in ultrasonic production units for enhanced oil recovery in China. *Ultrasonics Sonochemistry*, 60(March 2019), 104791. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104791>
- Wang, Zhenjun, Xu, Y., & Suman, B. (2015). Research status and development trend of ultrasonic oil production technique in China. *Ultrasonics Sonochemistry*, 26, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.01.014>
- Wang, Zhenjun, & Yin, C. (2018). Reprint of: State-of-the-art on ultrasonic oil production technique for EOR in China. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40(Pt B), 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.09.050>
- Wang, Zhiqi, Wang, H., & Guo, Q. (2006). Effect of ultrasonic treatment on the properties of petroleum coke oil slurry. *Energy and Fuels*, 20(5), 1959–1964.

<https://doi.org/10.1021/ef060144k>

Woo, G. T., Garbis, S. J., & Gray, T. C. (1984). *Long-Term Control of Paraffin Deposition* .

<https://doi.org/10.2118/13126-MS>

Xu, H., & Pu, C. (2013). Removal of Near-wellbore Formation Damage by Ultrasonic Stimulation.

Petroleum Science and Technology, 31(6), 563–571.

<https://doi.org/10.1080/10916466.2011.586959>

Zhou, L., & Wang, Z. (2020). A comparison study on the removal of paraffin wax deposition plug

by ultrasound treatment, chemical demulsifier and combination of ultrasound and chemical demulsifier. *Petroleum Science and Technology*, 38(9), 690–697.

<https://doi.org/10.1080/10916466.2020.1776732>

Ануфриев, Р. В., & Волкова, Г. И. (2016). Влияние ультразвука на структурно-механические

свойства нефтей и процесс осадкообразования. *Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг Георесурсов*, 327(10), 9.