

ESTUDIO DEL IMPACTO DEL ULTRASONIDO EN EL RECOBRO MEJORADO
DEL PETRÓLEO

ÁNGELA MARÍA GIRÓN OSPINO
BRIYITH VANESSA PEÑA PÉREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2021

ESTUDIO DEL IMPACTO DEL ULTRASONIDO EN EL RECOBRO MEJORADO
DEL PETRÓLEO

ÁNGELA MARÍA GIRÓN OSPINO
BRIYITH VANESSA PEÑA PÉREZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos

Director

Julio Cesar Pérez Angulo

Msc. Ingeniería de Hidrocarburos

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2021

DEDICATORIA

A Dios por permitirme cumplir cada una de las metas que me trace al iniciar mi carrera universitaria, por cuidarme cuando más vulnerable estaba y por darle el soporte a mi familia para poder sostenerme tanto económica como emocionalmente en un lugar que no era mi hogar.

A mi mamá por ser mi apoyo incondicional en todas las situaciones, por darme ánimos y confiar siempre en mí aun cuando ni yo lo hacía, por dejarme ser, por jamás interponer sus objetivos por encima de los míos, por ser mi motor para absolutamente todo lo que hago en la vida, por estar a mi lado a pesar de la distancia, por cuidar de cada uno de los aspectos de mi vida y por ser un ejemplo de superación, empoderamiento y fuerza.

A mi hermana por su amor infinito, por su protección y humildad, por estar siempre a mi lado, por ser el soporte que mamá siempre necesita, por armarme la maleta cada que me iba y por ser mi cómplice en todo.

A mi familia por confiar en mí, por apoyarme desde el primer momento que decidí estudiar en la distancia y aun así siempre supe que ellos estaban para mí, por darle el apoyo a mi mamá, por recibirme con tanto amor cada que llegaba y por jamás perder la fe en mí.

A mi ángel en el cielo, porque jamás me imaginé que no iba a verme cumplir este logro, por el apoyo más incondicional que recibí de nadie nunca, por cuidarme como a tu hija y por hacerme feliz el tiempo que estuvimos juntas.

A mis amigos de la universidad por estar conmigo durante todo este camino, a Tati y a Pipe por ser incondicionales durante todo el proceso, por ser mis hermanos, por estar siempre a mi lado y nunca dejarme vencer, por todos los trasteos que hicimos y por haberme hecho mejor persona, a Carlos, Andrés y Santiago por haberme hecho parte de ustedes en el momento que lo necesité, por cuidarme y ayudarme siempre, por cada risa, salida y comida que compartí con ustedes, gracias por todo, a Julián, Jeison y Kevin por ser mis compañeros de carrera, por estar juntos desde el principio hasta el fin, por cada logro académico cumplido juntos y por los que vendrán, gracias por todo.

A mi compañera de tesis Vane, por estar conmigo desde el principio, por ser mi compañera en cada cosa, en cada viaje y en cada momento, por ayudarme a superar uno de los momentos más difíciles y porque no pude haber escogido una mejor compañera de tesis.

Angela M. Girón O.

DEDICATORIA

Dedicado especialmente a Dios por darme la oportunidad de culminar una de mis mayores metas propuestas en la vida, un logro alcanzado gracias a la dedicación, constancia y amor por lo que se hace.

Igualmente, este trabajo de grado está dedicado a mis padres Ada Yolanda y Hugo David, porque son ellos la mayor motivación en mi vida, me impulsan a sentir orgullo de ejercer mi rol en la sociedad y a lo largo de este camino me apoyaron en cada decisión tomada.

Finalmente, dedicado a mi compañera de tesis, Ange, con quien empezamos juntas este camino lleno de experiencias, felicidades, apoyo mutuo y mucha responsabilidad para el día de hoy poder escribir y dejar un aporte significativo a la industria y una lección de vida en nombre de la amistad.

Briyith V. Peña P.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirnos lograr cada logro que nos propusimos hasta el momento, por cuidar de nosotras y ser nuestro guía en este camino.

A nuestros padres y familia, por ser nuestro apoyo incondicional, por confiar en nuestras decisiones y compartir con nosotras cada triunfo y derrota a lo largo de esta, nuestra mejor etapa.

A nuestros amigos, por ser nuestra segunda familia, por acompañarnos en cada momento y por los momentos vividos.

A la Universidad, quien nos dio la bienvenida, nos alimentó del conocimiento base, nos permitió contar con material necesario para desarrollar y poner en práctica nuestras capacidades. A toda su planta física, entes corporativos y personal administrativos les damos nuestros más sinceros agradecimientos por hacer parte de este.

A nuestro director, por su ayuda y seguimiento.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1. OBJETIVOS.....	15
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	15
2. RECUPERACIÓN DEL PETROLEO.....	16
2.1 RECUPERACIÓN PRIMARIA Y SECUNDARIA.....	16
2.2 RECOBRO MEJORADO.....	17
2.2.1 Métodos convencionales.....	18
.....	19
2.2.2 Métodos no convencionales.....	23
3. GENERALIDADES.....	30
3.1. ONDAS.....	30
3.2. CLASIFICACIÓN.....	30
3.2.1.Según su medio de propagación.....	31
3.2.2.Según la dirección de perturbación.....	31
3.3. ONDAS ULTRASÓNICAS.....	32
3.3.1.Generalidades de ondas ultrasónicas.....	33
3.3.2. Clasificación de ondas ultrasónicas.....	36
3.3.3. Modelos matemáticos de las ondas ultrasónicas.....	37
3.3.4. APLICACIONES.....	44
3.3.4.1. Aplicaciones generales.....	45
3.3.4.2. Aplicaciones dentro de la industria de hidrocarburos.....	46
4. DESARROLLO DEL ULTRASONIDO.....	50
4.1. ESTADO DEL ARTE.....	51

4.1.1. ESTUDIOS DE LABORATORIO	51
4.1.2. ESTUDIOS DE CAMPO.....	55
4.2 APLICACIÓN DE ONDAS DE ULTRASONIDO	58
4.3 EQUIPOS.....	59
4.3.1. Generador de ondas	59
4.3.2 Camión wire line	61
4.3.3. Herramienta de fondo de pozo.....	61
4.4 PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN DE LAS ONDAS DE ULTRASONIDO 68	
4.5 MECANISMOS DE RECUPERACION POR ULTRASONIDO	71
4.5.1. Cavitación:	71
4.5.2. Vibración Mecánica:.....	72
4.5.3. Acción térmica:	73
4.6. PROPIEDADES DEL FLUIDO	74
4.6.1. Viscosidad:.....	75
4.6.2. Saturación de fluidos	79
4.6.3. Tensión interfacial y superficial:	81
4.6.4. MOVILIDAD DEL PETROLEO	84
4.7. PROPIEDADES DE LA ROCA	85
4.7.1. Permeabilidad:	85
4.7.2. Porosidad:.....	88
4.7.3. Mojabilidad:.....	89
4.8. PROPIEDADES REOLOGICAS	91
4.9. CORTE DE AGUA	92
5. IMPACTO DEL ULTRASONIDO	95
5.1. CASOS DE APLICACIÓN.....	95
5.1.1. Casos de aplicación en laboratorios	95
5.1.2. Casos de aplicación en campo	102

5.2. RANGOS DE: FRECUENCIA, POTENCIA Y TIEMPOS DE ESTIMULACIÓN	112
5.3. SONOQUIMICA: ONDAS SONORAS COMBINADAS CON METODOS QUÍMICOS.....	114
5.4. VENTAJAS	117
5.5. DESVENTAJAS O LIMITACIONES	117
6. CONCLUSIONES	119
7. RECOMENDACIONES	120
BIBLIOGRAFÍA.....	121
ANEXOS.....	127
.....	127

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de la inyección alternada de vapor	19
Figura 2. Esquema general de las plantas usadas para recobro mejorado.....	25
Figura 3. Esquema usado en estimulación por microondas	27
Figura 4. Diagrama de bloques del modelo sugerido para EOR basado en ultrasonidos.....	42
Figura 5. Cable coaxial usado para fluidos altamente viscosos.....	63
Figura 6. Transductor subterráneo.....	64
Figura 7. Transductor de placa escalonada.....	66
Figura 8. Unidades principales de la herramienta de fondo de pozo PSPK-44	67
Figura 9. Montaje de equipos para el tratamiento ultrasonico	70
Figura 10. Permeabilidad.....	86
Figura 11. Roca mojada por agua.....	90
Figura 12. Roca mojada por aceite	90
Figura 13. Resultados de estudios donde disminuye el corte de agua.....	94
Figura 14. Montaje experimental.....	97
Figura 15. Datos de permeabilidad relativa del experimento de referencia (sin ultrasonido)	100
Figura 16. muestra la importancia de los efectos del ultrasonido en la recuperación de petróleo	101
Figura 17 Montaje de equipos en campo.....	104
Figura 18 Efecto del ultrasonido en la producción.	105
Figura 19. Equipo experimental para prueba de herramientas de fondo de pozo.	107
Figura 20 Equipo estimulación sonoquimica.....	115

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Criterios de diseño en la inyección cíclica de vapor.	20
Cuadro 2. Criterios de diseño en la inyección continua de Vapor.	22
Cuadro 3. Criterios de diseño en la inyección cíclica de vapor.	35
Cuadro 4. Características para la selección de pozos.	58
Cuadro 5. Características generador T6SP.	60
Cuadro 6. Características herramientas de fondo de pozo PSPK-44 y PSPK-52.	68
Cuadro 7. Factores que integran la acción térmica.	74
Cuadro 8. Rango de variables para sistemas saturados.	77
Cuadro 9. Propiedades del fluido.	96
Cuadro 10. Características de los pozos 14B3, 13B3, 16D6.	103
Cuadro 11. Características técnicas de la herramienta PSMS-42.	109
Cuadro 12. criterios para la selección de pozos candidatos para el tratamiento sonoquímico.	110
Cuadro 13 Recopilación de resultados en diferentes estudios.	113
Cuadro 14 Resultados estimulación sonoquímica.	116

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Recopilación Bibliográfica del ultrasonido.	127

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL IMPACTO DEL ULTRASONIDO EN EL RECOBRO MEJORADO DEL PETRÓLEO*

AUTORES: ÁNGELA MARÍA GIRÓN OSPINO

BRIYITH VANESSA PEÑA PÉREZ**

PALABRAS CLAVE: Ondas ultrasónicas, estimulación, recobro mejorado, viscosidad, productividad.

DESCRIPCIÓN: La necesidad que tiene la industria de los hidrocarburos por producir el petróleo residual que se queda atrapado en el yacimiento ha logrado que a través de los años se estudien y desarrollen técnicas diferentes que cada vez sean menos invasivas y ayuden a preservar el medio ambiente, estas técnicas se denominan métodos de recobro mejorado no convencionales dentro de los cuales se encuentran los ultrasonidos, los cuales tienen como función principal ayudar a superar la tensión interfacial entre el petróleo y el agua, reducir la presión capilar que a su vez favorece la movilización del petróleo y disminuir la viscosidad. Esta técnica hace uso de una variedad de equipos tanto de superficie como de fondo de pozo encargados de suministrar energía ultrasónica al yacimiento ya sea de manera permanente o de manera intermitente alterando tanto propiedades de la roca como propiedades del fluido. El siguiente proyecto busca dar a conocer el impacto que ha tenido el ultrasonido en el recobro mejorado del petróleo dando a conocer primero su principio de funcionalidad, los equipos que se usan para su desarrollo y finalmente los resultados obtenidos en estudios a nivel mundial donde ha sido aplicada la técnica a nivel de laboratorio y a nivel de campo.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director. M Sc. Julio César Pérez Angulo. Ingeniero de Petróleos

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE IMPACT OF ULTRASOUND ON ENHANCED OIL RECOVERY*

AUTHORS: ÁNGELA MARÍA GIRÓN OSPINO

BRIYITH VANESSA PEÑA PÉREZ**

KEYWORDS: Ultrasonic waves, stimulation, Enhanced oil recovery, viscosity, productivity.

DESCRIPTION: The need for the hydrocarbon industry to produce the residual oil that remains trapped in the reservoir has led to the study and development of different techniques that are less and less invasive and help preserve the environment over the years. techniques are called unconventional enhanced oil recovery methods, including ultrasound, whose main function is to help overcome the interfacial tension between oil and water, reduce capillary pressure, which in turn favors oil mobilization and decrease the viscosity. This technique makes use of a variety of both surface and downhole equipment in charge of supplying ultrasonic energy to the reservoir either permanently or intermittently altering both rock properties and fluid properties.

The following project seeks to publicize the impact that ultrasound has had on the improved recovery of oil, first revealing its principle of functionality, the equipment used for its development and finally the results obtained in studies worldwide where it has been applied the technique at the laboratory level and at the field level.

* Bachelor Thesis.

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de ingeniería de petróleo. Director. M Sc. Julio César Pérez Angulo. Ingeniero de Petróleos

INTRODUCCIÓN.

La industria de hidrocarburos a nivel mundial se enfrenta a graves problemas debido al ritmo de consumo de energía fósil, el alza de la demanda y la cada vez más baja producción hace que se enfrente a retos cada vez más grandes, uno de ellos es aumentar el factor de recobro el cual define la cantidad de petróleo recuperable que hay en un yacimiento, este valor a nivel mundial se encuentra entre el 45%-50%¹. La recuperación del petróleo a lo largo de la historia ha sido un desafío, la mayoría de los países usan métodos convencionales de recobro como el método químico o térmico, estos métodos pueden llegar a ser invasivos, contaminantes, costosos y poco efectivos, por lo que se hace necesario e importante estudiar métodos no convencionales que permitan aumentar el factor de recobro actual y que a su vez ayuden a solucionar la variedad de problemas que se presentan durante la producción. Con el fin de solucionar y evitar algunos problemas operativos con el medio ambiente se inician investigaciones dirigidas a métodos de recobro no convencionales en los que se encuentran los ultrasonidos, los cuales se refiere al uso de ondas ultrasónicas dentro del yacimiento cerca de la zona de perforados que logran cambiar propiedades de la roca y del fluido mejorando la capacidad de flujo.

En esta investigación se pretende estudiar el impacto que ha causado el ultrasonido en el recobro mejorado y demás problemas al momento de la producción, dando a conocer los principios de las ondas sonoras, su clasificación, algunos modelos matemáticos usados para su desarrollo, y su aplicabilidad dentro de la industria de nuestro interés; también daremos a conocer los equipos que se han desarrollado hasta el momento y las propiedades que las ondas de ultrasonido logran modificar a nivel de yacimiento. Finalmente se mencionarán algunos estudios que nos permitirán conocer los rangos de frecuencia, potencia y tiempo bajo los que la estimulación ha resultado exitosa.

¹ M.S. Mullakaev n, V.O.Abramov,A.V.Abramova. Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el impacto del ultrasonido en el recobro mejorado del petróleo.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer el cambio en las propiedades de la roca y del petróleo al generar ondas ultrasónicas.
- Determinar el rango de la frecuencia, la intensidad sónica y el tiempo requerido para la estimulación.
- Analizar de qué forma ha impactado el ultrasonido como método de recobro mejorado en la industria de hidrocarburos.

2. RECUPERACIÓN DEL PETROLEO

Los métodos de recobro en la industria de los hidrocarburos están sujetos a variables como: temperatura del yacimiento, tipo de fluido, tipo de formación, y viscosidad del fluido, de estas propiedades depende la productividad de un campo, y es por ello por lo que se hace necesario implementar alternativas que modifiquen algunas propiedades y con esto permitir un mejor flujo de fluidos desde yacimiento hasta superficie. La recuperación del petróleo se puede dividir en tres etapas, no necesariamente con un orden cronológico, sino orientado a la necesidad y tipo de yacimiento a tratar, por ello daremos un indicio de lo que consiste cada una de estas, como lo son: la recuperación primaria, secundaria, finalmente y como eje fundamental de estudio, el recobro mejorado.

2.1 RECUPERACIÓN PRIMARIA Y SECUNDARIA

En la industria de hidrocarburos se usan diferentes métodos de recobro que son clasificados por la necesidad con que cuente el yacimiento y los requerimientos de producción del campo, pero satisfacer esta necesidad depende de dos factores fundamentales: uno de ellos el factor económico que permitirá seleccionar las tecnologías más avanzadas y dos, que tanto el yacimiento aporta para hacer dicha inversión. La primera etapa de la recuperación del petróleo suele ser la recuperación primaria que es la energía natural con que cuenta el yacimiento para mantener la presión y así generar el flujo de fluidos hasta superficie. Después de cierto tiempo, la presión natural del yacimiento empieza a disminuir y aumenta la cantidad de petróleo que se queda en el yacimiento, esto sucede por algunas de las razones principales, como variación en la relación de movilidad, en las fuerzas capilares y en la heterogeneidad del yacimiento.

Existen varios tipos de recuperación primaria, esta variación depende de la cantidad de ciertos fluidos en el yacimiento y la forma en que estos se presentan, entre ellos están: empuje por gas en solución, empuje por agua, drenaje gravitacional, entre otros. La recuperación secundaria, generalmente, consiste en inyectar un fluido dentro del yacimiento por medio de arreglos de pozos inyectores que desplazan el petróleo presente en la zona hacia los pozos productores. El fluido inyectado, en la mayoría de los casos, es agua, pero también se puede hacer uso del gas. “En este último, se inyecta en la capa de gas para mantener la presión y expandirla, o dentro de la columna de petróleo en los pozos para el desplazamiento inmiscible del petróleo, de acuerdo con las condiciones de permeabilidad relativa y barrido volumétrico” ².

2.2 RECOBRO MEJORADO

La eficiencia en la recuperación primaria y secundaria se ve limitada por factores tanto a nivel macro como a nivel micro. En cuanto al nivel macro se puede hablar que en el yacimiento existen zonas en las cuales el fluido inyectado (recuperación secundaria) no penetra por la baja permeabilidad de las zonas ya sea porque siguen caminos preferenciales o por la geometría de los inyectores; en cuanto a la escala micro, “se puede hablar de los poros, donde el crudo alcanza una saturación residual muy baja para formar bancos que sean desplazados y estos quedan atrapados por las fuerzas capilares presentes” ³; es por ello que luego de

² y ³ Ferrer, M. 2001. Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos.

la relación costo beneficio tanto del primer y/o segundo método de recuperación se hace necesario implementar la recuperación mejorada del petróleo.

Como es de esperar, el propósito del recobro mejorado es aumentar la eficiencia en cuanto a la recuperación primaria y secundaria, es decir, mejorar variables como la reducción de las fuerzas capilares con ayuda de solventes miscibles, obtener una baja tensión interfacial con ayuda de surfactantes o soluciones alcalinas y mejorar la eficiencia de barrido reduciendo la viscosidad del crudo mediante métodos térmicos.

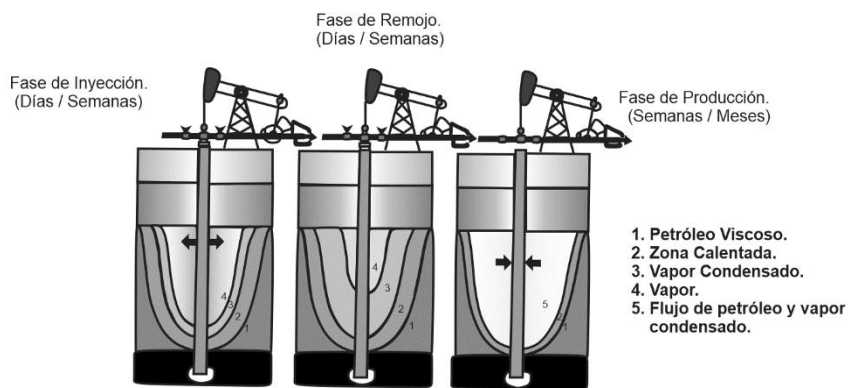
2.2.1 Métodos convencionales. Los métodos de recobro en la industria principalmente se requieren para aumentar la energía del yacimiento y en consecuencia aumentar el factor de recobro que, en síntesis, es por lo que se mide con trazabilidad económica las compañías. Todos estos métodos, cabe resaltar, están limitados por la rentabilidad que deben dar a la hora de ser desarrollarlos y perdurar en el tiempo estipulado para recuperar la inversión. Dentro de los metodos convencionales, generalmente para yacimientos de crudo pesado, se hace uso de metodos termicos y que gran ejemplo de ello es la inyeccion de vapor en el yacimiento con gravedades API bajas, es decir petroleos viscosos (5^o-15^o API), mejorando de esta manera su movilidad principalmente, pero a su vez se puede obtener mejora en la reducción de la saturación de petróleo residual y un aumento de la eficiencia areal; “aunque es importante resaltar que esta no es una condicion o uso especial en dichos yacimientos, este metodo tambien es usado en petroleos con gravedades API altas (45^o)”⁴, lo cual depende exclusivamente de condiciones de yacimiento y estudio costo-beneficio del mismo. Dicho metodo ha demostrado ser uno de los procesos de recuperacion

⁴ Ferrer, M. 2001. Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos.

de petróleo con mayor éxito a nivel mundial, así, existen dos formas de generar ciertos cambios en el yacimiento; el primero de ellos y el más usado es la inyección de vapor en sus dos modalidades (cíclica o continua) y la generación de calor dentro del yacimiento, más conocido como combustión in situ.

2.2.1.1 Inyección de vapor. En cuanto este método de inyección cíclica consta básicamente de tres etapas como se muestra en la Figura 1, siendo la primera de ellas la inyección durante la cual se introduce un bache de vapor en el yacimiento; la segunda etapa requiere cerrar el pozo durante varios días para permitir la distribución uniforme del calor lo cual permite la disminución de la viscosidad del petróleo y, por último, durante la tercera etapa, se produce el petróleo a través del mismo pozo hasta que retorne a las condiciones iniciales en que se encontró el yacimiento y este deje de ser económicamente viable; es importante resaltar que este método se puede llegar a usar más de una vez en el mismo yacimiento, por su alta eficiencia y su alta rentabilidad.

Figura 1. Esquema de la inyección alternada de vapor.



Fuente: FERRER, Magdalena de Paris, Esquema de la inyección alterada de vapor. [En línea]. Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos. Venezuela: Diagramación e impresión. 2001. [Consultado el: 25 de noviembre de 2020].

En algunas ocasiones luego de realizar la inyección cíclica de vapor, se procede y se opta por realizar una inyección continua en dichos pozos, manteniendo así la presión y el calentamiento del yacimiento que a su vez aumentan las tasas de producción rentables para el campo. A lo largo de los años y su gran acogida a nivel mundial se han desarrollado parámetros de diseño que son estudiados para su posible desarrollo en yacimientos de petróleo pesado. A continuación, en el cuadro 1 se mencionan algunas consideraciones a la hora de aplicar el método:

Cuadro 1. Criterios de diseño en la inyección cíclica de vapor.

Criterios de Diseño en la Inyección Cíclica de Vapor		
	Propiedad	Descripción
Petróleo	Gravedad.	< 16°API
	Viscosidad.	> 400 cp en condiciones de yacimiento
Yacimiento	Porosidad.	> 25%
	Espesor.	> 50 pies
	Profundidad.	< 3000 pies
	Petróleo in situ	> 1000 Bbls (acre-pie)
	Permeabilidad.	> 100 md
	Trasmisibilidad.	> 100 md*pies/cp
	Temperatura	No critica
Agua	Las propiedades del agua connata del yacimiento no son criticas El agua del generador de vapor deberá ser relativamente suave, ligeramente alcalina, libre de oxígeno, de sólidos, de petróleo, de H_2S y de hierro disuelto.	
Litología	Bajo contenido de arcillas	
	Pozos existentes adaptables a la inyección de vapor	
	Disponibilidad de combustible para suplir a los generadores de vapor	

Cuadro 1. (Continuación)

Pozos existentes adaptables a la inyección de vapor	
Factores Favorables.	Disponibilidad de combustible para suplir a los generadores de vapor
	Disponibilidad de agua que es económica y ligeramente alcalina.
	Presión de yacimiento adecuada en arenas más finas
	Formación homogénea.
Factores Desfavorables	Fuerte empuje de agua
	Capa de gas
	Fracción de arena total baja.

Fuente: FERRER, Magdalena de Paris, Criterios de diseño en la inyección cíclica de vapor. [En línea]. Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos. Venezuela: Diagramación e impresión. 2001. [Consultado el: 25 de noviembre de 2020]. Disponible en: <http://www.ing.unp.edu.ar/asignaturas/reservorios/libro%20iny%20agua%20y%20gas.pdf>

En la inyección continua, el vapor húmedo se pone en contacto con la formación a través de pozos inyectoros distribuidos en distintos arreglos junto con los pozos productores. Al entrar en contacto el vapor con la zona cañoneada del pozo inyector, este se eleva por diferencia de densidades hasta que encuentra una barrera impermeable. Transcurrido un tiempo y teniendo en cuenta la continuidad de la inyección, “se forma la zona de vapor que avanza a una tasa siempre decreciente”⁵, donde las fracciones de aceite que se encontraban en este espacio se empiezan a vaporizar formando conjuntamente una sola fase gaseosa y a medida que la fase gaseosa se va moviendo en el yacimiento, se pierde calor, la temperatura disminuye y se da lugar a fenómenos de condensación que forman el

⁵ Ferrer, M. 2001. Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos.

banco de aceite destilado. Al igual que en la inyección cíclica, se han desarrollado criterios a la hora de diseñar proyectos que incluyan la inyección continua de vapor, los cuales se pueden ver continuación en el cuadro 2:

Cuadro 2. Criterios de diseño en la inyección continua de Vapor.

Criterios de Diseño en la Inyección Continua de Vapor		
	Propiedad	Descripción
Petróleo	Gravedad.	< 25°API
	Viscosidad.	20-1000 cp
	Composición.	No crítica
Yacimiento	Saturación de petróleo.	> 500Bbls (acre-pie)
	Espesor.	> 20 pies
	Profundidad.	300- 3300 pies
	Permeabilidad.	> 200 md
	Trasmisibilidad.	kh/ μ > 100 md*pies/cp
Agua.	Las propiedades del agua de formación no son críticas El agua del generador de vapor deberá ser relativamente suave, ligeramente alcalina, libre de oxígeno, de sólidos, de petróleo, de H_2S y de hierro disuelto.	
Litología	Bajo contenido de arcillas.	
Factores Favorables.	Disponibilidad de pozos que puedan ser utilizados	
	Bajo costo de los combustibles	
	Alta calidad del agua	
	Alta densidad de pozos	
	Alto espesor neto con relación al total	
Factores Desfavorables	Fuerte empuje de agua	
	Capa grande de gas	
	Fracturas extensivas	

Fuente: FERRER, Magdalena de Paris, Criterios de diseño en la inyección continua de Vapor. [En línea]. Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos. Venezuela: Diagramación e impresión. 2001. [Consultado el: 25 de noviembre de 2020]. Disponible en: <http://www.ing.unp.edu.ar/asignaturas/reservorios/libro%20iny%20agua%20y%20gas.pdf>

Es importante resaltar que, al hacer uso de los tipos de inyección de vapor, se deben tener en cuenta los diferentes parámetros de diseño que son de gran importancia a la hora de ejecutarlos. Un parámetro importante mencionado anteriormente es la profundidad de los yacimientos en donde se desarrolla, “se destaca que el rango para que sea aplicado no supere alrededor de los 3300 pies”⁶ ya que a medida que aumenta este parámetro, se va perdiendo la energía que es aportada por los generadores que están en superficie y al perderse energía no se alcanza la temperatura objetivo para lograr movilizar el petróleo en yacimiento. Adicional a ello a esta profundidad se alcanza el punto crítico del agua por lo que el calor latente es muy bajo y no transferiría energía al crudo.

2.2.2 Métodos no convencionales. Dentro de los amplios estudios que se han realizado para poder hacer una estimulación al yacimiento verdaderamente efectiva se da lugar a nuevas técnicas alrededor del mundo que no son tan conocidas ni comunes pero que podrían dar resultados buenos y con algunas ventajas importantes sobre las convencionales. Dentro de esta clasificación están:

⁶ Ferrer, M. 2001. Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos.

2.2.2.1 Inyección de nitrógeno: El Nitrógeno es un gas que provee grandes ventajas en su uso a la industria petrolera, ya sea en los proyectos de Ingeniería de yacimientos dentro de la recuperación secundaria y la recuperación mejorada, como en las etapas de terminación de pozos, también se puede encontrar su aplicación en la etapa de producción⁷. El nitrógeno es un gas inerte presente en el aire y en condiciones normales se presenta de forma diatómica (N₂) es inodoro, incoloro, insípido, no tóxico y no reacciona con ningún otro elemento a menos que sus condiciones de temperatura y presión cambien. Por dichas propiedades y características es usado en la industria para aumentar la producción y al ser inyectado no reacciona ni con el gas natural ni con los compuestos del aceite.

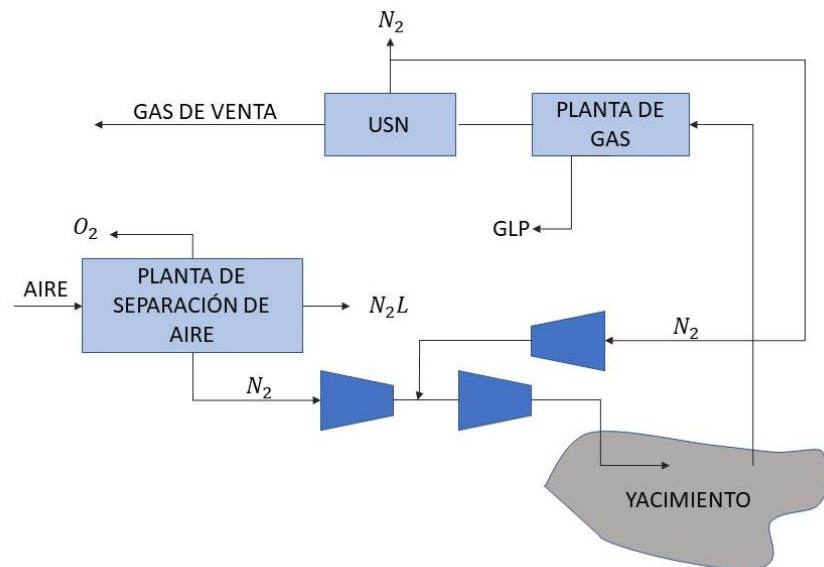
Para este proceso se implementan tanto pozos productores como inyectoros donde primero, para hacer dicha inyección se debe obtener el nitrógeno directamente del campo, para ello existen varios métodos de obtención tales como: la separación criogénica, que es un proceso en el que se puede obtener nitrógeno tanto del aire como del gas natural producido en el campo, también está la separación por membranas y la PSA que es (planta de separación del aire por presión) que son los métodos más efectivos ya que separan el nitrógeno de forma inmediata en el lugar que se realizara la inyección. Después de escoger muy bien el método de obtención del nitrógeno, se debe realizar el diseño de la Unidad de Separación del Nitrógeno (USN), la cual debe ser apta para los cambios de concentración del nitrógeno, en la figura 2, se observa el esquema general del proceso para realizar la correcta separación del nitrógeno del aire y poder ser usado para la inyección en el yacimiento. Este esquema de la operación de inyección de nitrógeno consiste en tres unidades fundamentales las cuales pueden

⁷ Morales, J. Inyección de nitrógeno como proceso de recuperación de hidrocarburos. Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis. 2011

variar según la necesidad, según el método escogido para la obtención del nitrógeno y según la cantidad de gas natural que se produce,

- Planta de separación de aire para generar el nitrógeno
- Planta de gas para la recuperación de líquidos producidos
- Unidad de separación del nitrógeno (USN)

Figura 2. Esquema general de las plantas usadas para recobro mejorado.



Fuente: elaboración propia, con base en (Morales, J. Inyección de nitrógeno como proceso de recuperación de hidrocarburos. Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis. 2011.)

En el momento en que ya se tiene el nitrógeno apto para el proceso de recobro mejorado se inyecta al yacimiento y este empuja los hidrocarburos hasta el pozo productor, aumentando así la producción del campo. La concentración de nitrógeno al principio por los pozos productores es casi nula, pero el pasar el

tiempo, aumenta y llega a tal en que aumenta tanto que el proyecto deja de ser rentable y debe suspenderse.

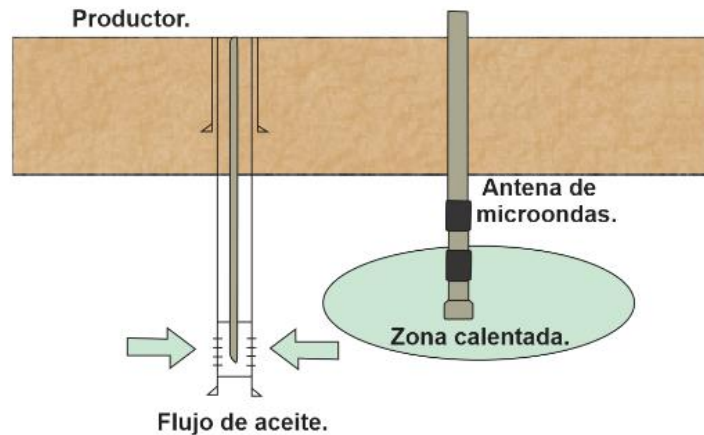
2.2.2.2 Microondas. Una de las aplicaciones y uso de microondas es en el recobro mejorado del petróleo, ya que cuenta con características potenciales para calentar la zona y de esta manera movilizar fluidos presentes en el yacimiento. El proceso e interacción con los materiales se resume en que estas ondas son transmitidas, absorbidas y reflejadas siendo en la absorción donde se maximiza el calentamiento de las zonas y por ende la mayor recuperación. “Es importante aclarar que el crudo no absorbe las ondas, pero la mezcla con receptores de microondas como el carbón activado, oxido y el hierro permite que se caliente el sistema. Además de ello las microondas interactúan con el contenido de agua presente en la formación, transfiriendo calor y de esta manera permitiendo que el crudo aumente su movilidad”⁸. Parte de su esquema se ve reflejado en la figura 3 que asemeja como es la disposición de los equipos para la estimulación.

A la hora de hablar de diseños y ejecución del método se tienen en cuenta dos parámetros fundamentales que son la fuente que emite las ondas y las propiedades dieléctricas de los materiales, donde estas propiedades dependen netamente de la frecuencia y de la temperatura de operación. En cuanto a la profundidad de penetración de las microondas se dice que es generalmente pequeña, pero para fluidos de reservorio relativamente móviles, la energía de microondas calienta continuamente los fluidos a medida que se dirigen hacia el pozo de producción de manera incremental, además está relacionada con la frecuencia del microondas. Debido a la poca profundidad de penetración, la

⁸ Llamuca. L. Mariño, R. Aplicación de Radiofrecuencia para el mejoramiento de la movilidad del crudo de la arena Hollín en el pozo Pungarayacu IP-15. Universidad central del ecuador 2019

antena de microondas se puede colocar en un orificio perforado cerca del pozo de producción.

Figura 3. Esquema usado en estimulación por microondas.



Fuente: LLAMUCA, Luis. MARIÑO, Xavier. Esquema de calentamiento por antena de Microonda [En línea]. Aplicación de Radiofrecuencia para el mejoramiento de la movilidad del crudo de la arena Hollín en el pozo Pungarayacu IP-15. Quito: Universidad central del ecuador. 2019. [Consultado el: 30 de noviembre de 2020]. Disponible en: <http://docplayer.es/158497759-Universidad-central-del-ecuador.html>

2.2.2.3 Agua inteligente. Esta estimulación ha dado buenos resultados y una de las razones es que el agua que será inyectada pasa por una serie de estudios y preparación previa en la que se demuestra que es compatible con el yacimiento, dentro de su preparación se puede modificar la salinidad y la composición iónica, evitando así daños a la formación. Dentro de los estudios y proyectos piloto que se han realizado a lo largo de la historia se ha demostrado que esta estimulación logra

dentro del yacimiento: Migración de finos, cambio en la mojabilidad de la roca, intercambio iónico multicomponente, cambio de PH, desorción, etc. ⁹

2.2.2.4 Ultrasonido. Otro método no convencional que es en el que se va a centrar esta investigación, el recobro mejorado por medio de ondas acústicas es considerado practico y efectivo, ya que, a comparación de otros métodos en esta estimulación no se está inyectando ningún fluido al yacimiento, lo que hace que este conserve sus propiedades. Entre sus ventajas esta su simplicidad, su costo, la buena aplicabilidad, la no contaminación entre otros beneficios que conllevan a mejorar la producción de un campo con este tipo de estimulación. “Su principio fundamental es que las rocas tienen características acústicas propias, es decir, tienen capacidad natural de difundir o transmitir vibraciones acústicas”. ¹⁰

Este método se basa en la generación de ondas ultrasónicas que crean efectos de resonancia, vibración y cavitación que en conjunto hacen cambios importantes como: en la viscosidad del fluido, la permeabilidad relativa, la eficiencia de desplazamiento y las fuerzas capilares¹¹. También tiene aplicaciones fuera del recobro mejorado como lo son: la deshidratación y desalación del crudo, eliminación o disminución del daño a la formación y evita la formación de parafinas y asfáltenos en fondo de pozo. Para que este método logre obtener buenos resultados debe cumplir con ciertos valores de potencia, frecuencia y tiempo de irradiación para que así genere la cantidad de ondas suficiente en el tiempo requerido.

⁹ Coung.T. State-of-the Art Flow salinity waterflooding for enhanced oil recover. SPE 165903. 2013

¹⁰ Duarte, D. Hernández M. 2019. Estudio de la estimulación por ondas vibratorias en la productividad de campos petroleros.

¹¹ WANG, Zhenjun. FANG, Ri. GUO, Hangyuan. Advances in ultrasonic production units for Enhanced oil recovery in China. Ultrasonics

Al tratarse este método como eje fundamental en el desarrollo del proyecto se hará énfasis en cómo se desarrolla el método, parámetros fundamentales y rangos establecidos para su aplicación, los principales equipos para el uso del método como, la guía de onda, el generador de onda y el equipo de fondo de pozo entre otras generalidades del tema.

3. GENERALIDADES

A continuación, se mencionan algunos conceptos importantes sobre las ondas con énfasis en las ondas ultrasónicas: sus generalidades, clasificación y aplicaciones en diferentes industrias.

3.1. ONDAS

Una onda es una perturbación que permanece móvil y que viaja por el espacio transfiriendo energía de un lugar a otro. Es posible describir la ecuación de onda mediante modelos matemáticos que se describen en función de su velocidad (v) para una dimensión de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Así, y es la función de onda y su solución general está dada por:

$$y(x, t) = A \sin(\omega t - kx)$$

Donde:

- A: Amplitud de onda
- ω : pulsación de onda
- K: Numero de ondas

3.2. CLASIFICACIÓN

Al estudiar las ondas es importante recordar que transfieren energía, no materia y es posible clasificarlas de la siguiente manera:

3.2.1. Según su medio de propagación

- **Ondas mecánicas:** Este tipo de ondas requieren de un medio para su propagación, es decir, deben tener algún tipo de materia en la cual se puedan desplazar y viajar a medida en que las moléculas del medio chocan entre si transmitiendo energía. Un ejemplo clave en este tipo de ondas, es el sonido. El sonido necesita de un medio por el cual pueda viajar, ya sea el aire, el agua o en sólidos, recordando que para los humanos este es permisible entre frecuencias comprendidas de 16Hz a 20Hz, fuera de estos límites el sonido ya no es audible para los humanos, aunque a las ondas mecánicas correspondientes se les sigue llamando sonido.
- **Ondas electromagnéticas:** Son ondas que pueden viajar a través del vacío, “no necesitan un medio o materia para su propagación y es esto lo que las diferencia de las ondas mecánicas”¹². Viajan a través de campos eléctricos y de campos magnéticos que se generan por las partículas cargadas. Ejemplo de ello podemos tener las microondas, las ondas de radio o los rayos X.

3.2.2. Según la dirección de perturbación

- **Ondas Longitudinales:** Son ondas en donde la perturbación se mueve en la misma dirección que la onda, es decir, se caracterizan por tener un movimiento de oscilación paralelo a la dirección de propagación y se puede entender que sucede cuando cada una de las partículas debido al efecto de la presión se ve forzada hacia la dirección en la cual se propaga el frente de la onda.

¹² Guzmán, H. Movimiento ondulatorio y ondas. 2009

- **Transversales:** “Son ondas donde la perturbación se mueve perpendicular a la dirección de propagación de la onda”¹³. Las ondas transversales se pueden propagar a través de medios sólidos y sobre la superficie de líquidos, dentro de estos o en gases no es posible ya que no hay algún mecanismo que permita que se presente el movimiento perpendicular a la dirección de propagación.

3.3. ONDAS ULTRASÓNICAS

De acuerdo con esta clasificación se puede hacer relación a las ondas acústicas que son de tipo mecánico y longitudinales, donde como característica principal es que no se propaga materia, pero si energía mecánica. Estas ondas se generan al causar una vibración en las partículas de todo su alrededor las cuales retoman a su posición de equilibrio. Dentro de las longitudinales están las ondas de nuestro interés que son las ondas ultrasónicas, en las cuales su frecuencia se encuentra por fuera del rango que puede percibir el oído humano, su dirección de propagación es paralela a la dirección de desplazamiento de las moléculas del medio material y tienen varios métodos de generación los cuales dependen de la potencia de salida de la onda, estos pueden ser: generación de ondas por medios mecánicos, magnetostrictivos, piezocerámicos y piezoeléctricos que es el método de generación en el que nos vamos a centrar, ya que es aquel que hace uso de “transductores que son aquellos que cuentan con la capacidad de convertir una energía en otra”¹⁴.

¹³ Duarte, D. Hernández M. 2019. Estudio de la estimulación por ondas vibratorias en la productividad de campos petroleros.

¹⁴ Martínez, J. Vitola, J. Sandoval, S. Fundamentos teórico-prácticos del ultrasonido. 2007

3.3.1. Generalidades de ondas ultrasónicas

3.3.1.1 Frecuencia: Una De las formas de clasificar las ondas son su frecuencia, que es el número de ciclos o repeticiones de una onda por unidad de tiempo, que casi siempre suelen ser segundos, para así darle paso a su unidad que son los Hertz = 1 ciclo/segundo. Las ondas ultrasónicas se caracterizan por una frecuencia alta que, a la muestra esta, el oído humano no la puede percibir, sus valores están entre 20 kHz hasta los 500 MHz, clasificándose también dentro de ese rango como ondas ultrasónicas de baja, media y alta frecuencia. Este valor es determinado por la fuente que está emitiendo las ondas sonoras y por el medio en el cual está viajando, se puede escribir matemáticamente de la siguiente manera:

$$f = \frac{\text{Tiempo}}{N^{\circ} \text{ Ciclos}}$$

Donde:

- f: Frecuencia de la onda.
- Tiempo: duración de los ciclos, en segundos.
- N.º Ciclos: cantidad de ciclos por unidad de tiempo.

3.3.1.2. Velocidad de transmisión (v): La Velocidad de transmisión o también llamada velocidad acústica da el valor a velocidad con que la energía sonora viaja a través del medio, este valor depende de dos factores fundamentales, uno de ellos es la densidad del material en que se está propagando, así como también la elasticidad de este; conocer el valor de esta variable es importante ya que de ella depende no solo la producción del eco, si no también, es la base para calcular la

impedancia acústica. “Se puede calcular dicha velocidad de transmisión con ayuda de la siguiente ecuación matemática”¹⁵:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Donde:

- v: Velocidad de propagación
- λ : Longitud de onda.
- T: periodo de la onda.

3.3.1.3. Propagación e impedancia acústica: Esta es una característica del medio de propagación, este valor o concepto relaciona la velocidad de transmisión al momento de la vibración con la presión a la cual está siendo sometida la onda, se puede relacionar también como la resistencia del medio al paso del sonido, cuando dos materiales tienen el mismo valor de impedancia, no se producen ecos y es por ello que su relación es directamente proporcional, “si el valor de impedancia es pequeño el eco producido será débil, pero si por el contrario el valor es grande la onda ultrasónica se reflejara en su totalidad”¹⁶, en el cuadro 3 se encuentran los valores de velocidad de propagación e impedancia acústica dependiendo del medio de propagación en donde se esté generando la onda.

¹⁵ Guzmán, H. Movimiento ondulatorio y ondas. 2009.

¹⁶ CARDONA John, RESTREPO Luis. Diseño de un sistema de control de nivel para la preparación de líquidos deslizantes basado en señales ultrasónicas. 2015.

Cuadro 3. Valores de velocidad de propagación e impedancia acústica.

Medio de propagación	Velocidad de propagación (10 ⁵)	Densidad del material $\rho = \frac{g}{cm^3}$	Impedancia acústica (10 ⁵)
Aluminio	6,22	2,65	1,7
Acero	5,81	7,8	4,76
Níquel	5,6	8,9	4,98
Magnesio	4,33	1,74	0,926
Cobre	4,62	8,93	4,11
Bronce	4,43	8,5	3,65
Plomo	2,13	11,4	2,73
Mercurio	1,46	13,6	1,93
Cristal	4,9 – 5,9	2,5 – 5,9	1,81
Agua	1,43	1	0,143
Aceite	1,39	0,92	0,128
Aire	0,331	0,0012	0,000042

Fuente: Benson H. University physics. United States, Jhon Wiley & sons. 1996

3.3.1.4. Intensidad: Esta medida está relacionada con la potencia con la que se generó la onda, su valor se determina dividiendo la potencia entre el área de la onda, así se conoce con certeza la cantidad de ondas ultrasónicas que están llegando a la zona de interés. Cabe resaltar que la potencia de la onda, así mismo como el tiempo de generación de la misma dependen de su aplicación ya que no será la misma si se requiere para realizar el ultrasonido para conocer el sexo de un bebe, que si se necesita generar ondas ultrasónicas dentro de un yacimiento de hidrocarburos.

3.3.1.5. Atenuación: Se le llama atenuación a la disminución de intensidad con respecto al tiempo en que una onda ultrasónica lleva siendo propagada por el medio, sus causas fundamentales son que el material absorbe la energía propagada haciendo que su intensidad disminuya, también las diferentes reflexiones que pueden presentarse por la heterogeneidad del medio en que están siendo propagadas. El valor de la atenuación puede dar características claves de la forma en que se propaga la onda sobre cierto material. Las propiedades que más se relacionan con la absorción de la energía son la viscosidad, conducción y relajación térmicas.

3.3.2. Clasificación de ondas ultrasónicas: Las ondas de ultrasonido se clasifican según el rango de su frecuencia e intensidad, aunque la diferencia entre un rango y otro no está muy determinada, cada aplicación en cada industria conoce bajo que intensidad debe ser generada la onda.

3.3.2.1. Ultrasonidos de baja frecuencia: Los ultrasonidos de baja frecuencia también deben ser de baja intensidad, “cuyo objetivo es obtener información acerca del medio de propagación sin producir ninguna modificación en su estado.”¹⁷ Por lo tanto, estos ultrasonidos son usados en la industria de alimentos y medicina.

¹⁷ Robles Ozuna. Ochoa Martínez. Ultrasonidos y sus aplicaciones en el procesamiento de alimentos. 2012.

3.3.2.2. Ultrasonidos de alta frecuencia: Los ultrasonidos de alta frecuencia son aquellos con objetivos de modificar el medio en que serán propagados, este tipo de ondas genera mecanismos de cambio dentro del medio tales como: agitación, difusión, cambios químicos, cambios físicos, inestabilidad de las interfases, entre otros procesos que ayudan a hacer cambios a nivel macro como a nivel micro.

En la industria de los hidrocarburos se hace uso de ondas ultrasónicas de alta frecuencia debido a la intensidad que se requiere para que dichas ondas logren hacer los cambios esperados en el yacimiento¹⁸.

3.3.3. Modelos matemáticos de las ondas ultrasónicas: Se han realizado contribuciones que muestran la planeación y desarrollo de los proyectos de manera más explícita, es decir, el desarrollo de modelos matemáticos de acuerdo a las condiciones, propiedades del yacimiento y equipos con que se cuente para realizar las intervenciones. A continuación, se tendrá un modelo de un dispositivo ultrasónico que se coloca en el fondo del pozo inyector para la recuperación mejorada del petróleo, que incluye y toma a consideración tanto la geofísica del petróleo, parámetros geométricos del yacimiento y la acústica que va a interactuar con los medios presentes en el yacimiento.

En el modelo matemático estudiado en este capítulo desarrolla un diseño de un sistema de hardware basado en ultrasonidos para el recobro mejorado, donde se ve incluida la geometría de los pozos, es decir, los arreglos de los inyectores con el productor (4:1) y que “por lo general, los diámetros de los pozos están estandarizados y oscilan entre 50 y 90 cm. En cuanto a la profundidad, puede

¹⁸ Gallego, Juan. High-power ultrasonic processing: recent developments and prospective advances. 2010.

llegar hasta los 4 km¹⁹ y se espera que pueda ser implementado en uno o más pozos del patrón de inyección. No menos importante se ha sugerido un modelo matemático para las estimulaciones ultrasónicas que es estudiado mediante un diagrama de flujo modular, es decir, se desarrolla mediante un módulo de presión acústica y un módulo de transferencia de calor o de temperatura haciendo que la presión circundante aumente dependiendo de la densidad del fluido, así como de la permeabilidad y porosidad del yacimiento. Esto conduce a un aumento de la temperatura general en el depósito, lo que lleva a una reducción de la viscosidad del líquido y, finalmente, a la recuperación de aceite. Es importante destacar que el desarrollo de este modelo matemático, como de su análisis es netamente del autor y se toma como base para la interpretación de los cambios (posible aumento) en la producción luego de ser implementado, por tanto, se sigue la misma estructura en cuando a ecuaciones, procedimientos o cálculos matemáticos.

- **Modulo acústico:** Su finalidad es establecer si durante el tratamiento hubo un cambio en la densidad del fluido alrededor de un 0.001gr/ml que permite a su vez un aumento en la presión circundante. Para este módulo se hace uso, inicialmente, de la ecuación de Helmholtz donde se hace la suposición de que el medio tiene una ligera pérdida y a su vez supone un estado estacionario:

$$\nabla^2 P + K'^2 P = 0$$

¹⁹¹⁹ M. Mohsin, M. Meribout. An extended model for ultrasonic-based enhanced oil recovery with experimental validation. 2014

Donde:

- P: Amplitud compleja de la presión
- K : Numero de onda complejo, donde dicho número este dado por:

$$K': c \sqrt{1 + j * \frac{\sigma}{w}}$$

Donde

- c: es la velocidad del sonido en el medio particular
- w: la frecuencia angular en rds/seg
- σ : el factor de amortiguamiento del material (0.5)

Luego de identificar y plantear de la ecuación de Helmholtz, se define la ecuación del cambio de la densidad en el fluido en función de los cambios de presión y temperatura que se tuvieron anteriormente, así replantear si hubo un cambio en esta o permanece igual, para esto se hace uso de la siguiente ecuación:

$$\rho_1: \frac{\frac{\rho_0}{1 + \beta(T_1 - T_0)}}{1 - \frac{P_1 - P_0}{E}}$$

Donde:

- T_1 y T_0 : Representan la temperatura inicial y final respectivamente.
- P_1 y P_0 : Representan la presión inicial y final respectivamente.
- ρ_0 : Es la densidad inicial
- β : El coeficiente térmico volumétrico de expansión en (m³ / m³. ° C)
- E: El módulo volumétrico de elasticidad del fluido en N / m²

Luego de determinar la densidad final, en este caso ρ_1 y si se logró un aumento de alrededor 0.1 gr/ml se calcula la distribución de presión en el sistema para así continuar con el diagrama de flujo y el siguiente modulo que es el de transferencia de calor.

- **Módulo de transferencia de calor:** En este módulo son característicos los resultados luego de la estimulación, es decir la distribución y cambios en la temperatura con una modificación en la presión.

“La disipación de potencia resultante de la absorción ultrasónica en el líquido es la principal causa de la distribución de temperatura”²⁰. Por tanto, la densidad de potencia calorífica W se da de la siguiente manera:

$$W: \frac{\alpha}{\rho c} * |P|^2$$

Donde:

- c es la velocidad del sonido en el medio particular
- α es el coeficiente de atenuación del medio para ondas ultrasónicas que resulta en la disipación de calor dentro del material y se puede calcular usando la siguiente ecuación

$$\alpha: k * \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right) * \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{W^2}} - 1\right)}$$

²⁰ M. Mohsin, M. Meribout. An extended model for ultrasonic-based enhanced oil recovery with experimental validation. 2014

Haciendo uso de la ley de Darcy para calcular el flujo de fluidos en medios porosos, se tiene:

$$V: \frac{k}{\mu} * \frac{dP}{dL}$$

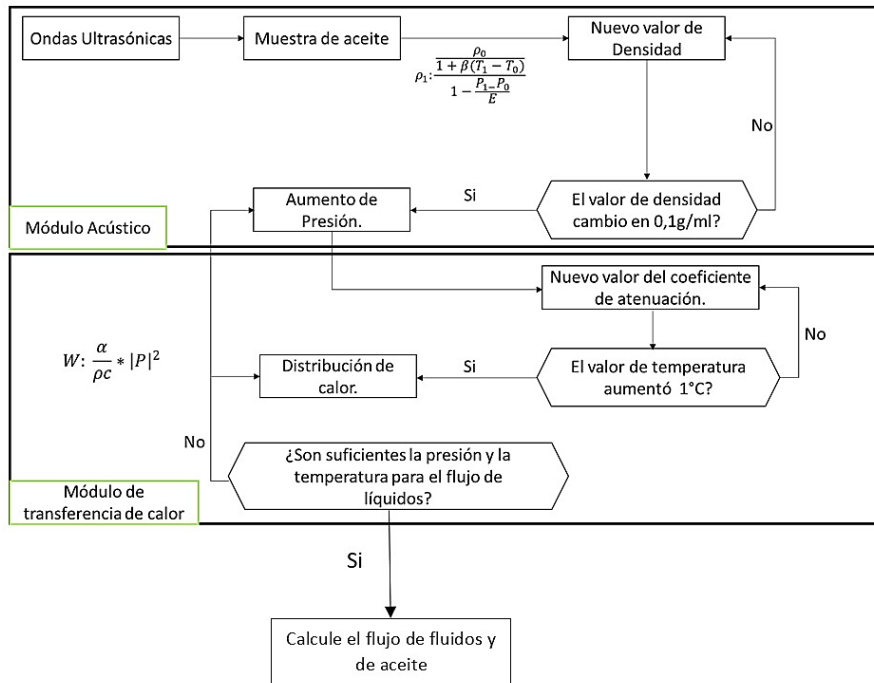
Donde

- μ es la viscosidad
- k la permeabilidad del yacimiento
- dP y dL son la presión diferencial y la longitud, respectivamente.

Luego de realizado el modelo matemático y al obtener los resultados del estudio se realiza una simulación numérica basada en elementos finitos, al igual que un modelo experimental y al poder establecer una correspondencia satisfactoria de alrededor del 70% de similitud en los casos anteriormente nombrados.

Finalmente, y luego de relacionar estos resultados, donde, se puede evidenciar un aumento en la presión luego de la estimulación en el pozo inyector por medio de este dispositivo, se propone la creación de modelos donde se implemente la técnica en más pozos inyectores con un número mayor de transductores ultrasónicos ya que todo esto conlleva a un aumento en la recuperación del petróleo por ende surgen modelos para EOR, basados en esta técnica como lo muestra la Figura 4.

Figura 4. Diagrama de bloques del modelo sugerido para EOR basado en ultrasonidos



Fuente: MOHSIN, Mohammed. MERIBOUT, Mahmoud. An extended model for ultrasonic-based enhanced oil recovery with experimental validation [En línea]. Electrical Engineering, Petroleum Institute, Abu Dhabi, United Arab Emirates: 2014. [Consultado el: 04 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.007>

Al igual que el caso tomado de ejemplo anteriormente donde se desarrollan modelos matemáticos que modelan y describen dispositivos ultrasónicos que, luego de su estudio y simulación, den como resultado un aumento en el factor de recobro se presenta el siguiente estudio realizado y tomado de base para el posterior análisis.

Este estudio llamado “Una técnica para evaluar los cambios de viscosidad de aceite pesado bajo ultrasonido en un medio poroso simulado” desarrollado por Hamidi H, Mohammadian e, Junin R, Rafati R, Manan A, Junid M. en el año 2013, desarrolló una técnica para investigar el efecto que tiene el ultrasonido al ser aplicado en diferentes rangos de frecuencia (25, 40, 68 kHz) y de potencia (100, 250, 500W) en diferentes fluidos basados en el modelo matemático de la ecuación de Poiseuille durante un tiempo alrededor de 60min por cada fluido.

Para este estudio fue necesario un generador ultrasónico “Genesis™ XG-500-6 que emite ondas ultrasónicas con una potencia máxima de 600 W y diferentes frecuencias de 25, 40 y 68 kHz. Un tubo capilar liso de acero inoxidable de 25 cm con una dimensión de 0,2 20 cm (DL) se utilizó como un sistema de poro único en los experimentos de flujo de fluidos. El baño de agua con una dimensión de 21 x 50 x 30cm”²¹. Con respecto a los fluidos utilizados fueron: aceite tipo parafina, aceite con una gravedad API de 17°, queroseno y salmuera de NaCl de 30.000 ppm. Adicional a ello se desarrolló cada prueba en función del control y no control de temperatura en el baño ultrasónico.

Se debe considerar que existe un diferencial de presión a lo largo del tubo, además se supone que existe un flujo laminar de un fluido newtoniano incompresible y para el cálculo de la viscosidad dentro de este, se realizó mediante la ecuación de Poiseuille, como se muestra:

$$\mu: \frac{\pi R^4 * \Delta P}{2QL} * \left[\frac{n}{3n + 1} \right]$$

²¹ Hamidi H, Mohammadian e, Junin R, Rafati R, Manan A, Junid M. A technique for evaluating the oil/heavy-oil viscosity changes under ultrasound in a simulated porous medium 2013

Donde:

- R es el radio del tubo capilar (cm).
- ΔP : Es el diferencial de presión (dynas/cm²)
- Q: Caudal (cm³/s)
- L: Es la longitud del tubo capilar (cm)
- n es el índice de fluido de la ley de potencia (Para un fluido newtoniano, el índice de fluido de ley de potencia es 1)

Luego de realizados los experimentos con las diferentes muestras se deduce que existe una disminución en la viscosidad mayor en los líquidos más livianos, en el caso del aceite con gravedad API de 17,29^o se cree que a mayor potencia y a mayor tiempo de exposición se lleguen a resultados más prometedores ya que se facilita la deposición de componentes con alto peso molecular, además se deduce que la cavitación, la generación de calor y una mayor potencia de ultrasonido magnifican los resultados.

3.3.4. APLICACIONES

3.3.4.1. Aplicaciones generales: El uso de ondas ultrasónicas de elevada intensidad en “procesos industriales se basa generalmente en una explotación adecuada de una serie de mecanismos activados por la energía ultrasónica tales como la transferencia de calor, agitación, difusión, fricción, efectos químicos entre otros basados en su medio de propagación (líquido, sólido o gaseoso)”²². Estos mecanismos son empleados para producir o mejorar una amplia gama de procesos industriales tales como soldadura de plásticos y metales, mecanizado, formación de metales, aglomeración de partículas, secado, extracción de líquidos e infinidad de aplicaciones que gracias al avance de la tecnología se optimizan para uso del ser humano.

A continuación, se detallan algunas aplicaciones del ultrasonido en diferentes ámbitos:

- **Medicina:** Realización de exploraciones ginecológicas y de otros órganos evitando usar los rayos X. Principal ejemplo de ello es la ecografía. También se desarrollan tratamientos como la Litotricia en riñón, vejiga y vesícula biliar, tendinitis muscular con calcificaciones, evitando así intervenciones quirúrgicas. Al igual que la eliminación de cálculos renales, el tratamiento de fibromialgia y fisioterapia y en odontología se utiliza para la eliminación de restauraciones para acceder al sistema de conductos, eliminación de obstrucciones, irrigación ultrasónica y obturación del sistema de conductos, así como la cirugía de endodoncia.
- **Industria Química y alimentos:** Contribuye en la reparación de coloides y desgasificación de líquidos, separación y precipitación de partículas finas en humos industriales, lavados textiles. “En lo que concierne a la utilización

²² Yao, Y & Pan Y. (2020) Power ultrasound and its applications: A state-of-the-art review

del ultrasonido en el desarrollo de los alimentos este representa una gran ventaja ya que reduce tiempos en el procesamiento y a su vez permite mejorar la calidad de los mismos”.²³ Dentro de los usos que tiene el ultrasonido en este ámbito podemos destacar: Cortado, congelado y cristalización, procesos de esterilización y pasteurización, emulsificación, entre otros.

- **Ensayos no destructivos:** En la industria en general son pruebas practicadas a los materiales para detectar fugas, medir espesor, detección de discontinuidades, etc. sin causar daño considerable a la muestra examinada, entre estos ensayos tenemos: medidas del módulo de elasticidad, de la modularidad de la fundición, tasa de curado del concreto armado, concentración de líquidos, proporción de mezclas densidad de cerámicos, polimerización en plásticos, porosidad de los materiales, anisotropía en sólidos, medida de temperaturas. Cuando se presenta una discontinuidad en el material o cambios en sus propiedades se causan ecos atenuación que modifican la propagación de la onda.

3.3.4.2. Aplicaciones dentro de la industria de hidrocarburos

La industria de los hidrocarburos es una industria versátil que necesita de muchas industrias más para desarrollarse de forma competitiva, y es que los ultrasonidos pueden ser generados y propagados para un objetivo dentro del yacimiento, y sin embargo cumplir y afectar positivamente otros problemas, algunas aplicaciones del ultrasonido en la industria son:

²³ Robles, L. & Ochoa, L. (2012). Ultrasonido y sus aplicaciones en el procesamiento de alimentos.

- **Deshidratación y desalación del crudo:** Este proceso es necesario ya que a presencia de agua en la corriente de crudo puede generar problemas como la corrosión, la obstrucción, acumulación de incrustaciones y presentar suciedad en la tubería.

El uso de ondas ultrasónicas en esta aplicación es fundamental ya que, para poder retirar cantidad de NaCl, es decir, desalarlo, se hace una inyección de agua al petróleo crudo denominada agua de lavado que al final, forma una emulsión. Dicha emulsión debe ser disuelta de alguna u otra forma, la irradiación de estas ondas ayudan a dividir la emulsión en sus dos fases, fase dispersa y fase continua, produciéndose des emulsificación del crudo en el momento en que cada partícula de agua se una con otra generando el fenómeno de coalescencia formando gotas de agua cada vez más grandes las cuales se separan por la diferencia de densidades.

Cabe resaltar que como el principio fundamental de la ruptura de la emulsión es la diferencia de densidades en la cual la fuerza de gravedad tiene mucho que ver, el tiempo de irradiación de la onda y los tiempos de asentamiento son factores que deben ser considerados previos a cualquier proyecto, ya que de la variación de estos tiempos puede depender el éxito o no de la irradiación de ondas ultrasónicas para desemulsificación, “también la temperatura es un parámetro importante sobre todo en el proceso de desalado, ya que, ayuda a disminuir la viscosidad de la fase interna que a su vez aumenta la velocidad de coalescencia y las gotas que contienen sales solubles se asentaran fácil y rápido”²⁴.

²⁴ CHECK, Gholam. Two-stage Ultrasonic Irradiation for Dehydration and Desalting of Crude Oil: A Novel Method. 2014.

- **Reducir daño a la formación:** El daño a la formación es una condición que se puede presentar en cualquier momento, causando deposición de asfaltenos, incrustaciones orgánicas y el más importante, es decir, el que debe ser mitigado con más urgencia es el daño que generan los fluidos de perforación ya que este genera cambio en la permeabilidad de la roca, la estimulación por medio de ondas ultrasónicas en zonas cercanas a la cara del pozo da buenos resultados con la frecuencia y el tiempo de estimulación adecuados, ya que las ondas ultrasónicas pueden atravesar fluidos tanto agua como aceite y posterior a eso, mediante vibración logran cambiar en la roca el ángulo de contacto entre el fluido y la pared porosa logrando así el flujo de fluido atrapado en ella.

La mezcla de la estimulación ultrasónica con otros métodos como el uso de algunos químicos da mejores resultados, cabe aclarar que el uso de ondas ultrasónicas no necesita la inyección de ningún fluido extraño a la formación por lo que no altera su composición ni sus condiciones, haciéndolo aún más atractivo.

- **Remoción de incrustaciones y limpieza:** Las incrustaciones son un problema común durante las operaciones de producción y pueden provocar a largo plazo una disminución en la producción, las más típicas se deben a la acumulación de sales de carbonato de calcio las cuales se forman por cambios en la temperatura y la presión y las incrustaciones de sulfato de calcio formadas por la mezcla de aguas incompatibles.

La limpieza de las incrustaciones con ondas ultrasónicas se da por medio de los nodos de presión y zonas de baja presión en el fluido que se crean al emitir estas ondas; Dentro de las zonas de baja presión se forman burbujas que se llenan de gas o vapor y crecen hasta alcanzar su diámetro crítico. Cuando alcanzan dicho diámetro, estas burbujas implosionan dando inicio a un fenómeno denominado como colapso de burbuja el cual crea una especie de

chorro que choca con alguna superficie y puede alcanzar velocidades hasta de 500 km/s produciéndose así la disminución de las incrustaciones. El efecto de limpieza se suele relacionar con la distribución de la presión al momento de emitir la onda, es por eso, que algunas zonas se limpian más que otras.

- **Limpieza de tuberías:** La precipitación de compuestos orgánicos en diferentes etapas de la producción es un problema que puede ser resuelto gracias a la cavitación generada por las ondas ultrasónicas, dicho fenómeno ayuda a disminuir la obstrucción de las tuberías en cualquier etapa en que se encuentren instaladas, ya sean, en las tuberías de producción, en las facilidades de superficie o en los oleoductos.
- **Recobro mejorado del petróleo:** La disminución de la producción a nivel mundial ha llevado a las compañías a abrirse a nuevos horizontes, entre ellos están los ultrasonidos como método de recobro mejorado, su uso trae muchos beneficios, entre ellos están: su fácil instalación, que no se requiere inyectar fluidos yacimiento, su costo, baja contaminación, su versatilidad y que puede llegar a ayudar en otros factores anteriormente mencionados.

El aumento de la producción debido al uso de ondas ultrasónicas se debe al cambio que estas generan en algunas propiedades tanto del fluido como de la roca, como, por ejemplo, la viscosidad, la humectabilidad, la permeabilidad, eficiencia de desplazamiento, las fuerzas capilares, entre otras fundamentales para una buena tasa de producción de hidrocarburos.

4. DESARROLLO DEL ULTRASONIDO

La recuperación mejorada del petróleo ha tenido infinidad de retos a lo largo de los años con cada una de las condiciones de cada yacimiento presente en el mundo, es por ello que, la industria siempre busca soluciones cada vez mejores, que ayuden al aumento de la producción y que no afecten la composición de los yacimientos, es pensando en ello que llegaron las ondas ultrasónicas a los métodos de recobro mejorado, siendo este un método de bajo costo, baja contaminación, bajo consumo de energía, no detiene la producción al momento de su aplicación, no necesita la inyección de ningún tipo de elemento al yacimiento, entre otras ventajas por encima de los métodos convencionales. Dentro del éxito del método se deben tener en cuenta algunos procedimientos de ingeniería como: “desarrollos de equipos de alta eficiencia, selección correcta de los pozos y la modelización matemática”²⁵

Las ondas ultrasónicas producen vibraciones en forma de ondas hidrodinámicas en el yacimiento con el fin de proporcionar energía continua para desalojar el petróleo atrapado en la roca, este desalojamiento se debe a los mecanismos que tienen las ondas de ultrasonido para producir cambios en las propiedades del fluido y de la roca, lo que hace que, como ya lo habíamos mencionado anteriormente, este método modifique varias propiedades al mismo tiempo y así sus aplicaciones en la industria.

²⁵ Siti Habibah Shafiai. Adel Gohari Conventional and electrical EOR review: the development tren of ultrasonic application in EOR. 2020.

4.1. ESTADO DEL ARTE

El desarrollo de métodos de recobro como el ultrasonido, el cual “se considera un método efectivo en yacimientos de petróleo que se encuentra en ventaja comparado con métodos convencionales porque se cataloga como una tecnología “verde”, tiene una alta adaptabilidad al yacimiento, cuenta con una operación técnica y tecnológica sencilla pero no por esto ha logrado una alta implementación en campo”²⁶ ha ido ampliando sus áreas de estudio a nivel de laboratorio. Todo surge debido a que a lo largo de los años y desde sus inicios que datan del año de 1950 en Estados Unidos cuando por el suceso de terremotos o eventos culturales que generan gran volumen de ondas se tuviera un aumento en la producción debido a dichos sucesos, se empezó a trabajar en esta técnica y que hoy en día sea tan prometedora. Desde la fecha hasta la actualidad han sido desarrollados gran cantidad de estudios para catalogar lo que realmente ocurre en yacimiento y en el fluido, adicional a ello las fuentes y equipos de generación ultrasónica. A continuación, se presentan algunas de estas contribuciones realizadas tanto en campo como en laboratorio y adicionalmente en el ANEXO A. PAG 112 se tiene el compendio de todos los estudios realizados.

4.1.1. ESTUDIOS DE LABORATORIO

- Chakma, y F. Berruti (1993)²⁷ Presentaron el primer estudio sobre cuál era el efecto que tenían las ondas de ultrasonido sobre la viscosidad de crudos extrapesados como el petróleo Athabasca, usaron diferentes

²⁶ WANG, Zhenjun. FANG, Ri. GUO, Hangyuan. Advances in ultrasonic production units for Enhanced oil recovery in China. Ultrasonics – Sonochemistry. 1-9. 2019.

²⁷ Chakma, and F. Berruti, "The Effects of Ultrasonic Treatment on the Viscosity of Athabasca Bitumen and Bitumen-solvent Mixtures". May 1993

tiempos (10,30 y 60 min), el petróleo mostro una reducción en la viscosidad hasta del 12%.

- Tarek Hamida, Tayfun Babadagli, (2008)²⁸. Los autores investigaron el efecto del ultrasonido en un flujo de fluidos a través de un capilar utilizando el método de la gota colgante inyectando agua en un tubo capilar sumergido en varios aceites con viscosidades diferentes, el montaje fue sometido a una radiación de ondas ultrasónicas y los resultados revelan un cambio notable en las fuerzas interfaciales entre el petróleo y el agua, lo cual se podría mencionar como una de las razones para aumentar la recuperación del petróleo.
- J. C. Díaz Álvarez, R. Martínez Rey, E. J. Patiño Reyes, y R. Barrero Acosta²⁹ (2013). Los autores evaluaron la eficiencia del tratamiento con ultrasonido sobre la viscosidad de crudo pesado en los llanos orientales de Colombia, el estudio se hizo en un sistema de flujo continuo analizando la influencia de la temperatura, el tiempo de exposición y la intensidad sobre la viscosidad, el experimento tuvo como conclusiones que la temperatura no tiene una influencia sobre la reducción de la viscosidad, también se demostró que el tiempo de estimulación y la intensidad sónica tiene un efecto favorable reduciendo la viscosidad hasta en un 1,5%.
- E. Mohammadian, M. Parak, P. Babakhani, (2014)³⁰. En este estudio se realizan diferentes experimentos de inyección de agua estimulada por

²⁸ Tarek Hamida, Tayfun Babadagli, Effects of ultrasonic waves on the interfacial forces between oil and water. 2008

²⁹ J. C. Díaz Álvarez, R. Martínez Rey, E. J. Patiño Reyes, y R. Barrero Acosta²⁹, "Estudio experimental sobre la eficiencia de un tratamiento de ultrasonido en un sistema de flujo continuo para la reducción de viscosidad de crudo pesado," 2013.

³⁰ E. Mohammadian, M. Parak, P. Babakhani, The Effects of Properties of Waves on the Recovery of Ultrasonic Stimulated Waterflooding. 2014.

ultrasonidos en un núcleo de arenisca, los rangos de las frecuencias fueron 25,40 y 65 kHz y la potencia 50 – 500 W, los resultados evidenciaron que el factor mas importante en estas variables es la potencia, ya que su aumento se relaciona directamente con el aumento en la recuperación del petróleo, mientras que el aumento de la frecuencia solamente acelera el proceso.

- E. Alhomadhi, M. Amro, M. Almobarky (2014)³¹. Los autores de este estudio confirmaron la capacidad de los ultrasonidos para aumentar la movilidad del petróleo, utilizaron una serie de experimentos de laboratorio con muestras de núcleo en un arreglo que permitía que cada núcleo estuviera ubicado de forma horizontal y vertical, usaron una frecuencia de 50kHz, se demostró una mejora en la tasa de recuperación y la interacción fluido/onda dentro de los poros de la roca logra desarrollar cambios en la permeabilidad relativa.
- M.S. Mullakaev, G.I. Volkova, O.M. Gradov (2015)³². Los autores estudiaron el impacto del ultrasonido en la viscosidad y en la temperatura de congelamiento de aceites crudos con diferentes composiciones de n-alcanos, se usaron frecuencias de 24,3 kHz y 4000W, descubriendo que la productividad del tratamiento depende de la composición del aceite y del tiempo de estimulación, después del estudio de resultados se evidencia que la estimulación de ultrasonidos no es adecuada para crudos pesados con alto contenido de n-alcanos, ya que, el aumento del tiempo de estimulación provoca la cristalización de dichos elementos aumentando la viscosidad.

³¹ E. Alhomadhi, M. Amro, M. Almobarky, Experimental application of ultrasound waves to improved oil recovery during waterflooding, 2014.

³² M.S. Mullakaev, G.I. Volkova, O.M. Gradov, Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions, 2015.

- Agi, R. Junin, A.S. Chong (2018)³³. Realizaron un experimento con un micromodelo de vidrio 2D que fue expuesto a ondas ultrasónicas de 40kHz y 500w para poder observar la diferencia entre estimulación intermitente y continua, dando como resultado que la estimulación intermitente dio mejores resultados.
- Agi, et al (2019)³⁴. Realizaron una operación de laboratorio combinada entre una inyección de surfactantes y la estimulación con ultrasonido haciendo uso de un núcleo de arena, dicho núcleo fue sumergido en un baño de agua y posteriormente se inyectaron los surfactantes dando como resultado una recuperación adicional del 11%, cuando se inició la estimulación con ondas ultrasónicas generadas con 40kHz y 500w se evidencio un aumento en la recuperación del 12%.
- Ghamartale, et al, (2019)³⁵. En este estudio se expusieron 5 muestras de carbonato y arenisca con diferentes texturas de roca a una radiación intermitente con 20 kHz y 300W, durante 10 segundos. Este estudio dio como resultado después del análisis petrográfico mostrando que las ondas de ultrasonido pueden tener la capacidad de cambiar la morfología de la roca mediante la generación de microfracturas, también se evidenciaron cambios en la permeabilidad siendo mas positivos en los carbonatos que en las areniscas.

³³ Agi, R. Junin, A.S. Chong, Intermittent ultrasonic wave to improve oil recovery, J. Petrol. Sci. Eng. 166 (2018) 577–591

³⁴ Agi, et al, Comparative study of ultrasound assisted water and surfactant flooding, (2019)

³⁵ Ghamartale, et al., Experimental investigation of ultrasonic treatment effectiveness on pore structure. 2019.

4.1.2. ESTUDIOS DE CAMPO

- Li Congyun, Zhou Pingling, (2006)³⁶. Los autores diseñaron un dispositivo de fondo de pozo que ayuda a prevenir la formación de incrustaciones, a reducir la viscosidad, aumentar la fluidez, mejorar la eficiencia del proceso y aumenta la producción del petróleo, este equipo no necesita energía externa, es seguro y protege el medio ambiente.
- Zhang Jia (2009)³⁷. Los escritores del artículo junto con el instituto de investigación de maquinaria petrolera Hanwei diseñaron una herramienta de fondo de pozo ZYQZ para inhibir parafina y reducir la viscosidad, esta herramienta se ha puesto en práctica en muchos yacimientos petroleros en América y Rusia dando resultados positivos, aumentando la recuperación entre un 6 a 9%.
- Pu, et al, (2011)³⁸. Estos autores estudiaron los efectos de la frecuencia, la potencia y el tiempo de estimulación considerándolas como las variables más influyentes en el tratamiento ultrasónico para la deposición de incrustaciones inorgánicas en la cara del pozo, dando como resultado que el tiempo óptimo de tratamiento era de 80 – 120 minutos.
- V.O. Abramov, et al, (2013)³⁹. Este estudio realizado en Rusia se basa en la aplicación de ondas ultrasónicas para estimular pozos fallidos, es decir, pozos que fueron perforados y no se obtuvo la respuesta esperada, el estudio se realizó en yacimientos con una permeabilidad de

³⁶ Li Congyun, Zhou Pingling. A device for preventing scaling and reducing viscosity, 2006.

³⁷ Zhang Jia, Research on the Technology of Paraffin-Controlling and Viscosity-Reducing for Crude Oil Based on the Ultrasonic Transducer Array, 2009.

³⁸ Pu, et al., Technology of removing near wellbore inorganic scale damage by high power ultrasonic treatment, 2011

³⁹ V.O. Abramov, et al., Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation, 2013

20mD y una porosidad del 15%, el tratamiento uso frecuencias de 25kHz, y logro aumentar la producción de un 50% hasta un 85%.

- Yu Hongpei, Zhao Shushan (2014)⁴⁰. Los autores diseñaron un transductor ultrasónico de alta potencia totalmente automático, este equipo tiene como base los principios de equilibrio de energía, acción térmica y cavitación, también trabaja de forma sincronizada con la herramienta de toma de datos de fondo de pozo lo que hace más eficiente el proceso.
- V.O. Abramov, et al (2015)⁴¹. Los autores de este proyecto piloto utilizaron un equipo diseñado para realizar una prueba de campo en pozos verticales en Rusia, el equipo consto de un generador de ultrasonido, una herramienta de fondo de pozo que funciona bajo condiciones de presión y temperatura altas, con una frecuencia de 15-30 kHz y una potencia de salida de 10kW, además tenía incluido un sistema de inyección para productos químicos y una sonda para la obtención de propiedades de fondo de pozo, dentro del tiempo que se realizó la estimulación y el tiempo en que se monitoreo se logra evidenciar aumento en la producción de cada pozo.
- Zhenjun Wang, Xu Yuanming, Gu Yuting (2015)⁴². Los autores realizaron el diseño de un transductor ultrasónico de alta potencia para el fondo de pozo hecho en niobato de litio, este es un material ligero y respetuoso con el medio ambiente y tiene una alta resistencia a la temperatura, este transductor está en fase experimental, pero está

⁴⁰ Yu Hongpei, Zhao Shushan. A full automatic high-power ultrasonic transducer for EOR, 2014

⁴¹ V.O. Abramov, et al., Sonochemical approaches to enhanced oil recovery, Ultrason. Sonochem. 25 (2015) 76–81

⁴² Zhenjun Wang, Xu Yuanming, Gu Yuting, Lithium niobate ultrasonic transducer design for enhanced oil recovery, 2015.

demostrado que la ubicación de cada vibrador piezoeléctrico hace que la radiación de ondas ultrasónicas aumente.

- M.S. Mullakaev, V.O. Abramov, V.G. Prachkin (2015)⁴³. Hicieron el estudio del concepto y las especificaciones de la máquina del sistema termoacústico de perforación BTAS que combina varios efectos, entre los cuales están: térmicos, ultrasónicos y químicos, esta máquina se probó con frecuencia de 19kHz en 14 pozos de la región de Samara dando resultados positivos aumentando el índice de producción 1,8 veces.
- Jingchao Tan, (2016)⁴⁴. Los autores desarrollan una nueva generación de equipos de fondo de pozo, las partes principales son: generador de ondas ultrasónicas, cable especial el cual está formado por hilos de cobre trenzados, transductor ultrasónico y sistema de orientación magnética, este equipo tiene un rango de potencia de salida entre 0-100 kW, el rango de frecuencia es de 10-35 kHz. Este equipo fue puesto en práctica en un campo de china, su aplicación logro aumentar en más del 30% la recuperación del petróleo.

Con el anterior resumen del estado del arte en el que comprende estudios que han brindado creaciones, diseños e investigaciones alrededor del mundo tanto en laboratorio, simulaciones y proyectos en campo, se logra evidenciar que los resultados de campo son coherentes con los de laboratorio, que la estimulación con ondas de ultrasonido da resultados positivos en su gran mayoría en cuanto a la reducción de viscosidad, reducción de saturación residual del petróleo y mejora en la producción. Así mismo, se destacan beneficios de la técnica en cuanto al medio ambiente y a su fácil implementación.

⁴³ M.S. Mullakaev, V.O. Abramov, V.G. Prachkin, Development of a Combined Technology and Ultrasonic Scheme for Stimulation of Oil Recovery, 2015.

⁴⁴ Jingchao Tan, The application of high-power ultrasonic plug removal, (2016)

4.2 APLICACIÓN DE ONDAS DE ULTRASONIDO

Esta estimulación es selectiva y ecológica, se recomienda en campos maduros, yacimientos naturalmente fracturados, yacimientos areno arcillosos, yacimientos de crudo pesado⁴⁵ y algunos campos offshore, esto hace que cada vez sea más atractivo el uso de las ondas de ultrasonido para aumentar la producción de hidrocarburos. Cabe resaltar que para la buena selección de pozos a estimular se debe tener conocimiento de algunas propiedades y condiciones, como se muestra en el cuadro 4.

Cuadro 4. Características para la selección de pozos.

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Caída de presión de la formación respecto a la inicial	Máximo 25%
Corte de agua actual	Máximo 80%
No de capas en el intervalo perforado	Máximo 10
Espesor mínimo de formación productora	3m
Potencial espontáneo	Mayor a 0,5
Permeabilidad	Mayor a 20 md
Porosidad	Mayor a 15%
Contenido de arcilla	Máximo 15%
Disminución de la tasa de producción en los últimos años	2 veces o más
Viscosidad dinámica @P, T formación	Máximo 25 mPa -s

⁴⁵ MI. Granados J. Dr. Flores F. Prueba tecnológica de estimulación de pozos petroleros mediante la tecnología ultrasónica (PU) en pozos del AIATG. 2012.

Tomado de: M.S. Mullakaev, V.O. Abramov, A.V. Abramova. Development of ultrasonic equipment and technology for well simulation and enhanced oil recovery. Journal of petroleum Science and Engineering, 1-6, 2015.

Cabe resaltar que cuando se trata de pozos offshore se deben tener en cuenta otros parámetros como la profundidad de inmersión de la herramienta y las condiciones de corriente marítima.

4.3 EQUIPOS

El recobro mejorado con ondas de ultrasonido que se ha implementado en varios campos alrededor del mundo⁴⁶ tiene variaciones en la utilización o no de varias herramientas, ya que, todos los pozos tienen características y necesidades diferentes, para hacer la correcta selección de equipos y arreglos dentro de una herramienta que vaya a ser introducida en el pozo se deben tener en cuenta aspectos como: la producción, el tipo de fluido, el tipo de yacimiento, si hubo recobro de otro tipo antes, el tipo de completamiento y su cementación, y el tiempo que se tenga pensado hacer la estimulación. Para poder realizar una estimulación exitosa se debe tener claro los equipos de superficie y aquellos que deben bajar hasta el pozo, aquí vamos a describir los equipos que se usan para este procedimiento.

4.3.1. Generador de ondas: Este equipo es fundamental dentro del proceso, ya que, es aquel que genera las ondas, “este equipo debe contar con 4 unidades importantes que son: unidad de alimentación, unidad de amplificación, unidad de

⁴⁶ Alhomadhi E, Mohammad A, Mohammad A, Experimental application of ultrasound waves to improved oil recovery during waterflooding, 2014.

polarización y unidad de control”⁴⁷, la unidad de control es considerada la más importante ya que, es aquella que debe encargarse de la recepción de datos que emitirá la herramienta de fondo de pozo. Un generador real que fue diseñado y usado por Mullakaev, Abramov, Abramova en un proyecto piloto para la recuperación mejorada de petróleo con ondas ultrasónicas, es el TS6P un generador ultrasónico diseñado para alimentar las herramientas de fondo de pozo, su variación en comparación con los demás generadores es que la gama de frecuencias bajo las que trabaja se pueden modificar según las necesidades, también garantiza el almacenamiento de datos para después ser transferidos a un monitor, y finalmente la refrigeración del mismo cuenta con un agente anticongelante para que proceso pueda trabajar en temperaturas negativas sin ningún inconveniente, en el cuadro 5 están algunas de sus características técnicas.

Cuadro 5. Características generador T6SP

Características	Valor	Unidades
Potencia de salida máxima	6	kW
Frecuencia de operación	16-19	kHz
Voltaje de salida	Desde 420 hasta 720	V
Eficiencia	No menos a 85	%
Fuente de alimentación	3 X 380/50, 60	Numero de fases x voltaje / frecuencia
Variación permitida del voltaje de alimentación	Desde -15 hasta +10	%
Potencia consumida	No más de 7	kW

⁴⁷ M.S. Mullakaev n, V.O.Abramov,A.V.Abramova. Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery.

Enfriamiento	Aire	
Dimensiones	660 * 670 * 310	mm
Peso	No más de 56	kg

Tomado de: M.S. Mullakaev. V.O. Abramov, A.V. Abramova. Ultrasonic piezoceramic module and technology for stimulating low-productivity Wells. 2017.

4.3.2 Camión wire line: Es un camión que tiene funciones parecidas a los usados para los registros de pozos, dentro de él se maneja todo el monitoreo y suministro de elementos para la estimulación.

4.3.3. Herramienta de fondo de pozo: Para poder hacer una estimulación completa en yacimientos con ondas de ultrasonido se han diseñado unas herramientas de fondo de pozo las cuales contienen todo lo necesario para que equipos que antes eran usados en otras industrias puedan entrar a un yacimiento y hacer su trabajo. la selección y el diseño óptimo de una herramienta de fondo de pozo ultrasónica es fundamental hacer uso de un equipo experimental para el ensayo, en este equipo se podrán obtener valores de amplitud de la pared lateral de la cámara, estas herramientas deben tener valores de frecuencias y potencia que encajen con los valores determinados por el generador de onda de superficie. También se deben tener en cuenta criterios para la selección del pozo al que se le realizara la estimulación, estos pueden ser: corte de agua, espesor mínimo de la formación, permeabilidad, contenido de arcilla, entre otros.

En la industria existe variedad de herramientas de fondo de pozo que han sido creadas y patentadas por diferentes investigadores a lo largo de la historia, a continuación, se mencionarán algunos elementos fundamentales que puedan contener dichas herramientas:

- **Cable coaxial:** Este cable presente en varios arreglos de herramientas de fondo de pozo, tiene varias secciones dentro del mismo que son:
 - Conductor interno: el cual consiste básicamente en un alambre esmaltado trenzado.
 - Capa de aislamiento: esta capa está hecha la mayoría de las veces en polipropileno especial.
 - Conductor externo: es una estructura de red tejida por alambres de cobre desnudos.
 - Capa de aislamiento a prueba de agua: esta capa está hecha de material impermeable, aumentando así la eficiencia de transmisión de energía.

El diseño de este tipo de cables está sujeto a las necesidades, dentro de las investigaciones que se han realizado a lo largo del tiempo se han encontrado varios tipos de cable, dentro de estas variaciones encontramos un cable especial diseñado para la estimulación sonoquímica, este cable consta de un conductor interno de 3 núcleos utilizado para alimentar la herramienta ultrasónica de fondo de pozo, este cable es fijado en la tubería para ser usado cuando se requiera inyectar reactivos químicos, y es allí donde se resalta una de las ventajas del método de recobro mejorado con ondas ultrasónicas y es que no se debe detener la operación para su realización y se pueden combinar métodos disminuyendo la probabilidad de problemas técnicos.

Figura 5. Cable coaxial usado para fluidos altamente viscosos.



Fuente: MAHMOUD MERIBOUT. On Using Ultrasonic-assisted Enhanced Oil Recovery (EOR): Recent Practical Achievements and Future Prospects. 2018

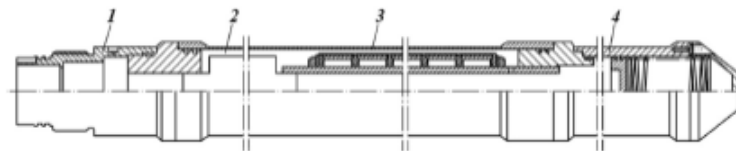
La variedad en diseños de cables se debe a que muchos de ellos tienen problemas en la resistencia a la tensión y a flexión, escasa resistencia al aceite y a altas temperaturas.

- Brida especial ultrasónica: Esta brida es una especie de cable que conecta en su parte inferior al transductor subterráneo y en su extremo superior al cable coaxial.
- Transductores ultrasónicos: Son equipos encargados de generar y detectar energía ultrasónica gracias a que contienen cristales piezoeléctricos que dentro de la industria los más comunes son los cuarzos, la turmalina, circonita de titanio entre otros. Estos materiales tienen capacidad de transformar la energía eléctrica en sonido y viceversa, por lo que el

transductor dentro de un arreglo de estimulación con ondas ultrasónicas puede actuar como emisor o receptor de ondas, cabe aclarar que un cristal piezoeléctrico no tiene la capacidad de emitir y recibir energía en el mismo instante, para que actúe como emisor y receptor se debe tener un equipo especial con la capacidad de aplicar corriente en un instante determinado y recibir corriente en otro instante.

Los transductores que han sido diseñados y escogidos para una estimulación en un pozo deben considerar tener un sensor de temperatura, ya que, si se detecta una temperatura alta la emisión de ondas de ultrasonido no es efectiva puesto que las altas temperaturas afectan el fenómeno de cavitación el cual es uno de los mecanismos que usa las ondas para el método de recobro los cuales mencionaremos más adelante. Los transductores están formados básicamente por 4 secciones como en la figura 6 las cuales son: “Conector superior el cual va conectado a la brida ultrasónica, correspondencia de inductancia, radiación de ondas ultrasónicas y equilibrio de presión.”⁴⁸

Figura 6. Transductor subterráneo.



Fuente: Zhenjun Wang , Yuanming Xu. Review on application of the recent new high- power ultrasonic transducers in enhanced oil recovery field in China. 2014

⁴⁸ Zhenjun Wang , Yuanming Xu. Review on application of the recent new high- power ultrasonic transducers in enhanced oil recovery field in China. 2014

- Transductor ultrasónico de alta potencia: Existen varios tipos de transductores y este es uno de los más comunes usados en la industria para el recobro mejorado, estos equipos deben ser diseñados bajo las condiciones de cada pozo y teniendo en cuenta todos los factores críticos que puedan determinar el éxito o no del procedimiento, se deben usar generadores de alta potencia debido al medio en que se van a propagar, por ejemplo, los gases tienen baja impedancia acústica y alta adsorción acústica lo que causa que la transmisión de energía no sea eficiente si no se realiza con una potencia suficiente para tener una buena adaptación de la impedancia, la adsorción, la amplitud de vibración y la direccionalidad con que ha sido emitida esta onda.

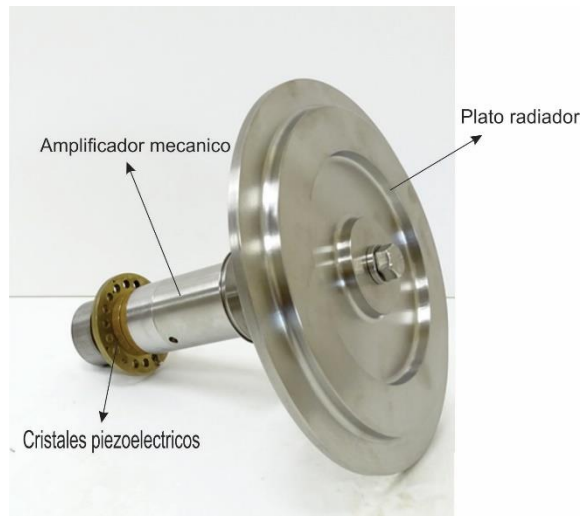
Estos transductores funcionan básicamente gracias a un elemento vibrador que contiene los cristales piezoeléctricos, estas vibraciones son amplificadas por un amplificador mecánico y este a su vez accionada un radiador el cual gracias a su variación y extensa forma aumenta la resistencia de la radiación lo que ayuda a mejorar la adaptación de la impedancia al medio ayudando así a la transmisión de ondas de ultrasonido en medios gaseosos. Debido a que la configuración del radiador dentro del transductor puede cambiar, traemos algunas de ellas más comunes en la industria:

- Transductor de placa escalonada: este diseño de transductor tiene un radiador de placa escalonada el cual ayuda a que al emitir las ondas estén sean generadas y su directividad sea tipo pistón, en la figura 7 se muestra un transductor de placa escalonada donde se evidencian sus partes principales.

- Transductor de placa ranurada escalonada: Este diseño ayuda a manejar la directividad de las ondas emitidas y también incorpora la distribución homogénea de la amplitud de la vibración.

Cada radiador puede ser construido diferente y aun así conservar la forma de su placa, pueden ser cilíndricos, rectangulares o de cualquier otra forma.

Figura 7. Transductor de placa escalonada.

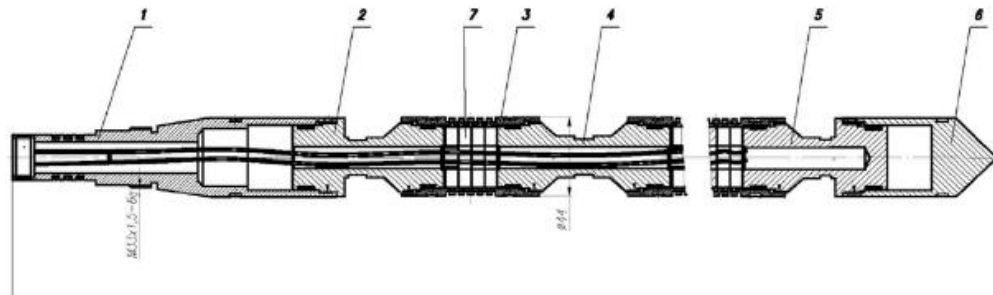


Modificado de: Museo virtual de la ciencia.
http://museovirtual.csic.es/coleccion/torres/fichas_aparatos/toap146.htm. 2021.

Para dar un ejemplo de las herramientas de fondo de pozo reales y con sus arreglos de equipos completos mencionaremos las herramientas PSPK-52 y PSPK-44, el número que acompaña su nombre indica el diámetro en milímetros de la herramienta, una de las variaciones más importantes con respecto a las demás es que cuenta con la posibilidad de variar el rango de frecuencia e intensidad de la radiación de la onda “garantizando intensidades en la zona cercana al pozo entre

1,3 y 1,8 veces superior que en comparación con otras herramientas”⁴⁹. Su disposición de elementos más importantes se ven en la figura 8, donde (1) es la conexión al cable principal, (3) el transductor y (7) la herramienta piezocerámica. En el cuadro 6, se evidencian algunas características de estas herramientas para poder conocer si son aptas para su uso en diferentes proyectos.

Figura 8. Unidades principales de la herramienta de fondo de pozo PSPK-44



Tomado de: M.S. Mullakaev, V.O. Abramov, A.V. Abramova. Ultrasonic piezoceramic module and technology for stimulating low-productivity Wells. 2017.

Teniendo en cuenta que, aunque ya están determinados sus elementos y organización estos pueden ser cambiados según las necesidades de cada pozo, es decir, puede que para cada proyecto de recobro mejorado con ultrasonido haya que diseñar una herramienta de fondo de pozo que cubra cada reto que se presente.

⁴⁹ M.S. Mullakaev *, V.O. Abramov, A.V. Abramova. Ultrasonic piezoceramic module and technology for stimulating low-productivity Wells. 2017

Cuadro 6. Características herramientas de fondo de pozo PSPK-44 y PSPK-52

Características	Unidad	PSPK-44	PSPK-52
Consumo de energía	kW	1,4	1,6
Voltaje de alimentación	V	No más de 150	No más de 150
Voltaje de alimentación (no inferior a 100 atm)	V	400	400
Frecuencia de resonancia	kHz	17 +- 1	15,5 +- 1
Resistencia dinámica en la resonancia		No más de 100	No más de 100
Frecuencia	ohm	100	100
Dimensiones	mm	44 * 1340	52 * 1500
Masa	kg	No más de 9	No más de 15

Tomado de: M.S. Mullakaev. V.O. Abramov, A.V. Abramova. Ultrasonic piezoceramic module and technology for stimulating low-productivity Wells. 2017.

4.4 PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN DE LAS ONDAS DE ULTRASONIDO

Como en todos los procedimientos de estimulación a nivel de yacimiento se debe hacer procedimientos para la preparación y posteriormente la estimulación, cada procedimiento será mencionado a continuación:

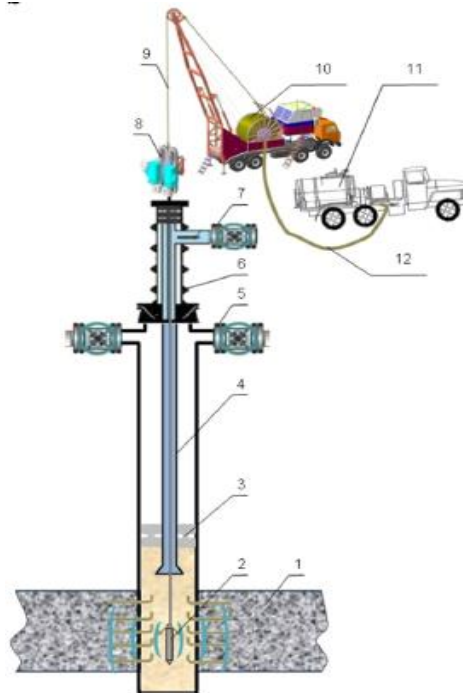
- Operaciones preparatorias.
 1. Detener la producción del pozo y bajar tubería con empaquetadura para ser sentada a una distancia considerable por encima de la zona de perforados.
 2. La unidad de bombeo y el elevador están conectados a tierra y al generador.
 3. El transductor y la estación de trabajo inician su posición de operación
 4. Si la estimulación va a ser mezclada con métodos químicos se conecta una manguera a la unidad de bombeo con el fin de suministrar reactivos químicos, posteriormente la manguera es conectada a un tanque con reactivos químicos.
 5. Equipos encargados de lubricar y alimentar de energía eléctrica el cable coaxial se ubican en el cabezal del pozo.
 6. Las poleas encargadas del transporte del cable coaxial son ubicadas en el equipo de alimentación

- Operaciones para la estimulación
 1. Se bajan herramientas geofísicas para obtener parámetros del pozo como: la presión, temperatura y flujo de fluidos, esta herramienta es retirada después de cumplir su función.
 2. La herramienta de fondo de pozo es conectada al cable coaxial.
 3. Si la estimulación va a ser mezclada con métodos químicos es en este punto donde se inyectan.
 4. Se cierra la válvula de control de cabeza de pozo, se desconecta la tubería a la unidad de bombeo y se conecta al cable coaxial del camión wireline.

5. Se introduce la herramienta de fondo de pozo a través de la tubería y se empieza el tratamiento ultrasónico, los parámetros como la presión y la temperatura de la zona cercana al pozo deben ser controlados.
6. Después de la estimulación la herramienta de fondo de pozo se desconecta, si se usó reactivos químicos se desconecta la manguera y se conecta a cilindros de aire comprimido.
7. Se desmontan los equipos para alimentar y lubricar.

En la figura 9, se observa el montaje de los equipos para la estimulación ultrasónica, desde el yacimiento con el numeral 1, la herramienta de fondo de pozo (3), la empaquetadura (3), cable coaxial (9), el camión wireline (11) y el (12) la unidad donde se guardan los reactivos químicos en caso de ser necesarios.

Figura 9. Montaje de equipos para el tratamiento ultrasonico



Fuente: M.S. Mullakaev, V.O. Abramov, A.V. Abramova. Development of ultrasonic equipment and technology for well simulation and enhanced oil recovery. Journal of petroleum Science and Engineering, 1-6, 2015.

4.5 MECANISMOS DE RECUPERACION POR ULTRASONIDO

Ya que se considera al ultrasonido dentro de las nuevas tecnologías como un metodo interesante e ideal a la hora de reducir la viscosidad y modificar ciertas propiedades de la roca y del fluido, es necesario conocer como este interactua en el yacimiento con estos dos parametros. Si se habla especificamente de propagacion de ondas en liquidos, su comportamiento estara sujeto a las propiedades del mismo y a la geometria con que cuente el yacimiento dado que parte de la onda se refleja y otra se trasmite. Con relacion a lo dicho anteriormente, se puede hacer referencia a los efectos que tiene el ultrasonido de alta frecuencia el yacimiento ya sea por medio de aspectos fundamentales como la vibracion mecanica, la cavitacion y la accion termica.

4.5.1. Cavitación: Cuando las ondas de ultrasonido entran en contacto con algún fluido, en este caso el crudo, el principal fenómeno que ocurre es la cavitación acústica, la cual, genera varios efectos en el yacimiento, dentro de los cuales están:

- **Reacciones químicas:** la cavitación acústica desencadena reacciones químicas que ayudan a descomponer las fracciones pesadas presentes en el crudo pesado, disminuyendo así su viscosidad lo cual trae consigo fácil transporte, aumento en la gravedad API y su valor en el mercado.
- **Burbujas de Cavitación:** la formación de burbujas de cavitación se da en los lugares en los que ocurren bajas de presión debido a la transmisión de

ondas de ultrasonido, estas burbujas absorben la energía de las ondas haciendo que su tamaño incremente, la presión externa y la presión de las mismas burbujas hace que implosionen generando condiciones ideales para las reacciones químicas , también liberan energía en forma de choque y en la formación de micro chorros que pueden llegar a tener una velocidad considerable.

Todos estos efectos generados por la cavitación en forma general ayudan a la disminución de fracciones pesadas en el crudo las cuales son las responsables de su resistencia a fluir, lo que quiere decir que, al disminuir la presencia de estas, se logra disminuir la viscosidad del crudo, aumentando su facilidad de transporte y su factor de recobro⁵⁰.

4.5.2. Vibración Mecánica: Al aplicar las ondas ultrasonicas en un medio elastico y tener un incremento en su amplitud, velocidad y aceleracion de particulas se trasmite como es de esperar, una vibracion mecanica y con ello se generan ciertos cambios ya sean en el yacimiento o en el fluido. Dentro de estos cambios podemos destacar:

- A medida que se genera la vibración mecánica y a su vez se aumenta la intensidad de la onda se produce cierta presión de impacto en la formación que libera una cantidad de energía distribuida en el área. Esta presión provoca unas microgrietas en las rocas de la formación que, a mayor intensidad, induce a que la unión inicial que había entre la roca y el crudo se debilite permitiendo su separación y mejor fluidez.
- Durante esta vibración es necesario hablar de la fricción que se ejerce entre partículas y que por este fenómeno “se produce un calentamiento local

⁵⁰,

sobre el fluido el cual se puede traducir como una de las fuentes del efecto térmico ultrasónico”.⁵¹

- Como es característico del método al aplicar ondas ultrasónicas de alta frecuencia e intensidad se tiene una reducción en la viscosidad del petróleo, ya que se genera una aceleración en las moléculas que componen a este fluido lo que genera rompimiento de algunas estructuras dando como resultado otras más sencillas facilitando el flujo.
- En capilares se genera una reducción en la tensión superficial de los poros dando como resultado un cambio ya sea de expansión o de contracción.

4.5.3. Acción térmica: “La resistencia a la hora de fluir, en este caso en el petróleo, se debe a la fricción interna que hay en el mismo”⁵². Para mejorar esta resistencia al flujo se puede hacer uso del aumento de la temperatura en yacimiento y de paso tener una reducción en la viscosidad, parámetro que directamente mejorara su fluidez. Este efecto térmico y su accionar se puede definir de manera integral y resumida en el Cuadro 7:

⁵¹ Y ²⁸ Zhenjun, W & Ri, F & Hangyuan, G (2019). Advances in ultrasonic production units for enhanced oil recovery in China.

Cuadro 7. Factores que integran la acción térmica.

Absorción	Al generarse y absorberse las ondas ultrasónicas dentro del yacimiento se convierte la energía acústica en energía térmica.
Fricción	Se desarrolla ya sea en la superficie y límites del área donde se generan las ondas permitiendo así un calentamiento local en el frente de onda o cuando se forma la onda de choque.
Cavitación	Durante el colapso de las burbujas se libera gran cantidad de energía térmica haciendo que la temperatura local aumente en gran proporción.

FUENTE: WANG, Zhenjun. FANG, Ri. GUO, Hangyuan. Advances in ultrasonic production units for enhanced oil recovery in China. [En línea]. - Ultrasonics sonochemistry, 2020. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417719304365>

Finalmente se puede resumir que si se aumenta la frecuencia del ultrasonido se tendrá una mejora tanto en el efecto de absorción como la fricción en los límites y si se aumenta la intensidad, por ende, se mejora la cavitación y el efecto térmico.

4.6. PROPIEDADES DEL FLUIDO

El ultrasonido como método de recobro actúa de manera en que logra modificar ciertas propiedades del fluido que ayudan en la recuperación mejorada del petróleo, entre esas propiedades están:

4.6.1. Viscosidad: Esta propiedad se define como la resistencia del petróleo al flujo, la cual es causada por la fricción interna generada a la hora en que las moléculas del fluido tratan de desplazarse unas sobre otras. Su denotación está dada por la letra μ y su unidad de medida en el sistema cegesimal es en centipoises, cp., ($\text{gr}/\text{cm}^*\text{seg}$). Se puede realizar una clasificación de los principales factores que afectan la viscosidad como lo son:

Los principales factores que afectan la viscosidad son:

- **Composición del petróleo:** En ese caso, se puede hablar de los “hidrocarburos parafínicos puros que muestran un incremento regular en la viscosidad a medida que el tamaño y la complejidad de sus moléculas aumenta”⁵³. Adicional a ello se puede inferir que la viscosidad aumentará con el peso molecular y a su vez cuando disminuye la gravedad API.
- **Temperatura:** Este parámetro como se mencionó anteriormente influye tanto en la viscosidad como en la densidad donde al tener un incremento de temperatura en el crudo se provoca un descenso en las medidas de viscosidad, esto generalmente es atribuido “en líquidos ya que cuenta con gran cantidad de moléculas (comparado con un gas) y sus fuerzas de cohesión son mayores. Como la cohesión disminuye con la temperatura, entonces el valor de viscosidad disminuirá cuando la temperatura aumente”⁵⁴.
- **Gas disuelto:** Cuando en el crudo se tiene poca cantidad de gas en solución se cuenta con una medida de alta en la viscosidad químicamente

⁵³ Muñoz, S. 1993. Propiedades de los fluidos en los yacimientos petrolíferos.

⁵⁴ Modon, A. Teoría de Mecánica de Fluidos, Apuntes.

hablando la reducción de viscosidad se produce porque las moléculas pequeñas de los componentes del gas pasan a formar parte de la configuración molecular y aumentan la separación intermolecular entre las moléculas complejas de la fase líquida, lo cual reduce la resistencia al movimiento. Adicionalmente la cantidad de gas en solución es una función directa de la presión, es decir si la presión disminuye la viscosidad disminuye.

- **Presión:** En cuanto a la presión se puede dividir en dos sucesos, el primero de ellos cuando los valores de presión se encuentran por encima del punto de burbuja y la viscosidad del líquido incrementa linealmente junto con el aumento de presión. El segundo suceso es cuando estos valores están por debajo de la presión de burbuja, gas y líquido están presentes y un aumento en la presión origina que los componentes gaseosos ligeros presentes entren a la fase líquida disminuyendo así la viscosidad del líquido.

La caída de producción en un yacimiento de aceite se atribuye a la disminución de presión con la que cuenta y la cual es la que genera el empuje del petróleo hacia la cara de pozo y a su vez se puede atribuir un incremento en la viscosidad, factores que dificultan su tendencia a fluir.

Para determinar la viscosidad del petróleo y realizar una estimación se hace uso de métodos matemáticos, donde primero se debe hacer una clasificación, es decir existe un método para sistemas saturados y otro para sistemas subsaturados. En los sistemas saturados primero se evalúa la propiedad para petróleo muerto, es decir, petróleo sin gas disuelto y luego a este resultado se le hace una corrección involucrando dicho parámetro. En estos sistemas saturados se utiliza la

correlación de Beggs y Robinson, desarrollada con más de 2000 mediciones de viscosidad y con un rango en sus propiedades como el presentado en el cuadro 8:

Cuadro 8. Rango de variables para sistemas saturados.

Variable	Rango
Solubilidad del gas, Rs	20 a 2070 pcn/BF
Gravedad API	16° a 58°
Presión	0 a 5250psi
Temperatura	70 a 245°F

FUENTE: ESCOBAR, Fredy. Fundamentos de ingeniería de yacimientos. [En línea]. 2000. Disponible en: https://www.u-cursos.cl/usuario/c19094b1ea89f1f08e243796b671e2e5/mi_blog/r/Fundamentos_de_Ingenieria_de_Yacimientos.pdf.

Para determinar la viscosidad, como se habló anteriormente lo primero que se debe hacer es determinar la viscosidad del petróleo muerto (μ_{od}) mediante la correlación de Beggs y Robinson y su ecuación es la siguiente:

$$\mu_{od}: 10^X - 1$$

Donde X:

$$X: T^{-1.163} * e^{6.9824-0.04658*API}$$

Luego de contar con la viscosidad del petróleo muerto, se hace la corrección por efecto del gas disuelto mediante la siguiente expresión:

$$\mu_o: A * \mu_{od}^B$$

Donde:

$$A: 10.715 * (Rs + 100)^{-0.515}$$

$$B: 5.44 * (Rs + 150)^{-0.338}$$

En petróleos subsaturados se hace uso de la correlación de Vasquez y Beggs, que se define como una extensión a la correlación de Beggs y Robinson. Para determinar la viscosidad por medio de esta correlación se hace de la siguiente manera:

$$\mu_o: \mu_{ob} * \left(\frac{P}{Pb}\right)^m$$

Donde m:

$$m: 2.6P^{1.187} * e^{-11.513-0.0000898P}$$

A la hora de analizar la manera en que existe una reducción en la viscosidad por medio del uso de ondas ultrasónicas se puede empezar hablando acerca de la potencia usada y el tiempo de las estimulaciones, es decir, “existe una relación en que a mayor potencia usada más fuerte será la energía que se transmite al yacimiento y por ende una mayor cavitación ultrasónica”⁵⁵, lo cual promueve el

⁵⁵ SHI, Chunwei. YANG, Wei. CHEN, Jianbin. SUN Xiaoping, *et al.* Application and mechanism of ultrasonic static mixer in heavy oil viscosity reduction. 2017

rompimiento de las macromoleculas pesadas en el aceite viscoso y la reduccion de la viscosidad sea mas significativa. Adicional a este parametro, se puede hablar del efecto de la vibracion mecanica que conduce a un fuerte movimiento en las moleculas aumentando asi la friccion presente entre cada una de ellas logrando rompimientos en los enlaces carbono – carbono (C-C) y se afirma, según SHI, Chunwei. YANG, Wei. CHEN, Jianbin. SUN Xiaoping, *et al* en su estudio: Application and mechanism of ultrasonic static mixer in heavy oil viscosity reduction, que a mayor cantidad de estas moleculas presentes en el aceite, es decir, entre mas pesado el petroleo su porcentaje de recuperacion sera mayor dado que existen mas enlaces relacionados con este efecto y su rompimiento sera a mayor escala. Con esto se puede inferir que no solamente se le puede atribuir al aumento de la temperatura, ya sea junto con el uso del ultrasonido o no, una reduccion significativa en la viscosidad del petroleo, sino que por el contrario existen otros factores como los anteriormente nombrados que ayudan a que esa reduccion sea efectiva.

4.6.2. Saturación de fluidos: Se define como una relacion que permite expresar la cantidad de fluidos, que generalmente son: agua (w), petroleo (o) y/o gas (g) que saturan el medio poroso y permiten establecer la fraccion del volumen poroso ocupada por cada fluido presente de la siguiente manera:

$$V_p: V_o + V_w + V_g$$

Donde:

- V_p : Volumen Poroso total
- V_g : Volumen poroso de gas
- V_o : Volumen poroso de petroleo
- V_w : Volumen poroso de agua

De acuerdo a lo anterior se puede inferir que la saturación está en función del volumen del fluido (agua, petróleo o gas) y a su vez en función del volumen poroso de la roca, expresándose de la siguiente manera :

$$S: \frac{V_{\text{fluido}}}{V_{\text{poroso}}}$$

Para determinar la saturación se puede hacer mediante:

- “Métodos directos en el laboratorio, tales como el llamado de todo de la retorta y el de extracción de solventes”.
- “Métodos indirectos en el pozo mediante perfiles eléctricos con registros especiales para dicho objetivo” ⁵⁶

Este valor de saturación puede ser expresado de dos maneras, ya sea como fracción o como porcentaje donde la saturación de todos los fluidos que hacen parte del medio poroso debe sumar 1 si se habla de fracción o 100 si hablamos de porcentaje.

$$S_g + S_o + S_{wi}: 1.0$$

Donde:

- S_g : Saturación de gas
- S_o : Saturación de petróleo
- S_{wi} : Saturación irreductible de agua

⁵⁶ Gutierrez, M. & Iturralde S. 2017 Elementos básicos de ingeniería de yacimientos

Es importante conocer que este parametro varia en funcion del tiempo y del espacio, es decir, el yacimiento cuenta con diferentes valores de saturacion de acuerdo a la cantidad de fluidos presentes, el tiempo en que estos vayan siendo producidos y por ende el espacio que van dejando a su paso. Con relacion a esto se puede inferir que los valores de saturacion van disminuyendo y teniendo valores cada vez mas pequeños pero nunca se tendra una saturacion menor o igual a cero, siempre quedara una cantidad capilar de fluidos que no puede ser reemplazada y se conoce como saturacion residual de fluidos, que generalmente se manifiestan como saturaciones de agua irreductible y agua connata donde una de ellas permanece atrapada como fase discontinua en el medio poroso limitando el flujo de la misma y la otra es el agua atrapada en los poros de la roca que esta presente desde el momento de su depositacion respectivamente. Finalmente es importante resaltar que de acuerdo a la distribucion de los volumenes porosos, la cantidad de fluido presente en el yacimiento y sus respectivas saturaciones el tratamiento por ultrasonido sera diseñaso, estudiado y desarrollado de acuerdo a dichos valores.

4.6.3. Tensión interfacial y superficial: Es fundamental comprender que para hablar de tesion superficial y/o tension interfacial se hace necesario conocer que es la interfase. Definida como aquella region que separa las fases presentes en yacimiento, caracterizada por una solubilidad limitada y que se forma debido a que las fuerzas atractivas entre las moléculas de la misma fase son mucho mayores que aquellas que existen en dos fases diferentes. La representación de esta propiedad está dada por la letra griega sigma σ y sus unidades en el sistema CGS son dina por centímetro elevado a la menos 1.

Si hacemos relación a la tensión superficial, la cual ocurre entre líquido-vapor (aire), se puede caracterizar como una propiedad termodinámica de la interfase y que de acuerdo con la cantidad de energía disponible es posible aumentar su superficie por unidad de área, lo cual es causado por efectos de las fuerzas intermoleculares, del medio en que se encuentre y de la temperatura. Para explicarlo de manera más sencilla se puede definir esta propiedad como una fuerza ejercida en el límite de las superficies entre la fase líquida y la fase vapor por unidad de longitud, la cual es causada por la diferencia entre las fuerzas moleculares del vapor y de la fase líquida, como ya se había explicado anteriormente. Los valores de tensión superficial en el petróleo son básicamente usados para resolver problemas relacionados con los fenómenos capilares y una forma de obtener estos valores es mediante pruebas de laboratorio para cada petróleo en particular o mediante cálculos matemáticos como el siguiente:

$$\sigma^{1/4} = \frac{P}{PM} * (\rho_L - \rho_{vap})$$

Donde:

- σ : Tensión Superficial (dinas/cm)
- PM: Peso molecular de la mezcla
- ρ_L : Densidad del líquido (gr/cm³)
- ρ_{vap} : Densidad del vapor (gr/cm³)
- P: Parámetro adimensional

P, es un parámetro adimensional característico de cada componente:

$$P = 40 + 2.38 * PM_{liq}$$

Cuando existe una reducción en la tensión superficial y a su vez una reducción en la viscosidad de los líquidos en el campo ultrasónico el paso del fluido se vuelve

más lento a través de los poros; se puede inferir que es una propiedad directamente proporcional tanto a la frecuencia, potencia y al tiempo de estimulación por ondas ultrasónicas.

En cuanto a la tensión interfacial se desarrolla entre las fases de dos líquidos diferentes (inmiscibles) o entre un líquido y un sólido la cual se produce porque una molécula cerca de la interfaz tiene interacciones moleculares diferentes de una molécula equivalente dentro del fluido estándar, siendo función de la presión, la temperatura y la composición de las fases. “A medida que la tensión interfacial se hace más baja, las dos fases se aproximan más a la miscibilidad. La tensión interfacial juega un papel importante en el recobro de petróleo especialmente en los procesos terciarios, ya que, si este parámetro se hace despreciable, entonces existirá un único fluido saturando el medio, el cual, fluye más fácilmente”.⁵⁷ es decir, una disminución de la tensión interfacial reducirá la presión capilar generada por las gotas de aceite atrapadas en los poros y, por lo tanto, movilizará el aceite de manera más eficaz.

En la literatura se cuenta con valores aproximados de tensión interfacial entre el agua e hidrocarburos puros a temperatura ambiente esta alrededor de “30 a 50 dinas/cm y para la tensión superficial entre el aire y el agua a temperatura ambiente esta alrededor de 73 dinas/cm”.⁵⁸ De acuerdo con esto se puede deducir que la tensión interfacial está fuertemente relacionada con el aumento o descenso de la temperatura a la hora de realizar procesos de recobro mejorado como es el caso del ultrasonido en presencia de esta.

⁵⁷ Escobar F, Fundamentos de ingeniería de yacimientos

⁵⁸ Willie P & Green D, 1998 Enhanced oil recovery

4.6.4. MOVILIDAD DEL PETROLEO

Se puede definir como una relacion de movilidades entre la fase desplazante que generalmente los autores definen a esta mayormente como el agua o el gas y la movilidad de la fase desplazada que en este caso seria el petorleo, es decir la capacidad con la que cuenta el fluido para fluir hacia los pozos productores. Se puede expresar de la siguiente manera:

$$M_{W,O} : \frac{k_{rw} * \mu_o}{k_{ro} * \mu_w}$$

Como se evidencia anteriormente se puede definir como la relacion que existe entre permeabiliada efectiva y la viscosidad del fluido, permitiendo asi evaluar la relacion de movilidades entre fluidos denominada M, como se muestra acontinuacion:

$$M_{W,O} : \frac{\lambda_w}{\lambda_o}$$

De acuerdo con la literatura se puede clasificar de acuerdo a su valor, por ejemplo, "si $M < 1$, significa que el crudo se mueve mas facilmente que el agua, si $M = 1$ Significa que ambos fluidos tienen igual movilidad y si $M > 1$ significa que el agua es muy movil con respecto al crudo".⁵⁹

Con el desarrollo de los modelos matemáticos y su relación indirecta con la viscosidad se infiere que a una mayor reducción en la viscosidad del petróleo su movilidad será mayor, recordando como se nombró anteriormente los parámetros para que por medio de las ondas ultrasónicas se pueda llegar a una reducción de

⁵⁹ Escobar F, Fundamentos de ingeniería de yacimientos

la misma, pero es importante resaltar que no solamente la movilidad depende de la viscosidad sino a su vez de la permeabilidad y de acuerdo a estudios “los efectos observados de la mejora de la permeabilidad, se cita la cavitación y la presión de radiación producida por el ultrasonido”⁶⁰ como parámetros que favorecen esta propiedad.

4.7. PROPIEDADES DE LA ROCA

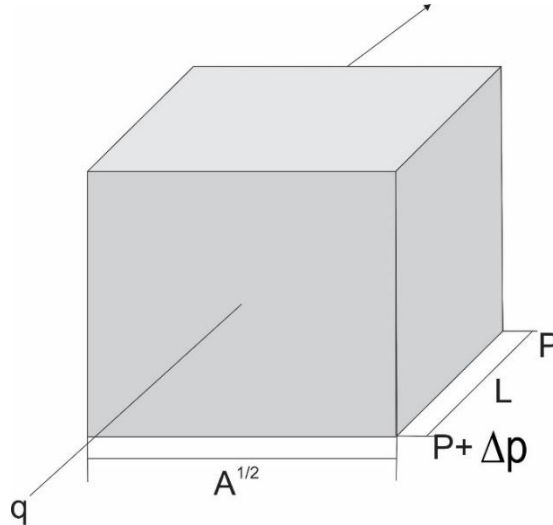
Dentro de los objetivos que tiene realizar una estimulación con ondas de ultrasonido está lograr que estas ondas cambien propiedades de la roca que permitan que el fluido dentro de la ella pueda ser extraído, algunas propiedades importantes son:

4.7.1. Permeabilidad: Esta propiedad define la capacidad que tienen las rocas para que los fluidos tengan movimiento dentro de su espacio poroso, es por eso que esta propiedad también depende del fluido ya que, cada fluido tiene valores de viscosidad y densidad diferente, la unidad representativa de la permeabilidad es el Darcy y está representada por una ecuación la cual a su vez fue desarrollada gracias a múltiples estudios y experimentos, esta ecuación “define la permeabilidad en estado estacionario, horizontal y de viscosidad constante” ⁶¹ y define que la roca tiene una permeabilidad de 1 Darcy si hay un fluido con las siguientes características: viscosidad: 1 centipoise, flujo: 1cm³/seg que va a través de un elemento de área: 1cm², longitud: 1cm y una caída de presión de 1atm como se evidencia en la figura 10, y su ecuación está dada así:

⁶⁰ Igor A. Beresnev, Paul A. Johnson. Elastic-wave stimulation of oil production:A review of methods and results. 1994

⁶¹ Bidner, Mirtha. Propiedades de la roca y los fluidos en reservorios de petróleo. 2001.

Figura 10. Permeabilidad.



Modificada de: Bidner, Mirtha. Propiedades de la roca y los fluidos en reservorios de petróleo. 2001.

$$k = \frac{q * \mu}{A} * \frac{l}{\Delta P}$$

Donde:

- q: Tasa volumétrica de flujo de fluido (cm³/seg)
- μ: Viscosidad del fluido (cp)
- A: sección transversal de la roca, perpendicular a la dirección de flujo (cm²)
- L: Longitud (cm)
- Δp: Caída de presión (atm)
- K: Permeabilidad de la roca (Darcy)

4.7.1.1. Tipos de permeabilidad: Los tipos de permeabilidades dependen de la cantidad de fluidos que estén presentes en la roca, es por eso que se clasifican en:

- PERMEABILIDAD ABSOLUTA (K): también denominada permeabilidad base la cual se da cuando hay un solo fluido saturando los espacios porosos de la roca.
- PERMEABILIDAD EFECTIVA (K_e): cuando hay dos o más fluidos saturando los espacios porosos de la roca
- PERMEABILIDAD RELATIVA: Es la relación entre la permeabilidad efectiva y la relativa, representada en la ecuación

$$K_r = \frac{K_e}{K}$$

El valor de esta propiedad está dentro de un conjunto de valores los cuales dependen de la saturación de fluidos dentro de la roca, su valor se puede determinar haciendo uso de correlaciones o en pruebas de laboratorio en donde aparte de la saturación se debe tener en cuenta la fase mojante y no mojante del núcleo al que se le está haciendo la prueba, es ahí donde se da lugar a las curvas de permeabilidad las cuales son la representación gráfica del flujo de fluidos en un medio poroso. Estas curvas son muy importantes en el recobro mejorado ya que cuando se hacen análisis de laboratorio con ondas de ultrasonido se analizan dichas curvas y se pueden deducir cambios en propiedades importantes como: la saturación de agua residual, la saturación de aceite residual y la permeabilidad relativa al aceite.

En varios estudios relacionados con el uso de ondas de ultrasonido para observar cambios en las curvas de permeabilidad relativa dan resultados favorables en cuanto a la mejora de la permeabilidad relativa al aceite, estos resultados en la

mayoría de los estudios son visibles ya que las curvas después de la estimulación con ondas de ultrasonido se desplazan hacia la derecha, y el efecto en el aumento de la permeabilidad puede durar varios meses, cabe resaltar que la interpretación de los resultados después del uso de ondas de ultrasonido debe darse en conjunto con todas las propiedades y los parámetros necesarios⁶².

4.7.2. Porosidad: Esta propiedad de la roca define la cantidad de espacio poroso dentro de ella, se mide en fracción y puede ser determinada de forma directa e indirecta, existen dos tipos de porosidad, la absoluta y la efectiva, la porosidad absoluta es aquella que tiene en cuenta los poros que están conectados y aquellos que no lo están, y la porosidad efectiva es aquella que por lo contrario solo define los poros que están interconectados.

Existen varios factores que intervienen en el valor de esta propiedad y entre ellos están:

- Forma de los sedimentos.
- Grado de cementación
- Empaquetamiento
- Uniformidad en el tamaño de grano

Esta propiedad debe ser de alto estudio debido a que dentro del espacio poroso es donde se albergan los fluidos, y poder cambiarla por algún método de estimulación sería un resultado altamente positivo. Con las ondas de ultrasonido como método de recobro mejorado se generan grandes presiones dentro del yacimiento por el fenómeno de cavitación lo que hace que se pueda empujar el fluido que hay dentro del espacio poroso, también se ha demostrado que las

⁶² SALEM, Adel. SNOSY, fouad. The effect of ultrasonic waves of EOR on the relative permeability curves. 2015.

ondas ultrasónicas tienen un efecto en la matriz porosa de la roca aumentando también el flujo de fluidos.

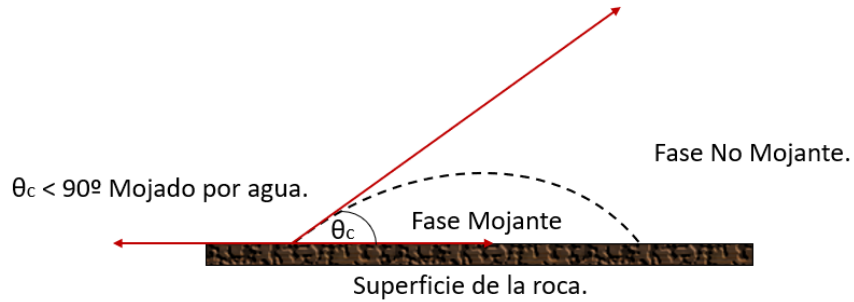
Sin embargo, la poca aplicación de ultrasonidos en la estimulación de pozos hasta la fecha en campos alrededor del mundo se debe a la falta de comprensión de los mecanismos físicos entre un campo de ondas acústicas y un medio poroso.

4.7.3. Mojabilidad: Tendencia de un fluido que junto con presencia de otro inmisible prevalece la adhesión a una superficie sólida, en este caso la superficie sólida haría referencia a la roca que tiene contenidos a los fluidos. El fluido que es más altamente atraído o adherido a la roca se define como la fase mojante, geológicamente se define al agua como la de mayor preferencia, seguida por el petróleo y finalizando con el gas, en el cual, su mojabilidad prácticamente es cero. La medida de mojabilidad se hace por medio del ángulo de contacto entre la superficie sólida y el fluido en contacto, es importante resaltar que en un medio poroso el fluido mojante ocupa los poros menores y en no mojante los mayores, por ende, su preferencia a que en los campos encontremos yacimientos mojados por agua. Basándose en este criterio se tiene las siguientes definiciones de mojabilidad para las rocas:

- Si $\theta < 90^\circ$ se dice que el sistema es mojado por agua
- Si $\theta > 90^\circ$ hace referencia a un sistema mojado por aceite.

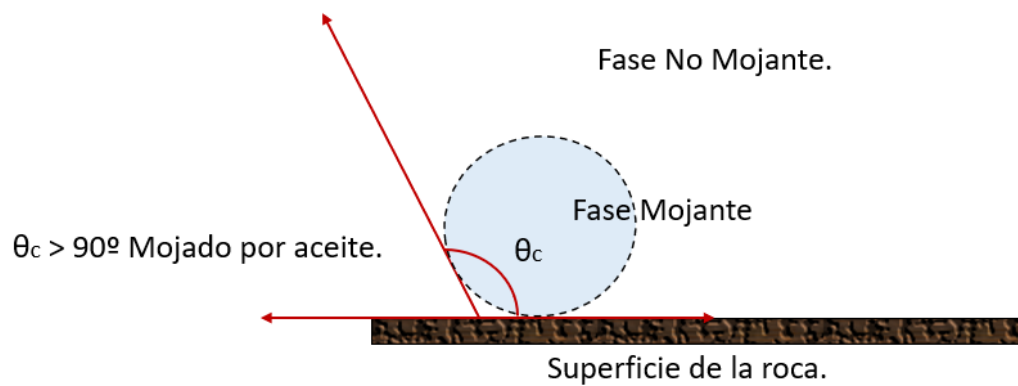
Para entender la variación del ángulo en función de la superficie en la Figura 11 al igual que en la figura 12, se evidencia su medición y cuál es la mojabilidad preferente en cuando a la roca.

Figura 11. Roca mojada por agua



Fuente: Adaptado de Propiedades de la roca y los fluidos en reservorios de petróleo.

Figura 12. Roca mojada por aceite.



Fuente: Adaptado de Propiedades de la roca y los fluidos en reservorios de petróleo.

Dentro de esta propiedad es necesario nombrar un proceso que gobierna su comportamiento más conocido como imbibición capilar, donde la fase mojante es desplazado por la fase no mojante debido a la acción de la presión capilar. Se han desarrollado estudios a lo largo de los años “de los cuales se puede inferir que por medio de la estimulación ultrasónica se tiene una mejora en la recuperación de aceite asociando a su vez a este proceso propiedades como la tensión superficial y la densidad”⁶³ de los mismos fluidos para obtener un mayor porcentaje de recuperación. Durante la estimulación ultrasónica se habla de una serie de mecanismos relacionados con el aporte a la recuperación de petróleo, dentro de ellos está la vibración mecánica que genera de acuerdo a la energía suministrada cambios tanto en la roca y de paso en el fluido, uno de los mecanismos que surgen cuando se produce dicha vibración mecánica es el transporte peristáltico que se da por la deformación de las paredes dentro de tubos capilares (medio poroso) y de esta manera el fluido presente en los poros es expulsado generando un aumento en el flujo, adicional a ello para que se de en óptimas condiciones este tipo de mecanismo es importante poner a consideración el tipo el material del capilar por donde será transportado. Es importante recordar que la vibración mecánica influye tanto en las fuerzas interfaciales, fuerzas viscosas y al mejorar el impulso y la transferencia de calor.

4.8. PROPIEDADES REOLOGICAS

⁶³ H.V. Fairbanks, W.I. Chen, Ultrasonic acceleration of liquid flow through porous media, A.I.Ch.E. Sonochem. Eng. 67 (1971) 108.

A.V. Sokolov, E.M. Simkin, Study of influence of acoustic treatment on rheological properties of some oils, in Topics in nonlinear geophysics (Voprosi nelineinoy geofiziki): All-Union Research Institute of Nuclear Geophysics and Geochemistry (VNIIYaGG) (1981)

La reología es aquella que estudia el flujo y las deformaciones de la materia, estos estudios se dirigen casi siempre a los fluidos, dentro de la reología se estudian varias propiedades y conceptos como: viscosidad dinámica, punto de fluidez, densidad, tensión interfacial, punto de cedencia, esfuerzo de corte, entre otros. Como las propiedades reológicas son básicamente la explicación al flujo de fluidos se convierten en propiedades de alto interés, en la actualidad para mejorar estas propiedades se usan métodos térmicos, químicos y ultrasónicos. El tratamiento ultrasónico para modificar dichos parámetros es un método prometedor y rentable. Dentro de los estudios realizados a la estimulación con ondas ultrasónicas para ver los cambios en las propiedades reológicas se encuentran resultados positivos que se logran evidenciar por medio de la disminución de la viscosidad, la densidad, el punto de fluidez, cambios en las curvas reológicas que relacionan los esfuerzos cortantes y la velocidad de corte, también se evidencian cambios en la composición química debido a la disminución de fracciones pesadas del crudo, cabe resaltar que el resultado del cambio de las propiedades reológicas también depende de las propiedades iniciales del crudo⁶⁴.

4.9. CORTE DE AGUA

Dentro de la producción de hidrocarburos el corte de agua se define como la tasa de agua producida con respecto al total de volumen de fluidos producidos en el pozo. La cantidad de agua producida depende del tipo de yacimiento y dentro de la industria puede resultar algo positivo y negativo, positivo en cuanto a que puede significar que el agua le está brindando energía al yacimiento para la producción de fluidos, y negativo ya que la producción de agua no brinda ningún aporte económico. Para determinar el corte de agua se hace por medio de una ecuación

⁶⁴ MULLAKAEV, M. ASYLBAEV, V. PRACHKIN, G. VOLKOVA, I. Influence of ultrasound and heat treatment on the rheological properties of ust-tegussskoe oil.

y también se puede medir el corte de agua de un flujo que va a través de una tubería por medio de medidores y diferentes tecnologías.

$$\% WC = \frac{Q_w}{Q_w + Q_o} * 100$$

Donde:

- Q_w = Caudal de agua.
- Q_o = Caudal de petróleo.
- WC = Corte de agua.

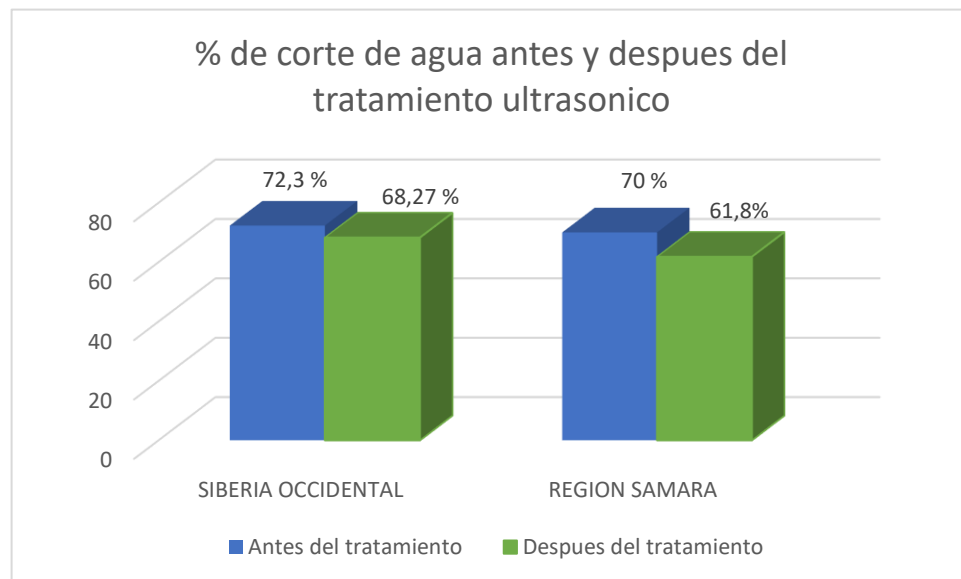
La disminución del corte de agua en yacimientos en los que se ha demostrado que la producción de esta no brinda energía al yacimiento es un reto cada vez mayor y se ha demostrado que la aplicación de ondas de ultrasonido disminuye este valor en forma considerable. Para poder aplicar esta estimulación se deben hacer estudios geofísicos en los que se conozca de forma detallada la afluencia de fluidos y su orientación para así poder crear un mapa de distribución de fluidos y así poder estimular la zona de interés. En la mayoría de los casos en los que se aplican ondas ultrasónicas en pozos para aumentar su productividad también se logra la disminución del corte de agua y esta se debe a la limpieza de la zona de perforados, es decir, se limpian las zonas que contienen petróleo y las zonas que contienen agua no se tratan gracias a los estudios previos⁶⁵.

Hasta ahora el uso del tratamiento ultrasónico para el corte de agua no se muestra dentro de los estudios como un objetivo principal, los resultados existentes de forma positiva se han dado en busca del aumento de la producción, sin embargo, casi siempre el corte de agua disminuye en porcentajes importantes. Un estudio

⁶⁵ Abramova A, Abramov V, Bayazitov V, Gerasin A, Pashin D. Ultrasonic technology for enhanced oil recovery. 2014.

realizado en Siberia occidental y en la región de Samara en 30 pozos realizado por Abramova A, Abramov V, Bayazitov V, Gerasin A, Pashin D en el 2014, donde se realizó el tratamiento ultrasónico junto con la optimización del equipo de bombeo el corte de agua logro disminuir hasta un 4% como muestra la figura 13, este valor se logró evidenciar después de un monitoreo de 18 meses.

Figura 13. Resultados de estudios donde disminuye el corte de agua.



Modificado de: Abramova A, Abramov V, Bayazitov V, Gerasin A, Pashin D. Ultrasonic technology for enhanced oil recovery. 2014

5. IMPACTO DEL ULTRASONIDO

La estimulación por ondas de ultrasonido a lo largo de la historia ha sido foco de muchos estudios a nivel de laboratorio y proyectos piloto en campos, los resultados en su gran mayoría han sido positivos, ya que, este método logra modificar propiedades importantes del crudo así mismo como, ayuda a resolver problemas en zonas cercanas a la cabeza del pozo mencionados anteriormente.

El impacto que han tenido las ondas ultrasónicas al ser aplicadas en yacimientos ha dado la vuelta al mundo centrándose en países que se han arriesgado a llevar la técnica a ese nivel como China y Rusia, estos países están a la vanguardia de las nuevas e innovadoras técnicas, las cuales son cada vez menos invasivas y ecológicas.

5.1. CASOS DE APLICACIÓN

El ultrasonido como método de recobro mejorado ha sido estudiado y aplicado en varias partes del mundo tanto a nivel de laboratorio como a nivel de yacimientos, evidenciando buenos resultados y una cantidad importante de ventajas por encima de los métodos convencionales. Algunos casos de aplicación con la metodología y los resultados en ambos contextos son:

5.1.1. Casos de aplicación en laboratorios. Como todos los métodos de recobro para saber que son exitosos a nivel de campo debe haber pruebas y procedimientos en laboratorios que ayuden a fortalecer cualquier teoría, a continuación, se mostraran dos casos con experimentos realizados en laboratorio en los que el ultrasonido fue el método de recobro mejorado.

Caso 1, “Aplicación experimental de ondas de ultrasonido para mejorar la recuperación mejorada durante la inyección de agua”⁶⁶

- Ubicación: Arabia
- Dimensiones de los núcleos:
- Longitud: 10,45 cm
- Diámetro: 5,2 cm.

A continuación, se encuentran las propiedades del fluido usado:

Cuadro 9. Propiedades del fluido.

Características	Valor	Unidad
API	31,2	°
Viscosidad	13 – 16	cp

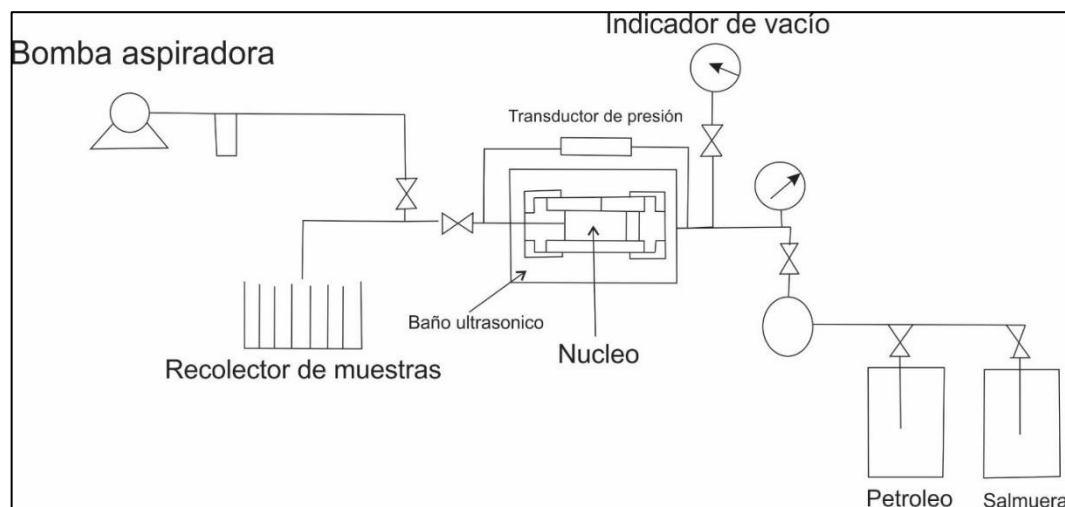
Este es un experimento realizado en laboratorio en que se hace uso estimulación por ultrasonido e inundación a los núcleos con salmuera para poder analizar los cambios en la porosidad, se usaron dos tipos de muestras diferentes en cuando a resistencia a la compresión, la primera muestra es una arenisca con resistencia a la compresión de 5000 psi y la segunda con una resistencia de 150 psi, cada una de ellas fue lavada y secada para el procedimiento.

El primer paso es por medio de las bombas de vacío y el uso de salmuera poder saturar los núcleos y calcular la permeabilidad y la porosidad, este mismo paso se

⁶⁶ Alhomadhi E, Mohammad A, Mohammad A, Experimental application of ultrasound waves to improved oil recovery during waterflooding, 2014.

usará como referencia al hacer la comparación sin ondas de ultrasonido solo la inundación con salmuera, después se inició la estimulación aplicando ondas de ultrasonido generadas en una frecuencia de 50 kHz y con una potencia de salida de 300W, para intentar mover el aceite residual de los núcleos, también se realizaron ensayos en los que no se saturan los núcleos con salmuera y así saber el efecto del ultrasonido en el aceite original, el arreglo experimental que se muestra en la figura 14 muestra la acomodación de cada uno de los elementos y equipos usados diseñados para dar el mejor resultado en cada uno de los experimentos a realizar.

Figura 14. Montaje experimental.

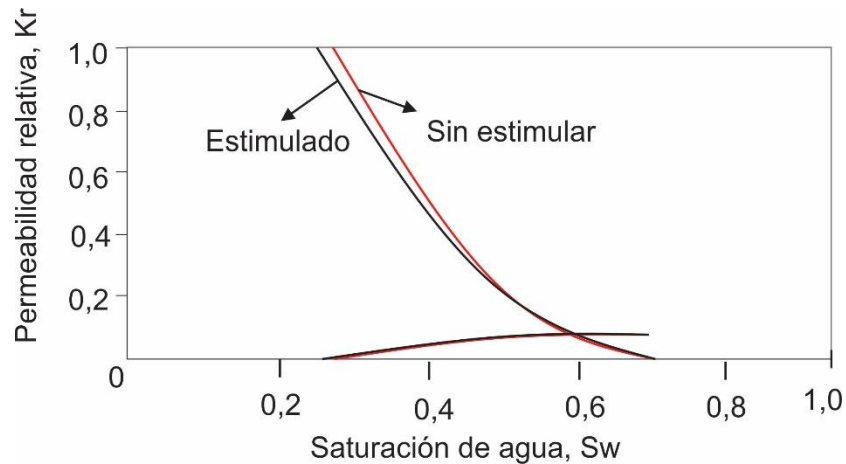


Fuente: Alhomadhi E, Mohammad A, Mohammad A, Experimental application of ultrasound waves to improved oil recovery during waterflooding, 2014.

Los resultados del experimento a nivel de laboratorio fueron positivos logrando modificar la saturación de aceite residual, las curvas de permeabilidad relativa del petróleo/agua como se muestra en la figura 15 y la tasa de producción del petróleo, hay que tener en cuenta que los núcleos dentro del arreglo se pudieron

poner horizontales y verticales, lo que hace que se pueda hacer un análisis con los pozos horizontales.

Figura 15. Cambio en las curvas de permeabilidad relativa.



Modificado de: Alhomadhi E, Mohammad A, Mohammad A, Experimental application of ultrasound waves to improved oil recovery during waterflooding, 2014.

- Caso 2: “Aplicación de ondas ultrasónicas para mejorar la recuperación de petróleo en la fase de recuperación secundaria”⁶⁷.

Para el desarrollo de este estudio en laboratorio usaron muestras de petróleo del Delta del Níger, donde, se tiene como fin investigar la efectividad y la mejora en la recuperación de petróleo por medio de ondas ultrasónicas, con ayuda de simuladores como el Eclipse® 2010 de Schlumberger que predice el desempeño de una de las dos pruebas desarrolladas y de paso se contribuye al estudio con el

⁶⁷ ABDULFATAH, Hajara. Application of Ultrasonic Waves in Enhancing Oil Recovery in Secondary Recovery Phase. 2018.

uso de MATLAB® donde se tienen como información datos de permeabilidad > 20mD y porosidad >15%, que de acuerdo a estos datos y a la simulación los resultados mostraron un aumento en la recuperación que alcanza el 50% atribuyendo este aumento al gran potencial con que las ondas de ultrasonido pueden “desbloquear los poros” y de esta manera facilitar el flujo de los fluidos presentes en la roca, adicional a ello por medio de este Software se pueden analizar los resultados y tener una postura frente a los mismos.

Se desarrollaron dos pruebas dentro de este estudio en laboratorio, las cuales se denominarán como prueba A y prueba B en núcleos; lo que difiere en ellas es que en la prueba A no se utilizó ultrasonido y en la prueba B se aplicó el ultrasonido usando una frecuencia mínima de 24 kHz y una máxima de 54kHz. A continuación, se describen equipos, propiedades del fluido y procedimiento tal cual fue desarrollado y descrito en el estudio. Los equipos y propiedades son:

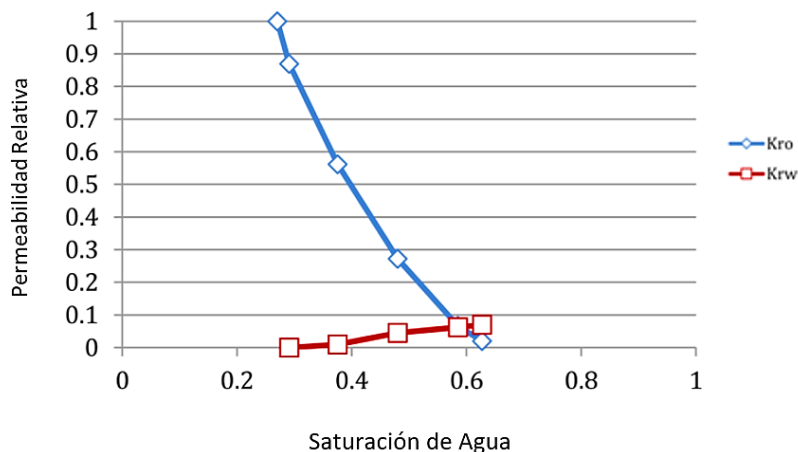
- Recipientes de almacenamiento de fluidos.
- Bombas de desplazamiento.
- Soporte de núcleo.
- Colector de fracciones.
- Transductor de presión y generador de ultrasonidos (Proceq Ultrasonic transducer) con una frecuencia mínima de 24 kHz y una frecuencia máxima de 54 kHz.
- Las propiedades de los fluidos incluyen: viscosidad del agua de 1cp, viscosidad del aceite de 1.1cp y caudal de 0.1cc/seg.

Adicional a ello el procedimiento realizado por los autores de este estudio se describe de la siguiente manera:

- Se coloca el núcleo en el soporte del núcleo con una presión de confinamiento de hasta 1500PSI.
- Se evacua con una bomba de vacío y se satura con salmuera al 5%.
- Se mide el volumen y se calcula la porosidad.
- Se calcula la permeabilidad del núcleo a una tasa de inyección constante.
- Se inunda la muestra del núcleo con petróleo crudo para desplazar la salmuera hasta que esta no se produzca.
- Luego se desplaza el aceite con salmuera a un caudal constante hasta que se alcance la saturación de aceite residual y se determine el OOIP.
- Finalmente se registra continuamente la caída de presión para determinar la permeabilidad relativa utilizando el modelo Chierici L, descrito en su libro Principles of Petroleum Reservoir Engineering.

En cuanto a los resultados del estudio, se puede definir que: Como se había descrito anteriormente, el estudio en laboratorio se llevó a cabo con dos pruebas (A y B). La prueba A fue el experimento base o de referencia para luego poder catalogar y establecer mejoras con el uso de las ondas ultrasónicas donde se realizó netamente con inyección de agua. Los datos obtenidos se presentan en función de permeabilidad relativa y saturación de los fluidos respectivamente, como se muestra a continuación en la Figura 15:

Figura 16. Datos de permeabilidad relativa del experimento de referencia (sin ultrasonido).

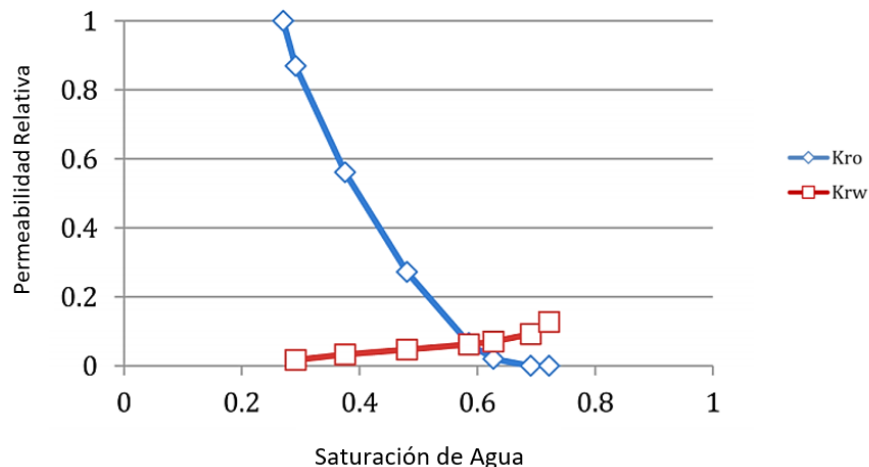


Fuente: ABDULFATAH, Hajara. Application of Ultrasonic Waves in Enhancing Oil Recovery in Secondary [imagen]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Dallas, Texas, 2018. P 5. [Consultado el: 02 de Mayo de 2021]. Disponible en:<https://onepetro.org/SPEATCE/proceedingsabstract/18ATCE/218ATCE/D023S099R006/214055>

En este experimento se puede apreciar lo que la literatura muestra en los procesos convencionales, es decir durante una inyección con agua donde se observa una saturación de agua connata de 0.27 a una permeabilidad relativa de 1 y donde el valor más bajo de saturación crítica de petróleo obtenido es de 0,37 donde el flujo de este ya es nulo.

Los resultados de la prueba B, es decir, donde ya se hace uso de ondas ultrasónicas en la muestra se puede evidenciar en la Figura 16:

Figura 17. muestra la importancia de los efectos del ultrasonido en la recuperación de petróleo.



Fuente: ABDULFATAH, Hajara. Application of Ultrasonic Waves in Enhancing Oil Recovery in Secondary [imagen]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Dallas, Texas, 2018. P 6. [Consultado el: 02 de Mayo de 2021]. Disponible en:<https://onepetro.org/SPEATCE/proceedingsabstract/18ATCE/218ATCE/D023S099R006/214055>

Según este estudio los autores concluyeron que el valor de la permeabilidad relativa al aceite disminuye drásticamente con el aumento de la saturación de agua hasta que se alcanza la saturación crítica de aceite y el valor de saturación de aceite residual se redujo críticamente quedando en 0.28, donde, en esta saturación de aceite cesa el flujo de aceite y se obtiene la permeabilidad relativa al agua del punto final. Esto da una reducción en la saturación crítica de aceite de 0.09 lo que representa una reducción del 25.4% en la saturación crítica de aceite desde el caso inicial cuando no se introdujeron los ultrasonidos. Este porcentaje podría conducir a un aumento de la recuperación hasta en un 50% según los autores del presente estudio.

5.1.2. Casos de aplicación en campo. La estimulación con ondas ultrasónicas se ha aplicado en yacimientos en tierra y yacimientos costa fuera, a continuación, se mostrarán dos casos de aplicaciones en los que la estimulación resulto exitosa.

- Caso 1 “Desarrollo de equipos y tecnología de ultrasonido para la estimulación de pozos y la mejora de la recuperación del petróleo”⁶⁸

⁶⁸ M.S. Mullakaev, V.O. Abramov, A.V. Abramova, Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. 2015.

- Ubicación: Estados Unidos
- Pozos: Rust 14B3, Lotridge gates 13B3, Ute 16D6.
- Crudo: Extrapesado.

En el cuadro 10 están las características y las condiciones que en las que se realizó la estimulación con ondas ultrasónicas.

Cuadro 10. Características de los pozos 14B3, 13B3, 16D6.

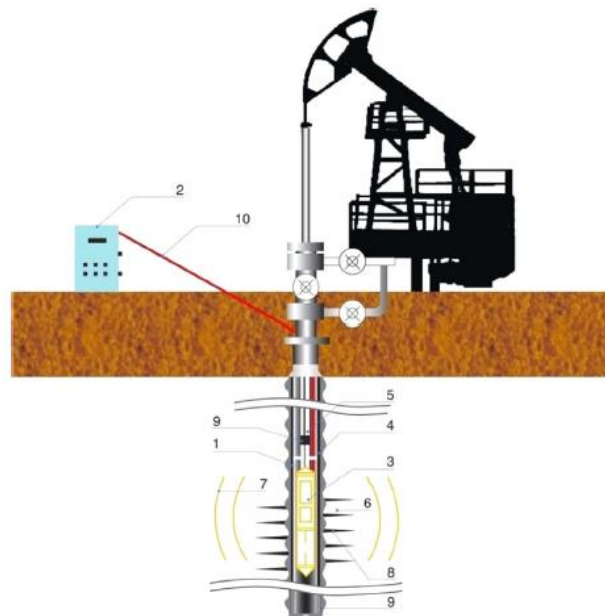
CARACTERÍSTICAS	VALOR	UNIDAD
Diámetro del pozo	139,7	mm
Intervalo perforado	12,2 – 15,8	m
Profundidad del pozo	2347 – 2363	m
Porosidad	8-14	%
Permeabilidad	0,25 – 14	mD
Contenido de agua	72 - 80	%
Contenido de parafina	45,1 – 49,3	%
Presión de formación	17237 - 18345	kPa
Temperatura de formación	73,3 – 78,1	°C

Fuente: M.S. Mullakaev, V.O. Abramov, A.V. Abramova, Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery, J. Petrol. Sci. Eng. 125 (2015) 201–208

El montaje que se usó para la estimulación de estos 3 pozos consto de varios elementos como se ve en la figura 17, (2) generador de ondas ultrasónicas, (3) herramienta de fondo de pozo, (4) revestimiento, (6) formación productora, (7)

ondas de ultrasonido, (8) zona perforada, (9) bomba de varilla de bombeo, y (10) cable de alimentación eléctrica a la herramienta de fondo de pozo que en este caso fue de 3000m de largo.

Figura 18 Montaje de equipos en campo.

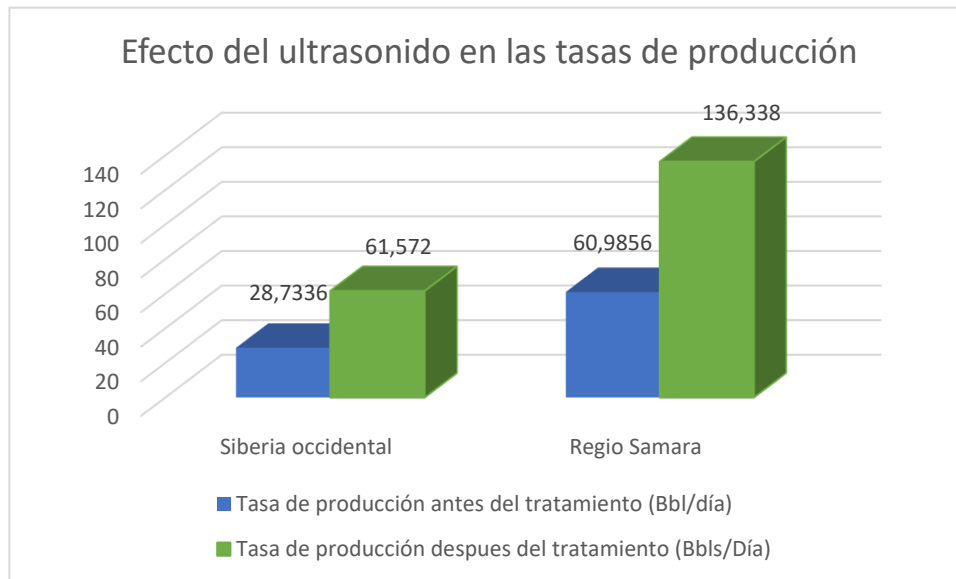


Fuente: M.S. Mullakaev, V.O. Abramov, A.V. Abramova, Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery, J. Petrol. Sci. Eng. 125 (2015) 201–208

Durante la estimulación de los 3 pozos seleccionados se hizo uso de la herramienta de fondo de pozo PSMS-102, dicha herramienta es bajada a la zona perforada de manera permanente y es encendida periódicamente 30 minutos al día lo que hace que los gastos del tratamiento ultrasónico se disminuyan, la potencia del generador fue: 10kW y la frecuencia 20kHz, durante 6 meses, como resultado se evidenció el aumento de la tasa de producción para los 3 pozos con

un valor de 32,6 BOPD, y la estimulación no duro más de 6 meses, como se muestra en la figura 18.

Figura 19 Efecto del ultrasonido en la producción.



Modificada de: M.S. Mullakaev, V.O. Abramov, A.V. Abramova, Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery, J. Petrol. Sci. Eng. 125 (2015) 201–208

- Caso 2: Tecnología ultrasónica para una mejor recuperación de aceite⁶⁹.

El uso de equipos y nuevas tecnologías desarrolladas especialmente para campos petroleros basados en las condiciones de trabajo y donde se pretende obtener una

⁶⁹ Abramova, A. Abramov, V. Bayazitov, V. Gerasin, A. et al. Ultrasonic Technology for Enhanced Oil Recovery. 2019.

recuperación de petróleo está ejemplificado en el desarrollo de este artículo. Su eficiencia se relaciona netamente con un desarrollo óptimo del equipo a utilizar, la elección correcta de los pozos candidatos y antes de su ejecución por su puesto una simulación del proceso. Es importante destacar que el equipo desarrollado por los autores fue probado exitosamente en un campo petrolífero conocido como campo Samotlor en Rusia antes de su implementación en los dos casos base de este estudio (Samara y en Siberia occidental). Por tanto, se proporciona una descripción del equipo, algunos criterios descubiertos para establecer la selección de los pozos y por último los resultados de las pruebas de campo.

Equipo desarrollado

Para este caso en especial, la tecnología implementada constaba de equipos de fondo y de superficie. Empezando por el equipo de superficie, se describe como un generador ultrasónico TS10W mejorado con una potencia de 10 kW. El generador consta de las siguientes unidades básicas:

- La unidad de alimentación.
- La unidad de potencia.
- La unidad de magnetización.
- La unidad de control.

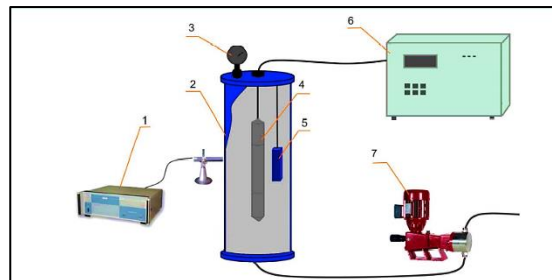
“A diferencia de los generadores de generaciones anteriores, el controlador de esta modificación incluye una unidad para procesar la información sobre la presión y la temperatura en el pozo, que se envía desde la herramienta de fondo de pozo”⁷⁰. Es importante recordar que toda esta data es necesaria para elegir las

⁷⁰ Anna A, Vladimir A, Vadim B, Artyom G, Dmitriy P. (2014). Ultrasonic Technology for Enhanced Oil Recovery

condiciones en que se hará la estimulación e irla ajustándola durante la operación donde el procesamiento de la data se envía a una computadora externa. El equipo de fondo de pozo incluye un sonotrodo PSMS-42 (con un diámetro de 42 mm) y un registrador de datos geofísicos (temperatura, presión, flujo) y adicional, la herramienta ultrasónica tiene forma de cilindro convirtiendo la oscilación longitudinal en radial.

Se debe generar un adecuado sistema de guía de ondas, que se puede definir como un ducto que permite la propagación sónica y con ayuda del método de los elementos finitos y por medio del software ANSYS® se muestra una amplitud máxima en el centro del sistema de guías propuesto. Para establecer el diseño óptimo de la herramienta se tuvo la siguiente configuración experimental, que incluye como parámetro fundamental en la decisión la forma de la guía de ondas, como se ve en la Figura 19:

Figura 20. Equipo experimental para prueba de herramientas de fondo de pozo.



Fuente: Abramova, A. Abramov, V. Bayazitov, V. Gerasin, A. et al. Ultrasonic Technology for Enhanced Oil Recovery [imagen]. Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow, 2019. P 180. [Consultado el: 05 de mayo de 2021]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2014.64021>.

El equipo experimental constaba de:

- Dispositivo para la medición de la amplitud de las oscilaciones de las paredes de la cámara (Vibrómetro SVAN 912M)
- Cámara de alta presión
- Manómetro para medir la presión en la cámara
- Sistema de guía de ondas con transductor magnetostrictivo
- Cápsula sellada con una muestra de núcleo
- Generador ultrasónico TS10W
- Bomba

Por lo tanto, en base a los cálculos y experimentos, se desarrolló la herramienta de fondo de pozo basada en transductores magnetostrictivos PSMS-42. Esta herramienta fue diseñada de tal manera que su frecuencia encaja en el rango de frecuencia de 13 a 26 kHz, que es determinado por el generador. La potencia de radiación acústica es de 2 a 3 kW (según la longitud del cable y la potencia suministrada). De manera resumida se presentan las características técnicas de la herramienta en el cuadro 11 y a continuación en el cuadro 12 se presentan los criterios para la selección de pozos:

Cuadro 11. Características técnicas de la herramienta PSMS-42.

Parámetro	Capacidad
Profundidad máxima del pozo, m	4000
Modo de trabajo	Cíclico
Frecuencia, kHz	18 ± 0.5
Corriente de magnetización, A	4 ± 1
Resistencia total a la frecuencia resonante	90 ± 30

Cuadro 11. (Continuación)

Fuente de alimentación del generador, V	380/480 (50 Hz)
Tamaño, mm	Ø42 x 1340
Peso, kg	No más de 8
Estándar de protección.	IP67
CONDICIONES DE OPERACIÓN	
Temperatura, °C	Desde 5 hasta 100
Presión hidrostática, МПа	No más de 35

Fuente: Abramova, A. Abramov, V. Bayazitov, V. Gerasin, A. et al. Ultrasonic Technology for Enhanced Oil Recovery, Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow, 2019. P 180.

Cuadro 12. Criterios para la selección de pozos candidatos para el tratamiento sonoquímico

Parámetro	Capacidad
Disminución de la presión de yacimiento (comparada con la inicial)	No más del 25%
Corte de agua	No más del 80%
El número de “streaks” en la zona de perforación	No más de 10
Espesor mínimo de la formación productora.	3 m
Potencial propio.	No más de 0.5
Permeabilidad.	Mas de $0.25\mu\text{m}^2$
Viscosidad dinámica.	No más de 25mPa*s
Contenido de arcilla.	No más del 15%.

Fuente: Abramova, A. Abramov, V. Bayazitov, V. Gerasin, A. et al. Ultrasonic Technology for Enhanced Oil Recovery, Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow, 2019. P 180.

Basados los autores en el desarrollo que tuvo el equipo ultrasónico en el campo Samotlor en Rusia durante las pruebas de campo se utilizó la siguiente maquinaria, equipo y metodología de las operaciones de prueba de campo:

- Carro Wire Line autopulsado (tipo ПКС-5)
- Unidad de bomba (tipo СИИ-32)
- Vehículo АЦ-10 con agua tratada

- Equipo ultrasónico descrito anteriormente
- Herramienta geofísica de fondo de pozo “Sova”
- Registrador de los parámetros geofísicos (tipo “Yugra”)

Con los equipos ya preparados tanto en fondo como los de superficie se procede a desarrollar la estimulación en el campo se procede por tapar el pozo, bajar la tubería de procesamiento y luego instalar el empaque en fondo (recomendado 1 metro antes de los perforados), en este punto tanto la bomba como el camión de Wire Line ya se encuentran conectados a tierra como a la fuente que les suministra la energía. Con este montaje se procede a bajar la herramienta geofísica de fondo de pozo “Sova”, con ella se investigan los parámetros geofísicos, en particular el perfil de flujo, la presión y la temperatura. Luego, la herramienta se retira del pozo y se desconecta. Adicional a este procedimiento se conecta ya como tal la herramienta ultrasónica y se baja al fondo de pozo donde se realiza el tratamiento ultrasónico en los perforado. Durante la estimulación se van controlando los parámetros que rigen el tratamiento y se realizan ajustes si es necesario, finalmente luego del objetivo base se retira y se desmonta el equipo junto con la bomba en superficie.

Como era de esperar el tratamiento ultrasónico conduce a un aumento del factor de productividad de los pozos petroleros en un 33% en promedio para este estudio. Además, el tratamiento selectivo de las capas de formación conduce a una disminución del corte de agua del pozo en alrededor de un 4% y adicional en un pozo donde solo se realizó la optimización del equipo de bombeo sin tratamiento ultrasónico, se observó una caída del factor de productividad de 5.6% y un incremento en el corte de agua de 1.5%.

Finalmente, y de acuerdo con los resultados de las pruebas de campo de la tecnología ultrasónica en la región de Samara y en Siberia occidental bajo diferentes condiciones geofísicas indican la alta eficiencia de la tecnología propuesta. Con base en el monitoreo de más de 100 pozos después del tratamiento ultrasónico en las dos regiones, se puede sacar la conclusión de que

la tasa de éxito del método alcanza el 90%, dato porcentual especificado por los autores de las pruebas realizadas.

Cuando se realizan este tipo de intervenciones, es decir la generación de ondas ultrasónicas se realizan a su vez modificaciones o acondicionamientos a los equipos de bombeo. Es importante aclarar que cuando se realizan este tipo de trabajos todo el ganancial de crudo no se puede atribuir a la estimulación ultrasónica, es decir, habrá parte reflejada por el reacondicionamiento, pero a su vez otra parte que será por las ondas y adicional a ello se especifica que el corte de agua aumenta cuando se realizan los reacondicionamientos de equipos de bombeo, pero se realizan en ausencia de la estimulación por ultrasonidos.

5.2. RANGOS DE: FRECUENCIA, POTENCIA Y TIEMPOS DE ESTIMULACIÓN

Las ondas ultrasónicas como método de recobro mejorado tienen varias ventajas, pero así mismo, desventajas, una de ellas es la asignación de rangos a las variables como: frecuencia, potencia y el tiempo de estimulación, ya que no existe una fórmula o un método para determinar estos rangos, pero gracias a cada uno de los estudios y proyectos piloto que se han realizado a lo largo de los años se conocen las características de los pozos que dan buen resultado a la estimulación y así mismo, los valores para estas variables usados en dichos proyectos con su resultado. En el cuadro 13 se encuentran algunos proyectos a nivel de campo que han dado como resultado un aumento en la producción.

Cuadro 13 Recopilación de resultados en diferentes estudios.

#	Referencia	Nivel del experimento	Ubicación	Frecuencia	Potencia	Tiempo
1	Morris 1974	Campo	Odessa, Texas	58 MHz	48 kW	Varios minutos
2	Kuznetsov and Efimova (1983)	Campo	Siberia Occidental	12,5 – 16,5 kHz	1,2 – 5 kW	Más de 5 días
3	Zimkin et al. (1990)	Campo	Siberia Occidental	5 – 50 kHz	1 – 10 kW	Varias horas
4	Shaw Resource servicies (1992)	Campo	California	200 kHz – 10 kHz	3 – 5 kW	1 mes
5		Campo	California	200 kHz – 10 kHz	3 – 5 kW	4 – 6 horas
6	Mullakaev, Abramov, A.V. Abramova (2015)	Campo	Utah	20 kHz	10 kW	6 meses
7	Abramova, A. Abramov, V. Bayazitov, V. Gerasin, A. et al (2019)	Campo	Samara y Siberia occidental	13kHz - 26 kHz	2 – 3 kW	-
8	Alhomadhi y Mohammad (2014)	Laboratorio	Arabia	50 kHz	0,3 kW	Algunos minutos
9	ABDULFATAH, H. (2018)	Laboratorio	Delta del Níger	24 kHz - 54kHz	0.3 kW	Algunos minutos

Con respecto a la tabla 13, y los estudios allí resumidos, se puede evidenciar que las variables más importantes para establecer el éxito de la técnica de ultrasonidos son la frecuencia, potencia y el tiempo de estimulación, se puede concluir que la potencia está directamente relacionada con el resultado del aumento de la producción, también se demostró que con una potencia regulada y lo suficientemente alta el método funciona bien en crudos pes en cuanto a la frecuencia no lograba aumentar la producción, simplemente disminuir el tiempo en que se alcanzaba el objetivo.

5.3. SONOQUIMICA: ONDAS SONORAS COMBINADAS CON METODOS QUÍMICOS

La gran necesidad que tiene el mundo en poder producir los hidrocarburos que aún siguen en el yacimiento ha llevado a grandes investigaciones que logran cada vez mejores resultados, la combinación de ondas sonoras en este caso ultrasónicas y la inyección de algún químico al yacimiento, una de las razones de aplicar ambas técnicas en una estimulación es que se ha demostrado que el tratamiento ultrasónico ayuda a la penetración del reactivo en la formación, lo que hace que se acelere la reacción química en los medios porosos de la formación.

La unión de estos dos métodos ha traído soluciones a problemas operaciones que se presentan casi siempre, por ejemplo, la obstrucción de la formación productora en los pozos horizontales, y cuando se hace la inyección del reactivo químico estos se disipan y no se logra la eficiencia que se necesita. Para estos y muchos inconvenientes más en la actualidad se están haciendo estudios y proyectos piloto de la combinación de estos métodos que cada vez van mejorando su aplicabilidad, dentro de esas mejoras se ha demostrado que para que la estimulación sea exitosa se debe tener un “estudio amplio de la formación productora, los reactivos deben inyectarse directamente en la zona del tratamiento acústico y el tratamiento

debe ser selectivo tratando solo las zonas problemáticas disminuyendo así su costo”.⁷¹

También dentro de los avances en investigación se han desarrollado los equipos de fondo de pozo en los cuales está el sonotrodo que incluye una sonda geofísica para toma de datos y un sistema que permite la inyección del reactivo químico, todo este sistema se desarrolla a través de un cable coaxial especial con diferentes núcleos eléctricos que le permitan alimentar al equipo ultrasónico y al sonotrodo, este cable conecta el equipo de fondo de pozo con la superficie por medio de una poleas, en la superficie se encuentra el alimentador de energía para la herramienta de fondo de pozo, el generador, y la alimentación del reactor químico que casi siempre están en un camión, como en la figura 20.

Figura 21 Equipo estimulación sonoquímica.



⁷¹ Vladimir O. AbramovAnna V. AbramovaVadim M. BayazitovLyubov K. AltuninaArtyom S. GerasinDmitriy M. PashinTimothy J. Mason. Sonochemical approaches to enhanced oil recovery. 2014. 77-85

Fuente: Vladimir O. AbramovAnna V. AbramovaVadim M. BayazitovLyubov K. AltuninaArtyom S. GerasinDmitriy M. PashinTimothy J. Mason. Sonochemical approaches to enhanced oil recovery. 2014.

A continuación, en el cuadro 14, se encuentra una comparación de una prueba de campo realizada en Siberia occidental y en región de Samara en el que se logra hacer una comparación ya que hubo dos estimulaciones, una solo con ondas ultrasónicas y la otra sumándole método químico. Es notable que los resultados con la estimulación Sonoquímica fueron mejores y más duraderos, la razón puede ser que al inyectar químicos en la formación estos logran penetrarse en el espacio poroso.

Cuadro 14 Resultados estimulación sonoquímica.

Región	Tipo de tratamiento	Tiempo de tratamiento (min)	Producción de petróleo (Ton/día)		
			Antes	Después	3 meses después
Siberia occidental	Sonoquímico	30	3,92	9,1	8,4
	Ultrasónico	60	3,92	8,32	7,7
Samara	Sonoquímico	30	8,4	19,8	15,8
	Ultrasónico	60	8,4	18,6	11,5

Fuente: Vladimir O. AbramovAnna V. AbramovaVadim M. BayazitovLyubov K. AltuninaArtyom S. GerasinDmitriy M. PashinTimothy J. Mason. Sonochemical approaches to enhanced oil recovery. 2014.

5.4. VENTAJAS

El inicio de estudios inclinados hacia las tecnologías no convencionales para aumentar la productividad de los campos se da para que estas tecnologías logren hacer lo que las tecnológicas convencionales no pudieron, la estimulación con ondas ultrasónicas cuenta con ventajas por encima de las técnicas convencionales y algunas de ellas son:

- Por denominarse una tecnología verde, la estimulación con ondas de ultrasonido puede llegar a tener una contaminación nula.
- Implementación rápida y fácil.
- Posicionamiento preciso en la estimulación del pozo, es decir, al momento de estimular alguna zona solo se realiza en la zona de interés.
- Se puede usar en varios tipos de yacimientos y puede ser adecuada a entornos heterogéneos.
- Su eficiencia puede aumentar haciendo uso de equipos de alta eficiencia y un buen modelado matemático.
- Tiene alta compatibilidad con métodos de recobro mejorado convencionales.

5.5. DESVENTAJAS O LIMITACIONES

- A la fecha, se cuenta con diferentes tipos de investigaciones acerca de la optimización en métodos EOR, donde se puede hablar acerca del ultrasonido y con mayor fuerza si hablamos de los grandes logros que se han tenido a nivel de laboratorio pero que a su vez no se han aplicado en su mayoría a los campos petroleros a gran escala, siendo fundamental que por medio de estudios como estos se fortalezca su conocimiento y posterior practica en campo.

- Como se describió a lo largo del estudio, la tecnología de recuperación de petróleo por ultrasonidos aplica en su mayoría y con una mejor repercusión en los yacimientos de petróleo pesado y de baja permeabilidad. Es necesario implementar estudios en laboratorio que incluyan diferentes tipos de fluidos, donde ejemplo de ello puede ser la explotación de gas esquisto o metano.
- En Colombia se puede ver limitado el desarrollo de métodos no convencionales comparado con métodos convencionales como, por ejemplo, inyección de vapor o agua, ya que, su estudio e investigación por parte de instituciones se enfoca mayoritariamente en dichos métodos, debido a las propiedades del crudo producido en el país.
- El alcance de una onda en una herramienta convencional está más o menos en un metro de penetración alrededor de la formación, por tanto, se puede inferir que la recuperación de petróleo por medio de este radio de acción dentro del yacimiento sería de muy baja eficiencia.
- Algunas herramientas se limitan por el rango de temperaturas a usar durante la estimulación de los pozos. Según literatura una de las herramientas puede solo alcanzar temperaturas alrededor de los 200°F; llegado el caso de querer aplicar este método y obtener una reducción notable en la viscosidad sería poco eficiente ya que las temperaturas para obtener reducción de viscosidad en campos colombianos están alrededor de los 350°F a 500°F.

6. CONCLUSIONES

- Valores más bajos de viscosidad son obtenidos cuando se ha realizado la estimulación ultrasónica en muestras a nivel de laboratorio, siendo esta propiedad razón fundamental para proporcionar mayor movilidad a los fluidos presentes en el estudio.
- Se describe al ultrasonido como un método de recobro antiguo, pero que a su vez compite con los métodos convencionales por poder obtener respuestas a nivel macro en campo que se asemejen a estos. Su mayor dificultad radica en que esta técnica se ha desarrollado de manera conceptual y no se da cabida para su implementación por la alta eficiencia de los anteriormente nombrados.
- Es una buena tecnología para implementar en yacimientos de crudo pesado en etapas tempranas de producción, es decir, como una especie de precalentamiento en las cercanías del pozo antes de utilizar un método convencional (inyección de vapor) para los pozos de petróleo pesado en el sector colombiano.
- La técnica ha planteado un desarrollo eficiente en disminución del daño a la formación, remoción de finos, remoción de parafinas o asfáltenos en las cercanías al pozo que limitan el flujo de fluidos.

7. RECOMENDACIONES

Este método de recobro y de hecho su estudio, ha estado en constante avance a lo largo de los años durante los cuales se han seguido desarrollando diferentes modalidades de trabajo implementando nuevas técnicas, pero uno de los mayores retos ante la industria es tener la certeza de la eficiencia con la que cuenta el método a nivel de campo, ya que, a nivel de laboratorio se tienen unas altas eficiencias de la técnica. Es por ello que se requiere una sinergia entre academias e industrias que integren dos roles fundamentales que componen este método de recobro: el desarrollo físico, tanto de los equipos a utilizar, su funcionamiento y principio matemático, como el conocimiento en cuanto a la geología, distribución y propiedades del petróleo. Con esos dos factores su implementación llevada a nivel de laboratorio, mayor investigación básica de los temas que interactúan en este método y la puesta en marcha en pruebas piloto son parte fundamental para un avance a nivel macro.

De acuerdo con estudios, se resalta el gran aporte que tiene la tecnología de recuperación de petróleo ultrasónica, pero a su vez se describe que esta estará limitada por el radio de acción. Por tanto, se recomienda que este método EOR sea combinado con otros métodos usados en la recuperación mejorada del petróleo ya sea mediante técnicas químicas o térmicas maximizando así su potencial.

BIBLIOGRAFÍA

ABDULFATAH, Hajara. Application of Ultrasonic Waves in Enhancing Oil Recovery in Secondary Recovery Phase. Department of Petroleum and Gas Engineering, Nile University of Nigeria. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2018.

ABRAMOVA, Anna. ABRAMOV, Vladimir. BAYAZITOV, Vadim. GERASIN, Artyom. *et al.* Ultrasonic Technology for Enhanced Oil Recovery. Engineering, Vol.6 No.4 177-184. 2014.

ALMOHADHI, Emad. AMRO, Mohammad. ALMOBARKY Mohammad. Experimental application of ultrasound waves to improved oil recovery during waterflooding. Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 103 – 110. 2013.

ALTUNINA, Lyubov. GERASIN, Artyom. PASHIN, Dmitriy. MASON, Timothy, *et al.* Sonochemical approaches to enhanced oil recovery. Ultrasonics Sonochemistry. 76-81. 2015.

ALVAREZ, Juan. MARTINEZ, Rey. PATIÑO, Edgar. BARRERO, Rigoberto. Estudio experimental sobre la eficiencia de un tratamiento de ultrasonido en un sistema de flujo continuo para la reducción de viscosidad de crudo pesado. Grupo de Investigación Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos (GMPH). 2013

BERESNEV, Igor. JOHNSON, Paul. Elastic-wave stimulation of oil production: A review of methods and results. Geophysics, vol. 59, no. 6 864-1017 (1994).

BIDNER, Mirtha Susana. Propiedades de la roca y los fluidos en reservorios de petróleo. Editorial universitaria de Buenos Aires. Argentina, Buenos Aires. 2001.

CHECK, Gholam. Two-stage Ultrasonic Irradiation for Dehydration and Desalting of Crude Oil: A Novel Method. Chemical Engineering and Processing. 1-22. 2014.

COUNG, T. State of the art flow salinity waterflooding for enhanced oil recovery. Society of Petroleum Engineers. 2013.

DEHSHIBI, Reza. MOHEBBI, Ali. RIAZI, Masoud. DANAFAR, Firoozeh. Visualization study of the effects of oil type and model geometry on oil recovery under ultrasonic irradiation in a glass micro-model. Fuel, 709-716. 2019.

DE LA FUENTE, Rene. ALTERMATT, Fernando. CORVETTO, Marcia. SIERRA, Ricardo. PETERSEN, Kristina. FIERRO, Claudio & DE LA CUADRA, Juan. Conceptos básicos de ultrasonografía aplicada a la anestesia regional. Universidad Católica de Chile, 30-45, 2009.

DUARTE, Daniela. HERNANDEZ María. Estudio de la estimulación por ondas vibratorias en la productividad de campos petroleros. Bucaramanga, Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad ingenierías fisicoquímicas. 2019, 54-54p

FERRER, Magdalena de Paris. Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos. Astro Dala S.A. Venezuela, Maracaibo. 2001.

GRANADOS CALIZ, Jaime. FLORES ÁVILA, Fernando, Prueba Tecnológica de estimulación de pozos petroleros mediante la tecnología Ultrasónica (PU) en pozos del IAITG. ingeniería petrolera. 2013.

GALLEGO, Juan. High-power ultrasonic processing: recent developments and prospective advances. 35-47, 2010.

GREEN, Don. WILLHITE, Paul. Enhanced Oil Recovery Second Edition. Society of Petroleum Engineers (2018).

GBADAMOSI, Afeez. JUNIN, Radzuan. MANAN, Radzuan. AGI, Augustine. An overview of chemical enhanced oil recovery: recent advances and prospects. International Nano Letters volumen, 171–202. 2019.

HAMIDA, Tarek, BABADAGLI, Tayfun. Analysis of capillary interaction and oil recovery under ultrasonic waves 231–255 - Transport in porous media, 2007

HAMIDI, Hossein. HADDAD, Amin. OTUMUDIA, Ephraim. RAFATI, Roozbeh. *et al.* Recent applications of ultrasonic waves in improved oil recovery: A review of techniques and results. Ultrasonics, 1-13. 2020.

HAMIDI, Hossein. MOHAMMADIAN, Erfan. JUNIN, Radzuan. RAFATI, Roozbeh *et al.* A technique for evaluating the oil/heavy-oil viscosity changes under ultrasound in a simulated porous médium. Ultrasonics, 655-662. 2014.

HAMIDI, Hossein. RAFATI, Roozbeh. JUNIN, Radzuan. MANAN, Mohammad. A role of ultrasonic frequency and power on oil mobilization in underground petroleum reservoirs. J Petrol Explor Prod Technol (2012).

HARTWIG Kunanz, WÖLFEL Sylvia & MONTANUNIVERSITAET Leoben. Scale Removal with Ultrasonic Waves. Society of Petroleum Engineers. SPE 169770. 1-10. 2014.

HUANG, Xintong. ZHOU, Cuihong. SUO, Quanyu. ZHANG, Lanting *et al.* Experimental study on viscosity reduction for residual oil by ultrasonic - Ultrasonics sonochemistry, 661-669 2018.

MAHMOUD, Meribout. On Using Ultrasonic-assisted Enhanced Oil Recovery (EOR): Recent Practical Achievements and Future Prospects, IEEE Access, 51110-51118, 2018.

MARTÍNEZ, Jairo. VITOLA, Jaime. SANDOVAL, Susana. Fundamentos teórico-prácticos del ultrasonido. Tecnura (Tecnología y Cultura Afirmando el conocimiento), 4-18. 2007.

MCLEOD, Rp. SCHAACK, Jp. A Unique Combination of Natural Gas Processing with Cryogenic Technology in an Enhanced Oil Recovery Project, Proceeding of the Sixty-Fifth Annual Convention of the Gas Processors Association, Tulsa, 1986.

MORALES, J. Inyección de nitrógeno como proceso de recuperación de hidrocarburos. Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis. 2011.

MOHSIN, Mohammed. MERIBOUT, Mahmoud. An extended model for ultrasonic-based enhanced oil recovery with experimental validation. Ultrasonics sonochemistry, 413-423 2015.

MULLAKAEV, et al. Ultrasonic piezoceramic module and technology for stimulating low-productivity Wells. Journal of petroleum Science and Engineering, 529-534, 2017.

MULLAKAEV, M. ABRAMOV, VO. ABRAMOVA, AV. Development of ultrasonic equipmet and technology for well simulation and enhanced oil recovery. Journal of petroleum Science and Engineering, 1-6, 2015.

MULLAKAEV, M. ASYLBAEV, V. PRACHKIN, G. VOLKOVA, I. Influence of ultrasound and heat treatment on the rheological properties of ust-tegusskoe oil. Chemical and Petroleum Engineering. 584 – 587. 2014.

MUÑOZ, Samuel. Propiedades de los fluidos en los yacimientos petrolíferos. Universidad Industrial de Santander. 1993.

NADERI, Khosrow. BABADAGLI, Tayfun. Influence of intensity and frequency of ultrasonic waves on capillary interaction and oil recovery from different rock types - Ultrasonics sonochemistry. 500-508, 2010.

SALEM, Adel. SNOSY, foudad. The effect of ultrasonic waves of EOR on the relative permeability curves. Society of Petroleum Engineers. 1-19. 2015.

SHAFIAI, Siti. GOHARI Adel. Conventional and electrical EOR review: the development trend of ultrasonic application in EOR. Journal of petroleum exploration and production technology. 2923-2945. 2020.

SHI, Chunwei. YANG, Wei. CHEN, Jianbin. SUN Xiaoping, *et al.* Application and mechanism of ultrasonic static mixer in heavy oil viscosity reduction. Ultrasonics Sonochemistry. 648-653, 2017.

SILVA, Mauricio. Diseño y construcción de un modelo didáctico y software para simulación en un PC de un medidor de nivel de líquidos en tanques abiertos por medio de ultrasonido. Escuela Politécnica Nacional. 1998.

WANG, Zhenjun. FANG, Ri. GUO, Hangyuan. Advances in ultrasonic production units for Enhanced oil recovery in China. *Ultrasonics – Sonochemistry*. 1-9. 2019.

WANG, Zhenjun. XU, Yuanming. Review on application of the recent new high-power ultrasonic transducers in enhanced oil recovery field in China. *Energy*. 259-267. 2015.

YAO, Ye. PAN, Yue. LIU, Shiqing. Power ultrasound and its applications: A state-of-the-art review. *Ultrasonics sonochemistry*, 2020.

XIAN Shi , HONGXING Xu , LIU Yang. Removal of formation damage induced by drilling and completion fluids with combination of ultrasonic and chemical technology. *Journal of Natural gas Science and Engineering*. 471-478. 2016.

ANEXOS

Anexo A. Recopilación Bibliográfica del ultrasonido.

Investigadores/Año	Descripción del estudio
Griffing V (1950)	Se define como el primer estudio sobre la aplicación de ondas ultrasónicas y cómo afectan la extracción de petróleo sujeto al estudio de la correlación entre el nivel del agua y la estimulación provocada por los terremotos.
Duhon R, Campbell J (1965)	Investigaron la utilización de ondas ultrasónicas con frecuencias entre 1 y 5.5 MHz en inyección con agua y concluyeron que la energía ultrasónica mejoraba la extracción de aceite.
Fairbanks H, Chen W (1970)	Observaron que el calor producido por las ondas de ultrasonido puede aumentar significativamente la velocidad de filtración.
Johnston H (1971) II.	Informaron que la aplicación de ondas ultrasónicas reduce la tensión superficial y la viscosidad, lo que a su vez provoca un aumento de la filtración de aceite y, posteriormente, una mejora en la recuperación de petróleo.
Gadiev S (1977)	Las ondas de ultrasonido se irradiaron a arenas no consolidadas saturadas de aceite y se observó que tanto la tasa de producción como la producción acumulada de petróleo aumentó significativamente.
Neretin V, Yudin V (1981)	Observaron que la implementación de ondas de ultrasonido provocaron un aumento en la tasa de desplazamiento de petróleo por el agua presente en las arenas no consolidadas del pozo.
Ganiev R, Ukrainskii L, Frolov K (1989)	Propusieron que el ultrasonido deformaría las paredes de los poros y alteraría el radio del poro ya que las ondas que viajan a lo largo de las paredes de los poros pueden causar un "transporte peristáltico" de desplazamiento de fluido.
Nikolaevskii V (1992)	Observaron que las vibraciones ultrasónicas creadas permiten que las gotas de aceite recuperen su movilidad.
Aarts A, Ooms G, Bli K, Bot E (1998)	Analizaron un deformación probada numérica y experimentalmente de las paredes de los poros y una mejora de la velocidad del fluido en medios porosos como resultado de la radiación ultrasónica.
Gunai OG, Islam M (2000)	Demostaron que los tratamientos ultrasónicos no cambian la reología del petróleo en función de la temperatura.
Guo X, Du Z, Li G, Shu Z (2004)	Aplicaron ondas ultrasónicas a los campos petroleros en China y observaron un aumento en la producción de petróleo.
N Bjørndalen, Mr Islam (2004)	Encontraron la reacción de las parafinas y los asfaltenos precipitados con la irradiación de ondas ultrasónicas, su resultado fue positivo y se recomendó usar en pozos horizontales.
Hamida T, Babadagli T (2005)	Examinaron la influencia de la onda ultrasónica en la imbibición capilar y concluyeron que el tipo de interacción matriz-fractura y la imbibición capilar dependiendo del fluido pueden causar una mejora de la recuperación de aceite cuando se aplican ondas ultrasónicas.
Hamida T, Babadagli T (2007)	Investigaron la interacción capilar bajo diferentes intensidades ultrasónicas para diferentes tipos de fluidos. Los resultados de sus experimentos indicaron que la aplicación de energía ultrasónica puede aumentar la solubilidad del tensioactivo y las propiedades reológicas de los polímeros pueden alterarse.
Mehran Sohrabi, Mahmoud Jamiolahmady (2007)	Analizaron la viabilidad del uso de ondas ultrasónicas para aliviar pérdidas de presión en yacimientos de gas condensado.
Hamida T, Babadagli T (2008)	Adoptaron el método de la gota colgante para investigar el efecto del ultrasonido en el flujo a través de un capilar. Encontraron un cambio notable en las fuerzas interfaciales entre el petróleo y el agua.
Najaf I (2010)	Investigaron analítica y experimentalmente el efecto del ultrasonido sobre el drenaje por gravedad y la filtración de aceite mediante el uso de fluidos de diferentes viscosidades. Llegaron a la conclusión de que la radiación actúa en oposición al efecto de presión capilar.
Mohammadian E, Shirazi MA, Idris AK (2011)	Encontraron experimentalmente que la recuperación de agua inyectada aumentó como resultado de la estimulación ultrasónica.
Mohammadian E, Junin R, Rahmani O, Idris AK (2013)	Investigaron los efectos de la radiación de sonicación en la recuperación de petróleo en inyección de agua estimulada por ondas ultrasónicas. Sus experimentos indicaron que la recuperación presentes en la inyección de agua aumentó en todos los casos.
Abramova A, Abramov V, Bayazitov V, Gerasin A, Pashin D (2014)	Desarrollaron equipos ultrasónicos y los probaron en dos regiones diferentes en diferentes condiciones geológicas. Observaron una mejora significativa en la producción de petróleo.
Gholam Reza Check (2014)	Experimentación con diferentes etapas de irradiación de ondas ultrasónicas para deshidratación y desalación del crudo pesado.
Gao Y, Ding R, Wu S, Wu Y, Zhang Y, Yang M (2015)	Examinaron el efecto de diferentes frecuencias de ultrasonidos en la eliminación de diferentes componentes del aceite presente en el lodo. Descubrieron que la mayor eficiencia y la tasa de recuperación de aceite se logran cuando se aplica el lavado ultrasónico con una frecuencia de 25 KHz.
Mohsin y Meribout (2015)	Creación de un modelo matemático modular y consiste en un módulo acústico y uno de transferencia de calor, considera propiedades geofísica y acústicas de los pozos y al usarlo se evidenció una buena tasa de producción.
Hamidi y col. (2015)	Desarrollo de un experimento con los modelos de vidrio 2D de Hele-Shaw, los núcleos se ponen dentro de un baño de ultrasonido por diferentes tiempos, fue examinada la interfaz petróleo/agua y su resultado fue positivo.
Zhenjun Wang, Yuanming Xu (2015)	Estudio de los posibles problemas que puedan ser resueltos con ondas ultrasónicas, menciona diferentes tipos de transductores y demás herramientas.
Mullakaev M, Abramov V, Abramova A (2017)	Realizaron experimentos de campo en Siberia occidental y desarrollaron el complejo de pozos de petróleo automatizado por ultrasonidos. El resultado de las pruebas mostró un notable aumento en la tasa de producción de petróleo y la productividad promedio de los pozos.
Shi C, Yang W, Chen J, Sun X, Chen W, An H, Pei M (2017)	Estudiaron experimentalmente el efecto de la aplicación ultrasónica en la reducción de la viscosidad de las muestras de petróleo en el campo Daqing. Descubrieron que la técnica ultrasónica es beneficiosa para despolimerizar y romper las largas cadenas de moléculas grandes (resina y asfaltenos) y tiene una influencia considerable en la disminución del consumo de energía térmica en el proceso.
Hesam Arabzadeh y Mahmood Amani (2017)	Estudio de laboratorio con muestra asfaltenica para evidenciar la influencia de la sonicación sobre la recuperación mejorada del petróleo mediante drenaje por gravedad.
He J, Wang Y, Llang G (2018)	Experimentación con petróleo crudo tomado de campos en China y lodo preparado en laboratorio a 40°C, los resultados del experimento fueron positivos en cuanto a la recuperación del petróleo, y se concluyó que la potencia es el factor más efectivo.
Abdulfatah HK (2018)	Implementaron ondas de ultrasonido en yacimientos, y el resultado de sus experimentos arrojó hasta un 50% de aumento en la recuperación de petróleo.
Mahmoud Meribout (2018)	Realizaron estudios a nivel de campo y laboratorio, resaltando la importancia de las ondas ultrasónicas en la industria, menciona diferentes equipos en ambos ambientes.
Augustine A, Radzuan J, Ramin S, Gbadamosi A, Nurudeen Y (2019)	Estudiaron el papel de la concentración crítica de micelas (CMC) durante una operación combinada de ultrasonido y de inyección de surfactante; también el impacto del ultrasonido durante la campaña de inyección de agua con el propósito de mejorar la recuperación de petróleo usando sand-pack como medio poroso.
Xiaoming Luo, Wayne Pennington (2019)	Comparación de los métodos químicos con el ultrasonido para posibles procedimientos dentro de la producción como la desulfuración y deshidratación, concluyendo que la combinación de los métodos es la opción más eficiente.
Zhenjun Wang, Ri Fang, Hanguan Guo (2019)	Experimentación con diferentes equipos y aplicación de cada uno de ellos, dentro del desarrollo del proyecto piloto se logra verificar reducción en la viscosidad y los diferentes métodos de recuperación con ultrasonido.
Mehdi Razavifar, Jafar Qafar (2020)	Estudio de lo que sucede con el fluido antes y después de la irradiación con ondas de ultrasonido, comparando los valores de viscosidad en los dos diferentes procesos.
Siti Habibah, Shafial, Adel Gohari (2020)	Explicación de los métodos de recobro tanto convencionales como no convencionales, mencionando todos un poco y centrandose en los no convencionales, dentro del ultrasonido se logró evidenciar los diferentes mecanismos bajo los que trabaja la técnica.