



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 21 de octubre de 2021

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

Los suscritos: Cristian Alfonso Gomez Molina, con C.C. No. 1075290796 , Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado “Análisis comparativo del uso de ondas ultrasónicas, utilizadas en el área de recobro mejorado”, presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de ingeniero de Petróleos; Autorizamos al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Cristian Alfonso Gomez Molina:

Firma: _____



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:

Análisis comparativo del uso de ondas ultrasónicas, utilizadas en el área de recobro mejorado

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
CRISTIAN ALFONSO	GOMEZ MOLINA

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
ERVIN	ARANDA ARANDA
PRINCIPE ALVARO	SUAREZ

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero de Petróleos

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Programa de ingeniería de Petróleos

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2021

NÚMERO DE PÁGINAS: 49

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías ___ Grabaciones en discos ___ Ilustraciones en general ___ Grabados ___
Láminas ___ Litografías ___ Mapas ___ Música impresa ___ Planos ___ Retratos ___ Sin ilustraciones ___ Tablas
o Cuadros

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Ninguno



MATERIAL ANEXO: Ninguno

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*): Tesis Meritoria

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Ondas ultrasónicas	Ultrasound waves	6. tensión interfacial	Interfacial tension
2. Frecuencia dominante	Dominant frequency	7. WOR	WOR
3. Viscosidad de aceite	Capillary pressure	8. Crudo pesado	Heavy oil
4. Saturación de aceite residual	Residual oil saturation	9. Analisis comparativo	Comparative analysis
5. Corte de agua	Water cut	10. Frecuencia	Frequency

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Debido a la constante demanda de hidrocarburos para uso energético y en petroquímica, la industria petrolera se encuentra en la necesidad de usar cada vez, nuevas tecnologías, las cuales permitirían aumentar la producción y/o el recobro de aceite a pesar de la madurez del reservorio con alto corte de agua. Este trabajo de grado, tiene como objetivo la recopilación bibliográfica sobre la recuperación de hidrocarburos por medio de ondas ultrasónicas de diferentes bases de datos con el fin de presentar el origen, los mecanismos de acción, los aspectos técnico-económicos, casos de éxitos en la implementación del uso de ondas de alta frecuencia para el recobro de hidrocarburos y comparar el recobro mejorado con ondas ultrasónicas, contra otros métodos de recobro de hidrocarburos. Finalmente, este trabajo de grado tiene como objetivo dar a conocer el uso de ondas de alta frecuencia como método de recobro alternativo y mostrar sus ventajas comparativas y su potencial económico.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Due to the constant demand for hydrocarbons for energy use and in petrochemicals, the oil industry finds itself in the need to use new technologies, which would allow increased production and/or oil recovery despite the maturity of a reservoir with high water cut. This degree work aims to compile the bibliography on the recovery of hydrocarbons through ultrasonic waves from different databases in order to present the origin, actional mechanisms, technical-economic aspects, successful cases in the implementation of the use of high-frequency waves for the recovery of hydrocarbons and to compare the enhanced



recovery through ultrasonic waves, against other methods of hydrocarbon recovery. Finally, this degree work aims to showcase and promote the use of high-frequency waves as an alternative recovery method and to show its comparative advantages and its economic potential.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: Freddy Humberto Escobar Macualo

Firma:

Nombre Jurado: Freddy Humberto Escobar Macualo

Firma:

Nombre Jurado: Jose Miguel Galindo Sanchez

Firma:

ANALISIS COMPARATIVO DEL USO DE ONDAS ULTRASÓNICAS,
UTILIZADAS EN EL AREA DE RECOBRO MEJORADO

CRISTIAN ALFONSO GOMEZ MOLINA

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA-HUILA
2021

ANALISIS COMPARATIVO DEL USO DE ONDAS ULTRASÓNICAS,
UTILIZADAS EN EL AREA DE RECOBRO MEJORADO

CRISTIAN ALFONSO GOMEZ MOLINA

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director
ERVIN ARANDA ARANDA
Ingeniero de petróleos

Co-Director
PRINCIPE ALVARO SUAREZ
Ingeniero de petróleos

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA-HUILA
2021

Nota de aceptación

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Surcolombiana optar al título de Ingeniero de Petróleos



Jurado: Freddy Humberto Escobar Macualo



Jurado: Jose Miguel Galindo Sanchez

NEIVA, 2021

Agradecimientos

Para mi familia que aprendí a amar, a mis verdaderos amigos que nunca me abandonaron y me aceptaron como soy y finalmente a mi mejor amigo Miguel Ángel que siempre me ayudo en esta travesía de la universidad.

Tabla de contenido

1. Introducción	10
2. Objetivos	12
2.1. Objetivo general.....	12
2.2. Objetivos específicos	12
3. Revisión de la literatura	13
3.1. Origen de la vibración in-situ.....	13
3.2. Factor de recobro	15
4. Ondas	16
4.1. Ondas ultrasónicas	17
4.2. Frecuencia dominante	17
4.3. Ondas acústicas.....	18
4.3.1. Movimiento de las ondas acústicas en el espacio poroso.....	18
4.3.2. Influencia de las ondas acústicas en el yacimiento	19
4.3.3. Influencia de las ondas acústicas en la tasa de aceite.....	20
4.3.4. Influencia de las ondas en las propiedades de la roca y los fluidos	22
5. Aspectos técnicos.....	24
5.1. Dispositivos utilizados para generar vibración	24
5.1.1. Dispositivos magneto-restrictivos.....	26
5.1.2. Actuadores piezoeléctricos	26
5.1.3. Dispositivo basado en la minimización de la reluctancia magnética	27
5.1.4. Dispositivo de vibración tipo pandeo.....	28
6. Investigación académica en Colombia y el mundo.....	30
7. Oportunidades de implementación en Colombia	33
8. Análisis técnico-económico del uso de ondas como método de recobro mejorado.....	35
9. Conclusiones	45
10. Recomendaciones	46
11. Referencias.....	47

Lista de figuras

Figura 1 Fluctuaciones en el nivel de agua en un pozo a 52 m de profundidad, inducidas por la excitación de ondas sísmicas. (Parker & Stringfield, 1950).....	13
Figura 2 Incremento en la producción de aceite para el campo Abuzy en Krasnodar, utilizando la frecuencia de vibración óptima. (Nikolaevskiy et al., 1996)	14
Figura 3 Ejemplo de ondas y su movimiento.(daniel tubau, 2019).	16
Figura 4 Alteración de la porosidad y permeabilidad relativa del aceite debido a la frecuencia en núcleos sintéticos. (Ragab & Snosy, 2015).....	23
Figura 5 Efecto de la vibración en la saturación residual de aceite. Fuente (Ragab & Snosy, 2015).....	23
Figura 6 Diagrama esquemático de un proceso de recobro mediante ultrasonido 1) Yacimiento 2) Herramienta de ultrasonido 3) empaques 4) tubería 5) válvula de revestimiento 6) lubricador 7) línea de descarga 8) alimentación de cable de suministro 9) cable de suministro 10) Camión de cableado 11) Unidad de bombeo 12)Tubería de suplemento de químicos. Fuente (Mullakaev et al., 2015).....	25
Figura 7 Herramienta de fondo de pozo PSM-42 compuesta por 1) Guía de ondas 2) terminal de cable 3) Enchufe de transporte 4) carenado 5) transductor magneto restrictivo . (Mullakaev et al., 2015)	26
Figura 8 Actuador piezoeléctrico tipo pila. (Cupich & Elizondo, 2000).	27
Figura 9 Dispositivo de vibración de fondo de pozo con radiador de sonido, desarrollado en China , (Hou et al., 2015).	28
Figura 10 Dispositivo de vibración adjunto a la sarta de perforación, desarrollado en Estados Unidos. Modificado de (Westermarck et al., 2001)	28
Figura 11 Resultados de mecanismos similares a recobro a través de ondas de alta frecuencia en el mundo.	30
Figura 12 Resultados de investigaciones académicas relacionadas al uso de ondas de ultrasonido en el área de ingeniería de petróleos.....	32
Figura 13 Proyectos de recobro secundario en Colombia. (Maya et al., 2010)	33
Figura 14 Producción departamental clasificada por tipo de crudo predominante. (Malagón et al., 2016)	34
Figura 15 Ganancias brutas anuales sin/con vibración por ondas.....	44

Lista de tablas

Tabla 1 Frecuencias dominantes para diferentes tipos de rocas. (Nikolaevskiy et al., 1996).....	18
Tabla 2 Ventajas y limitaciones del uso de ondas de ultrasonido, frente a otros métodos de recobro mejorado. Elaboración propia.	35
Tabla 3 Análisis técnico de los casos de aplicación. Elaboración propia.	38
Tabla 4 Análisis económico de los casos de aplicación. Elaboración propia.	43

Resumen

Debido a la constante demanda de hidrocarburos para uso energético y en petroquímica, la industria petrolera se encuentra en la necesidad de usar cada vez, nuevas tecnologías, las cuales permitirían aumentar la producción y/o el recobro de aceite a pesar de la madurez del reservorio con alto corte de agua. Este trabajo de grado, tiene como objetivo la recopilación bibliográfica sobre la recuperación de hidrocarburos por medio de ondas ultrasónicas de diferentes bases de datos con el fin de presentar el origen, los mecanismos de acción, los aspectos técnico-económicos, casos de éxitos en la implementación del uso de ondas de alta frecuencia para el recobro de hidrocarburos y comparar el recobro mejorado con ondas ultrasónicas, contra otros métodos de recobro de hidrocarburos. Finalmente, este trabajo de grado tiene como objetivo dar a conocer el uso de ondas de alta frecuencia como método de recobro alternativo y mostrar sus ventajas comparativas y su potencial económico.

Palabras clave: ondas ultrasónicas, frecuencia dominante, viscosidad de aceite, saturación de aceite residual, corte de agua, tensión interfacial, WOR

Abstract

Due to the constant demand for hydrocarbons for energy use and in petrochemicals, the oil industry finds itself in the need to use new technologies, which would allow increased production and/or oil recovery despite the maturity of a reservoir with high water cut. This degree work aims to compile the bibliography on the recovery of hydrocarbons through ultrasonic waves from different databases in order to present the origin, actional mechanisms, technical-economic aspects, successful cases in the implementation of the use of high-frequency waves for the recovery of hydrocarbons and to compare the enhanced recovery through ultrasonic waves, against other methods of hydrocarbon recovery. Finally, this degree work aims to showcase and promote the use of high-frequency waves as an alternative recovery method and to show its comparative advantages and its economic potential.

Key words: ultrasound waves, dominant frequency, capillary, pressure, residual, oil saturation, adsorbed, water cut, interfacial tension, WOR

1. Introducción

Desde los inicios de la industria petrolera hasta la actualidad, los yacimientos de crudo han producido mediante flujo natural y en la mayoría de los casos, mediante la ayuda de un sistema de levantamiento artificial. Posteriormente se han implementado métodos diferentes al ALS (Sistemas de levantamiento artificial por sus siglas en inglés), cuando la presión no era la suficiente para llevar el crudo de fondo a superficie, se implementaron nuevos métodos, como mecanismos de apoyo para suplir esta deficiencia. Dentro de estos métodos, se encuentra la inyección de agua, la cual ayuda a mantener y/o restaurar la presión del yacimiento y al mismo tiempo, ayuda a desplazar los hidrocarburos. Sin embargo, en este proceso se alcanza un punto en el cual la irrupción del frente de agua hace que las altas cantidades producidas de la misma, generen sobrecostos en las operaciones y en muchos casos la producción de hidrocarburos no sea económicamente rentable. No obstante, estos yacimientos aún poseen potenciales reservas a explotar, ya que la producción primaria y secundaria tiene un factor de recobro que oscila entre 15-40% del petróleo original in situ. (Schlumberger, n.d.)

Esta necesidad de producir en un margen económicamente rentable, unido a la demanda mundial de energía y de optimizar la producción hasta alcanzar el mayor factor de recobro posible, ha llevado al desarrollo de diferentes tecnologías y técnicas, donde se modifican las propiedades mismas del crudo o del reservorio, conocidas como recobro mejorado o EOR (*Enhanced Oil Recovery*). Entre los métodos más conocidos, se encuentran aquellos que involucran técnicas térmicas y químicas, generalmente para disminuir la viscosidad del crudo.

Los métodos mencionados anteriormente, pueden llegar a presentar un alto costo de implementación; Por ejemplo, la compra de dispositivos necesarios para la inyección de polímeros, pueden alcanzar costos cercanos a los \$230.000 dólares en procesos pequeños y mucho más elevados en procesos a gran escala. (Meribout, 2018) Por ello, se han desarrollado métodos menos conocidos que resulten más económicos y con una mayor aplicabilidad a yacimientos que presentan un alto corte de agua. En este sentido, el uso de las ondas ultrasónicas resulta atractivo en cuanto a costos y a los resultados obtenidos en yacimientos con este tipo de inconvenientes. Los dispositivos necesarios, se encuentran alrededor de los \$90.000 dólares (Meribout, 2018), un valor que equivale a menos de la mitad de los costos de equipos de otros métodos de recobro mejorado.

Esta tecnología, ha sido desarrollada e implementada por distintas potencias mundiales como son Rusia, China y Estados Unidos, obteniendo resultados satisfactorios en la mayor parte de los casos de aplicación en yacimientos de crudos pesados o con un alto corte de agua.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente proyecto de grado tiene como objetivo la investigación, análisis, recopilación de información y evaluación de la aplicación de ondas ultrasónicas como método de recobro mejorado en la producción de hidrocarburos en el mundo.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

- Determinar las ventajas y desventajas del uso de ondas ultrasónicas como método de recobro mejorado en la producción de hidrocarburos.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar una investigación bibliográfica acerca de los principios básicos del funcionamiento y aplicación de la vibración in situ en la industria de hidrocarburos.
- Recopilar casos de aplicación de ondas ultrasónicas en pruebas piloto o campos productores y determinar un factor de eficiencia basado en los resultados obtenidos en los mismos.
- Analizar y comparar el uso de ondas ultrasónicas respecto a la aplicación de otros métodos de recobro.

3. Revisión de la literatura

3.1. Origen de la vibración in-situ.

Alrededor del año 1950, se empezó a observar una relación entre la producción de crudo y la cercanía de los pozos a epicentros de terremotos o zonas cercanas a vías del tren. Esto debido a diversas investigaciones en EEUU y en la USSR en la década de los 70's. Dichas investigaciones fueron lideradas principalmente por instituciones como "the Institute of Physics of the Earth of the USSR Academy of Sciences", "the Krylov Institute of Oil and Gas" y "the Institute of Nuclear Geophysics and Geochemistry" (Beresnev & Johnson, 1994) . Sin embargo, Estados Unidos no se quedó atrás en la investigación de dichos fenómenos. Por ejemplo, en 1950 un estudio llevado a cabo por (Parker & Stringfield, 1950), en un pozo ubicado cerca de las vías del tren, vió afectada la altura del nivel de agua de manera favorable con el transcurrir del tiempo, especialmente después de producirse un terremoto en una zona cercana a él (Ver Figura 1). También, otros estudios alrededor del mundo han demostrado que el nivel de agua en los pozos, es afectado ampliamente por fenómenos, como son las ondas sísmicas o perturbaciones por maquinarias cercanas (Barabanov et al., 1987).

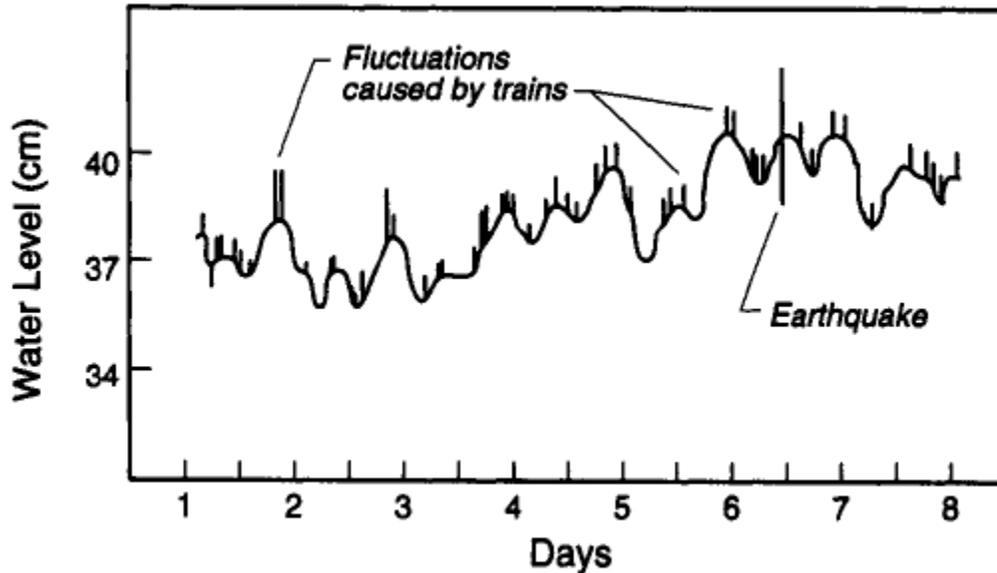


Figura 1 Fluctuaciones en el nivel de agua en un pozo a 52 m de profundidad, inducidas por la excitación de ondas sísmicas. (Parker & Stringfield, 1950).

Otros estudios adicionales muestran más beneficios, en el uso de las ondas ultrasónicas en pruebas de laboratorio de análisis de núcleos, los cuales mediante la influencia de ondas de alta frecuencia evidencian mejoras en la permeabilidad del crudo. También se observa en el mismo, un decrecimiento de la viscosidad. Ambos fenómenos mencionados anteriormente, son producto de lo que se conoce como excitación armónica.

Posteriormente, se desarrollaron varios proyectos pilotos en Rusia, como el caso del reservorio Abuzy en Krasnodar norte del Caucasus. En este piloto llevado a cabo en 1997, se aplicó una fuerza de 20 toneladas al reservorio y se obtuvo que la frecuencia óptima osciló entre 11 a 13 Hz. Durante este proyecto, se observó una disminución de la relación agua/aceite, aumentando la producción de crudo de un 3.2% a valores en el rango de 6.8-8% en el pozo de estudio A e incrementando la producción de 7.3% a valores entre 12.5 y 17.8% para el pozo de estudio B. (Ver Figura 2) (Nikolaevskiy et al., 1996).

<u>Well</u>	<u>Perforated Interval (m)</u>	<u>% Oil Before Vibrations</u>	<u>% Oil at Beginning of Vibrations*</u>	<u>% Oil at Optimum Frequency</u>	<u>Optimum Frequency (Hz)</u>	<u>Distance from vibrators (m)</u>
A	1471–1496	3.2	6.7	6.7–8.0	11–13	1000
B	1259–1452	7.3	9.0	12.5–17.8	11–13	100

Figura 2 Incremento en la producción de aceite para el campo Abuzy en Krasnodar, utilizando la frecuencia de vibración óptima. (Nikolaevskiy et al., 1996)

Posteriormente se empezó a aplicar la tecnología en China, gracias a los bajos costos y a su efectividad en pozos con altos cortes de agua. Para esta época, el desarrollo tecnológico permitió la implementación de equipos modernos y así poder obtener una mayor eficiencia al aplicar la técnica de recobro mejorado en diferentes regiones de China. Como ejemplo se tiene que en el campo Liaohe en el año 1997, se utilizó un dispositivo de vibración de fondo de pozo, el cual contaba con una frecuencia de 88 shocks/minuto y 5 toneladas de fuerza. Como resultado, 26 pozos del mismo campo incrementaron su producción en un 47.6% en comparación a la producción antes del proceso. Adicionalmente, se obtuvo una reducción en la viscosidad del crudo y una reducción en la producción de arena. (Zhu et al., 2005).

A la fecha de hoy, en el mundo, se han llevado varias investigaciones adicionales, utilizando núcleos en pruebas de laboratorio, para evaluar la influencia de las ondas producidas mediante este método de recobro (Westermarck et al., 2001). Lo anterior se debe principalmente al hecho que la tecnología continúa desarrollándose y presenta un gran potencial, como alternativa para la explotación de hidrocarburos.

3.2. Factor de recobro

El factor de recobro es el valor porcentual obtenido entre el volumen de crudo recuperado respecto al aceite original en la formación (*Original Oil In Place-OOIP*). Este factor, permite determinar el crudo remanente en la formación y, por ende, el potencial del yacimiento.

$$FR = \frac{N_p}{OOIP} * 100 \quad (3.1)$$

Este factor es afectado por el mecanismo de empuje y producción, por las propiedades petrofísicas y del crudo, entre otros factores. En general, mediante un mecanismo de empuje natural o primario, su valor no supera el 40 %. (Paris de Ferrer, 2009)

4. Ondas

Una onda es conocida como una perturbación itinerante, la cual viaja a través de un medio gracias a la transferencia de energía que ocurre, sin desplazar la masa de este. El desplazamiento de una onda es conocido como movimiento ondulatorio.



Figura 3 Ejemplo de ondas y su movimiento.(danieltubau, 2019).

Las ondas pueden ser clasificadas según el medio que las soporta, siendo las ondas mecánicas aquellas que requieren de un medio físico para desplazarse y las ondas electromagnéticas las que no requieren un medio físico para desplazarse.

Se considera el movimiento de una onda en el espacio al movimiento de una partícula, la cual oscila con un movimiento armónico simple. El movimiento de la onda se puede cuantificar mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (4.1)$$

Dónde: f es la frecuencia o número de repeticiones por unidad de tiempo; v es la velocidad de la onda y λ es la longitud de onda.

De igual forma, la frecuencia se expresa como:

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.2)$$

Dónde: T es el periodo de la señal de onda (Martín Bragado, 2018).

4.1. Ondas ultrasónicas

Se conocen como ondas ultrasónicas a las ondas mecánicas longitudinales, las cuales poseen una frecuencia superior a 20 kHz y una velocidad de propagación superior a la del sonido. Estas a su vez se dividen en ondas de baja frecuencia (20 kHz – 1MHz) y ondas de alta frecuencia (Superiores a 1 MHz) (Shafiai & Gohari, 2020).

4.2. Frecuencia dominante

Como se observó en la sección 3.1, la aplicación de ondas ultrasónicas se impulsó gracias al estudio de fenómenos sísmicos que afectaban la producción de crudo en zonas cercanas al epicentro de los terremotos. En diversos experimentos se logró comprobar que las vibraciones de alta amplitud son las que permiten una mayor recuperación de crudo en un yacimiento. No obstante, usar vibración de alta amplitud, se considera física y económicamente imposible, ya que solo se alcanza en fenómenos naturales como terremotos.

Por otro lado, estudios llevados a cabo por Igor A. Beresnev y Paul A. Johnson (Beresnev & Johnson, 1994), demostraron que posterior a la toma de registros acústicos en algunos pozos, se incrementó la producción de aceite, posiblemente a causa de la vibración ultrasónica. Este efecto se explica en el hecho de que posiblemente la cara del pozo fue limpiada por el efecto de las ondas. Estas ondas, tienen tendencia a dispersarse con facilidad y no logran penetrar más que unos pocos centímetros de la formación, ocasionando que sean poco prácticas a la hora de llevar a cabo una estimulación.

Diversos experimentos llevados a cabo, han demostrado que la frecuencia de onda puede variar drásticamente al pasar a través de un medio poroso saturado, dependiendo del grado de compactación de la roca y de la saturación de la misma. Al producirse este cambio en la frecuencia de onda, se presenta el fenómeno conocido como “frecuencia dominante”, la cual se define como: aquella frecuencia que no depende de su origen, ni del espectro de onda.

De acuerdo a lo anterior, científicos alrededor del mundo, han logrado establecer los valores de la frecuencia dominante de diferentes tipos de rocas, obteniendo:

Tabla 1 Frecuencias dominantes para diferentes tipos de rocas. (Nikolaevskiy et al., 1996).

Tipo de roca	Frecuencia dominante, Hz
Areniscas	20
Arcillas	40
Grava	10
Granito erosionado	100

4.3. Ondas acústicas

El sonido es el resultado de una perturbación propagada a través de un medio elástico. Por ello, se denominan ondas acústicas, a aquellas que se producen en un medio líquido o gaseoso. Su característica principal son habitualmente sus velocidades constantes, las cuales, a condiciones estándar de presión y temperatura, se encuentran cercanas a 345 m/s. Sin embargo, la velocidad de este tipo de ondas puede ser mayor o menor, dependiendo de factores del medio en el cual se transmiten, como son: homogeneidad, densidad, elasticidad y temperatura, además de propiedades de la onda como son su longitud y periodo, entre otras. (Martín Bragado, 2018).

4.3.1. Movimiento de las ondas acústicas en el espacio poroso

Para llevar a cabo un análisis del movimiento de las ondas acústicas en el yacimiento, se utiliza el modelo de Warren-Root, el cual considera que los poros en la roca del yacimiento de crudo, están compuestos de numerosos tubos capilares paralelos, de igual diámetro. Cuando las ondas acústicas entran en contacto con el yacimiento, logran disminuir la viscosidad del aceite entre un 25 y 30 %, generando una expansión y contracción del diámetro de las paredes capilares, además de un cambio en la apertura capilar, una disminución en la tensión superficial y finalmente, un cambio en la presión capilar externa e interna (Hou et al., 2015). La tensión interfacial y las fuerzas capilares se pueden calcular a través de las siguientes expresiones: (Ecuaciones (4.3) a (4.7))

$$\varphi = \frac{E_s - E_i}{\pi r^2} \quad (4.3)$$

Donde:

- E_s es la energía entre el límite de dos capas
- E_i es la energía de la capa molecular que presenta el mismo volumen en la fase
- r es el diámetro de apertura capilar
- θ es el ángulo de contacto del fluido mojante

$$v = \frac{2(E_s - E_i) \cos \theta}{\pi r^3} \quad (4.4)$$

4.3.2. Influencia de las ondas acústicas en el yacimiento

El modelo de fluido de Bingham es de gran importancia para entender el comportamiento de los fluidos en el reservorio, los cuales son influenciados por las ondas acústicas. Por ello, se ha presentado a través del modelo de Bingham, el comportamiento de las ondas de baja frecuencia a través de las siguientes condiciones:

$$|\Delta p| \leq A_j ; u = 0 \quad (4.5)$$

$$|\Delta p| > A_j ; u = -\frac{k}{\mu_h} \Delta p \left(1 - \frac{A_j}{|\Delta p|}\right) \quad (4.6)$$

Dónde:

- u es la velocidad media del fluido a lo largo del eje axial del capilar
- k es la permeabilidad
- μ_h es el coeficiente de viscosidad
- Δp es el gradiente de presión externo
- A_j es el mínimo gradiente de presión para que el crudo fluya y se puede calcular mediante la expresión:

$$A_j = 2t_0/R \quad (4.7)$$

Dónde: t_0 es el esfuerzo cortante y R es el radio capilar.

En cuanto la presión externa aumenta hasta el umbral y se aplica una vibración longitudinal a lo largo de la pared paralela a los poros, se inducirá en el fluido, un gradiente de presión inercial (P_{osc}) con una amplitud determinada ($\bar{\rho}\alpha$).

$$P_{osc} \approx \bar{\rho}\alpha \quad (4.8)$$

Dónde: $\bar{\rho}$ es la densidad promedio del crudo y α es la amplitud de la aceleración.

Finalmente, el gradiente de presión instantáneo en el fluido puede convertirse en:

$$\Delta p = P_{osc} + \Delta p_s \quad (4.9)$$

Dónde: Δp_s es el gradiente estático de presión externa.

De acuerdo con la ecuación (4.6), cuando las ondas acústicas actúan, el coeficiente de viscosidad (μ_h) disminuye, el gradiente de presión (Δp) aumenta y la velocidad media del fluido (u) se incrementa. Como resultado de lo anterior, se produce una mejora en la tasa de aceite y en el factor de recobro.

Por otro lado, cuando la frecuencia emitida es fija, se producirá un incremento en la amplitud de la aceleración de la pared a causa de un incremento en la amplitud de desplazamiento, causando un aumento en el gradiente de presión inercial y fortaleciendo el umbral de desconexión. (Hou et al., 2015)

4.3.3. Influencia de las ondas acústicas en la tasa de aceite

Como se mencionó anteriormente, las ondas acústicas pueden causar un impacto positivo en la tasa de aceite. Para cuantificar este fenómeno, primero se debe conocer el valor del momento a través de la siguiente expresión:

$$\rho \frac{dV_r}{dt} = (-\rho\zeta w^2 e^{i\omega t} - \frac{dp}{dx}) + \frac{1}{r} \frac{d(rn)}{dr} \quad (4.10)$$

Dónde:

- $\zeta e^{i\omega t}$ es el desplazamiento de las paredes capilares
- ζ es la amplitud de desplazamiento de las paredes capilares
- ω es la frecuencia angular de la vibración
- ρ es la densidad del crudo.

Por otro lado, se tiene que la velocidad relativa del crudo, calculada para un radio determinado, se puede calcular a través de la siguiente expresión:

$$V_r(r, t) = \frac{1}{4\mu_h} (r^2 - R^2) (-\rho\zeta w^2 e^{i\omega t} - \frac{dp}{dx}) \quad (4.11)$$

Dónde:

- R es el radio capilar
- r es la velocidad relativa del crudo dentro de cualquier radio capilar.

Finalmente, se integra la ecuación (4.7), teniendo que:

$$q(t) = \int_0^R V_r(r, t) 2\pi r dr = \frac{\pi R^4}{8\mu_h} (\rho\zeta w^2 e^{i\omega t} + \frac{dp}{dx}) \quad (4.12)$$

De acuerdo a lo anterior, a medida que haya un incremento en la amplitud de desplazamiento (ζ) o en la frecuencia angular de vibración (ω), habrá un incremento en el caudal de aceite. De igual manera, se puede calcular la tasa de aceite a través de la siguiente expresión:

$$Q = \frac{P_g - P_j}{\frac{\mu_s}{2\pi kh} \ln\left(\frac{R_g}{r_b}\right) + \frac{\mu_y}{2\pi kh} \ln\left(\frac{r_b}{R_y}\right)} \quad (4.13)$$

Dónde:

- P_g es la presión de superficie en el pozo durante el proceso de desplazamiento de aceite
- P_j es la presión de fondo de pozo

- k es la permeabilidad
- h es el espesor de la formación
- R_g es el radio del borde de suministro
- R_y es el radio de drenaje
- r_b es el radio hasta el borde del área de aceite
- μ_s es el coeficiente dinámico de la viscosidad del agua
- μ_y es el coeficiente dinámico de la viscosidad de aceite.

De esta manera, existen tres (3) factores que influyen directamente en la producción de aceite: el gradiente de presión del yacimiento, la permeabilidad y el coeficiente de viscosidad dinámica. El primero de ellos, depende del estado mecánico y de la integridad de la formación productora. El segundo factor, depende del tamaño, geometría y distribución de los poros. El último factor, depende de la naturaleza misma del hidrocarburo. (Liu et al., 2004)

4.3.4. Influencia de las ondas en las propiedades de la roca y los fluidos

Gracias a los estudios llevados a cabo en núcleos sintéticos (Ariadji, 2005), se demostró que las propiedades de la roca y del fluido, son alteradas por el paso de las ondas acústicas que atraviesan el medio poroso. Dicho estudio, se llevó a cabo con núcleos de diferentes tamaños de granos y diferentes tipos de cementos. Estos núcleos presentaban porosidades entre 13-30% y permeabilidades entre 1600-2500 mD, donde se observó que la frecuencia tenía un fuerte impacto en ellas. En la Figura 4, se muestran los resultados de los experimentos, donde se tuvo un incremento máximo de 15.3% en los valores originales de porosidad e incrementos de 73% en las permeabilidades relativas al aceite.

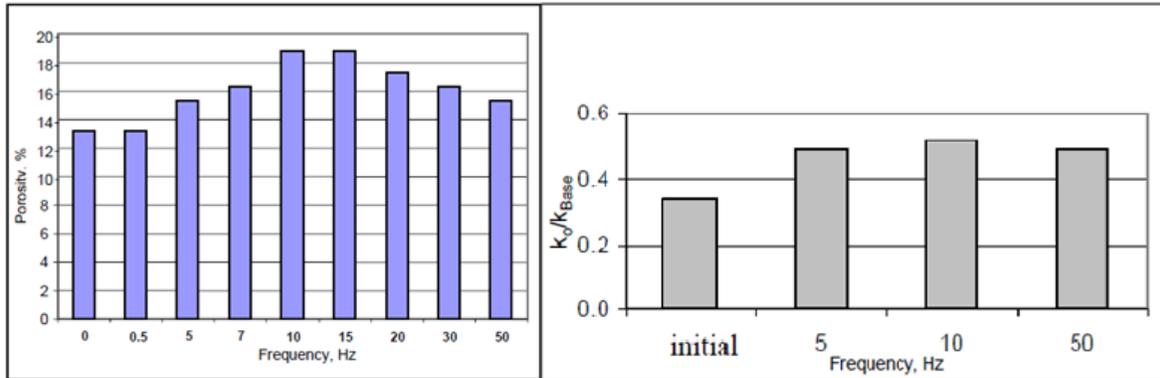


Figura 4 Alteración de la porosidad y permeabilidad relativa del aceite debido a la frecuencia en núcleos sintéticos. (Ragab & Snosy, 2015).

De igual manera, se presentan reducciones en la saturación residual de aceite, gracias a los cambios en la mojabilidad de la roca. (Ver Figura 5)

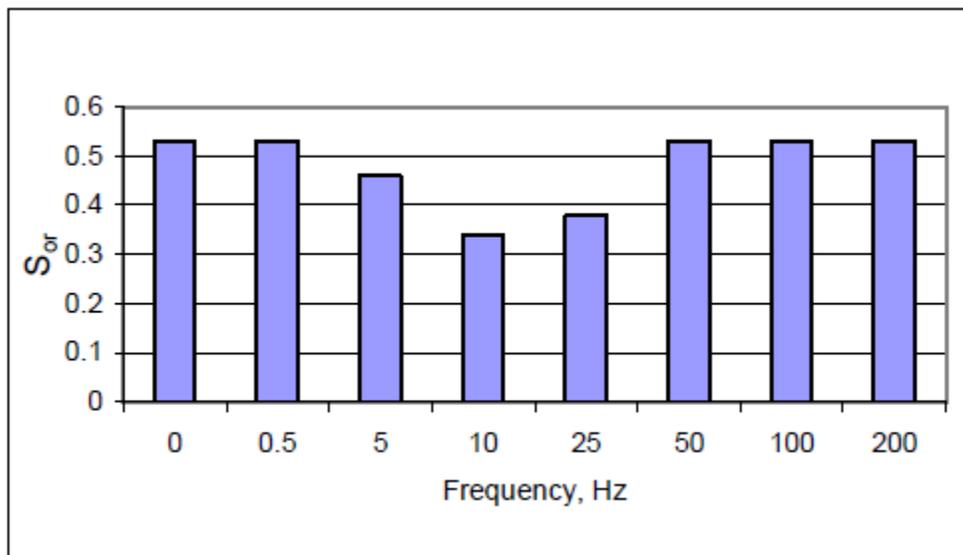


Figura 5 Efecto de la vibración en la saturación residual de aceite. Fuente (Ragab & Snosy, 2015).

5. Aspectos técnicos

Para la aplicación de ondas ultrasónicas como técnica de recobro mejorado, se han desarrollado diferentes dispositivos, los cuales tienen como objetivo la generación de ondas mecánicas longitudinales de 20kHz o superiores a los 1 Mhz; estas ondas permiten aumentar la producción de aceite, que se encuentra atrapado en los poros de la roca. Entre las tecnologías usadas para la generación de ondas se pueden encontrar los dispositivos de vibración como los magnetos restrictivos, piezo eléctricos entre otros, los cuales serán explicados a continuación.

5.1. Dispositivos utilizados para generar vibración

Los dispositivos usados para la generación de ondas armónicas orientadas a la recuperación de hidrocarburos presentan una gran variedad en su estructura, debido a que existen múltiples mecanismos para lograr la generación de estas ondas. Sin embargo, existen múltiples factores restrictivos a tener en consideración para la aplicación de dichos dispositivos, como el diámetro del pozo, propiedades del yacimiento y propiedades del crudo, entre otros.

De acuerdo a las más recientes investigaciones (Apasov et al., 2012), es importante tener en cuenta los siguientes criterios de selección para obtener resultados satisfactorios, aunque es de resaltar que estos criterios pueden variar dependiendo del tipo de equipo usado y el método de implementación usado, dentro de los más relevantes encontramos los siguientes:

- Decrecimiento de la presión de fondo no superior al 25 % de la presión original.
- El corte de agua no debe superar el 80 %.
- El número de máximo capas en el intervalo perforado no debe ser superior a 10.
- Se requiere un espesor de formación mínimo de 9.85 pies (3 metros).
- Debe poseer un potencial espontáneo (SP) de 0.5 o mayor.
- La permeabilidad debe ser superior a 253.31 milidarcies ($0.25\mu\text{m}^2$).
- No poseer un contenido de arcilla superior al 15 %.
- La disminución de la producción de aceite en los últimos 2 años no debe ser producto de razones técnicas.
- La viscosidad dinámica del crudo en condiciones de formación no debe ser superior a los 25 Cp (centipoise).

Siendo más enfático en los aspectos estructurales de los dispositivos usados para la generación de ondas de alta frecuencia se pueden encontrar aspectos similares en los equipos de superficie los cuales están compuestos por:

- Fuente de poder.
- Unidad de amplificación.

- Unidad de polarización
- Unidad de control
- Cable de alimentación
- Wire truck o camión de cableado

Sin embargo, la variación en los equipos de fondo de pozo pueden resultar ser variados al momento de implementar un sistema de aplicación de vibración ultrasónica, esto se debe a que el tipo de transductor ofrece diversas ventajas y por ello se pueden catalogar en diversos tipos, a continuación se habla de diversos dispositivos encontrados en la literatura.

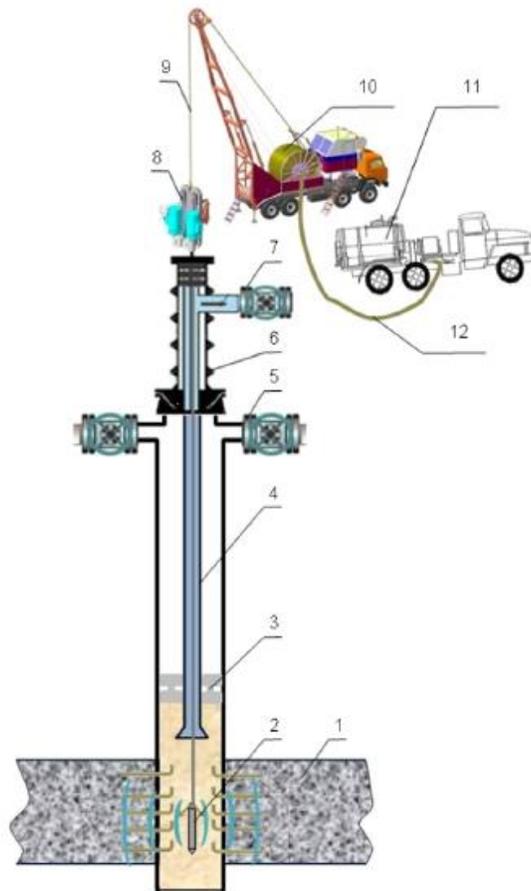


Figura 6 Diagrama esquemático de un proceso de recobro mediante ultrasonido 1) Yacimiento 2) Herramienta de ultrasonido 3) empaques 4) tubería 5) válvula de revestimiento 6) lubricador 7) línea de descarga 8) alimentación de cable de suministro 9) cable de suministro 10) Camión de cableado 11) Unidad de bombeo 12) Tubería de suplemento de químicos. Fuente (Mullakaev et al., 2015)

5.1.1. Dispositivos magneto-restrictivos

Estos dispositivos se basan en las propiedades de elementos magneto-restrictivos, los cuales al ser afectados por un campo magnético se expanden, lo cual permite ejercer un esfuerzo mecánico sobre la roca en el yacimiento por un periodo de tiempo determinado, permitiendo generar ondas ultrasónicas (Clark, 1980). Estos equipos emplean cilindros con propiedades ferromagnéticas, causando vibración en la zona de interés.

Según diferentes investigaciones (Beresnev & Johnson, 1994), no son dispositivos muy eficientes, mostrando resultados no satisfactorios en aproximadamente un 60% de los casos. Esto se debe a que, la mayoría de las pruebas posiblemente se hicieron en condiciones de yacimiento no favorables a este tipo de tecnología.

Un ejemplo de dispositivos magneto restrictivos modernos son el PSM-42 (ver Figura 8)) y el PSM-102 llamados de esta manera debido al diámetro (42 o 102 mm) los cuales en conjunto con el resto del equipo de fondo tienen como objetivo transformar las vibraciones longitudinales elásticas en vibraciones radiales que afectan la región cercana al pozo.

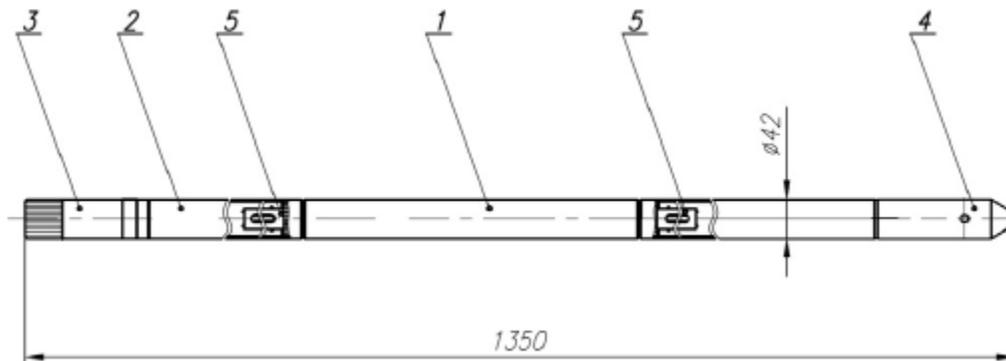


Figura 7 Herramienta de fondo de pozo PSM-42 compuesta por 1) Guía de ondas 2) terminal de cable 3) Enchufe de transporte 4) carenado 5) transductor magneto restrictivo . (Mullakaev et al., 2015)

5.1.2. Actuadores piezoeléctricos

Son dispositivos que se basan en la propiedad de los materiales piezoeléctricos, para generar un campo eléctrico al ser sometidos a una fuerza mecánica y viceversa. Para generar ondas ultrasónicas, estos dispositivos resultan claves, debido a los cambios de posición generados y a la capacidad de liberar grandes cantidades de fuerza. Adicional a ello, presentan la capacidad de expandirse y comprimirse con facilidad, por lo que pueden generar un amplio rango de frecuencias a bajas potencias.

El actuador piezoeléctrico más común, es el tipo “pila” (Ver Figura 8), el cual se encuentra compuesto de varias capas de cerámica con dos salidas eléctricas y una carcasa metálica que rodea las capas, para protegerlas de interferencias externas. A estas carcasas se les suelen incorporar resortes, los cuales comprimen las placas de cerámica para que éstas puedan operar a tensión y compresión sin ningún inconveniente. (Cupich & Elizondo, 2000).

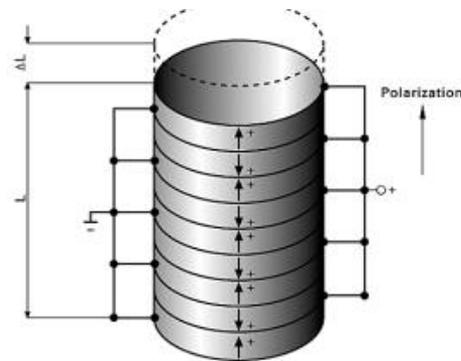


Figura 8 Actuador piezoeléctrico tipo pila. (Cupich & Elizondo, 2000).

5.1.3. Dispositivo basado en la minimización de la reluctancia magnética

Diseñado en el año 2015 por la *Southwest Petroleum University* en Chengdu. Este dispositivo, se encuentra basado en la teoría de la minimización de la reluctancia magnética, siendo ésta, la resistencia que un circuito o material posee al paso de un flujo magnético cuando es influenciado por un campo magnético. Su funcionamiento se dá, gracias al movimiento de un pistón, el cual llega a los mandriles superiores e inferiores, desplazando axialmente la placa de carga de los radiadores de sonido (Ver Figura 9). Es un dispositivo con un mayor rango de influencia que los mencionados anteriormente y presenta menores costos de fabricación. (Hou et al., 2015)

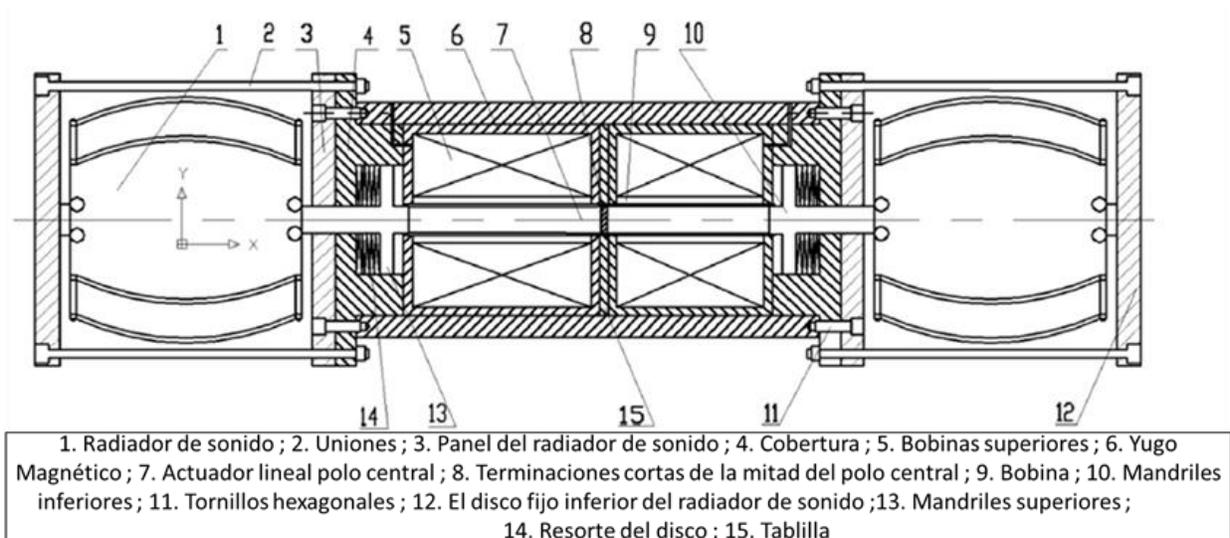


Figura 9 Dispositivo de vibración de fondo de pozo con radiador de sonido, desarrollado en China , (Hou et al., 2015).

5.1.4. Dispositivo de vibración tipo pandeo

Dispositivo desarrollado en Estados Unidos, el cual consiste en bajar una sarta de perforación, la cual se gira a una determinada cantidad de revoluciones por minuto dentro del casing del pozo, cuyo objetivo es aplicar vibración a la cara de la formación, el propósito es mejorar la producción de aceite en un radio de influencia cercano al pozo. (Ver Figura 10)

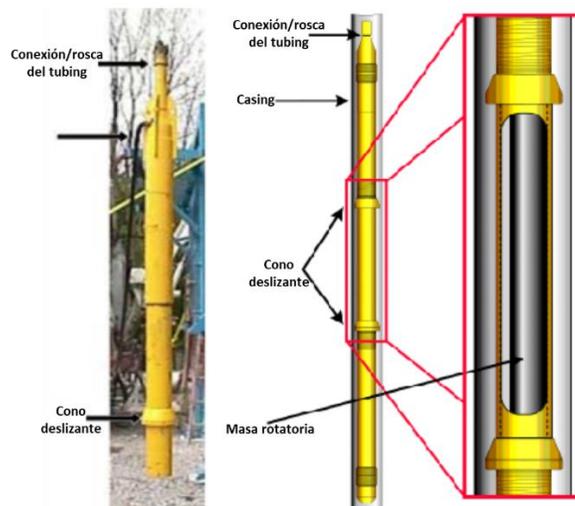


Figura 10 Dispositivo de vibración adjunto a la sarta de perforación, desarrollado en Estados Unidos. Modificado de (Westermarck et al., 2001)

Este dispositivo fue desarrollado a partir de investigaciones en donde se aprovechó el fenómeno conocido como “pandeo”, para generar vibraciones que mejorarían las propiedades del yacimiento y del crudo. El pandeo, es el fenómeno que se produce en las operaciones de perforación, cuando la sarta pierde parte de su verticalidad (por falta de tensión) y al girar, se estrella contra las paredes del pozo. En general, se busca que no se presente dicho fenómeno en el proceso de perforación, debido a que puede causar la remoción de la torta o causar pegas de tubería, sin embargo el objetivo de este dispositivo, es aprovechar dicho fenómeno, en el cual el cilindro interior (drill pipe) gira dentro del cilindro de radio mayor (casing), al ser aplicado en un pozo estructuralmente estable, permitiendo así, generar vibración de altas frecuencias con un menor esfuerzo, lo anterior se debe a que:

- Es un método eficiente y económico, para producir altas frecuencias ya que sólo requiere dos tuberías con diámetros diferentes.
- Gracias a que los cuerpos presentes dentro del casing, se encuentran sometidos a una poderosa fuerza centrífuga, no se requiere de un gran esfuerzo para que una masa pequeña, genere grandes fuerzas con facilidad.
- Se pueden producir ondas tanto de compresión, como de corte. Muchas investigaciones sugieren que este tipo de ondas, disminuyen la tensión superficial.

Alrededor del año 1994, se desarrolló uno de los primeros prototipos de esta tecnología, que tenía por objetivo, determinar la influencia de la vibración generada. Esta herramienta, fue probada a 120 ft de profundidad y su efecto se captó en geófono a 1100 ft de distancia y ubicado a 500 ft de profundidad. (Westermarck et al., 2001).

6. Investigación académica en Colombia y el mundo

Hasta la fecha, no existe información documentada de carácter público respecto al uso de ondas de alta frecuencia como mecanismos de recobro mejorado en Colombia, sin embargo existe literatura académica y casos de uso de esta tecnología como método de estimulación de pozos. A través de una búsqueda en tres de las principales bases de datos en el área de la ingeniería a nivel mundial, se evidenciaron múltiples estudios sobre el uso de ondas de alta frecuencia en el área del recobro mejorado de hidrocarburos los cuales son presentados en la Figura 11.

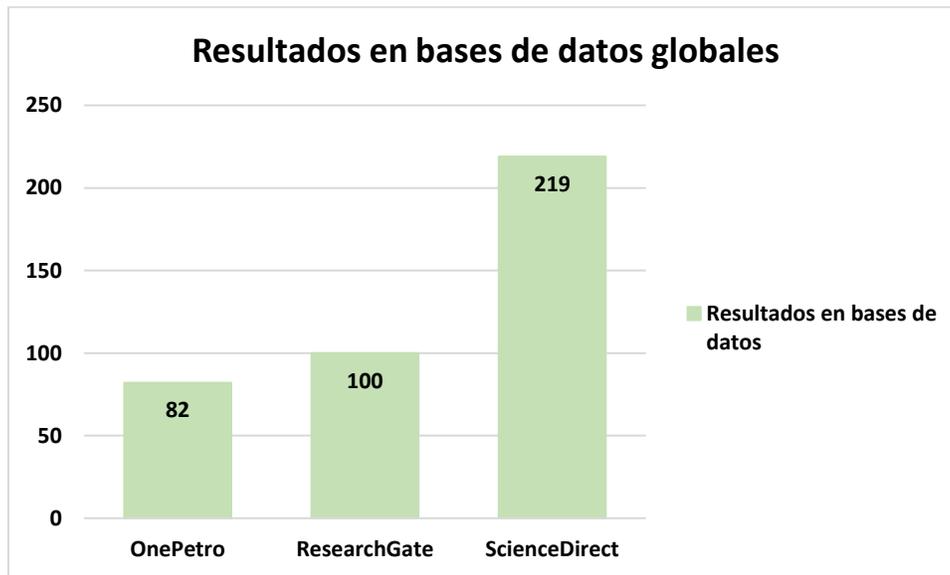


Figura 11 Resultados de mecanismos similares a recobro a través de ondas de alta frecuencia en el mundo.

Es importante resaltar que los resultados anteriores no necesariamente presentan información de casos de aplicación en el campo de ondas de alta frecuencia, sino también información de análisis de núcleos y proyectos relacionados con el uso de esta tecnología con fines no relacionados a la producción de hidrocarburos. Esto se debe a que el uso de las ondas de alta frecuencia presenta una gran versatilidad para implementarse en distintas áreas del sector de los hidrocarburos, sin embargo, a nivel nacional las investigaciones en el país son pocas siendo a continuación las más relacionadas con el recobro mejorado en las 4 principales universidades de petróleo en Colombia.

En la universidad de las Américas se encontró 3 documentos relacionados al tema de 10 resultados obtenidos en catálogo de la universidad, los cuales hablan del uso de las ondas

ultrasónicas para la estimulación de pozos para la eliminación del daño de formación siendo estos “Evaluación de la implementación de la tecnología hydro-acoustic tool (HAT) en dos pozos del Campo Llanito de la cuenca del valle medio del Magdalena” por (Plata Rangel, 2013), “Evaluación de la tecnología de ultrasonido como método de estimulación para pozos con daño de formación” por (Duarte Medina, 2009) y un caso de estimulación en los campos de petróleos de Tello y San Francisco, los cuales fueron documentados en el documento “Evaluación de los trabajos de estimulación ultrasónica desarrollados en los campos petroleros de Tello y San Francisco” por (Calderón Hernández, 2006).

En la Universidad Industrial de Santander se encontro 2 documentos entre 54, los cuales hablan de las propiedades reductoras de la viscosidad en el petróleo gracias a la aplicación del ultrasonido siendo los siguientes dos artículos, los más relevantes, “Reduction of heavy oil viscosity through ultrasound cavitation assisted by NiO nanocrystals-functionalized SiO₂ nanoparticles” por (Montes et al., 2018) y “Ultrasound Applied in the Reduction of Viscosity of Heavy Crude Oil ” por (Olaya-Escobar et al., 2020) .

En la universidad Surcolombiana, se encontró 1 artículo de 9 sobre la aplicación del ultrasonido para la estimulación de pozos presentado en el trabajo de grado “Evaluación y Selección de Pozos candidatos para la aplicación de la tecnología de estimulación mediante ondas de ultrasonido en los campos operados por BP Exploration Company (Colombia) LTD” por (Edwin Caicedo Garzón, 2007).

Finalmente, en la Universidad Nacional, en su catálogo bibliográfico se encontró el mismo artículo que el de la universidad industrial de Santander sobre la aplicación del ultrasonido en la reducción de la viscosidad en crudos pesados de los 7 artículos encontrados en su catálogo.

Como se puede observar, la aplicación de las ondas de alta frecuencia en Colombia aún no se discute y mucho menos se investiga en la academia y aún menos en la industria, sin embargo ya se conocen los beneficios de esta tecnología siendo una gran oportunidad para desarrollar y aplicarla en el país.



Figura 12 Resultados de investigaciones académicas relacionadas al uso de ondas de ultrasonido en el área de ingeniería de petróleos.

7. Oportunidades de implementación en Colombia

En Colombia la mayoría de los 280 campos petrolíferos llevan más de 40 años de explotación, no obstante, presentan un factor de recobro promedio, de alrededor del 19%. Sin embargo, muchos campos poseen aun reservas de aceite residual de alrededor del 43 % y el 36 % del petróleo móvil aun no contactado disponible para su extracción. Adicionalmente muchos campos presentan tasas de corte de agua superiores al 80%, esto se debe a que un gran porcentaje de los campos en el valle medio y superior del Magdalena poseen inyección de agua como método de recobro. Finalmente, los campos ubicados en los llanos orientales, aunque no presentan altas tasas de corte de agua son yacimientos abundantes en crudo de tipo pesado, lo cual hace que gracias a estas características, la implementación del recobro mediante ondas de ultrasonido sea una propuesta de gran interés gracias a su bajo costo y versatilidad, presentando una gran oportunidad para mejorar el factor de recobro y el incremento de la producción de aceite en el país.

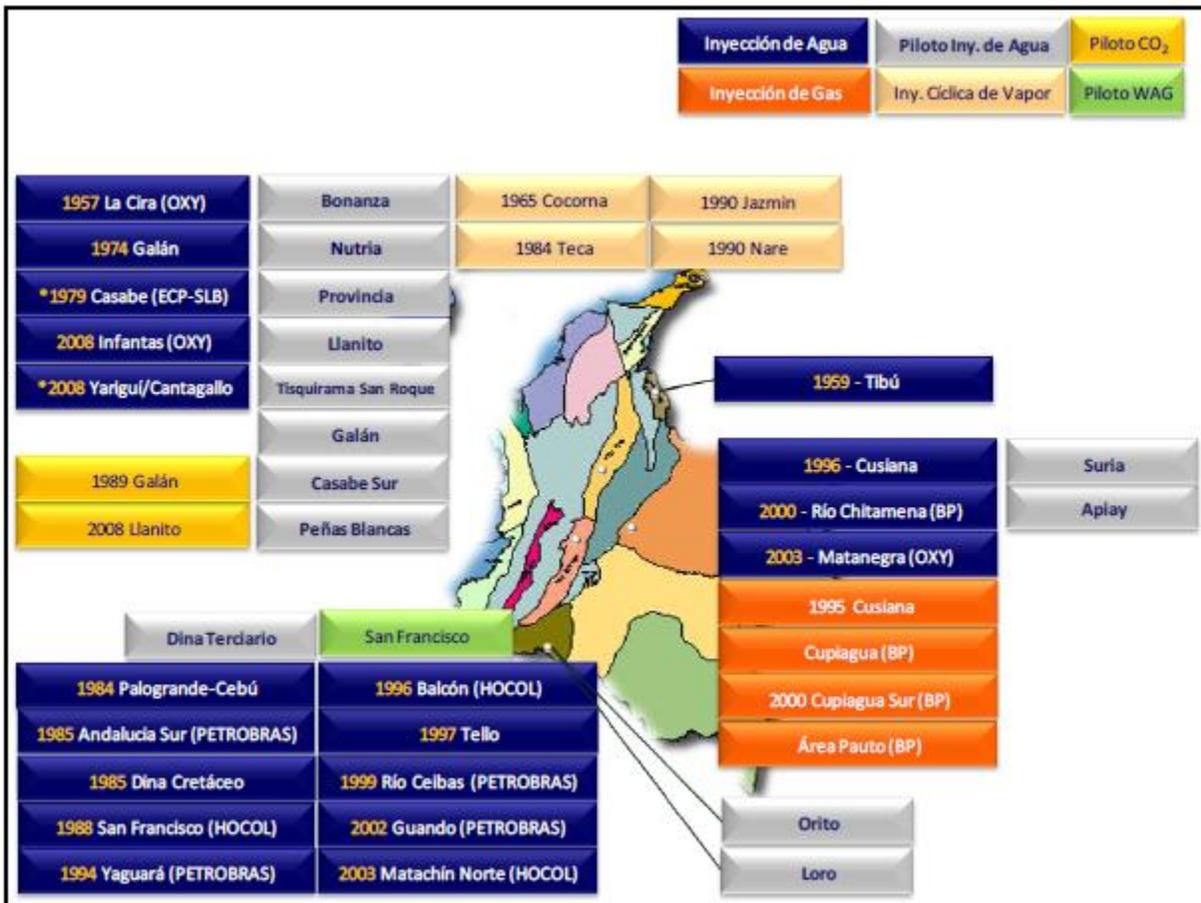


Figura 13 Proyectos de recobro secundario en Colombia. (Maya et al., 2010)

Entre los campos más prometedores en el país se cuentan: Casabe, Tibú, Caño limón, La Cira infantas, san Francisco, Balcón, Tello, Los Mangos, Cebú, Palo Grande, Dina Cretáceo y Terciario entre otros. Dichos campos presentan cortes de agua en promedio, superiores al 80%, los cuales son una gran oportunidad para la implementación del uso de ondas de alta frecuencia. Esto se debe a que dichos campos poseen algunas de las características más deseadas al momento de buscar un recobro mediante ondas de alta frecuencia. Además de ello la gran mayoría de campos en Colombia como se puede apreciar en la figura 14 son crudos especialmente pesados, lo que los convierte en candidatos de gran interés al momento de aplicar ondas de ultrasonido para obtener un mejor recobro e incrementar la producción.

Departamento	Tipo de crudo predominante	Departamento	Tipo de crudo predominante
Antioquia	Pesado	Huila	Mediano
Arauca	Mediano	Magdalena	Sin información
Atlántico	Sin información	Meta	Pesado
Bolívar	Pesado	Nariño	Mediano
Boyacá	Pesado	Norte de Santander	Liviano
Casanare	Pesado	Putumayo	Mediano
Cauca	Mediano	Santander	Pesado
Cesar	Pesado	Sucre	Sin información
Córdoba	Sin información	Tolima	Pesado
Cundinamarca	Pesado	Vichada	Pesado

Figura 14 Producción departamental clasificada por tipo de crudo predominante. (Malagón et al., 2016)

8. Análisis técnico-económico del uso de ondas como método de recobro mejorado

Para tener una mejor percepción de la aplicación de ondas como método de recobro, se ha realizado una tabla comparativa, donde se muestran las ventajas y limitaciones de este método respecto a las otras técnicas de recobro mejorado, más aplicadas en el mundo. (Ver Tabla 2)

Tabla 2 Ventajas y limitaciones del uso de ondas de ultrasonido, frente a otros métodos de recobro mejorado. Elaboración propia.

	Recobro térmico (combustión in-situ)
Ventajas	Reducción de la viscosidad
	Reducción de la tensión interfacial
	Aumenta la permeabilidad del crudo
	Alto factor de recobro
	Amplio radio de influencia
Limitaciones	Altos costos energéticos
	Se pierde parte del crudo por combustión
	Posible descontrol del frente de combustión
	Altos costos de equipos y materiales
	Daño a la cara del pozo, debido al inicio del frente de combustión
	Requiere de una inyección continua de aire
	Recobro químico (Uso de álcali, surfactante o polímeros)
Ventajas	Reducción de la tensión interfacial
	Alteración de la mojabilidad
	Permite controlar la movilidad para un barrido uniforme
	Equipos de bajo costo
	Amplio radio de influencia
Limitaciones	Altos costos en los materiales empleados
	Los materiales empleados, tienen alta sensibilidad y degradación

	Posible daño por incompatibilidad
	Bajo grado de difusión en la estructura de los poros
	Requiere mantener el uso de inyección de agua después del tratamiento para una eficiencia aceptable
	Nano fluidos
Ventajas	Fácil difusión y movilidad en medios porosos
	Gran área de contacto, lo que maximiza la eficiencia de aplicación
	Facilidad para el control de arenas
	Facilidad para control de asfáltenos
	Amplio radio de influencia
	Disminución de la tensión interfacial
Limitaciones	Altos costos de producción
	Tecnología aún en desarrollo
	Limitación en la producción de los nano fluidos de manera masiva
	Riesgo de aglomeración de las nanopartículas y posible daño a la formación
	Recobro por vibración de alta frecuencia
Ventajas	Ayuda en el control de arena y limpieza del pozo
	Reducción de viscosidad del aceite
	Gran aplicabilidad en yacimientos con altos cortes de agua
	Disminuye la tensión interfacial
	Altera la mojabilidad de la roca, beneficiando la producción de crudo
	Reduce la saturación de aceite residual de la roca
	Bajos costos de aplicación y fácil transporte
	No requiere la inyección de ningún tipo de fluido
Limitaciones	Bajo radio de influencia del pozo vibratorio a otros pozos circundantes (1640.42-3608.92 ft)

	Se recomienda aplicarse, solo en yacimientos con altos cortes de agua
	Los dispositivos utilizados, se ven limitados por las propiedades del yacimiento y por el estado mecánico del pozo
	Baja efectividad en yacimientos muy depletados
	Posibles riesgos al emplearse en zonas falladas
	Tecnología aún en desarrollo

En la Tabla 2, se observa que el recobro por vibración, producido por ondas ultrasónicas, al ser usado, ofrece mejoras en las condiciones del yacimiento y el fluido, muy similares a las proporcionadas por los otros métodos de recobro. Sin embargo, la tecnología resalta en su aspecto económico, al ser un sistema que no requiere de ningún tipo de inyección de fluido y al emplear equipos simples estructuralmente, volviéndose uno de los más rentables económicamente. En sus aspectos técnicos, la principal cualidad de esta aplicación, es su posible gran utilidad en pozos con altos cortes de agua (característica muy común en Colombia).

No obstante, es un sistema de recobro que aún requiere de estudios y se encuentra en desarrollo. Sus principales limitaciones son, su bajo radio de influencia y su impacto negativo en zonas falladas. Este último factor, destaca entre los demás, teniendo en cuenta los problemas ambientales y sociales que actualmente giran en torno a la industria petrolera en el mundo.

Por otro lado, se realizó una pesquisa en las diferentes bases de datos de confianza, sobre los diferentes proyectos piloto y casos de aplicación de ondas ultrasónicas como método de recobro mejorado reportados. En la Tabla 3, se observa que la mayor parte de estos proyectos, fueron en China y Rusia, ya que han sido dos grandes potencias en el desarrollo de esta tecnología.

Tabla 3 Análisis técnico de los casos de aplicación. Elaboración propia.

Caso	Fecha	País	Campo	Referencia	Tecnología de vibración usada	Resultados	Producción pre-vibración (bbl)	Producción post-vibración (bbl)
1	1996	Rusia	Abuzy	(Nikolaevski y et al., 1996)	Vibrador sísmico de 20 toneladas	Aumento en el corte de aceite, mejora en la composición y aumento en producción de gas	16-24	25-50
2	1996	Kyrgyzstan	Changyr-Tash	(Nikolaevski y et al., 1996)	Vibrador de superficie tipo martillo	Disminución en el corte de agua, disminución en el peso molecular del crudo e incremento en la fracción de etano	18.6	26.5
3	1996	Rusia	Zhirnovskoe	(Nikolaevski y et al., 1996)	Vibrador de superficie martillo-electromagnético	Aumento en la producción de crudo y disminución del corte de agua	NR	54%

4	1997	China	Liaohe	(Zhu et al., 2005)	Dispositivo de vibración de fondo de pozo DHOS	Disminución del corte de agua y aumento en la producción de crudo	288	376
5	1999	China	Huabei	(Zhu et al., 2005)	Dispositivo de vibración de fondo de pozo DHOS	Disminución en el corte de agua y aumento en la producción de crudo	2000	2550
6	1999	China	Shengli	(Zhu et al., 2005)	Dispositivo de vibración de fondo de pozo DHOS	Reducción de la viscosidad del crudo, disminución en la densidad del crudo, decrecimiento o en la producción de arena y aumento en el factor de recobro	NR	NR
7	1992	China	Shengli	(Guo et al., 2004)	Dispositivo de Vibración ultrasónico de fondo de pozo	Mejora en la producción de crudo	55.68	79.84

8	1989	China	Daqing	(Guo et al., 2004)	Dispositivo de Vibración ultrasónico de fondo de pozo	Mejora en la producción de crudo	368	1096
9	1997-1998	China	Zhongyuan	(Guo et al., 2004)	Dispositivo de Vibración ultrasónico de fondo de pozo	Mejora en la producción de crudo	368.8	743.2
10	1998	China	Huabei	(Guo et al., 2004)	Dispositivo de Vibración ultrasónico de fondo de pozo	Disminución de la emulsificación y la viscosidad	NR	NR
11	1998	China	Jilin	(Guo et al., 2004)	Dispositivo de Vibración ultrasónico de fondo de pozo	Aumento en la producción de crudo y disminución del corte de agua	NR	3255.2
12	2015	Rusia	Samotlor	(Abramov et al., 2016)	Generador de ultrasonido de componentes magneto restrictivos de fondo de pozo	Aumento en la producción de crudo y disminución del corte de agua	32.9	63

13	2018	Malasia	Bintulu/Well X	(Study et al., 2019)	Generador de ondas ultrasónicas de fondo de pozo	Aumento de la producción de fluidos y corte de agua constante	260	338
14	2010-2013	Rusia	Western Siberia	(Beresnev & Johnson, 1994)	Generador de ondas ultrasónicas con transductores ferromagnéticos de fondo de pozo	Aumento de la producción de fluidos y merma del corte de agua	31.36	66.56
15	2010-2013	Rusia	Samara región	(Abramova et al., 2014)	Generador de ondas ultrasónicas con transductores ferromagnéticos de fondo de pozo	Aumento de la producción de fluidos y disminución del corte de agua	67.2	148.8
16	2011	Rusia	Samotlor	(Abramov et al., 2013)	Generador de ondas ultrasónicas con transductores magneto restrictivos de fondo de pozo	Aumento de producción de crudo y declinación en el corte de agua	25.36	60.96

NR = No reportado, es decir, son datos faltantes o que no fueron reportados en las fuentes consultadas.

Con base en la Tabla 4, se elaboró un estimativo de las ganancias brutas anuales de estos proyectos, discriminando entre aquella que se hubiera producido sin la aplicación de ondas y aquella que se lograría mediante la aplicación de esta tecnología. De igual manera, se calcularon las ganancias adicionales generadas, a partir de los incrementos en la tasa de aceite en cada uno de los casos.

Tabla 4 Análisis económico de los casos de aplicación. Elaboración propia.

Caso	Precio promedio anual (USD) (Brent)	Ganancias brutas anuales (USD) (sin recobro mejorado)	Ganancias brutas anuales (USD) (recobro por vibración)	Incremento en las ganancias brutas (USD)
1	20.80	151840.00	246740.00	94900.00
2	20.80	141211.20	201188.00	59976.80
3	20.80	NPC	NPC	NPC
4	19.10	2007792.00	2621284.00	613492.00
5	17.60	12848000.00	16381200.00	3533200.00
6	17.60	NPC	NPC	NPC
7	19.40	394270.08	565347.04	171076.96
8	18.20	2444624.00	7280728.00	4836104.00
9	15.95	2147061.40	4326724.60	2179663.20
10	12.80	NPC	NPC	NPC
11	12.80	NPC	15208294.40	NPC
12	52.35	628644.98	1203788.25	575143.28
13	71.06	6743594.00	8766672.20	2023078.20
14	102.73	1175917.29	2495824.45	1319907.16
15	102.73	2519822.76	5579607.54	3059784.78
16	111.27	1029959.63	2475802.01	1445842.38

NPC = No puede calcularse, debido a la falta de información en las fuentes consultadas.

En los resultados mostrados anteriormente, se observan incrementos en las ganancias brutas que van desde 1.28 veces hasta 2.98 veces del valor original de las ganancias. Es importante aclarar que, a pesar de que en algunos casos se ven mayores incrementos, las mayores ganancias se presentaron en los proyectos llevados a cabo entre los años 2011 y 2013, ya que fueron los años donde el precio medio del barril de petróleo se encontraba en su pico más alto. Este comportamiento se muestra en la Figura 15, donde la diferencia entre las barras naranjas y azules, es el incremento en las ganancias, gracias al uso de vibración por ondas ultrasónicas y donde se observa que las mayores ganancias obtenidas se dieron en el caso de la aplicación número 5.

Finalmente, es de gran interés el conocer el costo que pueden tener equipos destinados al uso de ondas de ultrasonido para el recobro mejorado, los cuales pueden llegar a oscilar entre los 90.000 y 100.000 USD en comparación al costo de equipos de inyección de polímero que pueden tener un costo de hasta 260.000 USD (Meribout, 2018). Un ejemplo de caso, en el que presentaron un costo relativamente económico en procesos de recobro mejorado de crudo, se dió en el campo de aceite pesado Gaosheng en el cual se afectaron 26 pozos en un radio de 800 metros, esto tuvo como resultado un incremental en la producción del 47,6 % y una declinación del corte de agua

del 8% en los reportes presentados en el paper “Downhole harmonic vibration oil-displacement system: A new IOR tool” por Zhu et al., 2005 se calculó que por cada 10000 Yuanes se produjo un aproximado de 120 toneladas de crudo adicional equivalente a un costo por barril incremental de crudo del 1,46 \$ USD. En comparación de casos en el que la inyección de agua esta sometida a diversos factores como son la calidad del agua requerida tanto de entrada y salida, la disponibilidad de la misma, el caudal requerido a inyectar y la presión del fluido para entrar al yacimiento. Esto conlleva a que los proyectos de inyección de agua tengan como norma que el agua de inyección no tenga un costo superior a los 0.5 USD de lo contrario se le considera un proyecto no económicamente rentable, adicional a esto, el costo operativo de los casos de inyección de polímeros se considera que no deben superar los 15 USD por barril en Colombia para considerarlo un proyecto de recobro rentable.

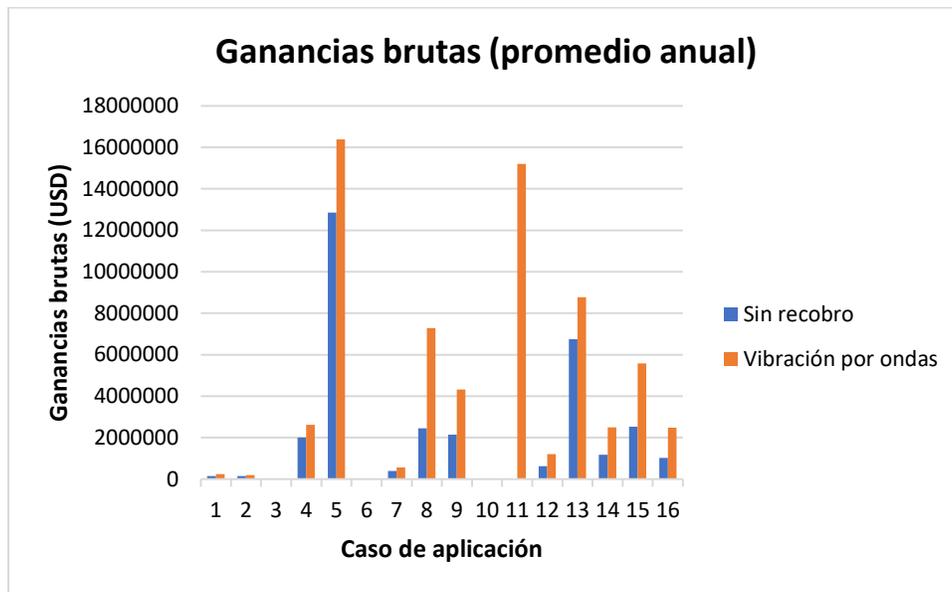


Figura 15 Ganancias brutas anuales sin/con vibración por ondas.

9. Conclusiones

- El recobro mejorado mediante el uso de ondas de alta frecuencia, es una tecnología que posee grandes ventajas operativas para su implementación en la industria.
- El recobro mejorado mediante el uso de ondas ultrasónicas, modifica las propiedades del aceite y la roca de manera beneficiosa para el recobro de hidrocarburos, viéndose alteradas algunas propiedades como: la viscosidad del crudo, la tensión interfacial, la mojabilidad, la saturación residual de aceite, la porosidad y el corte de agua.
- Las ganancias de la recuperación de crudo mediante vibración, son entre 128 % y 298 % superiores a las ganancias sin la aplicación de esta tecnología, siendo un posible método de recobro que promete grandes beneficios cuando es aplicado de manera correcta.
- Las tecnologías de recobro mejorado son amplias y versátiles, permitiendo la creación de una gran variedad de oportunidades de implementación a un costo competitivo.

10. Recomendaciones

- Analizar oportunidades de aplicación del método de recobro mediante ondas de ultrasonido en Colombia.
- Investigar campos candidatos al uso de recobro con ondas de ultrasonido en Colombia.
- Crear y/o adecuar e implementar equipos de laboratorio para el análisis del efecto de las ondas de alta frecuencia en los núcleos de laboratorio.
- La creación de simuladores para la implementación naciente de esta tecnología, representa una gran oportunidad para la industria petrolera.

11. Referencias

- Abramov, V. O., Abramova, A. V., Bayazitov, V. M., Marnosov, A. V., Kuleshov, S. P., & Gerasin, A. S. (2016). Selective ultrasonic treatment of perforation zones in horizontal oil wells for water cut reduction. *Applied Acoustics*, *103*, 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.06.017>
- Abramov, V. O., Mullakaev, M. S., Abramova, A. V., Esipov, I. B., & Mason, T. J. (2013). Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation. *Ultrasonics Sonochemistry*, *20*(5), 1289–1295. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.03.004>
- Abramova, A., Abramov, V., Bayazitov, V., Gerasin, A., & Pashin, D. (2014). Ultrasonic Technology for Enhanced Oil Recovery. *Engineering*, *06*(04), 177–184. <https://doi.org/10.4236/eng.2014.64021>
- Apasov, G. T., Apasov, T. K., Saltikov, Y., Apasov, R. T., & Abramova, A. (2012). The factors affecting the efficiency of the effect of ultrasound on the near-wellbore area of formations in the Samotlor oil field. *Sci. FEC*, *6*, 53–56.
- Ariadji, T. (2005). Effect of vibration on rock and fluid properties: On seeking the vibroseismic technology mechanisms. *2005 SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition - Proceedings*, 161–168. <https://doi.org/10.2118/93112-ms>
- Barabanov, V. L., Grinevskiy, A. O., Kissin, I. G., & Nikolayev, A. V. (1987). *Some effects of imposed seismic vibrations on a water-saturated medium. Comparison with effects of distant earthquakes*. 297, 1–4.
- Beresnev, I. A., & Johnson, P. A. (1994). Elastic-wave stimulation of oil production: a review of methods and results. *Geophysics*, *59*(6), 1000–1017. <https://doi.org/10.1190/1.1443645>
- Calderón Hernández, S. (2006). Evaluación de los trabajos de estimulación ultrasónica desarrollados en los campos petroleros de Tello y San Francisco. In *Fundación Universidad de América*.
- Clark, A. E. (1980). Ferromagnetic Materials vol1. In North-Holland (Ed.), *Ferromagnetic Materials vol1* (North-Holl, p. 531). North-Holland.
- Cupich, M. C., & Elizondo, F. J. (2000). Actuadores Piezoeléctricos. *Ingenierías, volumen II*(6), 22–28. http://www.ingenierias.uanl.mx/6/pdf/6_Miguel_Cupich_et_al_actuadores_Piezo.pdf
- danieltubau. (2019). *ONDAS Y PARTÍCULAS: Ondas*. El Experimento de La Doble Rendija. <https://wordpress.danieltubau.com/ondas-h4el-experimento-de-la-doble/>
- Duarte Medina, I. L. (2009). *Evaluación de la tecnología de ultrasonido como método de estimulación para pozos con daño de formación*. Fundación Universidad de América.
- Edwin Caicedo Garzón. (2007). *Evaluación y Selección de Pozos candidatos para la aplicación de la tecnología de estimulación mediante ondas de ultrasonido en los campos operados por BP Exploration Company (Colombia) LTD*. Universidad Surcolombiana.
- Guo, X., Du, Z., Li, G., Oilfield, S., & Shu, Z. (2004). High frequency vibration recovery enhancement technology in the heavy oil fields of China. *SPE International Thermal Operations and Heavy Oil*

- Symposium Proceedings*, 361–378. <https://doi.org/10.2523/86956-ms>
- Hou, Y., Zhou, R., Long, X., Liu, P., & Fu, Y. (2015). The design and simulation of new downhole vibration device about acoustic oil recovery technology. *Petroleum*, 1(3), 257–263. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2015.09.001>
- Liu, Y.-J., Qu, J.-P., & Cao, X.-W. (2004). Calculation of apparent viscosity of polymer melt under vibration force field. *Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University*, 38, 1003–1006.
- Malagón, J., Montoya, G., & Ruiz, C. (2016). La competitividad del sector de hidrocarburos en las diferentes regiones de Colombia. *Cuadernos Programa de Las Naciones Unidas Para El Desarrollo (PNUD)*, 1–82. <https://bit.ly/32MT0gQ>
- Martín Bragado, I. (2018). *Física General v.1.1*. 1–199.
- Maya, G., Castro, R., Lobo, A., Ordóñez, A., Sandoval, J., Mercado, D., Trujillo, M., Soto, C., & Pérez, H. (2010). Estatus de la Recuperación Mejorada de Petróleo. *The Science of Enhanced Oil Recovery.Tiorco, Vmm*, 1–4.
- Meribout, M. (2018). On Using Ultrasonic-assisted Enhanced Oil Recovery (EOR): Recent Practical Achievements and Future Prospects. *IEEE Access*, 6(August), 51110–51118. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2859774>
- Montes, D., Cortés, F. B., & Franco, C. A. (2018). Reduction of heavy oil viscosity through ultrasound cavitation assisted by NiO nanocrystals-functionalized SiO₂ nanoparticles TT - Reducción de la viscosidad de crudos pesados mediante cavitación por ultrasonido asistida por nanopartículas de SiO₂ funcio. *Dyna*, 85(207), 153–160. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532018000400153&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v85n207/0012-7353-dyna-85-207-153.pdf
- Mullakaev, M. S., Abramov, V. O., & Abramova, A. V. (2015). Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 125, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.10.024>
- Nikolaevskiy, V. N., Lopukhov, G. P., Liao, Y., & Economides, M. J. (1996). Residual oil reservoir recovery with seismic vibrations. *SPE Production and Facilities*, 11(2), 89–94. <https://doi.org/10.2118/29155-PA>
- Olaya-Escobar, D. R., Quintana-Jiménez, L. A., González-Jiménez, E. E., & Olaya-Escobar, E. S. (2020). Ultrasound Applied in the Reduction of Viscosity of Heavy Crude Oil. *Revista Facultad de Ingenieria*, 29(54). <https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.11528>
- Paris de Ferrer, M. (2009). *Fundamentos de Ingenieria de Yacimientos Magdalena* (p. 588).
- Parker, G. G., & Stringfield, V. T. (1950). Effects of earthquakes, tides, winds, and atmospheric pressure changes on water in the geologic formations of southern Florida. *Economic Geology*, 45(5), 441–460. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.45.5.441>

- Plata Rangel, L. C. (2013). *Evaluación de la implementación de la tecnología hydro-acoustic tool (HAT) en dos pozos del Campo Llanito de la cuenca del valle medio del Magdalena* [Fundación Universidad de América]. [https://biblos.uamerica.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=171870&query_desc=kw%2Cwrd1%3A ultrasonido petroleo](https://biblos.uamerica.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=171870&query_desc=kw%2Cwrd1%3A+ultrasonido+petroleo)
- Ragab, A. M. S., & Snosy, M. F. (2015). The effect of ultrasonic waves of EOR on the relative permeability curves. *Society of Petroleum Engineers - SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference*. <https://doi.org/10.2118/175410-ms>
- Schlumberger. (n.d.). *Schlumberger Oilfield Glossary*. https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/s/secondary_recovery.aspx
- Shafiai, S. H., & Gohari, A. (2020). Conventional and electrical EOR review: the development trend of ultrasonic application in EOR. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, *10*(7), 2923–2945. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00929-x>
- Study, C., Doors, T. O., Methods, S., Li, C., Chang, S., Carigali, P., Bhd, S., Spenger, O., Ag, R. U., & Amran, A. (2019). *First Application of Ultrasonic Technology in South East Asia : Breakthrough*.
- Westermarck, R. V., Brett, J. F., & Maloney, D. R. (2001). Enhanced Oil Recovery with Downhole Vibration Stimulation. *Proceedings - SPE Production Operations Symposium*, 555–567. <https://doi.org/10.2523/67303-ms>
- Zhu, T., Xutao, H., & Vajjha, P. (2005). Downhole harmonic vibration oil-displacement system: A new IOR tool. *SPE Western Regional Meeting, Proceedings*, 571–575.