

**ESTUDIO DE TÉCNICA NO INTRUSIVA PARA
ASEGURAMIENTO DE FLUJO**

**GLORIA ESPERANZA QUINTERO BALLESTEROS
CATALINA MEDRANO BARCO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2015

**ESTUDIO DE TÉCNICA NO INTRUSIVA PARA
ASEGURAMIENTO DE FLUJO**

**GLORIA ESPERANZA QUINTERO BALLESTEROS
CATALINA MEDRANO BARCO**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniera de Petróleos**

**Director
JULIO CESAR PÉREZ ANGULO
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A ti Dios padre celestial, glorias y alabanzas, gracias porque eres un Dios de amor que me ha acompañado en cada instante de mi vida. Gracias por permitirme llegar a este momento de tu mano y de la mano de todos los ángeles que has colocado en mi vida, No permitas que me aleje de ti, y guíame para imitar tus ejemplos y ser digna de llamarme hija tuya.

A todos aquellos que partieron de este mundo y fueron importantes en este proceso, Los llevo en mi corazón infinitas Gracias y Dios los tenga en su reino.

A mi ángel en la tierra y mejor amiga, Marina Ballesteros Cáceres, mi compañera de vida y mayor motivación, gracias por tu apoyo incondicional, gracias por ser la luchadora que eres, gracias por tu fortaleza ante la adversidad, y por enseñarme que todo se lo debemos a Dios. Gracias Mamita por ser el milagro de Dios en nuestras vidas.

A mi padre Fidelino Quintero Sánchez por apoyarme en mi sueño y enseñarme que no hay obstáculo que de la mano de Dios no se pueda vencer, y que toda meta comienza con un "sólo por hoy" gracias papi, este también es tu triunfo.

A mis hermanos Jhon y Helberh Gracias por su cariño, por su apoyo, por comprenderme y aceptarme tal cual como soy, porque son excelentes hermanos. Gracias porque Uds. han sido mi inspiración en los momentos de dificultad.

A mis abuelos Luis y Leonila, a mis tías Silvia, Cecilia, y Ana, y mis tíos Pedro, Juan Luis, Ramón y José y a todos mis primos. Todos ustedes han sido mi familia en todo momento y me han apoyado de la mejor forma en que han podido.

A Mariste el ángel que Dios ha colocado en mi familia para enseñarme que el tiempo de Dios es perfecto. Infinitas Gracias y Bendiciones sobre tu vida. Pido a Dios que me permita seguir tu ejemplo y recompensar cada uno de tus esfuerzos.

A cada uno de mis Profesores y formadores que han dejado grandes enseñanzas en mi vida GRACIAS, son ustedes el pilar de mi formación.

A mis colegas, amigos y compañeros Sabina, Catalina, Diego, Adriana, Francy, Nicolás, Parodi, Albeiro, Laura, y Carito Con quienes compartí momentos de alegría y tristeza en esta etapa de mi vida y a quienes considero mis hermanos de la vida. Gracias porque me animaron cuando sentí decaer. Gracias y les auguro una vida exitosa y llena de amor. Pido a Dios bendiciones sobre cada uno de ustedes y espero que sigamos siendo amigos para siempre.

A todos y cada uno de quienes de una u otra forma han sido parte de este proceso Gracias. Estaré agradecida Siempre con ustedes y pediré a Dios Bendiciones sobre sus vidas.

Finalmente y no menos importante a Sergio Díaz Padilla por su apoyo, comprensión, ayuda y amor. Gracias Amor, Dios te coloco en mi vida para enseñarme que el verdadero amor es incondicional y tú lo has sido conmigo. Este triunfo es también tuyo y Dios permita que sea el primero de nuestros triunfos. Sergio siempre te desearé una vida llena de éxitos, porque te lo mereces por ser la persona tan maravillosa que eres. Dios te bendiga siempre.

Gloria Esperanza Quintero Ballesteros

DEDICATORIA

A Dios, porque lo que soy y lo que anhelo ser, lo debo todo a él.

*A mi papí Armando y mi mami Nasly por su amor, ejemplo,
esfuerzo y motivación, este logro es para ustedes.*

*A Claud mi amor, por estar siempre a mi lado y creer en mí aun
cuando yo misma no lo hice, este triunfo también es tuyo.*

*A mis familiares y amigos quienes en algún momento de este camino
me brindaron apoyo y motivación, hoy comparto con ustedes esta
gran alegría de terminar una etapa tan importante para mí.*

Catalina M. B.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por estar presente en nuestras vidas, por guiarnos en todo momento, por colocarnos en los lugares y con las personas adecuadas y por darnos la oportunidad de crecer como personas y como profesionales.

A la Universidad Industrial de Santander, la escuela de Ingeniería de Petróleos y todos los profesores que hicieron parte de nuestra formación. En especial aquellos que dejaron huellas en nuestra vida y con su ejemplo y dedicación nos enseñaron que primero y ante todo se debe ser persona.

Al ingeniero Julio Pérez por ser nuestro director, por su orientación, dedicación y paciencia.

Al Ingeniero Werney Machuca por el tiempo que nos dedicó para brindarnos su colaboración, paciencia y motivación hacia nosotras, gracias ingeniero por creer en nosotras.

A nuestros compañeros con quienes comenzamos este sueño de convertirnos en ingenieros de petróleo, por todos los momentos compartidos en clases, por los momentos vividos antes, durante y después de los parciales, porque con su compañía el camino para llegar a la meta fue más agradable y lleno de anécdotas, a todos GRACIAS.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. CONCEPTOS PRELIMINARES	19
1.1 DAÑO DE FORMACIÓN	19
1.1.2 ORIGEN DEL DAÑO DE FORMACIÓN.....	19
1.1.3 MECANISMOS DE DAÑO DE FORMACIÓN	21
1.2 ESCAMAS	24
1.2.1 ORIGEN DE LAS ESCAMAS.....	24
1.2.2 FACTORES QUE CONTRIBUYEN EN LA FORMACIÓN DE ESCAMAS	25
1.2.3 TIPOS DE ESCAMAS.....	26
1.2.4 PROBLEMAS QUE OCASIONAN LAS ESCAMAS	28
1.3 ESTIMULACIÓN CONVENCIONAL DE POZO	29
1.3.1 ESTIMULACIÓN MATRICIAL	29
1.3.2 ESTIMULACIÓN POR FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO.....	30
2. ONDAS ULTRASÓNICAS COMO TÉCNICA DE ESTIMULACIÓN NO INTRUSIVA	32
2.1 ONDAS ULTRASÓNICAS	32
2.1.1 GENERACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS	36
2.1.2 EFECTO DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS EN LÍQUIDOS	38
2.1.3 COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS EN SÓLIDOS	42
2.1.4 COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS EN SUPERFICIES LÍMITES.....	43
2.2 DESARROLLO HISTÓRICO DEL ULTRASONIDO COMO TÉCNICA DE ESTIMULACIÓN DE POZO	47
3. COMPARACIÓN ENTRE LA ESTIMULACIÓN CON ULTRASONIDO Y LOS MÉTODOS DE ESTIMULACIÓN CONVENCIONAL	53

3.1 ULTRASONIDO Y LA ESTIMULACIÓN ACIDA	54
3.2 ULTRASONIDO Y EL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO.....	58
4. CASOS ESTUDIO DEL ULTRASONIDO COMO TÉCNICA DE ESTIMULACIÓN PARA ELIMINACIÓN DE ESCAMAS	63
4.1 CASO 1: REMOCIÓN DE ESCAMAS DE SULFATO DE CALCIO: YESO	63
4.2 CASO 2: REMOCIÓN DE ESCAMAS DE CARBONATO DE CALCIO	69
4.3 OBSERVACIONES GENERALES	72
5. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA DE LA ESTIMULACIÓN CON ULTRASONIDO PARA REMOCIÓN DE ESCAMAS: RESULTADOS CASOS ESTUDIO	81
5.1 LA POTENCIA EN LA REMOCIÓN DE ESCAMAS DE SULFATO Y CARBONATO DE CALCIO POR MEDIO DEL ULTRASONIDO	81
5.2 EL TIEMPO EN LA REMOCIÓN DE ESCAMAS DE SULFATO Y CARBONATO DE CALCIO POR MEDIO DEL ULTRASONIDO	83
6. METODOLOGÍA PARA LA REALIZACION DE TRABAJOS DE ESTIMULACIÓN CON ULTRASONIDO	85
6.1 SELECCIÓN DEL POZO CANDIDATO	86
6.2 DISEÑO DEL PROGRAMA.....	90
6.3 EJECUCIÓN DEL PROGRAMA.....	90
6.4 EVALUACIÓN DE LA ESTIMULACIÓN	90
7. CONCLUSIONES	91
8. RECOMENDACIONES.....	92
BIBLIOGRAFÍA	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Partes de una onda.	34
Figura 2. Generación de ondas ultrasónicas.	36
Figura 3. Átomos de silicio con carga positiva y oxígeno con carga negativa en un cristal de cuarzo.	37
Figura 4. Moléculas en material oscilando en la misma dirección que la onda formando zonas de compresión y rarefacción.	38
Figura 5. Colapso de una burbuja cerca de una pared.	40
Figura 6. Comportamiento de las ondas ultrasónicas en incidencia perpendicular.	44
Figura 7. Reflexión y refracción de una onda con incidencia oblicua en la entrecara plana que separa dos medios.	46
Figura 8. Reflexión y refracción de una onda incidente oblicua sobre una superficie límite entre dos cuerpos sólidos.	47
Figura 9. Transductor con enfriador de agua y sonotrodo	64
Figura 10. Equipos de ultrasonido para los experimentos con flujo	65
Figura 11. Sistema de simulación de extracción dinámica de flujo con ultrasonido	69
Figura 12. Muestra V38 antes y después del tratamiento con ultrasonido.	73
Figura 13. Muestra V57 antes y después del tratamiento con ultrasonido.	74
Figura 14. La potencia y la eliminación de escamas.	82
Figura 15. El tiempo y la eliminación de escamas.	83
Figura 16. Metodología para la realización de trabajos de estimulación con ultrasonido	85
Figura 17. Diagrama de toma de decisión para la realización de trabajos de estimulación con ultrasonido.	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación del ultrasonido como técnica de estimulación y las estimulaciones convencionales.....	62
Tabla 2. Parámetros de diseño experimental sin flujo	66
Tabla 3. Parámetros de diseño experimental con flujo	67
Tabla 4. Resultados de la prueba de eliminación de escamas de sulfato de calcio en tubería utilizando el ultrasonido	68
Tabla 5. Parámetros de los transductores ultrasónicos utilizados en las pruebas.	70
Tabla 6. Resultados de la prueba de eliminación de escamas de carbonato de calcio en núcleos utilizando el ultrasónico	71
Tabla 7. Análisis de los resultados obtenidos de la prueba de eliminación de escamas de sulfato de calcio en tubería utilizando el ultrasonido.....	74
Tabla 8. Análisis Financiero para la realización de un trabajo de estimulación con ultrasonido.	89

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Producción de crudo antes y después de la estimulación acida en el pozo 30L ubicado en Nigeria.	55
Grafica 2. Producción de crudo antes y después de la estimulación con ultrasonido en el campo Samotlor ubicado en Rusia.	56
Grafica 3. Producción de crudo antes y después de la estimulación con ultrasonido en el campo Samotlor ubicado en Rusia.	57
Grafica 4. Producción de crudo antes y después del fracturamiento hidráulico en el pozo LF-1010 del campo Los Flamings ubicado en Argentina.	59
Grafica 5. Amplitud y Limpieza de escamas de sulfato de calcio.....	75
Grafica 6. Potencia y Limpieza de escamas de sulfato de calcio.....	76
Grafica 7. Temperatura y Limpieza de escamas de sulfato de calcio.	76
Grafica 8. Flujo y Limpieza de escamas de sulfato de calcio.....	77
Grafica 9. Permeabilidad y Limpieza de escamas de carbonato de calcio.	78
Grafica 10. Tiempo y Limpieza de escamas de carbonato de calcio con el transductor N°2.....	78
Grafica 11. Potencia y Limpieza de escamas de carbonato de calcio	79
Grafica 12. Frecuencia y Limpieza de escamas de carbonato de calcio	80

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE TÉCNICA NO INTRUSIVA PARA ASEGURAMIENTO DE FLUJO*

AUTORES: GLORIA ESPERANZA QUINTERO BALLESTEROS
CATALINA MEDRANO BARCO**

PALABRAS CLAVES: Daño de formación, estimulación con ultrasonido, ondas ultrasónicas, estimulación acida, fracturamiento hidráulico.

DESCRIPCION:

En este trabajo de investigación se desarrolló un estudio de las ondas de ultrasonido como técnica de estimulación no intrusiva al yacimiento y en el cual se determina los parámetros que influyen en la eficiencia de esta tecnología en cuanto a la remoción de escamas. Para tal fin se presenta inicialmente los conceptos preliminares sobre daño a la formación y los métodos de estimulación convencionales para hacer claridad en los términos que se tratan en el desarrollo de los siguientes capítulos; a continuación se hace énfasis en las ondas ultrasónicas dando claridad a su forma de generación y propagación, así como el efecto que las mismas generan sobre los líquidos y el desarrollo histórico como técnica de estimulación.

Así mismo se comparan las técnicas de estimulación convencional con el ultrasonido teniendo en cuenta criterios como medio ambiente, costo-beneficio y tasas de producción, esto con la finalidad de responder a las necesidades hoy en día de la industria de los hidrocarburos; seguidamente se presentan dos casos estudio del ultrasonido como técnica de estimulación y sus resultados en pruebas de laboratorio, así como el análisis planteado de los mismos.

A continuación se presentan los resultados de este trabajo de investigación, analizando los dos parámetros: potencia y tiempo, seleccionados como los que más influyen en la eficiencia en la eliminación de escamas por medio del ultrasonido; finalmente se propone una metodología para la realización de trabajos de estimulación con ultrasonido teniendo en cuenta la comparación realizada con las técnicas convencionales de estimulación y los parámetros determinados.

* Trabajo de Grado

** Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: M.Sc. Julio Cesar Pérez Angulo.

ABSTRACT

TITLE: TECHNIQUE STUDY NON-INTRUSIVE FOR FLOW ASSURANCE*

AUTHOR: GLORIA ESPERANZA QUINTERO BALLESTEROS
CATALINA MEDRANO BARCO**

KEY WORDS: Formation damage, ultrasound stimulation, ultrasonic waves, acid stimulation, hydraulic fracturing.

DESCRIPTION:

This work of investigation presents a study of ultrasound waves as stimulation technique non-intrusive to the reservoir where the parameters that influence the efficiency of this technology as to the removal of scales are determined. For this purpose initially presents the preliminary concepts of formation damage and conventional stimulation methods for clarity in the terms discussed in the development of the following chapters; then ultrasonic waves emphasis on giving clarity to their way of generation and propagation, and the impact they generate on liquids and historical development as stimulation technique is done.

After stimulation techniques and conventional ultrasound they are compared taking into consideration criteria such as environment, cost-benefit and rates production, this in order to respond to today's needs of oil and gas industry; then two cases ultrasound study as stimulation technique and results of laboratory tests and analysis proposed of them are presented.

The results of this work of investigation are presented by analyzing the two parameters: power and time, selected as the greatest influence on efficiency in removing scales by means of ultrasound; finally a methodology for the realization of ultrasound stimulation jobs taking into account the comparison with the conventional techniques and selected stimulation parameters are proposed.

* Project Grade

** Industrial University of Santander, Physicochemical Engineering Faculty, Petroleum Engineering School. Director: M.Sc. Julio Cesar Pérez Angulo.

INTRODUCCIÓN

La estimulación de pozo es una de las actividades más importantes en el mantenimiento de la producción de los pozos petroleros y en algunos casos utilizada para incrementar la producción de hidrocarburos; es el proceso mediante el cual se libera o limpia el medio poroso en la cara del pozo de lodo o algún material que este obstaculizando el paso del fluido de la formación productora al pozo.

La estimulación involucra en su gran mayoría tratamientos químicos y/o orgánicos, los cuales tienen gran costo y pueden llegar a ser altamente contaminantes afectando no solo al yacimiento sobre el cual se utiliza sino a su entorno.

El reto que nos plantea actualmente la industria petrolera en cuanto a la estimulación de pozo, es encontrar nuevas técnicas que logren mantener y/o aumentar el flujo del fluido evitando al máximo daños en el medio ambiente, además de obtener los mejores resultados en cuanto a la calidad y producción de hidrocarburos.

Se han realizado estudios a nivel mundial para encontrar nuevos procedimientos de estimulación que cumplan con las expectativas de la industria petrolera y que brinden la seguridad en el manejo ambiental dando las mismas o mejores respuestas en cuanto a producción que dan las técnicas de estimulación actual; dichos estudios se basan en el principio físico de tecnologías aplicadas en otras áreas y que han dado excelentes resultados en pruebas de laboratorio.

Este trabajo de grado investigo parte de la literatura internacional, los resultados de pruebas de laboratorio y/o piloto en las cuales se usaron las ondas de

ultrasonido como técnica de estimulación de pozo para la eliminación de escamas y/o aseguramiento y mantenimiento de flujo.

En el primer capítulo inicialmente se encuentran los conceptos preliminares de daño a la formación, su origen y los mecanismos del daño a la formación. Posteriormente en el apartado 1.2 se profundiza en las escamas, los factores que contribuyen a la formación de ellas, los tipos de escamas más comunes y los problemas que ellas pueden ocasionar, finalmente en este primer capítulo se hace una introducción a las estimulaciones convencionales de pozos. El segundo capítulo está dedicado a las ondas ultrasónicas, ya que ellas y su efecto en la eliminación de escamas son el principal motivo de esta investigación se profundizan aspectos como como la generación de ellas, el efecto que pueden causar en líquidos, el comportamiento en presencia de sólidos y en superficies límites, finalmente en este capítulo se tiene en cuenta el desarrollo histórico del ultrasonido como técnica de estimulación de pozos. En el capítulo 3 se hace una comparación entre la estimulación con ultrasonido y los métodos de estimulación convencional, dicha comparación se realizó en base a la literatura consultada y referenciada en bibliografía. El capítulo 4 está enfocado en el análisis de dos casos estudio en los cuales se realizaron remoción de escamas por la técnica de ultrasonido, el primer caso para remoción de escamas de sulfato de calcio que fue realizado en laboratorio por los autores del artículo citado en el presente trabajo, en él se describe como se realizó el montaje, aplicación de la prueba y resultados obtenidos en dichas pruebas de laboratorio, el segundo caso de investigación es para remoción de escamas de carbonato de calcio y a diferencia del primer caso, este se realizó en una prueba piloto en China, se detallan los parámetros y resultados obtenidos y las observaciones a las que se llega en cada estudio. En el quinto capítulo se encuentran los parámetros que más influyeron en la eliminación de las escamas en base a los dos casos estudiados. Finalmente en el último capítulo se encontrara las conclusiones y recomendaciones a las que llega este trabajo.

1. CONCEPTOS PRELIMINARES

La estimulación de pozo es uno de los procesos primordiales y más utilizados a nivel mundial en la industria petrolera; el propósito principal de esta técnica es remover el daño de formación en la zona cercana al pozo y así facilitar el flujo de los fluidos, del yacimiento al pozo, para aumentar la producción. Este capítulo describe las técnicas convencionales de estimulación de pozo y para tener una real comprensión de estas, se presenta inicialmente los conceptos fundamentales sobre el daño de formación, explicando en detalle las escamas, ya que la remoción de estas es el tema principal de la investigación.

1.1 DAÑO DE FORMACIÓN

Es aquel que causa una reducción en la permeabilidad original de la formación, influyendo significativamente en la disminución de la producción del pozo, así como una caída de presión adicional en la cara del pozo. El daño de formación se presenta cuando existe un taponamiento de los canales de flujo en la región de la matriz de la roca alrededor del pozo; esta obstrucción se puede deber a factores tales como invasión de fluidos, incompatibilidad entre fluidos, migración de finos, depósitos orgánicos e inorgánicos, entre otros.

1.1.2 ORIGEN DEL DAÑO DE FORMACIÓN

Este se puede presentar en cualquier etapa del desarrollo del pozo, durante los trabajos de perforación, cementación, completamiento, procesos de recuperación secundaria, de recobro mejorado, y por el simple hecho de producir el pozo.¹

¹ QUINTANA, JAVIER. "Evaluación de Trabajos de Estimulación Orgánica En Pozos del Campo Yariguí - Cantagallo" Bucaramanga, 2008., p. 14 – 18. Trabajo de Grado (Ingeniero de Petróleos) Universidad Industrial de Santander.

- ✓ **Etapa de Perforación:** El daño debido al filtrado del lodo de perforación, puede ser una de las causas más importantes en el deterioro de la producción; este puede reaccionar con los minerales de la formación, agua de producción y arcillas presentes, llegando a taponar el sistema poral del yacimiento en la cara del pozo. Los sólidos del lodo de perforación también pueden provocar una reducción en la permeabilidad alrededor del pozo.

- ✓ **Etapa de Cementación:** La lechada de cemento puede reaccionar con el agua de formación y arcillas presentes, para formar precipitados que dañan la permeabilidad en la cara del pozo.

- ✓ **Etapa de Completamiento:** Las salmueras utilizadas para el control del pozo pueden penetrar en el yacimiento, reaccionar con el agua de formación y taponar los canales de flujo en la cercanía al pozo; igualmente algunos fluidos de estimulación pueden reaccionar con los minerales de la formación induciendo precipitaciones.

- ✓ **Etapa de Recuperación Secundaria:** El agua inyectada puede presentar incompatibilidad con el agua de formación y precipitar incrustaciones, así como hinchamiento y dispersión de las arcillas ocasionando el taponamiento del sistema poral del yacimiento. Cuando se inyecta gas se pueden arrastrar residuos de lubricantes y productos de la corrosión que pueden taponar los canales de flujo en la cara del pozo.

- ✓ **Etapa de Recuperación Mejorado (EOR):** La inyección de polímeros pueden reaccionar con los minerales de la formación ocasionando daño a la formación. La inyección de alcalinos puede disolver y dispersar las arcillas, así cómo reaccionar con los iones del agua de formación y formar precipitados que taponen el sistema de poros. La inyección de vapor puede

disolver algunos minerales presentes en el yacimiento dañando su permeabilidad.

- ✓ ***Etapas de Producción:*** Durante la producción de un pozo se puede precipitar material inorgánico y presentarse migración de finos lo cual originaría un taponamiento en los canales de flujo alrededor del pozo. En yacimientos de gas retrogrado, la condensación de líquido hidrocarburo en la cara del pozo reduce significativamente la producción de gas. En los yacimientos de petróleo producidos por debajo de la presión del punto de burbuja, se forma gas libre, ocupando espacio poroso en la cercanía al pozo y reduciendo la producción de crudo.

1.1.3 MECANISMOS DE DAÑO DE FORMACIÓN

El daño de formación se clasifica según su mecanismo de creación, inducido o natural. El daño de formación inducido es aquel que se forma en cualquiera de las etapas de desarrollo del pozo anteriormente mencionadas, con excepción de la etapa de producción, ya que durante esta etapa se presenta el daño de formación natural.²

Entre los mecanismos de daño de formación inducido se encuentran:

- ✓ ***Taponamiento con partículas inducidas:*** Adicional a las partículas que pueden migrar naturalmente junto con el fluido producido, muchas partículas diferentes pueden ser introducidas a la formación durante las operaciones de pozo y estar compuestas de una gran gama de materiales. El material particulado en los fluidos de perforación puede ser arcilla, recortes de perforación, agentes densificantes y material de control de

² BONILLA, FABIAN. "Desarrollo y Evaluación de Programa de Estimulación a Partir de Análisis de Daño a la Formación para el Campo Guando". Bucaramanga, 2011., p. 46 – 63. Trabajo de Grado (Ingeniero de Petróleos) Universidad Industrial de Santander.

filtrado. Los fluidos de completamiento y workover también pueden contener sólidos en suspensión incluyendo bacterias y residuos de polímeros. En los fluidos de estimulación, la presencia de material particulado puede ocurrir debido a una mala calidad del agua y de los revestimientos de tanques de almacenamiento, residuos en tanques de almacenamiento, y escombros en tuberías; los tratamientos ácidos también pueden causar daño de formación debido a la precipitación de los productos secundarios de la reacción de ácidos, los productos precipitados incluyen hidróxido de hierro, fluoruro de calcio, fluorosilicato de potasio y sílice.

- ✓ **Alteración en la Mojabilidad:** El taponamiento de la formación puede ser causado por el líquido o el gas cambiando la permeabilidad relativa de la roca del yacimiento. Este mecanismo de daño está asociado principalmente a los lodos de perforación base aceite, en los cuales los surfactantes pueden llegar a causar estos cambios en la mojabilidad de la formación.

- ✓ **Bacterias:** Las bacterias pueden ser un serio problema en las operaciones de producción debido a lo que consumen y los productos de su metabolismo. Las bacterias más problemáticas en los campos petroleros son las sulfato-reductoras, formadores de limo, bacterias oxidantes de hierro y bacterias que atacan a los polímeros en los fluidos de fracturamiento y los fluidos de recuperación secundaria.

- ✓ **Bloqueos por Agua:** Este es un caso especial de los problemas de permeabilidad relativa. El agua puede causar bloqueo en rocas de baja permeabilidad, ocupando los espacios de flujo (ya sean poros o fracturas naturales) que se utilizan principalmente para que los hidrocarburos fluyan hacia el pozo. Debido a diferencias de movilidad y viscosidad, los hidrocarburos pueden no ser capaces de desplazar el agua.

Entre los mecanismos de daño de formación natural se encuentran:

- ✓ **Migración de Finos:** Las partículas pueden migrar junto con el fluido producido a través de las gargantas de poro en la región cercana a la cara del pozo; cuando estas partículas resultan de la roca del yacimiento se denominan normalmente como finos. La migración de finos puede ser de una gran variedad de materiales como arcillas (Filosilicatos con un tamaño típico de menos de 4 mm) y limos (Silicatos o aluminosilicatos con tamaños que van desde 4 hasta 64 mm). Se cree que los minerales del grupo Caolinita e Illita son las arcillas migratorias más comunes. El daño causado por la migración de finos se encuentra por lo general en un radio de 3 a 5 pies.

- ✓ **Hinchamiento de Arcillas:** Las arcillas pueden cambiar su volumen a medida de que la salinidad del fluido que fluye a través de la formación cambia. La alteración de la arcilla puede producir cambios en la permeabilidad de la formación debido a la disposición, estado químico y ubicación de la arcilla respecto a los fluidos en movimiento. Las arcillas que comúnmente se hinchan en el medio poroso son la esmectita y mezclas de esmectita; si estas arcillas ocupan los poros más grandes y en especial las gargantas de poro, son capaces de crear una barrera casi impermeable debido a que toman agua en su estructura aumentando su volumen hasta un 600%.

- ✓ **Depósito de Orgánicos:** Los depósitos orgánicos son hidrocarburos pesados (parafinas o asfáltenos) que se precipitan principalmente por reducciones de presión y temperatura. Este mecanismo de daño se localiza generalmente en la tubería de producción, en las perforaciones, en las fracturas si existen o en su defecto en la formación.

- ✓ **Emulsiones:** Las emulsiones son combinaciones de dos o más líquidos inmiscibles (incluyendo gas) que no se dispersan molecularmente entre sí. La mayoría de las emulsiones encontradas en campo se producen por la adición de energía.

- ✓ **Escamas:** Las escamas comúnmente son precipitados formados a partir de mezclas de fluidos incompatibles o debido a cambios en las condiciones de los fluidos de producción, estos cambios en las condiciones pueden ser por la caída de presión, temperatura, gases disueltos, viscosidad de flujo, y en general cualquier cosa que trastorne el equilibrio de la solución. Las escamas más comunes son el carbonato de calcio, sulfato de calcio y sulfato de bario, se realizara una descripción detallada de cada una de ellas en el siguiente numeral.

1.2 ESCAMAS

La formación y deposición de escamas es un problema común en los campos petroleros que genera grandes pérdidas económicas, debido a la disminución significativa en la producción de hidrocarburos y los altos costos para su tratamiento. Las escamas son depósitos cristalinos inorgánicos que se forman como resultado de los cambios en las propiedades fisicoquímicas de los fluidos durante la producción o la incompatibilidad química entre fluidos durante las operaciones de desarrollo del pozo.

1.2.1 ORIGEN DE LAS ESCAMAS

El agua asociada al petróleo tiene iones disueltos los cuales al sobrepasar el límite de solubilidad, debido a un desequilibrio en el estado natural del agua, se pueden unir y precipitar formando cristales; estos cristales tenderán a atraerse y unirse

entre ellos para formar estructuras más grandes hasta llegar a crear incrustaciones o escamas que se adhieren a la estructura que las contiene.

Se conocen tres mecanismos principales por los cuales se forman las escamas:³

- 1) La disminución de la presión y/o el aumento de la temperatura de la salmuera durante el proceso de desarrollo del pozo, lleva a una reducción en la solubilidad de la sal, generando comúnmente precipitación de escamas de carbonato.
- 2) La mezcla de fluidos incompatibles, generalmente con agua de formación rico en cationes de bario, calcio y/o estroncio, agua de mar rica en sulfato, forman comúnmente precipitación de escamas de sulfato; Otras mezclas incompatibles generan escamas de sulfato cuando el gas de sulfuro de hidrogeno se mezcla con agua de formación rica en hierro, zinc o plomo.
- 3) La evaporación de la salmuera, genera el aumento de la concentración de sal por encima del límite de solubilidad y ocasiona la precipitación de escamas, como puede ocurrir en los pozos de gas en los cuales el flujo de gas seco se puede mezclar con la baja tasa de la salmuera, resultando en la deshidratación y comúnmente en la precipitación de NaCl.

1.2.2 FACTORES QUE CONTRIBUYEN EN LA FORMACIÓN DE ESCAMAS

Los factores que influyen en la deposición y crecimiento del cristal para finalmente formar la precipitación de escamas son principalmente:⁴

³ BIN, AMER. "The study of scale formation in oil reservoir during water injection at high-barium and high-salinity formation water". Malasia, 2007., p. 18 – 19. Trabajo de Grado (Master of Engineering) Universiti Teknologi Malaysia.

⁴ CASTRO, HENRY y GAMEZ, CHRISTIAN. "Evaluación de la Depositación de Incrustaciones en Sistemas de Bombeo Electrosumergible del Campo Cantagallo". Bucaramanga, 2009. p. 26 – 27. Trabajo de Grado (Ingeniero de Petróleos) Universidad Industrial de Santander.

- ✓ **Sobresaturación:** Esta es la causa principal de la formación de escamas y se produce cuando la solución contiene material disuelto que se encuentra en concentraciones más altas que su concentración de equilibrio.
- ✓ **Presión:** Los sulfatos de calcio, bario y estroncio son más solubles a presiones altas, en consecuencia, el agua de formación a menudo puede precipitar escamas de sulfato cuando se reduce la presión durante la producción.
- ✓ **Temperatura:** Para el caso de inyección, al calentar el agua en el yacimiento se tiende a precipitar el sulfato de calcio, debido a que este es menos soluble a altas temperaturas, de igual forma ocurre con el carbonato de calcio.
- ✓ **pH:** La cantidad de CO₂ presente en el agua afecta su pH y la solubilidad del carbonato de calcio; con un pH más alto, se tiene grandes probabilidades de que la precipitación del carbonato de calcio se genere.

1.2.3 TIPOS DE ESCAMAS

Generalmente se pueden presentar escamas de carbonato de calcio y sulfatos como sulfato de calcio, sulfato de bario y sulfato de estroncio; también se encuentran escamas menos comunes como de óxidos de hierro, carbonato de hierro, sulfuros de hierro y de zinc.⁵

- ✓ **Escamas por Carbonato de Calcio (CaCO₃):** Este tipo de escamas se encuentra con frecuencia en las operaciones de campo, se forman comúnmente por la caída de presión y el alto contenido de iones de calcio y bicarbonato presentes; la precipitación de estas escamas está igualmente

⁵ BIN, AMER. Op. cit., p. 34 – 37.

relacionada con la cantidad de CO_2 presente en el agua, debido a las reacciones de ionización que forman iones de carbonatos y bicarbonatos.

- ✓ **Escamas por Sulfato de Calcio (CaSO_4):** Estas escamas son las que probablemente causan más problema en la industria ya que pueden llegar a taponar completamente la garganta de los poros en la cara del pozo y los tratamientos ácidos pueden no ser muy eficientes; esta situación se complica debido a que se pueden presentar tres formas distintas: yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) y anhidrita (CaSO_4). Generalmente el yeso se forma a bajas temperaturas, mientras que la anhidrita a altas temperaturas; otros parámetros como la presión, las concentraciones en los fluidos, la cantidad de hidrogeno en la salmuera, la dinámica del fluido y el tipo de medio poroso son algunos de los cuales ayudan a que este tipo de precipitaciones se generen.

- ✓ **Escamas por Sulfato de Bario (BaSO_4):** Las escamas de este tipo no son muy comunes, se forman cuando se combinan iones de bario y sulfato, y esto generalmente ocurre cuando se presenta incompatibilidad entre fluidos; debido a que esta incompatibilidad entre mezclas se puede llegar a predecir, las precipitaciones de sulfato de bario son muy limitadas, sin embargo cuando se presentan en gran cantidad, son un grave problema ya que son casi imposibles de eliminar. La solubilidad del sulfato de bario aumenta con la temperatura, presión y contenido de sal en la salmuera, por lo que hace complicado la predicción de la precipitación de esta escama y habitualmente se utilizan tratamientos preventivos para así evitar su formación.

- ✓ **Escamas por Sulfato de Estroncio (SrSO_4):** Son inusuales las escamas de sulfato de estroncio, por lo general precipitan junto con el bario y su proporción va hasta aproximadamente 15%. Al aumentar la temperatura y

el contenido de sal disuelta considerablemente, aumenta la posibilidad de que se formen escamas de este tipo.

- ✓ **Escamas por Hierro:** Se forman por los iones de hierro presentes en el agua de formación o debido a la corrosión de las estructuras de producción, el agua de formación no tiene altas concentraciones de hierro (hasta 100 ppm), dado el caso se deben realizar inspecciones de posible corrosión. Estas escamas pueden ser de óxido de hierro, carbonato de hierro o sulfuros de hierro.

- ✓ **Escamas por Sulfuro de Zinc:** Las escamas de sulfuro de zinc pueden formarse cuando el agua de formación es rica en zinc y que junto con el gas H_2S generan mezclas de fluidos incompatibles en la cara del pozo causando su precipitación.

1.2.4 PROBLEMAS QUE OCASIONAN LAS ESCAMAS

Las escamas son una gran preocupación para las empresas petroleras, debido a que pueden presentarse en las facilidades de superficie o en el fondo de pozo y en cualquiera de los dos casos, limita el paso normal del fluido, trayendo como consecuencia el mal funcionamiento de los equipos, altos costos de mantenimiento y la disminución significativa en la producción.

El tratamiento de las escamas tiene grandes costos para las petroleras no solo porque se debe parar la producción para realizar la limpieza de equipos de superficie y/o de fondo, sino que en varios casos es necesario reemplazarlos; adicionalmente, para la limpieza del medio poroso en la zona cercana a la cara del pozo se deben llevar a cabo técnicas de estimulación costosas que pueden tomar días o hasta semanas en realizarse.

Otros problemas asociados a las escamas son la corrosión por picadura sobre superficies metálicas y aumentos exagerados de presión, los cuales pueden causar fugas y llegar a presentar graves emergencias ambientales y de seguridad.

1.3 ESTIMULACIÓN CONVENCIONAL DE POZO

La estimulación de pozo se define como la operación mediante la cual se pretenden restablecer o crear las conexiones de los canales de flujo en la formación para lograr facilitar el flujo de fluidos de la formación al pozo y así mantener una producción de hidrocarburos igual o mayor.

Los tratamientos convencionales de estimulación de pozos pueden ser de dos formas: estimulación matricial y estimulación por fracturamiento hidráulico; la diferencia entre estos dos tipos de estimulación recaen en el gasto y presión de inyección.⁶

1.3.1 ESTIMULACIÓN MATRICIAL

La estimulación matricial consiste en inyectar en la zona de formación cercana al pozo, un fluido que permita limpiar o liberar el medio poroso de los materiales presentes para recuperar o aumentar la permeabilidad en la cara del pozo. Este tratamiento se caracteriza por manejar presiones de inyección por debajo de la presión de fractura. Este tipo de estimulación puede ser matricial no ácida y estimulación matricial ácida.

- ✓ **Estimulación Matricial No Ácida:** Es en la cual los fluidos de tratamiento no reaccionan químicamente con los materiales o sólidos de la roca; se utilizan esencialmente para la remoción de daños ocasionados por

⁶ ISLAS, CARLOS. "Manual de Estimulación Matricial de Pozos Petroleros" México: CIPM, 1991. Capítulo II.

bloqueos de agua, aceite o emulsión, pérdidas de fluido de control o depósitos orgánicos. Se usan soluciones oleosas o acuosas, alcoholes o solventes mutuos, acompañados de surfactantes u otros aditivos afines.

- ✓ **Estimulación Ácida:** Es en la cual los fluidos de tratamiento reaccionan químicamente disolviendo materiales que dañan la formación y a los sólidos contenidos en la roca. Se utilizan para la remoción de daño por partículas de sólidos (arcillas), y precipitaciones inorgánicas. Se usan principalmente los fluidos de sistemas ácidos.

1.3.2 ESTIMULACIÓN POR FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Puede ser definido como el proceso en el cual se aplica presión hidráulica a la roca del yacimiento hasta que ocurra una falla o fractura, generalmente conocido como rompimiento de formación. Después de la rotura de la roca, se mantiene la presión del fluido originando que la fractura se propague desde el punto de rompimiento de la roca creando un canal de flujo de gran tamaño que provee un área adicional de drenaje.

El fracturamiento hidráulico es la técnica de estimulación más exitosa a nivel mundial, siendo por esto el método más utilizado para incrementar las reservas y tasas de producción de un campo.⁷ Se puede realizar a un pozo por cualquiera de las siguientes razones:

- Evitar el daño en la cara del pozo y devolverle su productividad natural.
- Extender los canales de flujo por fracturas naturales existentes en la formación y por lo tanto aumentar la productividad más allá del nivel natural.

⁷ BALLESTAS, MARTA. y ARAMBULA, YENNY. "Metodología para la Selección, Diseño y Ejecución de Trabajos de Estimulación de Pozos de Bajo Potencial: Aplicación al Campo Colorado" Bucaramanga, 2009. p. 90 - 95. Trabajo de Grado (Ingeniero de Petróleos) Universidad Industrial de Santander.

- Para alterar el flujo del fluido en la formación.

En el primer caso, se utilizan por lo general estimulación matricial para remover el daño; sin embargo, los procedimientos químicos pueden no ser efices o apropiados y las operaciones de fracturamiento hidráulico se utilizan para evitar el daño.

2. ONDAS ULTRASÓNICAS COMO TÉCNICA DE ESTIMULACIÓN NO INTRUSIVA

Diariamente se realizan nuevas investigaciones sobre las características y ventajas de las ondas ultrasónicas, hasta llegar a despertar el interés en utilizar el ultrasonido como una técnica de estimulación para la eliminación de escamas que causan taponamiento en la formación y por ende la caída del flujo de hidrocarburos en los pozos. Se ha comprobado en laboratorio que las ondas ultrasónicas son capaces de remover escamas de yeso, calcio, bario, zinc entre otras, sin la necesidad de invadir el yacimiento con líquidos, sólidos o gases, por lo que se puede afirmar que las ondas ultrasónicas son no intrusivas y no destructivas.

Es importante conocer y comprender los fenómenos químicos y físicos que las ondas ultrasónicas pueden llegar a generar en el medio en que se propagan, para así poder tener un mejor entendimiento del porque se podrían utilizar como un método de estimulación. En este capítulo inicialmente se definen las ondas de ultrasonido y los parámetros físicos que las describen, se explica la forma como se pueden generar las ondas ultrasónicas, el efecto de las mismas sobre los líquidos y el comportamiento que presentan en los sólidos, finalmente se describe el desarrollo histórico del ultrasonido como técnica de estimulación de pozo.

2.1 ONDAS ULTRASÓNICAS

Son ondas sonoras cuya frecuencia es superior a los 20 KHz, pueden llegar a ser percibidos solo por algunos animales; estas ondas son mecánicas ya que se propagan a través de la materia y de tipo longitudinal o transversal. Se tienen ondas longitudinales cuando las partículas vibran en la misma dirección en la que se propaga la onda, este tipo de onda solo se propaga en líquidos y gases, por tal

razón para esta investigación se abordará el ultrasonido desde el punto de vista mecánico y longitudinal. Las ondas de tipo transversal se tienen cuando las partículas vibran perpendicularmente a la dirección en que se propaga la onda ultrasónica y solo se propagan en sólidos o en líquidos altamente viscosos.

- **Ondas Mecánicas:** Pueden propagarse a través de un medio elástico (sólido, líquido o gas) y transportar energía sin un transporte neto de materia. Para que se produzca una onda mecánica se necesita una fuente de perturbación que provoca que las partículas que componen el medio oscilen alrededor de un punto fijo, y al interactuar las partículas unas con otras se transfiere la energía desde una partícula hacia su vecina, sin que haya transporte de la materia que constituye el medio.⁸
- **Ondas Longitudinales:** El movimiento de las partículas en el medio es paralelo a la dirección de propagación de la onda. Estas son las más utilizadas en ultrasonido porque, además de propagarse en cualquier medio, son fácilmente generadas y detectadas, pueden ser orientadas y localizadas en un haz concentrado y poseen alta velocidad.⁹

Para tener una mayor comprensión de las ondas ultrasónicas es necesario tener en cuenta los parámetros físicos que las describen:

- ✓ **Oscilación (ciclos):** Es el cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo.
- ✓ **Periodo (T):** Tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación.

⁸ [en línea] <http://ricardosilveira.tripod.com/1/id10.html> [citado en noviembre de 2014]

⁹ RIMOLDI, CLAUDIO. y MUNDO, LUIS. "Ensayos No Destructivos", Facultad de Ingeniería, Departamento de Aeronáutica, Apuntes de Clase. P 5-7.

- ✓ **Frecuencia: (f)** Es la cantidad de ciclos, oscilaciones o eventos por segundo de una partícula, su magnitud está dada por el generador del ultrasonido. La frecuencia se mide en Hertzios (Hz), pero como las ondas ultrasónicas son de alta frecuencia la medida básica es el Mega hertzio (MHz). El valor de la frecuencia se calcula de la siguiente forma:

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde T es el periodo expresado en segundos.

- ✓ **Longitud de Onda: (λ)** Es la distancia existente entre dos crestas o valles consecutivos. Esta característica nos describe que tan larga es la onda.
- ✓ **Amplitud acústica: (A)** Es el desplazamiento máximo que tiene la partícula que se encuentra sometida a vibración respecto a un punto de referencia. La unidad de medida es el decibel (dB). La intensidad de la onda disminuye al interactuar con el medio y en función a la distancia recorrida por tal razón la amplitud también disminuirá.

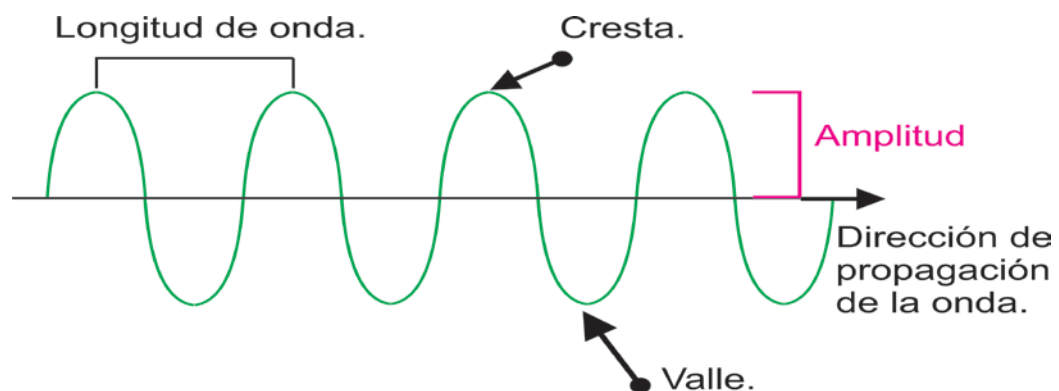


Figura 1. Partes de una onda.¹⁰

¹⁰ [en línea] <http://www.areatecnologia.com/ondas-electromagneticas.htm> [citado en diciembre de 2014] (Modificado)

- ✓ **Velocidad Acústica: (C)** Es la velocidad de propagación del sonido en el medio. Esta velocidad es característica propia del material y en general, es constante para un material dado, independientemente de la frecuencia y de la longitud de onda. La velocidad acústica de cualquier onda se puede determinar mediante la siguiente expresión en (m/s):

$$C = \lambda * f \quad \text{Ecuación 2}$$

- ✓ **Velocidad de Vibración: (V)** Es la velocidad de la partícula en su movimiento oscilatorio. Este parámetro es fundamental ya que es un factor que interviene en la producción del eco, también es la base para calcular la impedancia acústica.
- ✓ **Presión Acústica: (P)** Se define como la fuerza en dirección normal por unidad de superficie (N/m^2), también se conoce como amplitud de presión acústica y está íntimamente ligada con la amplitud de la oscilación.
- ✓ **Intensidad: (I)** Es la energía que pasa por segundo a través de la superficie, colocada perpendicularmente a la dirección de propagación del movimiento. Su unidad es (W/m^2).
- ✓ **Impedancia acústica: (Z)** Es una característica propia del medio por donde se hace pasar la onda ultrasónica y relaciona la velocidad que adquiere la partícula vibrante con la presión a la que está sometida dicha partícula. La impedancia acústica es el producto de la densidad por la velocidad de propagación del sonido y se representa por :

$$Z = \rho * C \quad \text{Ecuación 3}$$

La impedancia acústica es una resistencia que se opone a la vibración de la onda es decir se opone a la vibración de los elementos de masa pero no a la propagación de la onda.

2.1.1 GENERACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS

Para generar ondas ultrasónicas se debe contar con un generador de alta frecuencia el cual aplica el voltaje a un transductor capaz de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa; gracias a la excitación eléctrica y por el efecto piezoeléctrico, el transductor vibra a altas frecuencias amplificadas y transmitidas al medio que lo rodea como ondas ultrasónicas.

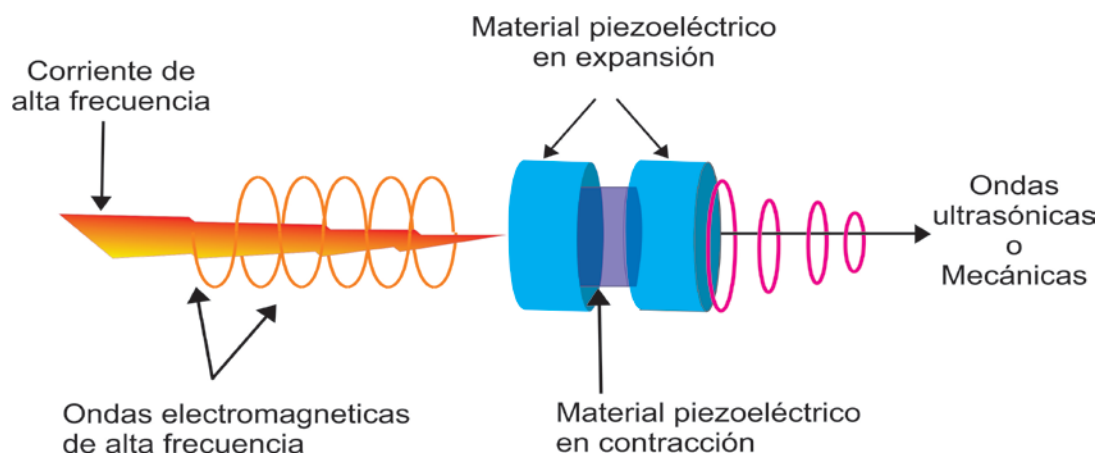


Figura 2. Generación de ondas ultrasónicas.

El efecto piezoeléctrico utiliza una pieza de material polarizado; cuando un campo eléctrico es aplicado a lo largo del material, las moléculas polarizadas se alinearán con el campo resultando un dipolo inducido en la estructura cristalina. Esta alineación de las moléculas causará una deformación del material sometido al campo eléctrico y así mismo puede darse la acción opuesta, producir un campo eléctrico cuando cambian de dimensión;¹¹ como se representa en la figura 2, si quitamos y aplicamos el campo eléctrico, el material vibrara y será capaz, si esta

¹¹ RIMOLDI, CLAUDIO., *Op. cit.*, p. 14 – 15

en íntimo contacto con otro medio, de transmitir su vibración en ondas ultrasónicas; generalmente entre más altas sean las frecuencias requeridas, más delgados serán los materiales utilizados.

Los principales materiales piezoeléctricos son: cuarzo, sulfato de litio y materiales cerámicos polarizados como el titanio de bario, metabianato de plomo y titanatozirconato de plomo.

El cuarzo fue el primer material utilizado y tiene características muy estables en frecuencias; está conformado por átomos de silicio con carga positiva y de oxígeno con carga negativa en un patrón repetitivo como se representa en la figura 3. Normalmente, cuando el cuarzo no está bajo ningún tipo de estrés extremo, sus cargas se dispersan uniformemente en las moléculas a través del mismo, pero si se aplica corriente eléctrica, el orden de los átomos cambia ligeramente, causando que las cargas negativas se acumulen en un lado y las cargas positivas en el lado opuesto y en consecuencia el cuarzo cambia de forma estirándose o comprimiéndose. Si se aplica y retira el campo eléctrico, se producirá un movimiento vibratorio en el cuarzo, el cual ocasionara perturbaciones en el medio con el cual interactúa en forma de ondas ultrasónicas.



Figura 3. Átomos de silicio con carga positiva y oxígeno con carga negativa en un cristal de cuarzo.¹²

¹² [en línea]

http://www.nisenet.org/sites/default/files/catalog/uploads/spanish/12194/electricsqueeze_images_13nov13_sp.pdf [citado en diciembre de 2014] (Modificado)

Los transductores con materiales piezoeléctricos, a pesar de que pierden eficacia con el tiempo, debido al uso y a que los materiales pierden su polarización, tienen visibles ventajas como el bajo costo de adquisición y la facilidad de fabricación.

2.1.2 EFECTO DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS EN LÍQUIDOS

En diversas investigaciones y pruebas de laboratorio, se usan las ondas ultrasónicas con la finalidad de mejorar rendimientos, acelerar procesos químicos o físicos, permitir que la reacción ocurra en condiciones extremas o en algunos casos, cambiar completamente el curso de la reacción; todo esto gracias al fenómeno que las ondas ultrasónicas producen llamado cavitación, que es el surgimiento, crecimiento y colapso de burbujas en el líquido presente.

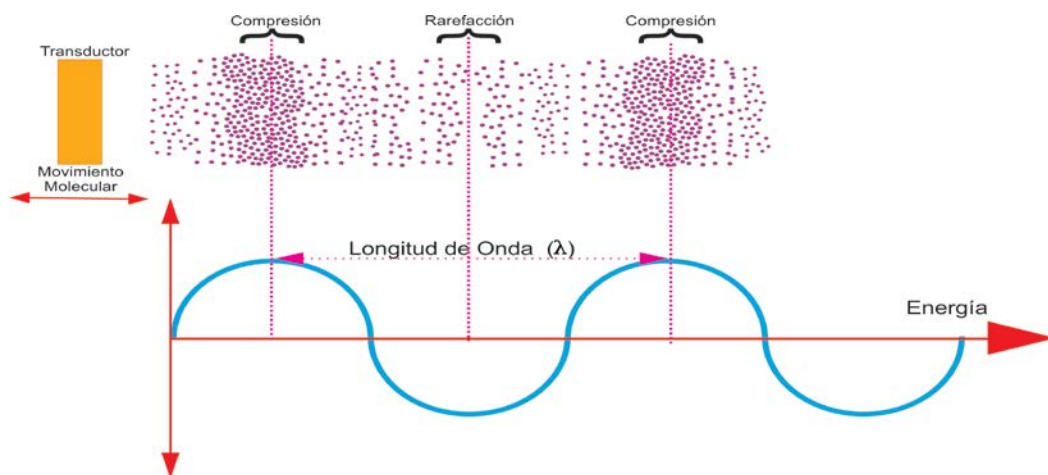


Figura 4. Moléculas en material oscilando en la misma dirección que la onda formando zonas de compresión y rarefacción.

Las ondas ultrasónicas que se propagan en un líquido alternan ciclos de alta presión denominado zona de compresión y de baja presión en zonas llamadas rarefacción debido al movimiento vibratorio del transductor como se representa en la figura 4; en la zona de rarefacción la presión puede igualar la presión de vapor del líquido teniendo como consecuencia la formación de pequeñas burbujas,

huecos o cavidades llenas de vapor, y cuando estas alcanzan un volumen en el cual ya no pueden absorber más energía, colapsan a una velocidad mayor que la del sonido, emitiendo ondas de choque. Las burbujas presentan dos formas de implosión dependiendo de su entorno:¹³

- *Simétrico*: Cuando la burbuja se forma alejada de cualquier tipo de superficie en un entorno uniforme, su colapso genera una onda de choque que se propaga en todas las direcciones.
- *Asimétrico*: Cuando la burbuja se forma cerca de una superficie, la superficie ofrece resistencia al flujo de líquido del lado de la pared y como resultado se da una irrupción del líquido generado principalmente por el lado de la burbuja que se encuentra alejada de la superficie formando un chorro de líquido “micro-jet” de gran alcance que se dirige a la superficie sólida.

La implosión violenta de las burbujas es la etapa final y más importante de la cavitación y su efecto en los líquidos, debido a que genera condiciones inusuales de alta temperatura y presión en regiones microscópicas con tiempos de vida muy cortos, proporcionando un medio único para la conducción de las reacciones químicas en condiciones extremas.

El crecimiento y colapso de una burbuja de vapor cerca de una pared depende de la distancia h a la cual se encuentra el centro de la burbuja respecto al sustrato y el radio máximo R_{max} de la misma, es decir:¹⁴

$$\gamma = \frac{h}{R_{max}} \quad \text{Ecuación 4}$$

¹³ [en línea] <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22520/Capitulo1.pdf> [citado noviembre de 2014]

¹⁴ *Ibid.*, p 9-10

En la figura 5 se muestran los resultados numéricos calculados por Plesset y Chapman (1971), los cuales muestran la dinámica de la implosión de una burbuja cercana a una superficie sólida. **A** representa la burbuja inicial (radio máximo) al tiempo $t=0.63$ segundos después de la creación de la burbuja; posteriores curvas muestran su evolución y su deformación conforme la burbuja se acerca al colapso. En la etapa final (desde **E**) se da la formación de un microchorro de agua dirigido hacia el centro de la burbuja y como se muestra en la tabla de la misma figura, la velocidad del colapso aumenta hasta alcanzar los 100 m/s. En este caso la presión disminuye conforme aumenta el radio, es decir, son inversamente proporcionales.

Cuando la burbuja colapsa no necesariamente se va a destruir por completo; el colapso genera otra burbuja de un radio mucho menor, lo cual ocasiona que se propague una segunda onda; este comportamiento es muy característico de la cavitación causada por ondas acústicas.

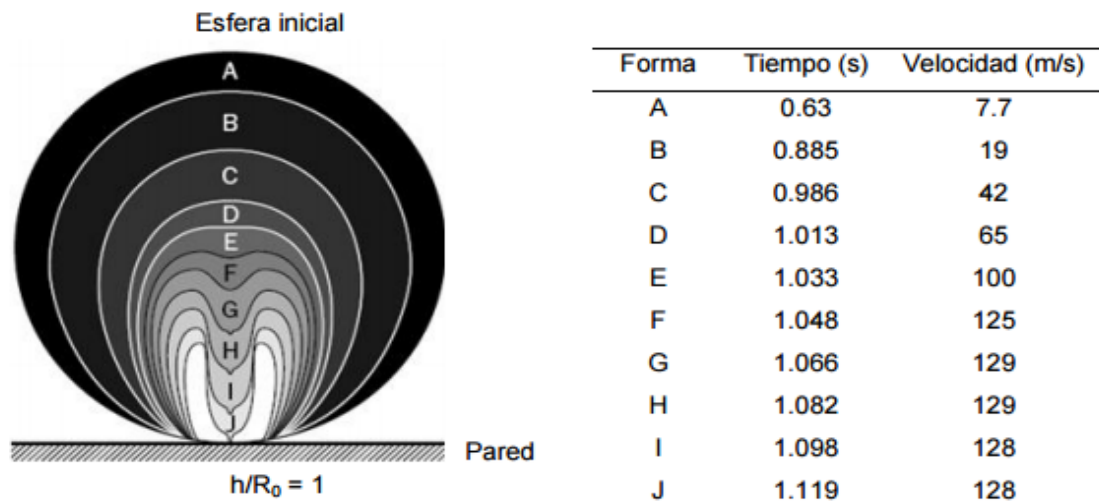


Figura 5. Colapso de una burbuja cerca de una pared.¹⁵

¹⁵ *Ibid.*, p. 10

Lord Rayleigh propuso un modelo conocido como “Rayleigh Cavity” con el cual se puede determinar el radio máximo de la burbuja tomando en cuenta los cambios de presión y la densidad del fluido:¹⁶

$$R_{max} = \frac{T_c}{0,915 \sqrt{\frac{\rho_L}{P_0 - P_v}}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde R_{max} es radio máximo de la burbuja, T_c es el periodo de oscilación, es decir, el tiempo desde que nace hasta que ocurre el primer colapso, P_v es la presión de vapor a temperatura ambiente, P_0 es la presión atmosférica y ρ_L es la densidad del líquido.

En la estimulación de pozo con ondas ultrasónicas, el crecimiento y posterior colapso de las burbujas en el medio poroso libera energía en forma de ondas que impactan unas contra otras y contra las paredes cercanas, logrando remover las incrustaciones formadas, residuos de lodo, finos o depósitos orgánicos que estén taponando los canales de flujo en la cercanía a la cara del pozo. Se necesita que la limpieza con ultrasonido remueva las escamas y otros tipos de daño sin llegar a causar erosión comprometiendo la integridad del yacimiento.

El fenómeno de la erosión por cavitación es complejo ya que se deben de tener en cuenta tanto el origen de la cavitación como las propiedades del material sobre el cual se va a remover sustrato. La erosión en sí, se debe a la concentración de energía mecánica en áreas muy pequeñas de las paredes expuestas a la cavitación. Esta concentración de energía resulta en altos niveles de tensión los cuales pueden exceder la resistencia del material (límite elástico). Desde el punto de vista de la mecánica, de la física sólida y la metalurgia, la respuesta del

¹⁶ *Ibid.*, p. 13

material al micro-bombardeo por miles de colapsos de burbujas es la pieza clave en la erosión por cavitación.

Una onda de choque como se mencionó, es una onda con aumento de presión y temperatura, se puede determinar la presión de la onda de choque mediante la siguiente ecuación:¹⁷

$$P = A\rho_0v\left(10^{\frac{v-C_0}{B}} - 1\right) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde P es la presión máxima de choque, U es la velocidad de onda de choque, $C_0=1483 \text{ ms}^{-1}$ es la velocidad del sonido, $\rho_0 = 998 \text{ Kg/m}^3$ y corresponde a la densidad del agua en reposo, A y B son constantes de Rankine-Hugoniot (datos empíricos) cuyos valores respectivos son 5190 ms^{-1} y 25306 ms^{-1} .

En particular, las presiones medidas a unos 4 milímetros del sustrato indican que la presión es de 1 MPa. Sin embargo al acercarnos más, la presión crece exponencialmente obteniéndose valores de hasta 20 veces más, por lo que es posible entonces causar daño en superficies metálicas y dieléctricas.

2.1.3 COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS EN SÓLIDOS

Como se mencionó al definir las ondas ultrasónicas, estas pueden propagarse a través de los sólidos, líquidos o gases sin transporte de materia debido a que las partículas que los componen interactúan unas con otras oscilando alrededor de un punto fijo transfiriendo solo energía. En un material sólido las ondas ultrasónicas

¹⁷ *Ibid.*, p. 18.

presentan una disminución de su intensidad más pronunciada que en líquidos y gases debido a dos causas:¹⁸

1) *Dispersión:* Los sólidos presentan heterogeneidades, fases en la estructura cristalina de los metales, límites de grano, etc., en las que la impedancia acústica cambia bruscamente, debido a la diferencia de densidad o velocidad acústica de los materiales, de naturaleza, condición o estado diferente en dichas entrecaras.

2) *Absorción:* Es un efecto de frenado de la oscilación de las partículas generando pérdida de energía transmitida entre ellas.

2.1.4 COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS EN SUPERFICIES LÍMITES¹⁹

Se considera “superficie límite” a aquella que separa dos medios con propiedades elásticas diferentes. Si un material se encuentra adherido a otro, la onda ultrasónica se propagará alterando su dirección, intensidad y modo.

1) *Incidencia perpendicular o normal:* Si una onda ultrasónica incide perpendicularmente sobre una superficie plana que separa dos medios diferentes, una parte de la energía de la onda se refleja y vuelve en la misma dirección de la incidente y otra parte se propaga en el segundo medio manteniendo su dirección y sentido.

Si I_i es la intensidad de la onda incidente, I_r la de la reflejada, I_t la transmitida y Z_1 y Z_2 las respectivas impedancias acústicas de los materiales, representado en la figura 6.

¹⁸ [en línea] <http://www.nebrija.es/areas/material/Superior/TecMaterial/UT.pdf> [citado en enero de 2014]

¹⁹ *Ibid.*, p. 14 - 18.

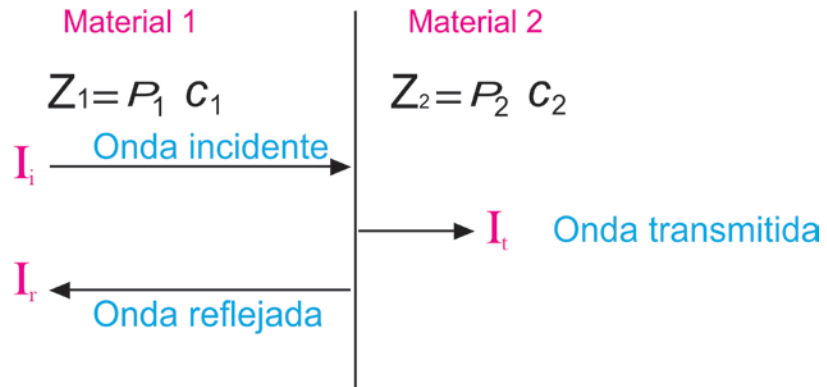


Figura 6. Comportamiento de las ondas ultrasónicas en incidencia perpendicular.

Se pueden definir los coeficientes adimensionales de reflexión R como:

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad \text{Ecuación 7}$$

y de transmisión T como:

$$T = \frac{I_t}{I_i} \quad \text{Ecuación 8}$$

Los cuales expresan el porcentaje de intensidad reflejada y transmitida respectivamente, en relación con la intensidad incidente.

El balance de la energía, expresada en intensidad es:

$$I_i = I_r + I_t \quad \longrightarrow \quad R + T = 1 \quad \text{Ecuación 9}$$

Teniendo en cuenta las expresiones que relacionan la intensidad acústica con la impedancia y la presión acústica, se deduce:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad ; \quad T = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad \text{Ecuación 10}$$

Análogamente, teniendo en cuenta las presiones acústicas, tenemos:

$$R' = \frac{P_r}{P_i} \quad ; \quad T' = \frac{P_t}{P_i} \quad \text{Ecuación 11}$$

Y aplicando las formulas de la impedancia acústica:

$$R' = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad ; \quad T' = \frac{4 Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad \text{Ecuación 12}$$

De las expresiones obtenidas, podemos concluir lo siguiente:

- Desde el punto de vista de las intensidades acústicas, es indiferente el lado de la superficie sobre el que incide la onda ya que los valores de R y T no cambian al intercambiarse entre si Z_1 y Z_2 .
- Si las impedancias son iguales en ambos medios, la onda atraviesa la superficie sin ser perturbada.

$$R = R' = 0 \quad ; \quad T = T' = 1 \quad \text{Ecuación 13}$$

- Si las impedancias difieren mucho (caso del aire y de los gases en contacto con sólidos o líquidos) las ondas prácticamente en su totalidad se reflejan.

$$R = R' = 1 \quad ; \quad T = T' = 0 \quad \text{Ecuación 14}$$

2) Incidencia Angular: Si una onda acústica incide oblicuamente en una entrecara plana que separa dos medios con un ángulo de incidencia α_i

como se representa en la figura 7, se producen ondas reflejadas y transmitidas de modo similar a lo que ocurre en óptica.

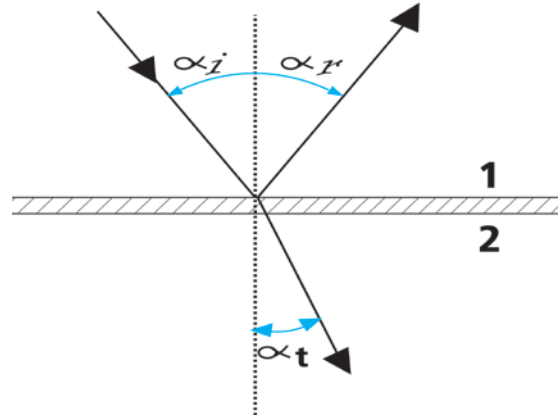


Figura 7. Reflexión y refracción de una onda con incidencia oblicua en la entrecara plana que separa dos medios.

Las ondas transmitidas se llaman también ondas refractadas ya que su dirección cambia en relación con la dirección de incidencia. Los ángulos de reflexión X_r y de transmisión o de refracción X_t dependen del ángulo de incidencia de las velocidades acústicas de los materiales.

En contraste con la óptica, se añade aquí un nuevo fenómeno, consiste en que un nuevo tipo de onda puede transformarse en otro, es decir, las ondas longitudinales en transversales y viceversa.

- *Ondas Transversales:* El movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de la propagación de la onda.²⁰

Por ejemplo en la figura 8, se aprecia el desdoblamiento que sufren, tanto la onda reflejada como la transmitida, en una onda longitudinal y otra

²⁰ RIMOLDI, CLAUDIO., *Op. cit.*, p. 5.

transversal, resultando que una onda incidente da lugar a cuatro ondas cuando los dos medios son cuerpos sólidos.

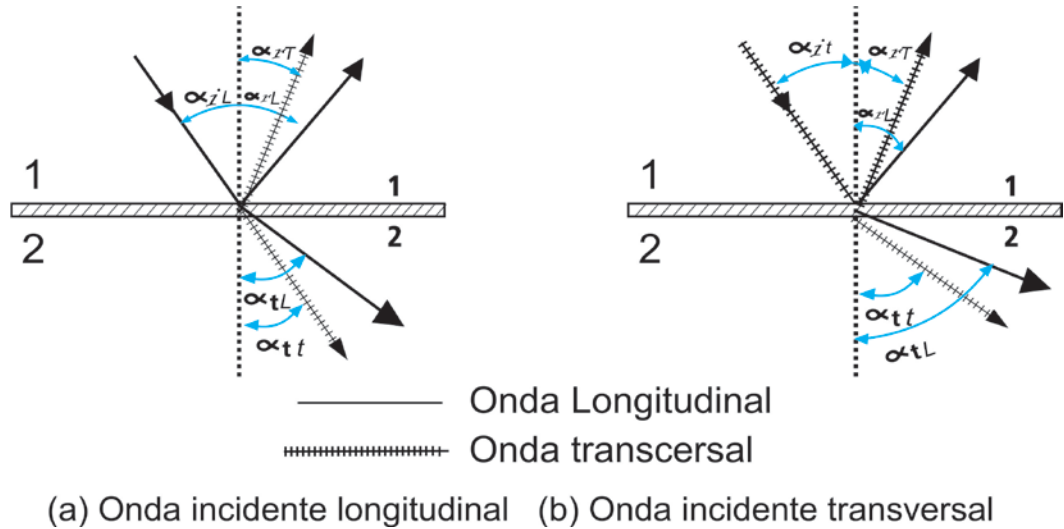


Figura 8. Reflexión y refracción de una onda incidente oblicua sobre una superficie límite entre dos cuerpos sólidos.

2.2 DESARROLLO HISTÓRICO DEL ULTRASONIDO COMO TÉCNICA DE ESTIMULACIÓN DE POZO

La técnica de ultrasonido inicialmente se basaba en la percusión de la muestra, la cual se realizaba con un martillo, y se debía prestar atención al sonido y los cambios emitidos por el mismo en presencia de materiales con discontinuidades. Fue en 1924 cuando el científico Ruso S.Y Sokolov propuso el uso del ultrasonido como mecanismo válido para la inspección industrial, particularmente para la búsqueda de defectos en el material.²¹ En 1929 Sokolov realizó los primeros ensayos y logró detectar presencia de heterogeneidades en el material estudiado mediante la técnica de ultrasonido. Sokolov observó y midió la caída de la

²¹ MARTINEZ, JAIRO., et. al., "Fundamentos Teórico prácticos del ultrasonido" p. 5.

intensidad acústica transmitida en el material con discontinuidad, para esta época se requería un emisor y un receptor de la onda ultrasónica.

En el transcurso de la segunda guerra mundial y debido a los efectos causados por las ondas expansivas de las bombas lanzadas durante esta, ingenieros alemanes y soviéticos, se interesaron en los efectos expansivos de las ondas y desarrollaron equipos de inspección ultrasónica para aplicaciones militares (aún se empleaba un emisor y un receptor).

En 1940 el Dr. Floyd Firestone desarrollo el primer equipo que empleaba un mismo transductor como emisor y receptor, basando la técnica en la propiedad característica del sonido para reflejarse al alcanzar una interface acústica. En 1942 Firestone aplico por primera vez el principio del sonar, para localización de buques, medir profundidades marinas y detectar heterogeneidades en los materiales; este principio se basa en la capacidad de los materiales para recibir o reflejar las ondas emitidas hacia él. Los investigadores Alemanes Josef y Herbert Krautkramer en 1948, iniciaron con el perfeccionamiento del instrumento de inspección por ultrasonido, por lo cual hoy en día se cuenta con una infinidad de variantes de la inspección ultrasónica, cada una de ellas especializada en obtener distintas discontinuidades o para evaluar los diferentes materiales que se pudiesen encontrar.

El ultrasonido como un método para la recuperación de petróleo en campos maduros fue investigado por primera vez en 1965 por Duhon y Campbell, quienes realizaron una serie de experimentos en muestras de arenisca con petróleo saturado utilizando las ondas de ultrasonido con rangos de frecuencia de 1- 5,5 MHz.²² Observaron que la energía generada con el ultrasonido incremento la eficiencia de desplazamiento mediante la creación de un frente de desplazamiento

²² HAMIDA, TAREK. And BABADAGLI, TAYFUN. "Displacement of Oil by Different Interfacial Tension Fluids Under Ultrasonic Waves". Artículo en: Elsevier, publicado por: Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 316, p.2, 2008.

más uniforme. Fairbanks y Chen en 1969, probaron el efecto de transferencia de calor en líquidos en un medio poroso afectado por ondas ultrasónicas, observando una disminución de la viscosidad en el fluido, pero no se tenía claro si este efecto se debía al aumento de la temperatura o a las vibraciones de las partículas en el medio.

Muchos experimentos de laboratorio y pruebas piloto sobre las ondas ultrasónicas para la recuperación mejorada de petróleo se llevaron a cabo durante los años 70 en los EE.UU y la Unión Soviética. En 1974 se realizó una prueba piloto en 21 pozos en el campo petrolero Oudasar en Texas. El uso de la tecnología ultrasónica logro aumentar la producción de petróleo de 770 a 1098 barriles por día y mejorar la recuperación de petróleo.²³ Igor A. Beresnev y Paul A. Johnson en su artículo titulado “Elastic-Wave stimulation of oil production: A review of methods and results” publicada en Geophysics en Junio de 1994, señalan que la URSS en el año de 1975, realizo pruebas en campos petroleros con la acústica como método para la estimulación de yacimientos.

Gadiev en 1977, analizo los efectos del ultrasonido en arenas no consolidadas saturadas de aceite, observando un considerable aumento en la tasa de producción y la acumulada de petróleo. Postuló entonces que este efecto era debido a un fenómeno llamado "efecto sono-capilar", “por el cual el nivel de líquido dentro de un capilar se eleva debido a una presión adicional generada por el colapso de las burbujas durante la cavitación”.²⁴

²³ GUO, XIAO., et al. “High Frequency Vibration Recovery Enhancement Technology in the Heavy Oil Fields of China”. Artículo SPE 86956, p. 2, presentado en: SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and Western Regional Meeting” Bakersfield, California. Marzo 16-18 de 2004.

²⁴ HAMIDA, TAREK. And BABADAGLI, TAYFUN. “Displacement of Oil by Different Interfacial Tension Fluids Under Ultrasonic Waves”. Artículo en: Elsevier, publicado por: Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 316, p.2, 2008.

Durante los años 80, en otros países se despertó el interés por el estudio sobre este tema y se desarrollaron numerosas investigaciones de gran importancia para el desarrollo y comprensión del ultrasonido como técnica de estimulación; países como Rusia, China, Canadá, EE.UU. y Noruega, crearon laboratorios de investigaciones que se centraron en el estudio de la vibración de ondas elásticas, pulsos de presión, la tecnología vibro-sísmica, entre otras, todas como nuevas técnicas de recuperación mejorada de petróleo.²⁵

Como ya se mencionó, Beresnev y Johnson (1994) proporcionaron una revisión exhaustiva de los estudios realizados hasta esa época, que utilizaron la estimulación de ondas elásticas para la producción de petróleo, incluyendo ondas ultrasónicas y sísmicas; ellos indicaron que estas ondas afectan la permeabilidad en medios porosos y la tasa de producción en la mayoría de los casos.

La primera investigación encontrada que se enfocó en la eliminación del daño en la cercanía del pozo por medio del ultrasonido, se presentó en el Simposio Internacional de la SPE sobre Control del Daño de Formación en 1994 en Luisiana por Venkitaraman et al., quien realizó una serie de experimentos de laboratorio para investigar la viabilidad del uso del ultrasonido para eliminar el daño causado por el lodo de perforación y la migración de finos; observó que los núcleos con este tipo de daño tratados con ondas ultrasónicas a varias frecuencias e intensidades, incrementaron su permeabilidad considerablemente.

Renyuan Sun et. al., investigó la influencia de la onda ultrasónica sobre la permeabilidad de la roca en medios porosos y presentó los resultados en su artículo "Impacts of Ultrasonic Waves to Rock Permeability" publicado por Oil Drilling & Production Technology en 1996, mostrando que no solo el ultrasonido

²⁵ ALHOMADHI, EMAD., "Experimental Application of Ultrasound Waves to Improved Oil Recovery During Waterflooding". Artículo en: Elsevier, publicado por: Journal of King Saud University – Engineering Sciences 26, p.2, 2014.

puede aumentar la permeabilidad de la roca sino que también surge un gran efecto de histéresis. Xiaowei Wu et. al. en el mismo año presento los resultados de su investigación encontrando que el daño de formación ocasionado por fluidos de perforación pueden llegar a eliminarse entre 61% - 88% y cuando el efecto del ultrasonido cesa, se formaría el efecto de histéresis.²⁶

En el 2000 Roberts et al., quien trabajo con Venkitaraman en numerosos trabajos desde 1994 investigando diversos tipos de taponamiento con partículas en la formación y su eliminación con el uso de ultrasonido, centró sus estudios especialmente en los depósitos de parafina y asfáltenos; encontrando que al usar el ultrasonido se logra remover estos depósitos orgánicos y se aumenta la permeabilidad.

Numerosos trabajos sobre el control de parafinas y prevención de las incrustaciones también han realizado Bin Lu y Zhang Jianguo et.al., entre los que está un controlador de parafinas con ondas ultrasónica y uso del mismo para la recuperación de petróleo en el 2002; solo hasta el 2004 esta tecnología se había utilizado en 11 campos petroleros en el este de China, como Campo Dading, Campo Liaohe, Campo Shengli, Campo Huabei, Campo Dagang, Campo Jiangsu, Campo Jidong, Campo Zhongyuan, y la Corporación Petrolera de Xinxing, etc.²⁷ obteniendo excelentes resultados.

Igualmente durante el 2001 y el 2004, Poesio et al. realizo una serie de investigaciones para la remoción de pequeñas partículas y finos en medios porosos, logrando desarrollar un modelo teórico para predecir la eliminación de este tipo de daño por medio del ultrasonido.

²⁶ GUO, XIAO., *Op. cit.*, p. 2.

²⁷ *Ibid.* p. 2.

A pesar de la gran cantidad de investigaciones realizadas, la interacción física de la acústica entre la roca y los fluidos no estaba totalmente comprendida. Hamida y Babadagli entre el 2005 y el 2008, publicaron varios artículos en los cuales analizaron como las ondas de ultrasonido crean vibraciones en el yacimiento, facilitando la producción de petróleo al afectar las fuerzas capilares, la adhesión entre la roca y los fluidos, y la causa de coalescencia en el crudo.

Durante los últimos 10 años se desencadenaron una gran cantidad de investigaciones con ultrasonido como técnica de recobro de petróleo, enfocadas en diferentes aspectos tales como ayudar a la inyección agua, la estimulación acida, la producción de crudos pesados, la remoción de daño de formación, entre otros; los cuales han realizado grandes aportes para lograr llegar a tener una mejor comprensión del efecto que causan las ondas ultrasónicas en el comportamiento de los fluidos, la roca y otros componentes presentes en los yacimientos petroleros.

3. COMPARACIÓN ENTRE LA ESTIMULACIÓN CON ULTRASONIDO Y LOS MÉTODOS DE ESTIMULACIÓN CONVENCIONAL

En la actualidad, los métodos de recuperación mejorada de petróleo (EOR) tienen una eficiencia de aproximadamente 40%²⁸ y se caracterizan por tener grandes costos de operación y generar graves problemas al medio ambiente, es por esto que el mejoramiento en dichos aspectos de estos métodos convencionales y el desarrollo de nuevas tecnologías de recuperación de petróleo, son el objetivo de la gran mayoría de investigaciones realizadas cada día en todo el mundo.

Durante los últimos 50 años, se han investigado las ondas ultrasónicas como técnica de recuperación mejorada de petróleo y realizado importantes aplicaciones en campos petroleros en todo el mundo; todos los resultados han deducido que el uso del ultrasonido propone un aumento en la tasa de producción, con operaciones económicamente viables y amigables con el medio ambiente. Sin embargo, se plantea que se deben desarrollar estudios más específicos sobre cada uno de los diferentes factores en los que influye la energía sónica para lograr tener un mejor entendimiento y así un mayor beneficio del uso de esta tecnología.

Teniendo en cuenta lo anterior, algunas investigaciones se han centrado en las ondas ultrasónicas como técnica de estimulación de pozo, dirigidas en el mejoramiento de la permeabilidad en la cara del pozo y la limpieza de la tubería de producción. A continuación se presenta una comparación del ultrasonido como técnica de estimulación y los métodos de estimulación convencional, respecto a las tasas de producción y cuidado del medio ambiente.

²⁸ ABRAMOVA, A., et al. "Ultrasonic Technology for Enhanced Oil Recovery". Artículo en: SciRes, publicado por: Engineering, p. 1, 2014.

3.1 ULTRASONIDO Y LA ESTIMULACIÓN ACIDA

La estimulación matricial es la técnica más antigua y se basa en inyectar un fluido para limpiar el medio poroso de la formación en la cercanía al pozo con el fin de permitir más fácilmente la producción de hidrocarburos, tiene un porcentaje de éxito aproximadamente del 90%.²⁹ Para el caso de la eliminación de escamas, es necesario utilizar la estimulación acida, la cual implica la inyección de fluido con concentraciones de ácido clorhídrico, fluorhídrico, entre otros. El uso de estos químicos para dicha operación es altamente costoso y se necesitan permisos gubernamentales especiales para poder emplearlos.

Para comparar el método de estimulación acida con el ultrasonido respecto al aumento en sus tasas de producción y sus consecuencias ambientales, se citan los siguientes casos:

- Estimulación acida en Middleton pozo 30L ubicado en Nigeria.³⁰
- Estimulación con ultrasonido en el campo Samotlor ubicado en Rusia.³¹

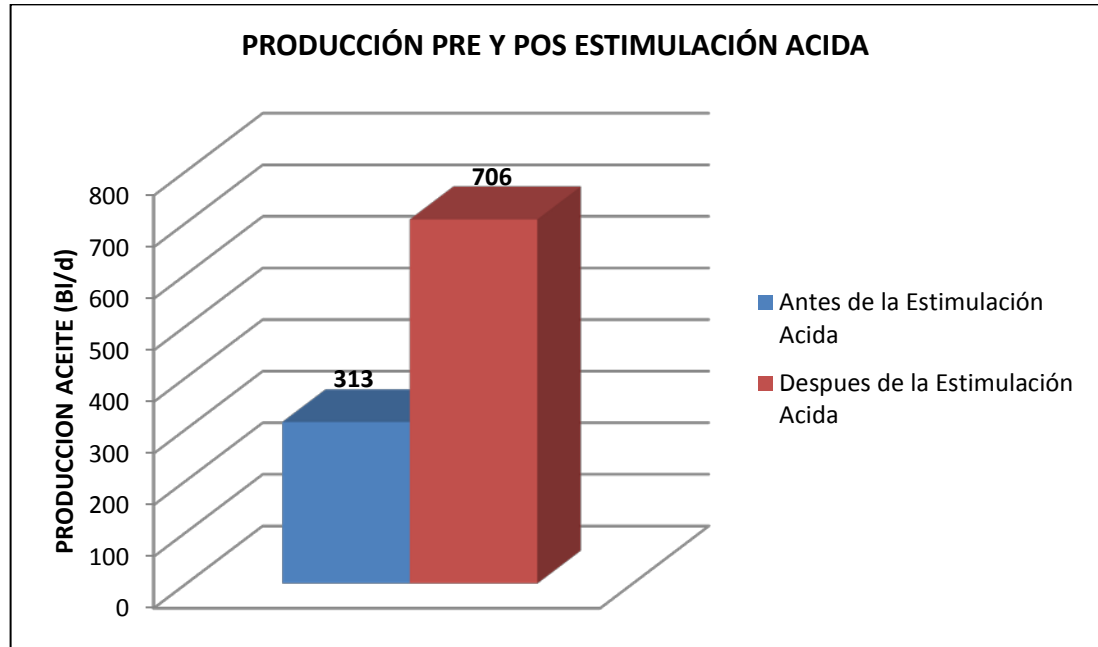
En la estimulación acida realizada en el pozo 30L ubicado en Nigeria, se utilizaron aproximadamente 1890 galones de Cloruro de Amonio, 151 galones entre solvente y surfactante, y más de 1280 galones de un ácido especial, entre otros químicos. En la gráfica 1 se observa que se tenía una producción de petróleo 313 Bl/d y después de la estimulación se incrementó la producción a 706 Bl/d, logrando un aumento del 125% en la producción de petróleo; se debe destacar que no siempre los resultados con estimulaciones acidas alcanzan este valor

²⁹ Economides, M.J. y Nolte, K.G. "Reservoir Stimulation" Londres: John Wiley & Sons Ltd. 3ra Edición p.13-1, 2000.

³⁰ OLOORO, J., et. al., "Oil Well Stimulation Using Acidizing Method" Artículo en: Journal of Engineering and Applied Sciences, publicado por: Cenresin Publications, Vol 2, 2010.

³¹ ABRAMOVA, A., Op. cit., p. 177-184.

porcentual, se tomó este caso en particular con el fin de plantear los mejores escenarios para cada técnica de estimulación.

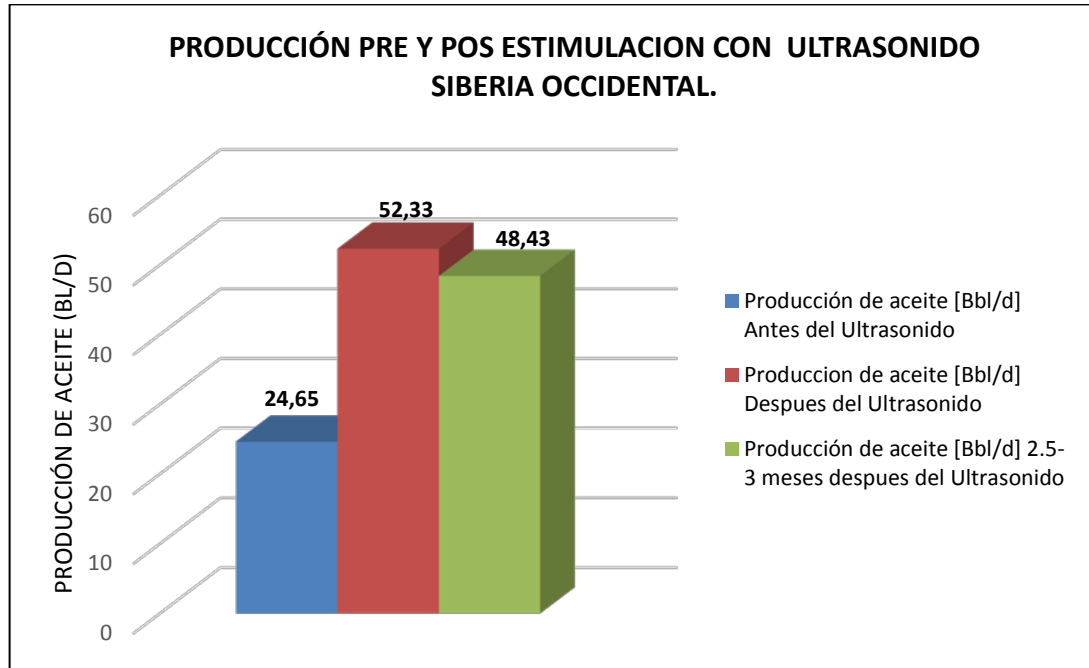


Grafica 1. Producción de crudo antes y después de la estimulación acida en el pozo 30L ubicado en Nigeria.

En el campo Samotlor ubicado en Rusia se realizaron estimulaciones con ultrasonido en las regiones de Siberia Occidental y Samara, en las cuales se aplicó a 100 pozos entre los años de 2010 y 2013. Una vez realizada la estimulación con ondas ultrasónicas se evidencio un aumento en la producción promedio de crudo de 4,4 Ton/día (32,12 BI/d) para la región de Siberia Occidental, mientras que para la región de Samara el aumento fue de 10,2 Ton/día (74,46 BI/d).

En la Grafica 2 se observa el comportamiento en la producción de crudo para la región de Siberia Occidental; inmediatamente después del ultrasonido se observó un aumento cercano al doble del valor inicial en la producción, es decir la producción paso de 3,92 m³/d (24,65 BI/d) a 8,32 m³/d (52,33 BI/d) y como se

observa en la misma gráfica este aumento en la producción de crudo se mantuvo 3 meses después de realizada la estimulación ultrasónica.

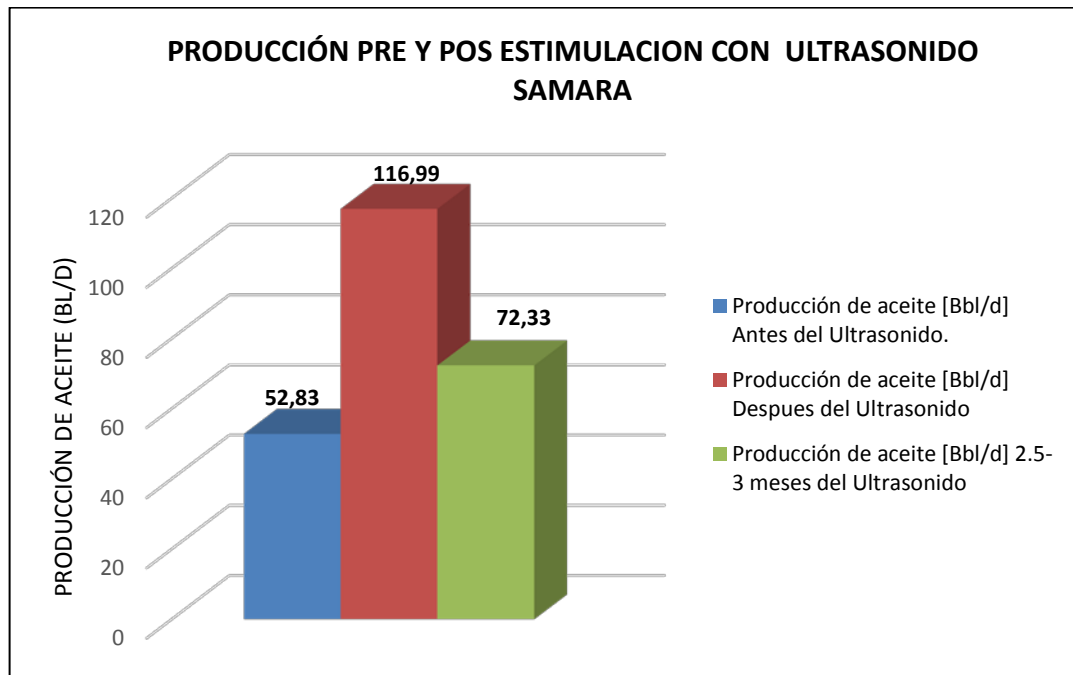


Gráfica 2. Producción de crudo antes y después de la estimulación con ultrasonido en el campo Samotlor ubicado en Rusia.

La gráfica 3 representa el comportamiento en la producción de crudo para la región de Samara, la tendencia del comportamiento es similar al de la gráfica dos y se ajusta a los valores correspondientes de la región de Samara, allí la producción de crudo después de la estimulación también duplico el valor de producción, es decir de 8,4 m³/d (52,83 Bl/d) paso a 18,6 m³/d (52,33 Bl/d) y también se mantuvo una producción alta de aceite aun después de 3 meses de realizada la estimulación con ultrasonido, lo cual se traduce en un éxito en la aplicación de la tecnología del ultrasonido.

El incremento de producción de petróleo para los dos casos de estimulación es beneficioso, pero no siempre los resultados con estimulaciones acidas serán favorables, esto debido a que el comportamiento variara según las condiciones

geológicas y a las propiedades del pozo a estimular; se continuara realizando la comparación en cuanto a las problemáticas ambientales que cada uno puede llegar a presentar.



Grafica 3. Producción de crudo antes y después de la estimulación con ultrasonido en el campo Samotlor ubicado en Rusia.

La técnica de estimulación acida se limita a ciertos tipos de rocas y/o formaciones que se encuentren naturalmente fracturados; sin embargo si en algún caso no se logra determinar con precisión las fracturas naturales presentes, puede ocasionar irremediables problemas ambientales ya que el fluido con concentraciones de ácido puede migrar por estas fracturas hacia otras formaciones e incluso contactar fuentes de agua. El tratamiento y posterior disposición del fluido que queda como resultado de la estimulación acida es el punto más crítico del uso de esta técnica.

El ultrasonido en comparación con la estimulación acida, es una técnica amigable con el medio ambiente, no necesita de ningún tipo de producto químico para su

funcionamiento. En la mayoría de las investigaciones se concluye que el ultrasonido logra recuperar la permeabilidad de la zona cercana al pozo entre un 60% y 80% lo que permite un aumento considerable en la producción.

Los equipos utilizados para generar las ondas ultrasónicas son más económicos, no necesitan grandes espacios para ubicarlos y tienen grandes ventajas adicionales ante la estimulación acida:

- No necesita permisos especiales para su utilización.
- No genera ningún tipo de residuos contaminantes que necesiten ser tratados para su disposición.
- No se ha encontrado hasta ahora restricción alguna para su implementación.

3.2 ULTRASONIDO Y EL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Sin duda el fracturamiento hidráulico o “fracking” es actualmente la técnica de estimulación más eficiente y utilizada a nivel mundial; Este método logra aumentar la producción de petróleo de 2 a 3 veces,³² para lo cual requiere el uso de costosas unidades de operación así como equipos especiales en cabeza de pozo, todo esto ocasiona que la operación sea muy costosa. Para comparar los métodos de estimulación con fraccionamiento y con ultrasonido respecto al aumento en sus tasas de producción y sus consecuencias ambientales, se citan los siguientes casos:

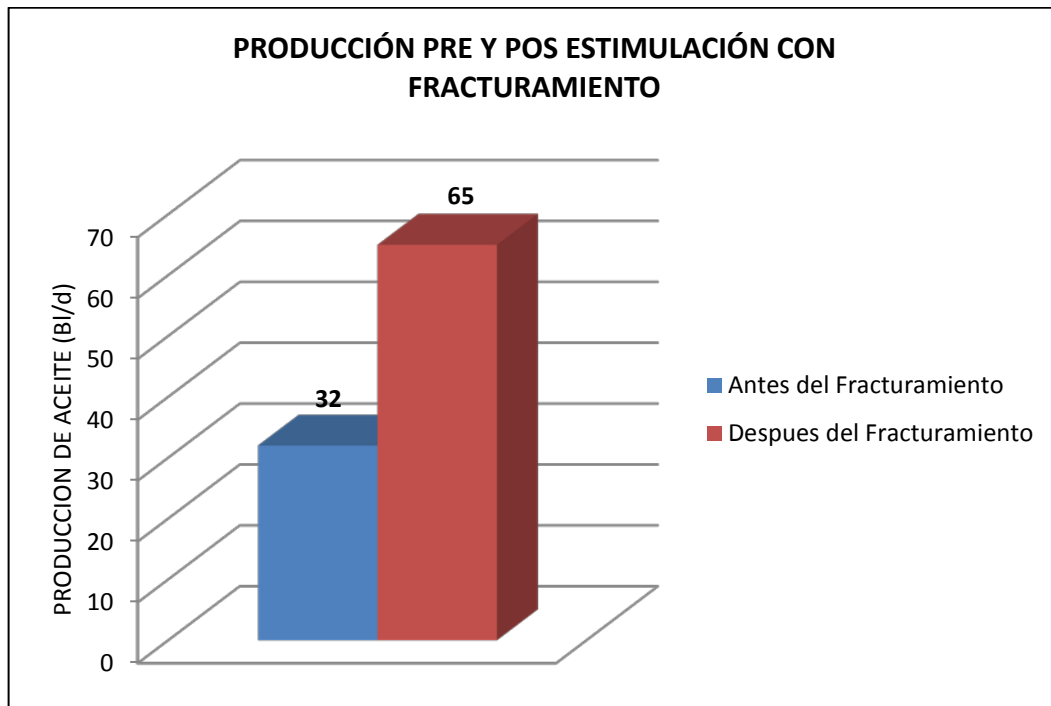
- Estimulación con fracturamiento en el campo Los Flamencos ubicado en Argentina.³³

³² *Ibid.* p. 1.

³³ [en línea] <http://www.bnamericas.com/en/news/oilandgas/antrim-ups-tierra-del-fuego-production-with-fracture-stimulation?idioma=en> [citado en marzo de 2014]

- Estimulación con ultrasonido en el campo Samotlor ubicado en Rusia.³⁴

Una estimulación con fracturamiento hidráulico fue realizada en el pozo LF-1010 del campo Los Flamencos en Argentina en el año 2011, logrando aumentar la producción de 32 BI/día a 65 BI/día, teniendo un incremento en la producción del 103%. En la gráfica 3 se presenta la producción antes y después de la estimulación con fracturamiento en dicho pozo.



Grafica 4. Producción de crudo antes y después del fracturamiento hidráulico en el pozo LF-1010 del campo Los Flamencos ubicado en Argentina.

El fracturamiento hidráulico para este caso evidencia que es un método de estimulación muy eficiente aumentando 2 veces el valor de la producción de petróleo; para el caso de la estimulación con ultrasonido realizada en el campo Samotlor en Rusia descrita anteriormente, se logra igualmente aumentar la

³⁴ ABRAMOVA, A., *Op. cit.*, p. 177-184.

producción al doble de su valor antes de la estimulación. Los dos casos presentan igual incremento de producción, por tal razón la comparación ahora se centrara en las restricciones y los problemas ambientales que cada uno puede llegar a presentar.

La discusión sobre el uso del fracking se centra en los miles de galones de agua que se necesitan y los daños ambientales que puede originar el posterior tratamiento y/o almacenamiento del fluido que fractura la roca.

El agua utilizada en este método de estimulación en muchos casos no vuelve al ciclo natural del agua, ya que se transforma en fluido contaminado al ser mezclado con productos químicos y se debe realizar un tratamiento especial para luego ser almacenado en depósitos subterráneos.

La cantidad y los tipos de químicos a utilizarse es particular para cada caso; esta información es restringida ya que los fabricantes y/o usuarios de estos productos alegan custodias empresariales para así evitar la presentación de informes de los mismos. Se cree que la inyección en pozos subterráneos del fluido para fracturamiento como método de almacenamiento puede traer graves consecuencias ambientales debido a que si se presentan fugas, puede llegar a contactar acuíferos cercanos o contaminar importantes fuentes de agua como lagos o ríos. Tanto entes gubernamentales, organizaciones ambientalistas y empresas petroleras, han realizado investigaciones al respecto, pero aún hoy en día no se ha dicho la última palabra sobre este hecho.

Al igual que en la comparación realizada con la estimulación acida, el ultrasonido propone una nueva técnica de estimulación libre de contaminantes químicos. El efecto del ultrasonido sobre el pozo y el yacimiento lleva a una mejora en la

producción entre un 60% y 100% (según diferentes experimentos y algunas pruebas de campo realizadas) y se logra por medio de dos aspectos:³⁵

- 1) Incremento en el flujo de fluidos a través del medio poroso en la cara del pozo y en la tubería de producción.
- 2) Reducción de la viscosidad del crudo.

Respecto a costos de operación, el ultrasonido es muy prometedor pues no se requiere gran cantidad de unidades de operación ni grandes espacios y se puede realizar el tratamiento mientras el pozo se encuentra produciendo. Algunos resultados de pruebas piloto concluyen, que el mismo equipo se puede llegar a utilizar en diferentes pozos con una duración del efecto de las ondas ultrasónicas aproximadamente de 15 días a un año.

En la tabla 1 se presenta en resumen la comparación del ultrasonido como técnica de estimulación y las diferentes estimulaciones convencionales.

³⁵ *Ibid.* p. 2

COMPARACIÓN	ESTIMULACIÓN		
	ACIDA	FRACTURAMIENTO HIDRAULICO	ULTRASONIDO
AUMENTO DE PRODUCCIÓN	Entre el 90% y 100%	Alrededor del 100%	Entre el 90% y 100%
PROBLEMAS AMBIENTALES	<p>Permisos especiales gubernamentales para el uso de ciertos químicos tóxicos</p> <p>Tratamiento y disposición del fluido residuo de estimulación</p> <p>Limitación en formaciones naturalmente fracturados</p> <p>Alteración en el hábitat y fauna silvestre</p>	<p>Esta técnica está prohibida en algunos lugares y países a nivel mundial</p> <p>Miles de galones de agua son necesarios para aplicar la técnica</p> <p>Tratamiento y disposición del fluido residuo de estimulación</p> <p>Uso de químicos tóxicos</p> <p>Alteración en el hábitat y fauna silvestre</p>	<p>No se necesitan permisos especiales para aplicar esta técnica</p> <p>No genera ningún tipo de residuos contaminantes</p> <p>No se necesitan ningún tipo de químicos</p> <p>No necesita ningún tipo de fluido adicional a los que tiene el pozo</p>
COSTO/BENEFICIO	<p>Uso de químicos altamente costosos</p> <p>Altos costos en el tratamiento y la disposición del fluido residuo de estimulación</p> <p>Altos costos operacionales</p> <p>Requiere mayor espacio y equipos para su implementación</p> <p>Se debe detener la producción para realizar la estimulación</p>	<p>Uso de químicos altamente costosos</p> <p>Altos costos en el tratamiento y la disposición del fluido residuo de estimulación</p> <p>Altos costos operacionales</p> <p>Requiere mayor espacio y equipos para su implementación</p> <p>Se debe detener la producción para realizar la estimulación</p>	<p>Equipos de bajo costo</p> <p>No requiere grandes espacios ni equipos para su implementación</p> <p>Bajos costos operacionales</p> <p>No existen costos por uso de químicos, ni por tratamiento de residuos</p> <p>Se puede realizar la estimulación con pozos de flujo libre durante la producción</p>

Tabla 1. Comparación del ultrasonido como técnica de estimulación y las estimulaciones convencionales.

4. CASOS ESTUDIO DEL ULTRASONIDO COMO TÉCNICA DE ESTIMULACIÓN PARA ELIMINACIÓN DE ESCAMAS

Los métodos utilizados hoy en día para mantener o aumentar la producción de petróleo, incluyen el uso y tratamiento de costosos químicos con restricciones, debido a las consecuencias sociales y ambientales que el manejo de estos puede ocasionar, lo cual es un dolor de cabeza para las compañías petroleras. Valiosas investigaciones se han realizado con el fin de encontrar nuevas técnicas de estimulación que ayuden en la producción de hidrocarburos y renueven sus procesos para convertirlos en prácticas seguras para con los trabajadores y el medio ambiente.

Una de las técnicas propuestas con cuantiosos estudios es el ultrasonido; con aproximadamente 50 años de investigación y gran cantidad de pruebas piloto en diferentes campos petroleros del mundo, hacen de este probablemente el nuevo método de estimulación a implementarse en el futuro cercano.

A continuación se describen dos investigaciones de laboratorio destacadas, realizadas para el entendimiento de los efectos causados por el ultrasonido en la remoción de escamas de sulfato y carbonato de calcio, y se presentan las observaciones encontradas en cada una de ellas.

4.1 CASO 1: REMOCIÓN DE ESCAMAS DE SULFATO DE CALCIO: YESO

En el estudio realizado por Hartwing Kunanz y Silvia Wölfel presentado en el artículo "Scale Removal with Ultrasonic Waves" publicado por la SPE en el año 2014, se explica inicialmente cómo se crearon artificialmente en laboratorio escamas de yeso (debido al fácil manejo y fabricación) colocadas en tubos de

acero divididos en la mitad del diámetro, todo esto para representar las propiedades geométricas que se encuentran en un pozo productor.

Las escamas de yeso se obtuvieron mediante la mezcla de yeso comercialmente disponible y agua sin tratamiento alguno, es decir agua de grifo. Una vez lista esta mezcla, procedieron a sumergir el tubo en ella y repitieron este procedimiento para varios tubos (24) de iguales características en cuanto al material y diámetro; posteriormente las muestras fueron secadas en el laboratorio bajo condiciones controladas de presión y temperatura. El tiempo para la preparación de las muestras en laboratorio fue relativamente corto en comparación con los resultados que se podrían obtener en campo debido al control existente de temperatura y presión.

El equipo utilizado fue un dispositivo ultrasónico DG 2000 de la empresa suiza Telsonic AG. La frecuencia con la que opero este equipo fue alrededor de 20 KHz con una potencia máxima de 2 KW, la amplitud fue ajustada entre 50 y 100 %, generando ondas ultrasónicas en base al efecto piezoeléctrico, por lo cual la frecuencia de operación no fue ajustada ya que esta dependía del material piezoeléctrico utilizado en el transductor. La amplitud fue establecida en un valor fijo, y la potencia fue registrada a cada minuto de exposición al ultrasonido.



Figura 9. Transductor con enfriador de agua y sonotrodo³⁶

³⁶ KUNANZ, H., et al. "Scale Removal with Ultrasonic Waves". Artículo en: SPE 169770-MS, p 3, 2014. (Modificado)

En la figura 9 se observan parte de los instrumentos utilizados para el experimento realizado, se señalan el llamado sonotrodo que es el responsable del transporte de la onda vibratoria desde el transductor hasta el fluido utilizado; El transductor que es el encargado de convertir la energía eléctrica en energía mecánica; también se observa un enfriador de agua para evitar el sobrecalentamiento del material piezoeléctrico en el transductor.

El equipo completo se puede apreciar en la figura 10, donde se encuentra un cilindro de acero con agua de grifo que facilita el funcionamiento del dispositivo ultrasónico, dentro de este se encuentra también el sonotrodo. Igualmente se observa el generador que produce pulsos eléctricos de corta duración, el enfriador de agua, un recipiente de almacenamiento de agua y el equipo de ultrasonido.



Figura 10. Equipos de ultrasonido para los experimentos con flujo³⁷

Una vez ajustados los parámetros en el generador y preparadas las muestras, se establecieron el tiempo de duración y la amplitud de acuerdo con el diseño experimental. El experimento se dividió en dos partes, la primera fue sin flujo de agua en la que se llenó cada cilindro con 2,2 litros de agua, se atornilló el sonotrodo en el cilindro y se encendieron el enfriador de agua y el dispositivo de ultrasonido, la temperatura exterior del cilindro era revisada para evitar

³⁷ *Ibid.* p. 4 (Modificado)

sobrecalentamiento; finalmente se realizó el desmontaje del equipo, se vació el agua que se encontraba en el cilindro, se sacó la muestra del cilindro y se colocó a secar para observar los cambios y resultados.

La segunda parte del experimento se realizó con agua fluyendo gracias al bombeo del fluido por medio de una pequeña bomba capaz de rotar un caudal de 5,5 L/min, en estas pruebas con fluido se realizó el mismo montaje descrito anterior, con el sonotrodo atornillado al cilindro, se conectó la bomba y se encendió. El recipiente de depósito de agua o contenedor de agua fue llenado con un volumen de 60 Litros de agua de grifo, tan pronto se llenó el cilindro se observó la temperatura exterior del mismo y se enciendo el dispositivo ultrasónico, se verifico nuevamente la temperatura exterior del cilindro, al finalizar se desmonto el equipo para sacar la muestra y colocarla a secar.

EXPERIMENTOS SIN FLUJO				
EXPERIMENTO N°	REFERENCIA	AMPLITUD (%)	TIEMPO (min)	FLUJO (L/min)
1	V 37	100	5	0
3	V 39	50	10	0
6	V 42	50	10	0
7	V 43	50	10	0
11	V 47	100	5	0
12	V 48	100	5	0
13	V 49	50	5	0
17	V 53	100	10	0
20	V 56	100	10	0
21	V 57	100	10	0
22	V 58	50	5	0
23	V 59	50	5	0

Tabla 2. Parámetros de diseño experimental sin flujo³⁸

Los parámetros experimentales para las pruebas realizadas sin el flujo y con el flujo de fluido se presentan en las tablas 1 y 2 respectivamente para un total de 24

³⁸ *Ibid. p. 4 (Modificado)*

pruebas de laboratorio. Las pruebas fueron divididas en subgrupos de 3 experimentos para observar la eficiencia en la remoción de escamas al variar parámetros como el tiempo, la amplitud y la presencia de flujo de fluido.

EXPERIMENTOS CON FLUJO				
EXPERIMENTO N°	REFERENCIA	AMPLITUD (%)	TIEMPO (min)	FLUJO (L/min)
2	V 38	50	5	5.5
4	V 40	50	5	5.5
5	V 41	100	10	5.5
8	V 44	50	5	5.5
9	V 45	100	10	5.5
10	V 46	100	10	5.5
14	V 50	100	5	5.5
15	V 51	50	10	5.5
16	V 52	50	10	5.5
18	V 54	100	5	5.5
19	V 55	50	10	5.5
24	V 60	100	5	5.5

Tabla 3. Parámetros de diseño experimental con flujo³⁹

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos en la remoción de escamas durante los 24 ensayos prácticos realizados por Hartwing Kunanz y Silvia Wölfel, el efecto de la limpieza esta dado en porcentaje de limpieza gravimétrica debido a que se obtuvo mediante la diferencia de peso de las muestras antes y después del tratamiento con ultrasonido, es decir se pesó para cada ensayo el tubo de acero antes y después de agregarle las escamas de yeso para una vez expuestos al tratamiento, calcular la diferencia másica y obtener el porcentaje de limpieza gravimétrico.

³⁹ *Ibid. p. 4 (Modificado)*

RESULTADOS			
REFERENCIA	EFEECTO DE LIMPIEZA GRAVIMETRICA [%]	POTENCIA [W]	AUMENTO DE TEMPERATURA (°C)
V 40	18.90	279	0.20
V 38	22.50	246	0
V 44	25.60	242	0.70
V 43	46.90	307	12.70
V 42	47.50	297	13.00
V 59	49.30	322	7.10
V 58	51.40	314	6.40
V 52	52.50	244	0.70
V 39	53.90	593	12.60
V 49	59.20	317	6.60
V 54	60.70	787	0
V 37	66.00	799	16.40
V 55	71.70	286	1.60
V 60	72.70	782	1.30
V 51	74.30	260	0.70
V 47	74.60	795	16.60
V 45	76.40	781	2.60
V 46	82.50	810	3.00
V 50	84.20	777	1.90
V 48	87.50	775	16.70
V 53	92.20	768	30.20
V 41	96.10	801	2.80
V 56	100	766	30.70
V 57	100	751	31.70

Tabla 4. Resultados de la prueba de eliminación de escamas de sulfato de calcio en tubería utilizando el ultrasonido⁴⁰

⁴⁰ *Ibid.* p. 7 (Modificado)

4.2 CASO 2: REMOCIÓN DE ESCAMAS DE CARBONATO DE CALCIO

La investigación de Pu Chunsheng, et al. publicada en el 2011 y realizada para el Instituto de Investigación de Exploración y Desarrollo del Petróleo, PetroChina, llevo a cabo experimentos de laboratorio en los cuales se realizó la remoción de escamas de carbonato de calcio por medio de tratamiento de estimulación ultrasónico en núcleos, analizando parámetros como la frecuencia, la intensidad del sonido, el tiempo de exposición y los cambios que producen estos en la permeabilidad.

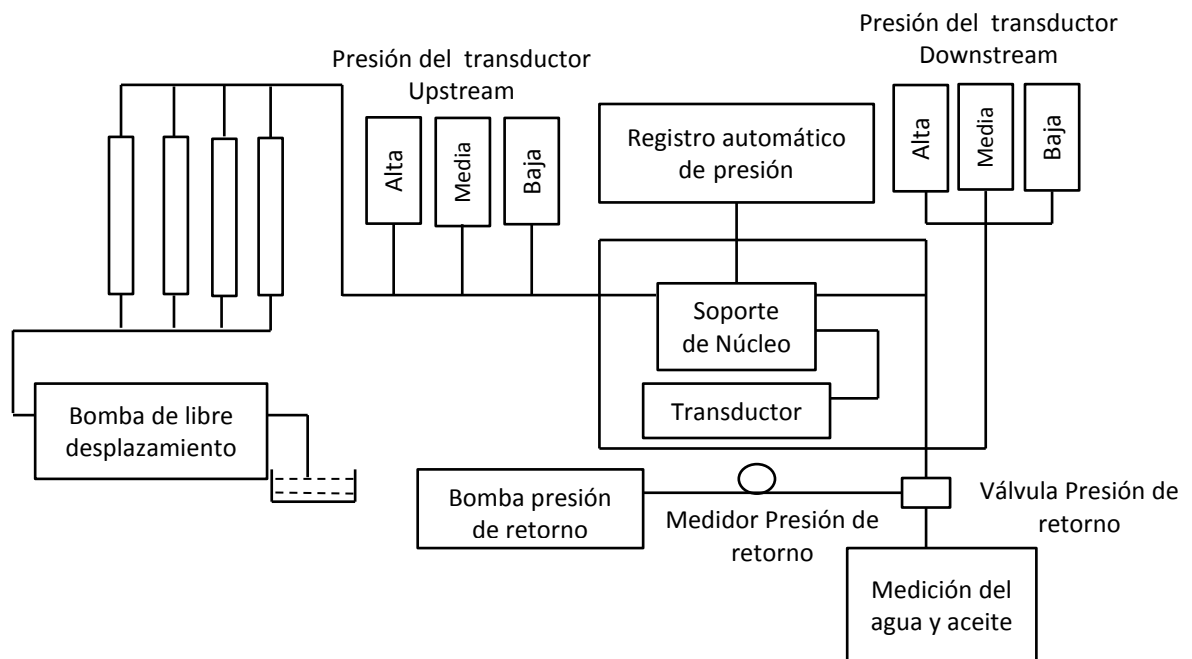


Figura 11. Sistema de simulación de extracción dinámica de flujo con ultrasonido⁴¹

Para las pruebas de laboratorio, se simulo un sistema basado en los principios y mecanismos de la extracción de petróleo, así como la presión y temperatura de la formación. Igualmente, se utilizó alta tecnología de transductores e informática que logro determinar el impacto de las ondas ultrasónicas en propiedades físicas y

⁴¹ CHUNSHENG, P., et al. "Technology of removing near wellbore inorganic scale damage by high power ultrasonic treatment". Artículo en: ScienceDirect, publicado por: PETROL. EXPLOR.DEVELOP., 2011, 38(2) p.243-248. (Modificado)

químicas de la roca, en las escamas y los fluidos que se encuentran en el medio poroso de la zona cercana a la cara del pozo.

El sistema incluye un módulo de ondas ultrasónicas, bomba de libre desplazamiento, contenedor intermedio, sistema de válvulas y el módulo de seguimiento automático para la presión de confinamiento (Figura 11). En el módulo de ondas ultrasónicas se encuentra el núcleo, que se utiliza para simular el tratamiento ultrasónico en la cercanía del pozo mediante el transductor piezoeléctrico, al cual llegan las señales eléctricas de alta frecuencia generadas por el generador de ultrasonidos transformándolas en señales ultrasónicas. Se utilizaron en estas pruebas seis tipos de transductores, como se relacionan en la tabla 4, para lograr determinar el rendimiento de cada uno de ellos en la remoción de escamas.

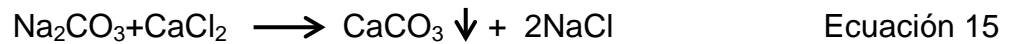
Transductor	Frecuencia (kHz)	Potencia (W)
1	18	1000
2	22	1000
3	25	1000
4	30	60
5	40	60
6	50	200

Tabla 5. Parámetros de los transductores ultrasónicos utilizados en las pruebas⁴²

Los materiales utilizados en esta prueba incluían NaCl, KCl, MgC₁₂, Na₂CO₃, y CaCl₂ y la presión de confinamiento de 0 – 50 MPa. Los núcleos que se utilizaron de diámetro 2,5 cm y longitud de 7 - 8 cm, clasificados en tres grupos de acuerdo a la permeabilidad del gas: 30×10⁻³ μm², 80×10⁻³ μm² y 150×10⁻³ μm²; con una porosidad en los núcleos de 18,9% - 21,9% y la salinidad de la salmuera de 20000 mg/L con fórmula de NaCl: CaCl₂: MgCl₂·6H₂O=7: 0.6: 0.4.

⁴² *Ibid.* 243-248 (Modificado)

Para realizar las pruebas, previamente se determinó la permeabilidad inicial del fluido (K_i) en los núcleos saturados con salmuera y sometidos a presión de confinamiento; se incito la formación de escamas de carbonato de calcio en los núcleos con la siguiente reacción química:



Con la anterior fórmula, se prepararon soluciones en laboratorio de carbonato de sodio y cloruro de calcio con fracción en masa de 20% y 21% respectivamente.

Permeabilidad del gas (mD)	Transductor	K_i (mD)	K_d (mD)	K_t (mD)	$[(K_t - K_d)/K_i]/\%$
30	1	20,77	11,91	18,37	31,10
	2	21,1	9,98	17,17	34,08
	3	20,03	11,49	18,15	33,25
	4	19,84	10,83	12,78	9,83
	5	21,6	10,74	12,61	8,66
	6	21,03	10,15	12,31	10,27
80	1	62,37	36,28	56,07	31,73
	2	56,93	32,38	53,02	36,26
	3	61,82	32,52	52,57	32,43
	4	66,71	35,49	41,95	9,68
	5	59,2	35,22	39,75	7,65
	6	64,42	34,44	41,48	10,93
150	1	108,16	60,76	94,88	31,55
	2	111,81	55,3	97,04	37,33
	3	111,76	62,94	101,41	34,42
	4	122,13	58,29	71,24	10,60
	5	125,69	64,31	76,81	9,95
	6	123,33	59,72	75,64	12,91

Tabla 6. Resultados de la prueba de eliminación de escamas de carbonato de calcio en núcleos utilizando el ultrasónico⁴³

⁴³ *Ibid.* 243-248 (Modificado)

Una vez formadas las escamas, se determinó la permeabilidad (Kd) de los núcleos nuevamente. Iniciaron el proceso de tratamiento con ultrasonido utilizando el transductor N°1 con un descanso de 5 minutos por cada 10 minutos de estimulación hasta alcanzar 60 minutos; luego se determinó la permeabilidad (Kt) de los núcleos después del tratamiento. Repitieron el mismo procedimiento para los otros transductores y calcularon la recuperación de la permeabilidad $((Kt - Kd) / Ki)$ como un índice para determinar el transductor ultrasónico con el mejor rendimiento en la eliminación de escamas.

Los resultados que obtuvo Pu Chunsheng, et al., durante este procedimiento se pueden observar en la Tabla 4. El transductor N°2 tiene los mejores resultados en cuanto a la eliminación de escamas y mejoramiento de la permeabilidad para los tres casos de núcleos presentados con permeabilidad del gas: $30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ y $150 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, con un índice de recuperación de permeabilidad del 34,1%, 36,3% y 37,3% respectivamente.

4.3 OBSERVACIONES GENERALES

CASO 1: En la tabla 3 se observan el efecto de limpieza obtenido en cada ensayo para la remoción de escamas de sulfato de calcio, la potencia utilizada, y los valores de temperatura; se puede ver que con un porcentaje de 18,90% el experimento registrado como V40 arrojó el menor resultado de limpieza, esto puede ser debido a que la amplitud y el tiempo tienen los valores más bajos y en presencia de flujo, mientras el mayor porcentaje de limpieza fue de 100% para la muestra V57, la cual contó con una amplitud de 100% un tiempo de exposición al ultrasonido de 10 minutos y sin flujo de agua.

Se podría entonces deducir que los factores que más influyeron en estas pruebas al momento de obtener mejores resultados en limpieza de escamas de yeso en

tubería por medio de la técnica de ultrasonido son definitivamente la amplitud y el tiempo de exposición.

En la figura 12 se ve una clara diferencia antes y después del tratamiento para la muestra V38 que se manejó con una potencia de 246 [W], un tiempo de exposición al ultrasonido de 5 minutos y una amplitud de 50%, tal vez si la amplitud hubiese sido mayor, muy probablemente los resultados hubiesen sido más notorios en la remoción de la escama de yeso, sin embargo a pesar del corto tiempo de exposición al ultrasonido y de la poca amplitud se evidencia que la técnica de ultrasonido para remoción de escamas si funciona y tiene un vínculo directo con la amplitud y tiempo.

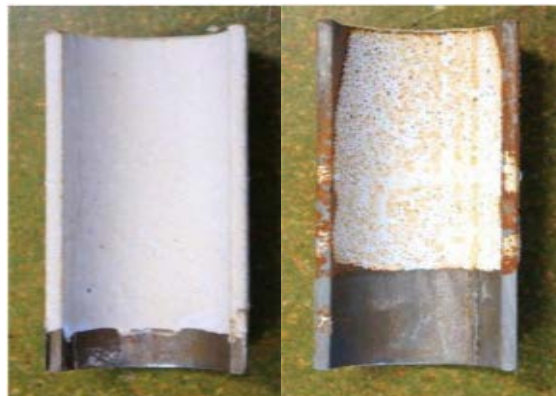


Figura 12. Muestra V38 antes y después del tratamiento con ultrasonido.⁴⁴

La anterior lo podemos evidenciar en la figura 13 donde se analiza la muestra V57 antes y después del tratamiento con ultrasonido, con un resultado sorprendente ya que la limpieza tiene una efectividad del 100% debido al tiempo de exposición y la amplitud suministrada a la muestra.

⁴⁴ KUNANZ, H., *Op. cit.*, p. 5-6.



Figura 13. Muestra V57 antes y después del tratamiento con ultrasonido.⁴⁵

El flujo por el contrario tuvo un impacto negativo en la eficacia de la limpieza, pero no incide en la misma magnitud que lo hace la amplitud. A continuación en la tabla 6 se detallan con mayor especificación los resultados obtenidos.

RESULTADOS			
REFERENCIA	EFEECTO DE LIEMPIEZA GRAVIMETRICA [%]	POTENCIA [W]	AUMENTO DE TEMPERATURA
V 40	18.90	279	0.20
V 38	22.50	246	0
V 44	25.60	242	0.70
V 43	46.90	307	12.70
V 42	47.50	297	13.00
V 59	49.30	322	7.10
V 58	51.40	314	6.40
V 52	52.50	244	0.70
V 39	53.90	593	12.60
V 49	59.20	317	6.60
V 54	60.70	787	0
V 37	66.00	799	16.40
V 55	71.70	286	1.60
V 60	72.70	782	1.30
V 51	74.30	260	0.70
V 47	74.60	795	16.60
V 45	76.40	781	2.60
V 46	82.50	810	3.00
V 50	84.20	777	1.90
V 48	87.50	775	16.70
V 53	92.20	768	30.20
V 41	96.10	801	2.80
V 56	100	766	30.70
V 57	100	751	31.70

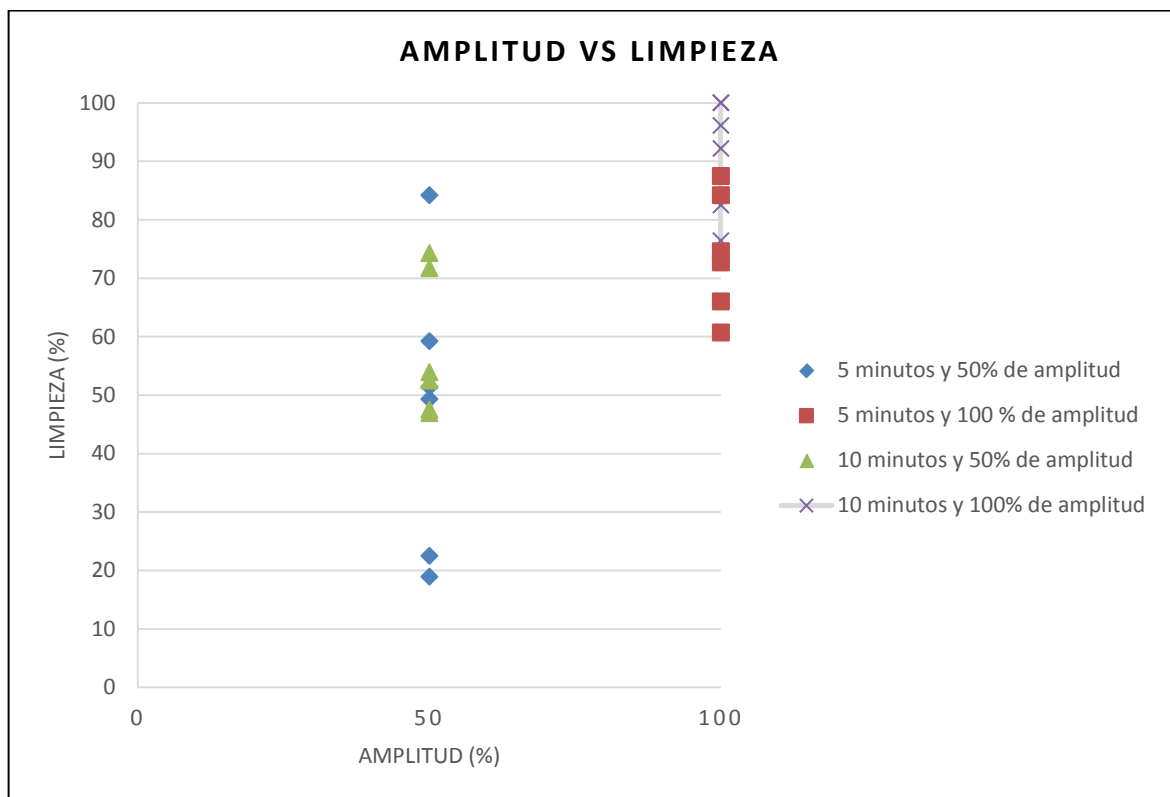
SIN FLUJO DE AGUA		
COLOR	AMPLITUD [%]	TIEMPO [min]
Green	100	5
Purple	100	10
Cyan	50	5
Grey	50	10

CON FLUJO DE AGUA		
COLOR	AMPLITUD [%]	TIEMPO [min]
Brown	100	5
Red	100	10
Yellow	50	5
Orange	50	10

Tabla 7. Análisis de los resultados obtenidos de la prueba de eliminación de escamas de sulfato de calcio en tubería utilizando el ultrasonido.

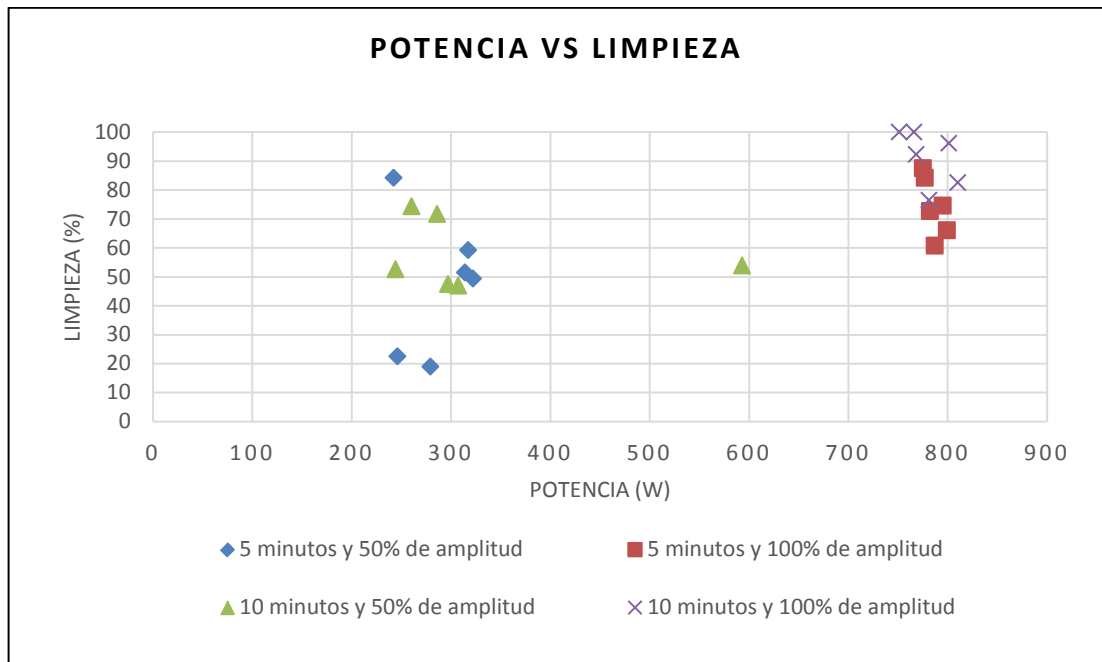
⁴⁵ *Ibid.* P 5-6.

A mayor amplitud y tiempo de exposición al ultrasonido se obtiene la mejor respuesta en la eliminación de escamas, esto se puede evidenciar en la gráfica 1, en donde se ve claramente que el mayor porcentaje de limpieza obtenido fue alcanzado cuando se dio el máximo tiempo (10 minutos) y 100% de amplitud, también se observa que a pesar de un corto tiempo de exposición y a la mayor amplitud posible, la respuesta en la eliminación de la escama es muy favorable por ejemplo el mínimo porcentaje de limpieza con corto tiempo y máxima amplitud fue dado por muestra V54 con un 60,7 % de remoción de escama.

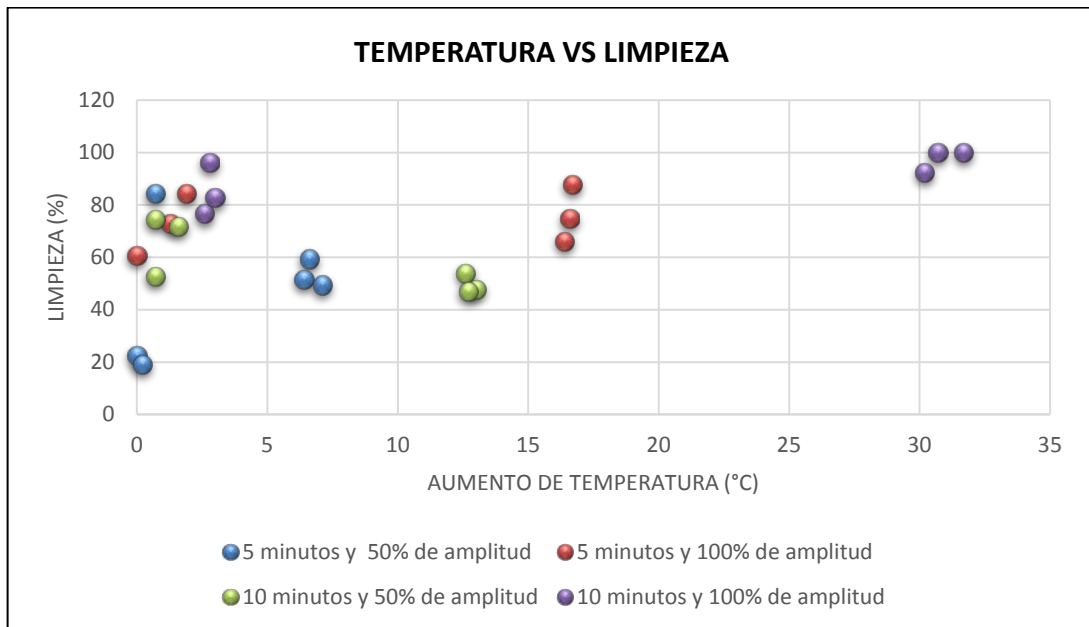


Grafica 5. Amplitud y Limpieza de escamas de sulfato de calcio.

En cuanto a la potencia en la gráfica 2 se observa el mismo comportamiento de la amplitud, debido a que la potencia y la amplitud son dos variables directamente proporcionales.



Grafica 6. Potencia y Limpieza de escamas de sulfato de calcio.

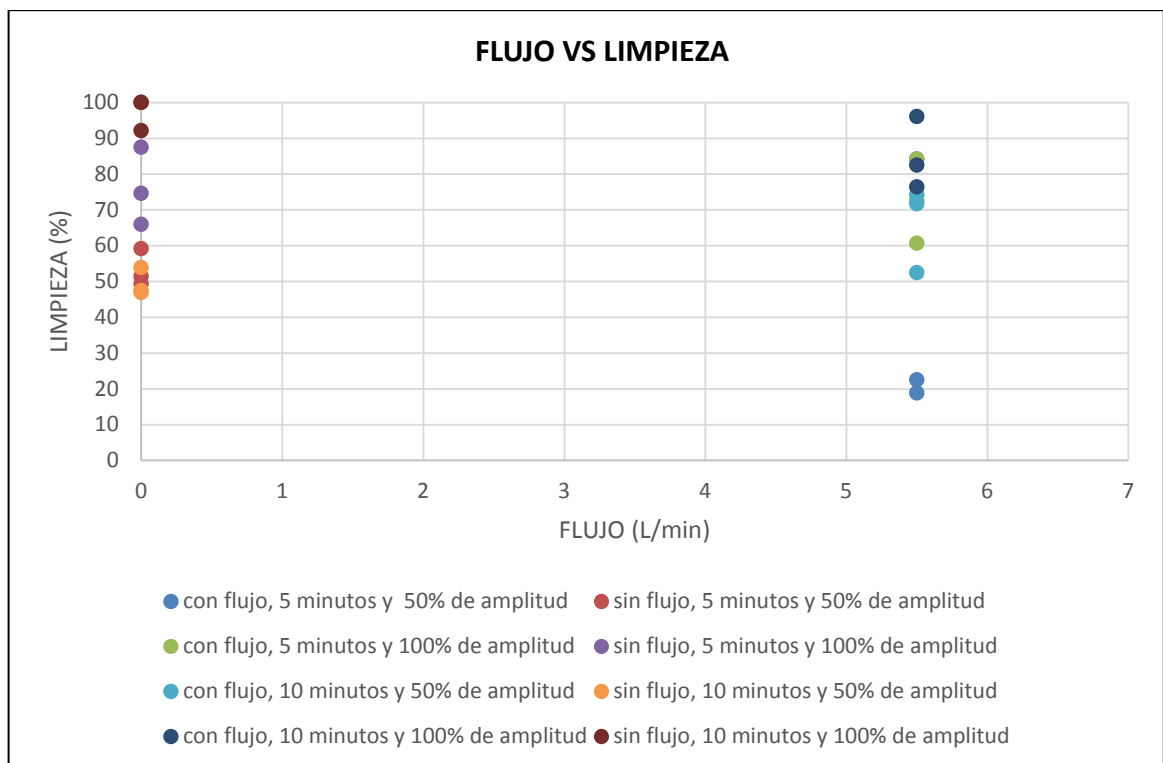


Grafica 7. Temperatura y Limpieza de escamas de sulfato de calcio.

Para el análisis de la incidencia de la temperatura, en la gráfica 3 se ve que a mayor amplitud y tiempo mayor aumento en la temperatura, esto es debido al

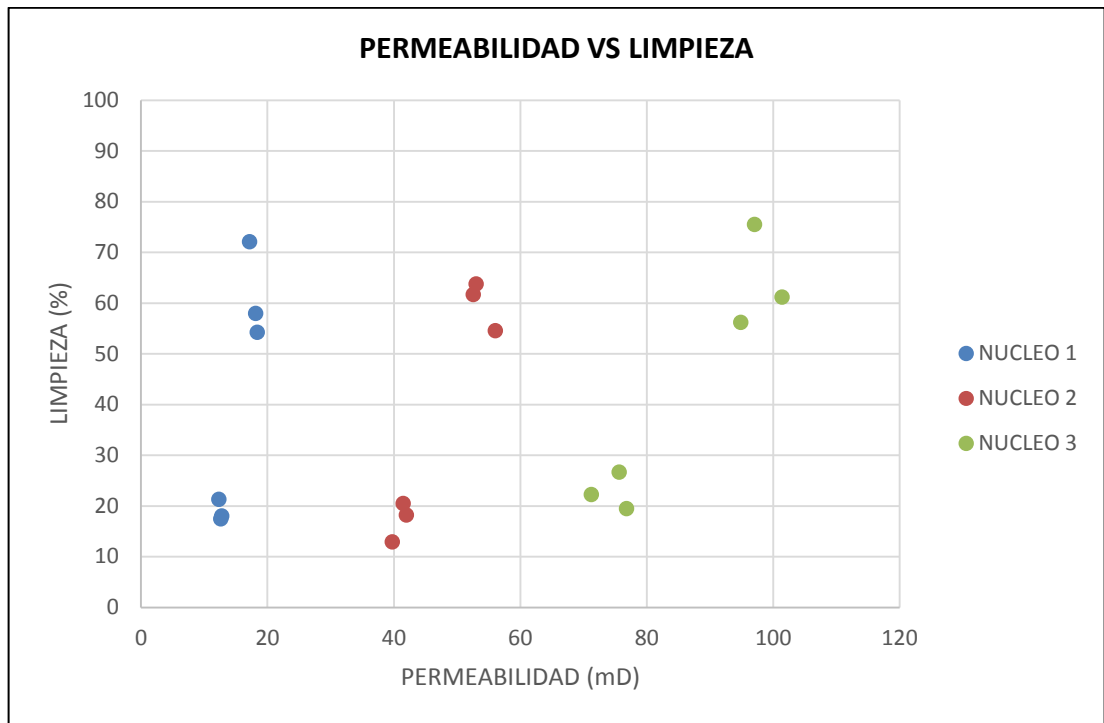
efecto vibratorio causado por la onda ultrasónica, sin embargo un aumento en la temperatura no implica que la remoción de escamas sea mayor.

Respecto a la presencia de flujo, este puede disminuir la eficacia en la remoción de escamas pero no imposibilita la remoción de escamas, esto se puede observar en la gráfica 4, donde nuevamente el parámetro más importante es la amplitud.

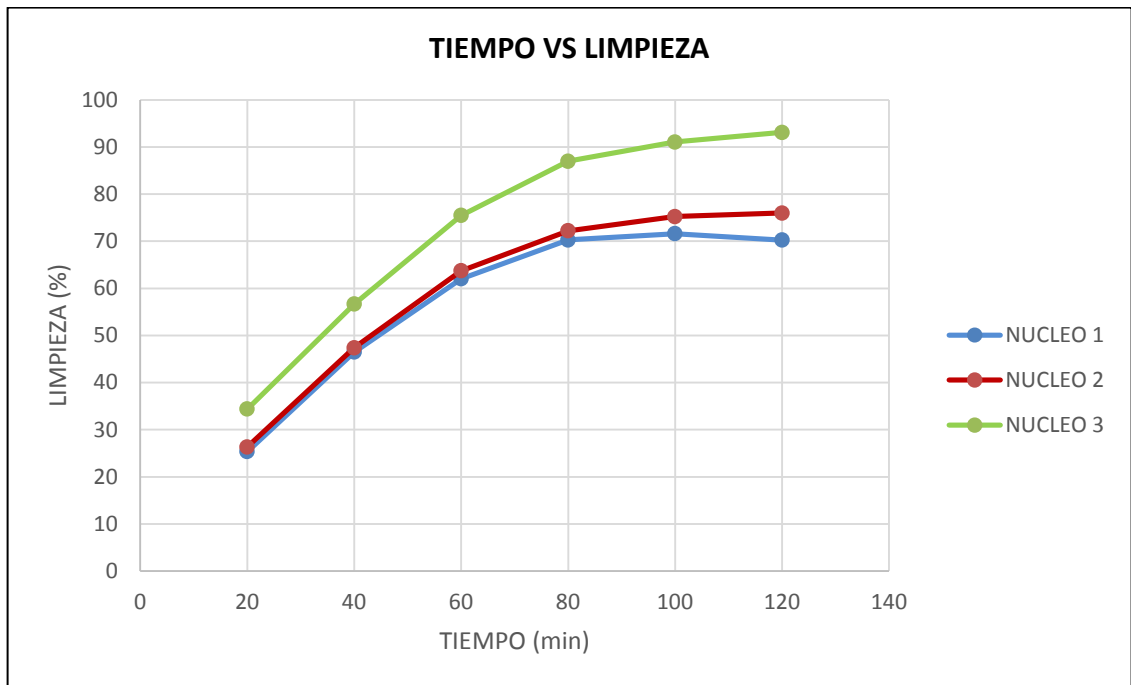


Grafica 8. Flujo y Limpieza de escamas de sulfato de calcio.

CASO 2: En la gráfica 5 se observa el cambio de la permeabilidad del gas en cada núcleo en relación a los seis transductores utilizados; el núcleo que presenta inicialmente alta permeabilidad es el que obtiene los mejores resultados en cuanto a la eliminación de las escamas de carbonato de calcio. Estos resultados coinciden con los de diversas investigaciones encontradas en la literatura, en los que se concluye que a mayor permeabilidad mejor es la acción de las ondas ultrasónicas en la eliminación de las micropartículas que obstaculizan el flujo.



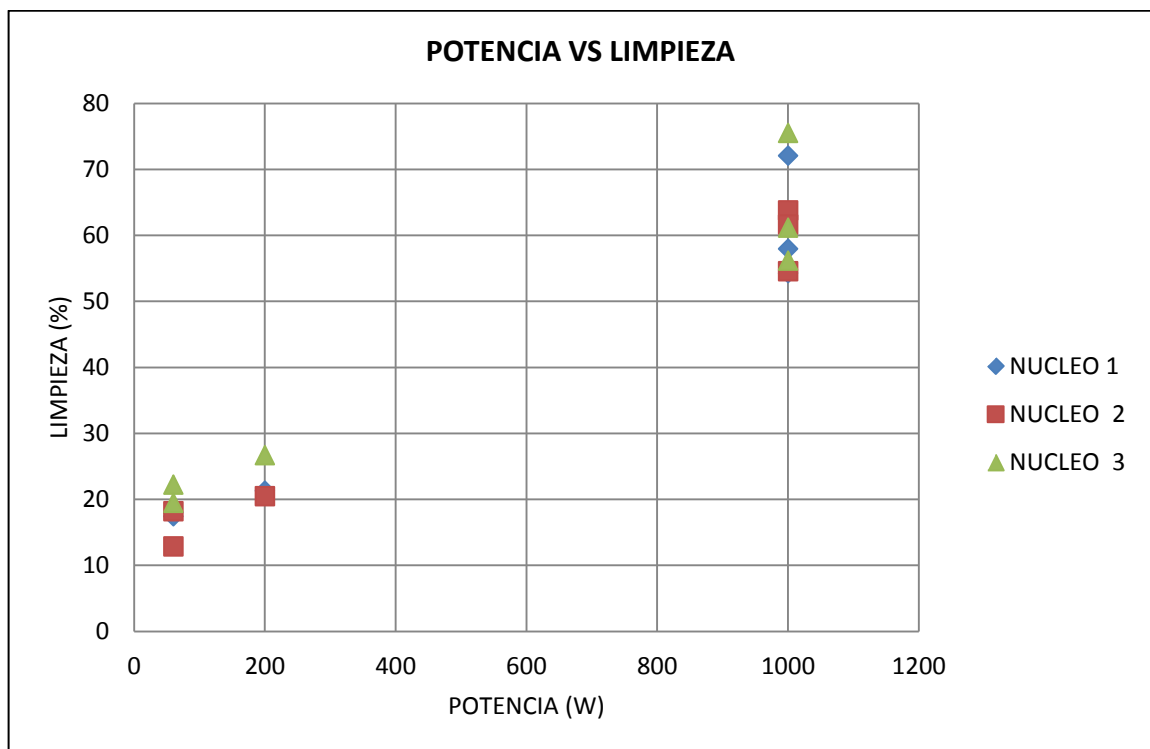
Grafica 9. Permeabilidad y Limpieza de escamas de carbonato de calcio.



Grafica 10. Tiempo y Limpieza de escamas de carbonato de calcio con el transductor N°2.

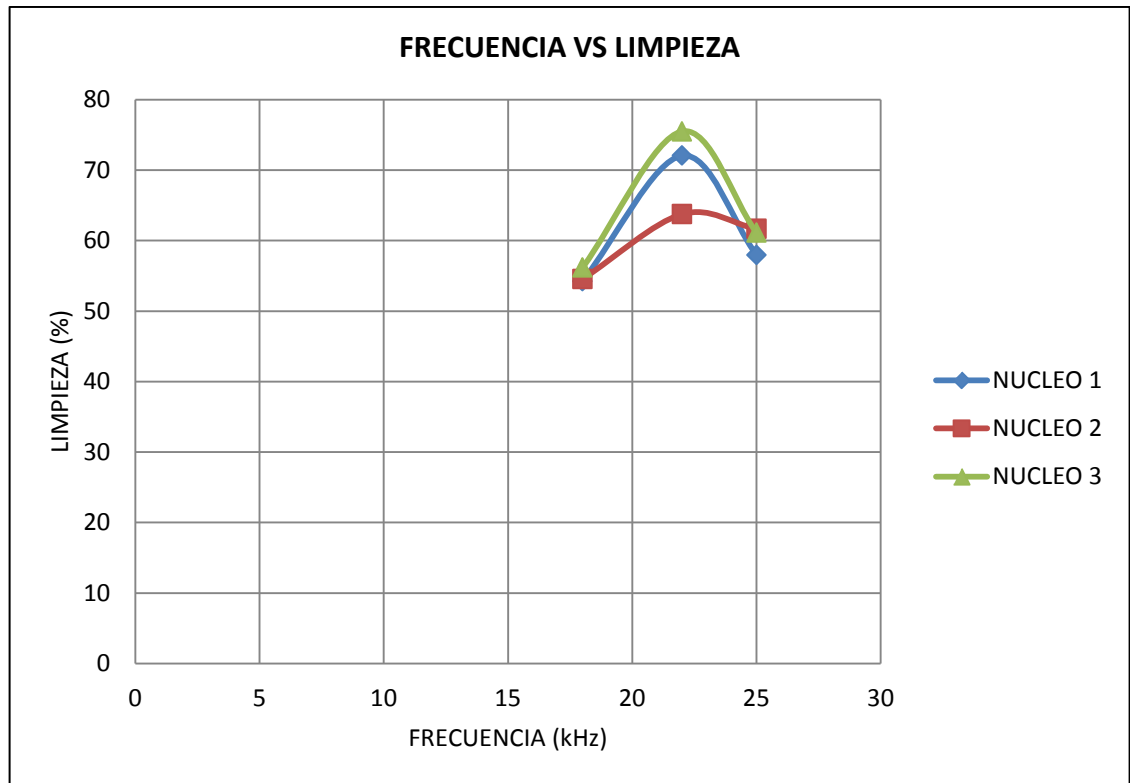
Al analizar el efecto del tiempo en la eliminación de escamas para el transductor N°2 presentado en la gráfica 6, se observa claramente que durante los primeros 60 min se logra obtener un importante porcentaje de limpieza; durante los siguientes 60 min trata de mantenerse este porcentaje antes alcanzado, hasta que al finalizar en 120 min se estabiliza logrando el máximo valor del porcentaje de limpieza. Una vez más se destaca la alta eficiencia en la eliminación de escamas del núcleo con mayor permeabilidad.

En relación con el efecto de la potencia, se puede observar en la gráfica 7 una mejor eficiencia de eliminación de escamas en los transductores N° 1, N° 2 y N° 3 los cuales tienen la mayor potencia con 1000 W cada uno. Los transductores N ° 4 y N ° 5 presentan la más baja potencia con 60 W cada uno y así mismo el más bajo porcentaje de limpieza. Se continúa marcando la tendencia del núcleo con mayor permeabilidad como el que presenta un mejor porcentaje de limpieza.



Gráfica 11. Potencia y Limpieza de escamas de carbonato de calcio

Para determinar el efecto de la frecuencia, se toman los transductores N° 1, N° 2 y N° 3, los cuales utilizaron el mismo valor de potencia de 1000 W. En la gráfica 8 se puede analizar que en el que presenta un mejor porcentaje de limpieza en primer lugar es el transductor N° 2 con un valor de frecuencia de 22 kHz, en segundo lugar está el transductor N°3 con una frecuencia de 25 kHz y por último el transductor N°1 con una frecuencia de 18 kHz. En otras investigaciones concluyen que una mayor frecuencia puede generar un mejor efecto en la eliminación de las escamas que obstaculizan el flujo, contrario a los resultados aquí planteados; se requieren más estudios sobre el efecto de la frecuencia en la eliminación de escamas para tener claridad sobre este aspecto.



Grafica 12. Frecuencia y Limpieza de escamas de carbonato de calcio

5. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA DE LA ESTIMULACIÓN CON ULTRASONIDO PARA REMOCIÓN DE ESCAMAS: RESULTADOS CASOS ESTUDIO

En el análisis realizado a las pruebas de laboratorio de remoción de escamas de sulfato de calcio: yeso (caso 1) y remoción de escamas de carbonato de calcio (caso 2), las variables que influyen en los resultados obtenidos en las pruebas son la potencia, la cual es directamente proporcional a la amplitud, y el tiempo de exposición de la onda ultrasónica; a continuación se analizan dichos parámetros.

5.1 LA POTENCIA EN LA REMOCIÓN DE ESCAMAS DE SULFATO Y CARBONATO DE CALCIO POR MEDIO DEL ULTRASONIDO

La cavitación producida por la aplicación de ondas ultrasónicas en presencia de fluidos es quien permite la ruptura mecánica de material particulado sólido en la matriz de la roca alrededor del pozo; pero para producir este fenómeno es necesario tener una potencia determinada la cual es responsable junto con la amplitud de la penetración de la onda en el medio.

En el caso de tratamientos para eliminación de escamas de sulfato y carbonato de calcio por medio del ultrasonido se evidencio que entre mayor fue la potencia suministrada mejores fueron los resultados en la limpieza; esto sucedió tanto para limpieza en tubería como en medio poroso, aun cuando estos medios son completamente diferentes debido a su estructura y propiedades se concluyen en ambos que:

- A mayor potencia, mayor efectividad en la remoción de escamas.
- La cantidad de potencia suministrada para eliminar las escamas dependió del equipo ultrasónico, en especial de los transductores piezoeléctricos empleados.

- Existe una relación directa entre la potencia y la amplitud, ya que la potencia acústica viene determinada por la propia amplitud de la onda, pues cuanto mayor será la amplitud de la onda, mayor será la cantidad de energía (potencia).

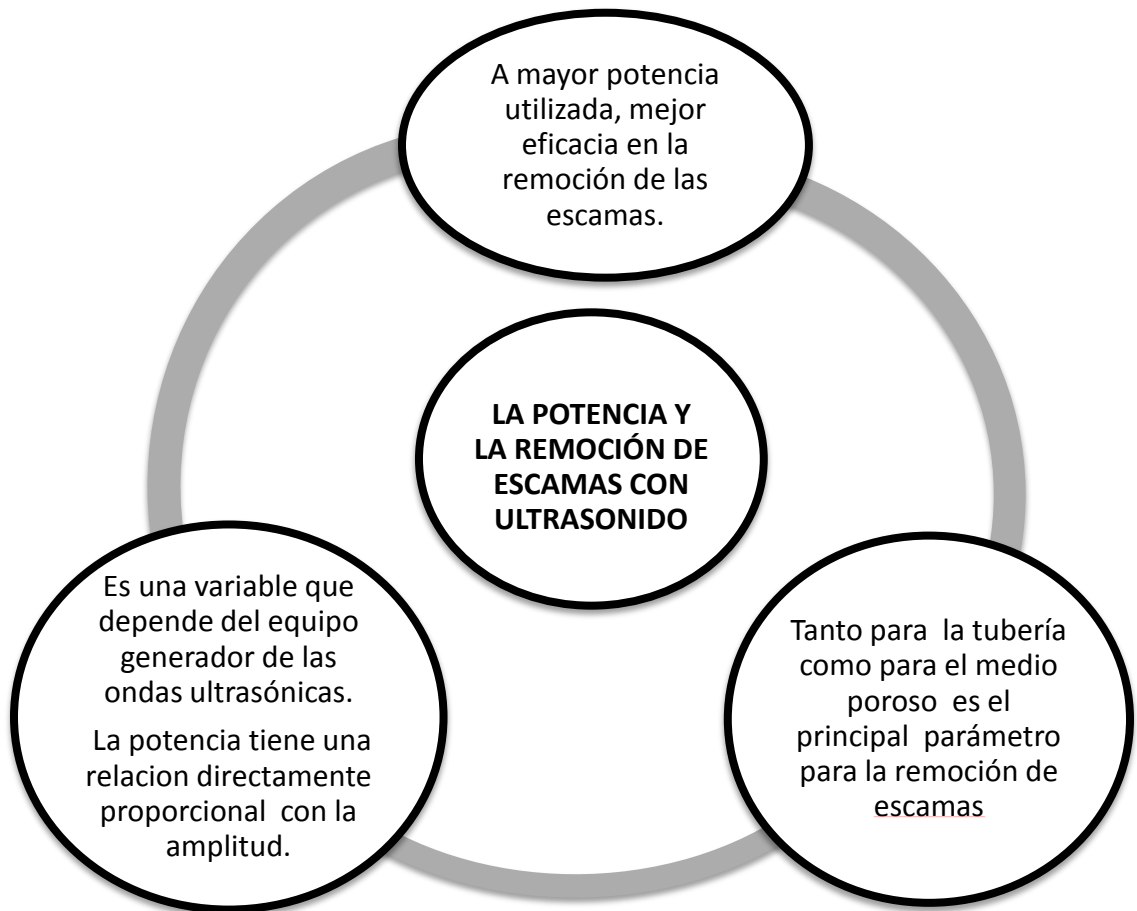


Figura 14. La potencia y la eliminación de escamas.

5.2 EL TIEMPO EN LA REMOCIÓN DE ESCAMAS DE SULFATO Y CARBONATO DE CALCIO POR MEDIO DEL ULTRASONIDO

El tiempo es un factor trascendental para la estimulación de pozo por medio del ultrasonido, ya que este puede lograr o no que el fenómeno de cavitación se dé exitosamente. En la tubería con flujo se puede llegar a obtener un 100% de eliminación de escamas de yeso con tiempos cortos de estimulación, mientras que en el medio poroso se consigue una eliminación de escamas de carbonato de calcio entre un 70%-90% con tiempo de 1 a 2 horas. Se puede llegar a determinar experimentalmente el tiempo óptimo de eliminación de escamas pero este dependerá del medio, potencia, frecuencia, y del tipo de transductor utilizado.

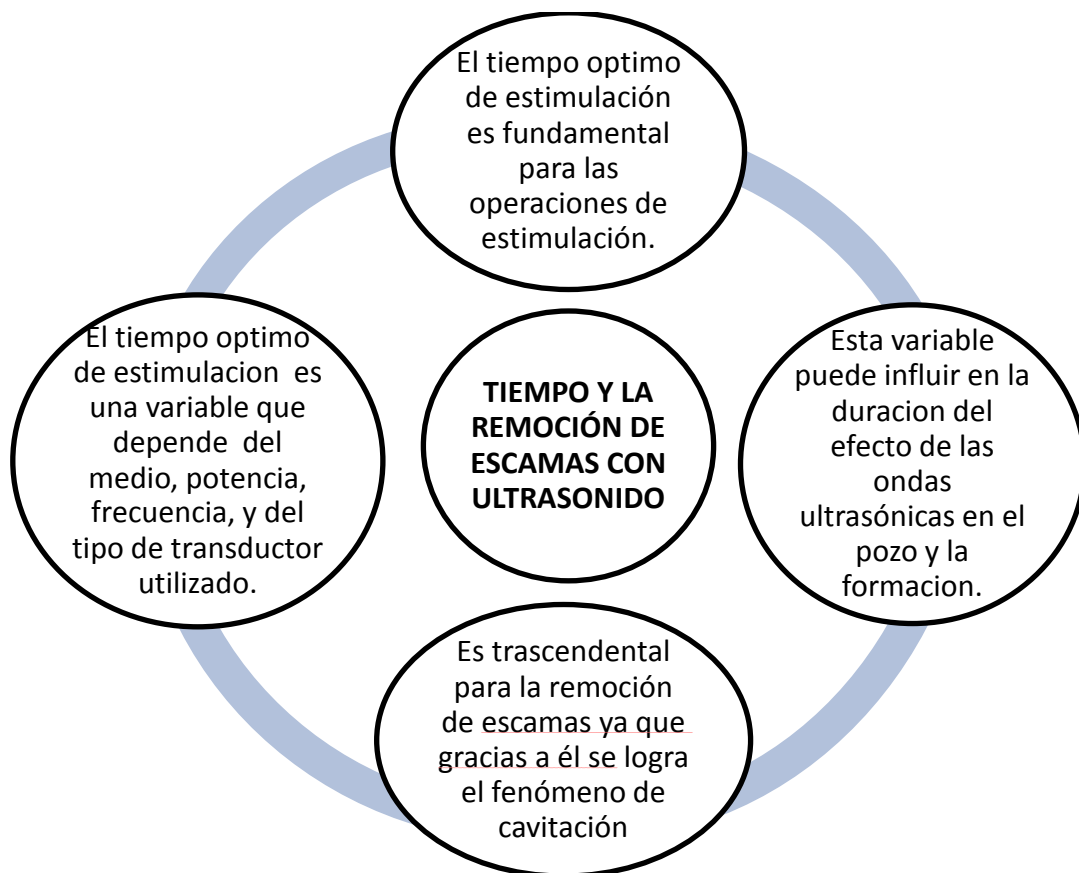


Figura 15. El tiempo y la eliminación de escamas.

Es importante poder llegar a establecer el tiempo óptimo de estimulación debido a que una vez eliminadas las escamas del medio, el fenómeno de cavitación podría llegar a erosionar el yacimiento; sin embargo en otro tipo de estudios se afirma que teniendo control en la presión de la onda de choque, el efecto de la cavitación también puede influenciar positivamente sobre la viscosidad en los líquidos. Para un mayor entendimiento de este efecto se deben realizar estudios enfocados en la viscosidad.

Se debe tener presente que el tiempo de exposición también puede influir en el efecto de las ondas ultrasónicas una vez finalizada la estimulación; en algunos pruebas piloto realizadas en pozos petroleros con tiempos cortos de estimulación el efecto duro hasta 15 días, mientras que en otros pozos con tiempos óptimos de estimulación el efecto alcanzo una duración de hasta 2 meses.

6. METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS DE ESTIMULACIÓN CON ULTRASONIDO

Para poder hacer una estimulación de pozo, se debe cumplir antes con una serie de etapas para asegurar en gran porcentaje el éxito de la operación; por esto es necesario establecer los criterios más importantes para la implementación del ultrasonido como técnica de estimulación. Se propone a continuación una metodología para la realización de trabajos de estimulación con ultrasonido que incluye la selección de pozos candidatos, diseño, ejecución y evaluación de la estimulación para eliminar escamas.

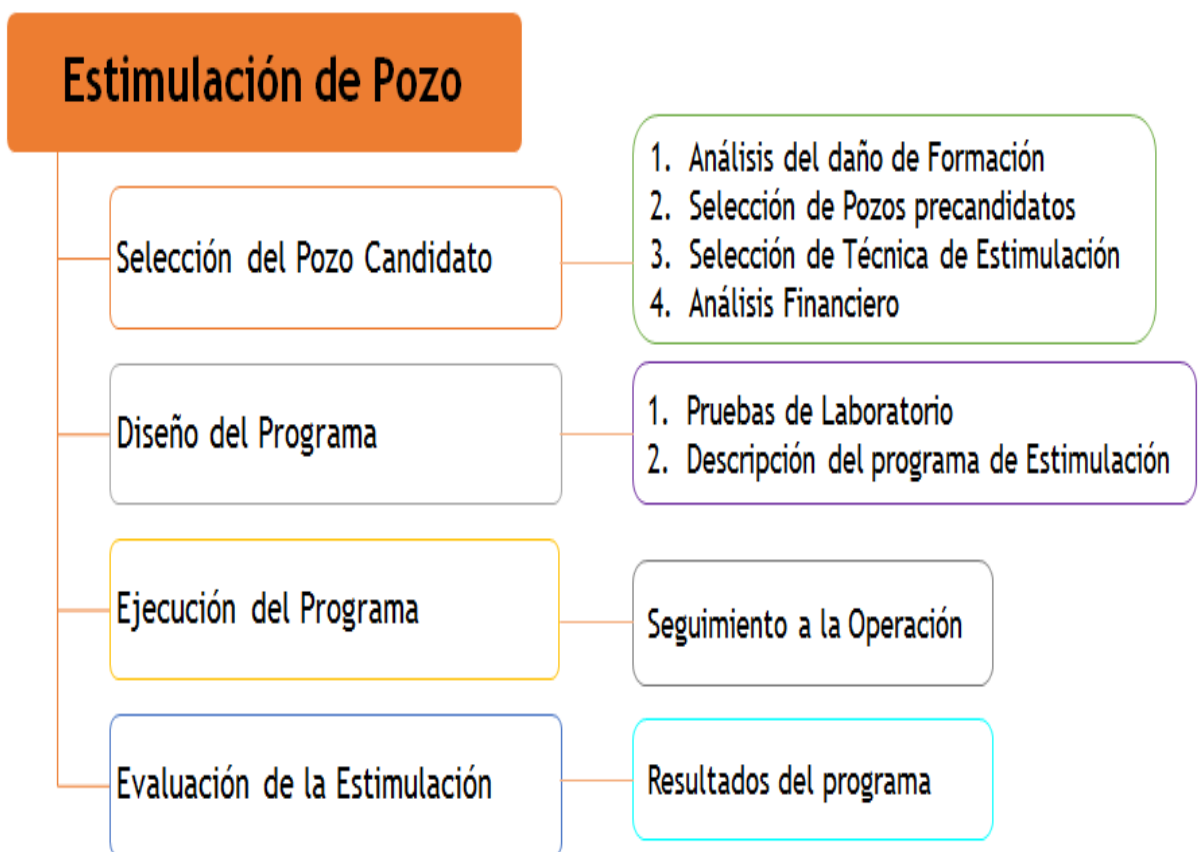


Figura 16. Metodología para la realización de trabajos de estimulación con ultrasonido

6.1 SELECCIÓN DEL POZO CANDIDATO

En esta primera etapa se debe reunir toda la información disponible de los pozos con el fin de tener el mayor conocimiento posible de cada uno de ellos y poder identificar fácilmente si se presenta algún tipo de daño. Para realizarla selección de los pozos candidatos a la estimulación con ultrasonido se deben realizar 3 fases importantes:

1. **Análisis del daño de formación:** Para realizar el análisis e identificar el daño de formación presente se deben tener en cuenta:
 - **Curvas de producción e inyección:** se diagnostica la posible existencia de daño en la formación, por medio de la interpretación de los cambios en la pendiente de la gráfica de la tasa de producción de aceite contra el tiempo.
 - **Antecedentes Históricos del pozo:** se detallan los procesos típicos a los cuales ha sido sometido el pozo, debido a que operaciones tan comunes como la perforación, cementación completamiento, producción, estimulación, técnicas de estimulación secundaria y terciaria son fuentes directas de daño a la formación.
 - **Pruebas de laboratorio:** se representan los fenómenos a los que es sometido el pozo en estudio, esto se hace generalmente utilizando los núcleos y fluidos propios del yacimiento es decir análisis petrofísicos, también son importantes las evidencias de daño como incrustaciones, depósitos orgánicos e inorgánicos que han sido recuperados del pozo en estudio para entender que daño se puede estar presentando.

- **Esquema de Inyección.** En el caso se pozos inyectoros, se evalúa que tan conveniente es el sistema de inyección que se está manejando en el pozo y si el esquema planteado aporta daño a la formación.
- **Pruebas de presión y perfiles de inyección:** se verifica si la presión que maneja el pozo puede ser mantenida sin causar daño a la formación y si es viable para implementar una técnica de estimulación.

2. Selección de pozos precandidatos: Los pozos precandidatos son propuestos una vez se realizó el análisis de la información recopilada ya que se tienen en cuenta aquellos que evidencian daño a la formación por precipitación de escamas y de estos se seleccionan los que presenten una mayor producción y alta relación costo/beneficio.

Esta selección es importante dentro de este proceso, ya que a partir de esta se diseñara el programa de estimulación en el cual se deben hacer pruebas de laboratorio para según cada pozo candidato, determinar las condiciones de los parámetros potencia y tiempo, para la realización del trabajo de estimulación con ultrasonido.

3. Selección del ultrasonido como técnica de estimulación: Teniendo en cuenta los antecedentes encontrados respecto al ultrasonido como técnica de estimulación, se sabe que puede recuperar petróleo mediante:

- Aumento en la eficiencia de desplazamiento mediante la creación de un frente más uniforme y por lo cual se aumenta la producción.
- Disminución de viscosidad mediante la transferencia de calor en líquidos en el medio poroso.

- Eliminación de daño causado por el lodo de perforación y migración de finos.
- Eliminación y control de parafinas y asfáltenos.
- Aumento de permeabilidad.
- Eliminación de escamas.

Aunque el ultrasonido como técnica de estimulación para eliminación de daño a la formación es relativamente nuevo y por motivos de confidencialidad no se conocen muchos campos a los cuales se les ha implementado esta tecnología; gracias a lo conseguido en esta investigación se ha desarrollado el diagrama para tomar la decisión de aplicar ultrasonido como técnica de estimulación, comparándolo con las técnicas de estimulación convencional y bajo los criterios de aumento en la producción, costos de aplicación y manejo ambiental.

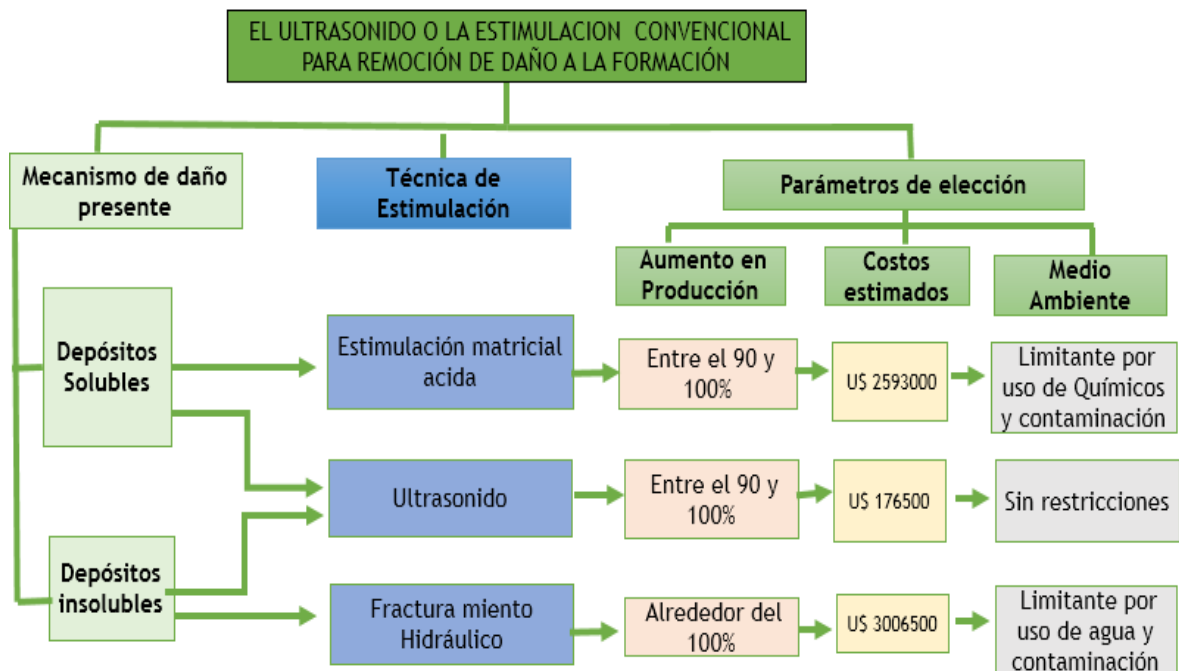


Figura 17. Diagrama de toma de decisión para la realización de trabajos de estimulación con ultrasonido.

4. Análisis Financiero: Para tomar la decisión de realizar una estimulación de pozo, se debe analizar diferentes aspectos económicos que nos permitirán tener una visión más clara de la ejecución o no del trabajo de estimulación a un pozo. A continuación se presenta en detalle los parámetros tenidos en cuenta para la evaluación económica.

Ultrasonido				
Item	Actividades	cantidad	Valor Unitario (US\$/Unidad)	Ultrasonido
1	Movilizacion inicial equipo de workover	0	1.000.000	0
2	Arme equipo de Workover	0	15.000	0
3	Equipo de Workover operando	0	25.000	0
4	Desarme equipo workover	0	15.000	0
5	Movilizacion final equipo workover	0	600.000	0
6	Movilizacion inicial equipo basico de Acidificacion	0	20000	0
7	Arme equipo basico de Acidificacion	0	0	0
8	Equipo basico de Acidificación operando	0	30000	0
9	Desarme equipo basico de Acidificación	0	0	0
10	Movilizacion final equipo basico de Acidificación	0	20000	0
11	Productos quimicos			
12	Tratamiento de fluidos residuales			
13	Movilizacion inicial equipo basico de Fracturamiento	0	150000	0
14	Arme equipo basico de Fracturamiento	0	50000	0
15	Equipo basico de Fracturamiento operando	0	50000	0
16	Desarme equipo basico de Fracturamiento	0	50000	0
17	Movilizacion final equipo basico de Fracturamiento	0	150000	0
18	Productos quimicos			
19	Tratamiento de fluidos residuales			
20	Movilizacion inicial equipo basico de Ultrasonido	1	15000	15000
21	Arme equipo basico de Ultrasonido	0,5	15000	7500
22	Equipo basico de Ultrasonido operando	10	50000	500000
23	Desarme equipo basico de Ultrasonido	0,5	15000	7500
24	Movilizacion final equipo basico de Ultrasonido	1	15000	15000
25	Totales	11		545000
26	Rata de Produccion	5500		
27	Costo del barril			
28	Produccion diferida en barriles	368500		
29	Costo Total dela Operación	176500		

Tabla 8. Análisis Financiero para la realización de un trabajo de estimulación con ultrasonido.

6.2 DISEÑO DEL PROGRAMA

La estimulación con ultrasonido necesita una planeación especial ya que esta será diferente para cada pozo a la cual se pretende aplicar; se deben realizar pruebas de laboratorio que permitan establecer las condiciones en las cuales se manejaran los parámetros que más influyen en la estimulación con ultrasonido: potencia y tiempo de estimulación, para finalmente poder hacer la descripción del programa que se ajuste a cada pozo seleccionado.

6.3 EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

Durante la ejecución del programa de estimulación es importante que se realice un monitoreo a la operación para analizar el efecto de los parámetros establecidos en el numeral anterior y la influencia de los mismos en la estimulación, esto brindara importantes resultados permitiendo ajustar y optimizar futuras prácticas de estimulación con ondas ultrasónicas.

6.4 EVALUACIÓN DE LA ESTIMULACIÓN

Los resultados del programa de estimulación con ondas ultrasónicas se deben establecer con el fin de determinar la efectividad de la técnica en cuanto a la mejora de la producción, costo-beneficio e impacto ambiental, para así lograr tener evidencia de lo expuesto en esta investigación y a su vez plantear la mejora y/o correcciones, como fuera el caso, para la ejecución de otros trabajos de estimulación con ultrasonido.

7. CONCLUSIONES

- El efecto de las ondas de ultrasonido sobre los yacimientos petroleros han sido estudiadas desde hace 50 años pero solo en los últimos 10 años se despertó el interés real por este tema a nivel mundial y se presentaron numerosas investigaciones las cuales realizaron grandes aportes para tener hoy un mejor entendimiento de la influencia de las ondas ultrasónicas en el comportamiento de los fluidos, la roca y otros componentes presentes en los yacimientos petroleros.
- La estimulación con ultrasonido tiene un funcionamiento sencillo, no genera daños en el yacimiento ni en el medio ambiente, y los costos de operación son bajos. En ninguna de las investigaciones consultadas, se señaló algún efecto nocivo en la salud o integridad de quienes realizaron las pruebas ni en los núcleos o tuberías expuestas a las ondas ultrasónicas.
- El uso del ultrasonido como técnica de estimulación de pozo para remoción de daño es una herramienta eficaz en el control y eliminación de escamas de carbonato y sulfato de calcio. La amplitud, la potencia y el tiempo de exposición a las ondas de ultrasonido son los parámetros fundamentales para el éxito en la eliminación de dichas escamas alcanzando el 90% de limpieza y un aumento en la producción de crudo entre el 40% y 60%.
- El ultrasonido como técnica de estimulación para remoción de escamas brinda mejores resultados cuando la permeabilidad inicial es alta y se puede ejecutar la operación de esta estimulación en pozos de flujo libre durante la producción, siempre y cuando la velocidad de flujo no sea demasiado alta. Esta es una gran ventaja en la aplicación de esta técnica ya que la producción no se ve afectada en teoría.

8. RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar el modelo de un equipo Ultrasónico, diseñado a partir de pruebas de laboratorio que concluyan en determinar el transductor óptimo para utilizar en estimulación de pozo.
- Se recomienda la realización artificial en laboratorio de escamas de sulfato de bario, sulfato de estroncio, escamas de hierro y escamas de sulfuro de zinc y la eliminación de las mismas por medio de un equipo de ultrasonido para comparar los resultados con los aquí expuestos y llegar a una conclusión general respecto a la eficacia en la remoción de escamas por medio del ultrasonido.
- Se sugiere realizar el mismo procedimiento detallado en la remoción de escamas de sulfato de calcio pero con núcleos que represente el medio poroso, para analizar una variable importante como lo es la permeabilidad.
- Se recomienda la simulación de los datos obtenidos en laboratorio para poder tener una mejor herramienta y evaluar diversas alternativas que nos proponen la gran variedad de campos colombianos, así lograr tomar decisiones rápidas y acertadas.
- Se recomienda con previo análisis de pruebas de laboratorio la implementación del ultrasonido como técnica de estimulación para remoción de daño en un campo colombiano.
- Se recomienda realizar el mismo estudio del ultrasonido como técnica de estimulación para otros tipos de daño como depósito de orgánicos, migración de finos y partículas inducidas, y como método de recobro mejorado en el mejoramiento de la viscosidad.

BIBLIOGRAFÍA

ABRAMOVA, A., et al. Ultrasonic Technology for Enhanced Oil Recovery. Artículo en: Scientific Research, publicado por: Engineering (6) p. 177-184, 2014.

BALLESTAS, MARTA. y ARAMBULA, YENNY. Metodología para la Selección, Diseño y Ejecución de Trabajos de Estimulación de Pozos de Bajo Potencial: Aplicación al Campo Colorado. Bucaramanga, 2009. p. 90 - 95. Trabajo de Grado (Ingeniero de Petróleos) Universidad Industrial de Santander.

BIN, AMER. “The study of scale formation in oil reservoir during water injection at high-barium and high-salinity formation water”. Malasia, 2007. P. 18 – 19. Trabajo de Grado (Master of Engineering) Universiti Teknologi Malaysia.

BONILLA, FABIAN. Desarrollo y Evaluación de Programa de Estimulación a Partir de Análisis de Daño a la Formación para el Campo Guando. Bucaramanga, 2011. p. 46 – 63 Trabajo de Grado (Ingeniero de Petróleos) Universidad Industrial de Santander.

CASTRO, HENRY y GAMEZ, CHRISTIAN. “Evaluación de la Depositación de Incrustaciones en Sistemas de Bombeo Electrosumergible del Campo Cantagallo”. Bucaramanga, 2009. p. 26 – 27. Trabajo de Grado (Ingeniero de Petróleos) Universidad Industrial de Santander.

CHUNSHENG, P., et al. “Technology of removing near wellbore inorganic scale damage by high power ultrasonic treatment”. Artículo en: ScienceDirect, publicado por: PETROL. EXPLOR.DEVELOP., 38(2) p. 243-248, 2011.

CIVAN, FARUK. Reservoir Formation Damage. Publicado en: Elsevier Inc. 2007.

DIAZ, JUAN., et al. “Estudio Experimental sobre la eficiencia de un tratamiento de ultrasonido en un sistema de flujo continuo para la reducción de viscosidad de crudo pesado” En: Revista ION, UIS, Vol. 26 – 2 2013, p. 47-63, Bucaramanga, Colombia.

DUHON, R.D., y CAMPBELL, J.M. The effect of ultrasonic energy on the flow of fluids in porous media, Artículo en: 2nd Annual Eastern Regional Meeting of SPE/AIME, Publicado por: SPE 1316, Charleston, WV, 1965.

HAMIDA, T. y BABADAGLI, T., Analysis of capillary interaction and oil recovery under ultrasonic waves, Artículo en: Transport in Porous Media, Vol. 70 (2) p 231–255, 2007.

HAMIDA, T. y BABADAGLI, T., Effect of ultrasonic waves on the capillary imbibition recovery of oil, Artículo en: SPE 92124, Presentado en: SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exh., 5–7 April 2005, Jakarta, Indonesia.

HAMIDA, T. y BABADAGLI, T., Effects of ultrasonic waves on immiscible and miscible displacement in porous media, Artículo en: SPE 95327, Presentado en: SPE Annual Technical Conference and Exh., Dallas, TX, p. 9–12, 2005.

HAMIDA, T. y BABADAGLI, T., Investigations on the capillary interaction of different oleic and aqueous phases between matrix and fracture under ultrasonic waves, Artículo en: SPE 94105, presentado en: SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference, p, 13–16, Madrid, España, 2005.

HAMIDA, T. y BABADAGLI, T., Investigations on capillary and viscous displacement under ultrasonic waves Technical Note, Publicado en: Journal of Canadian Petroleum Technology p 16–19, 2006.

ISLAS, CARLOS. Manual de Estimulación Matricial de Pozos Petroleros. México: CIPM, 1991. Capitulo II.

KUNANZ, H., et al. "Scale Removal with Ultrasonic Waves". Artículo en: SPE 169770-MS, p 3, 2014.

POESIO, P. et al., Removal of small particles from a porous material by ultrasonic irradiation, Artículo en: Transport Porous Media, Vol. 54, p 239–264, 2014.

QUINTANA, JAVIER. Evaluación de Trabajos de Estimulación Orgánica En Pozos del Campo Yariguí – Cantagallo. Bucaramanga, 2008. p. 14 – 18. Trabajo de Grado (Ingeniero de Petróleos) Universidad Industrial de Santander.

VENKITARAMAN, A., et al., Ultrasonic removal of nearwellbore damage caused by fines and mud solids, Publicado por: SPE, 1995.