

Ultrasound Applied in the Reduction of Viscosity of Heavy Crude Oil

David-Roberto Olaya-Escobar; Leonardo-Augusto Quintana-Jiménez;
Edgar-Emir González-Jiménez; Erika-Sofia Olaya-Escobar

Citación: D.-R. Olaya-Escobar, L.-A. Quintana-Jiménez, E.-E. González-Jiménez; Erika-Sofia Olaya-Escobar, “Ultrasound Applied in the Reduction of Viscosity of Heavy Crude Oil,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 29 (54), e11528, 2020.

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

Recibido: Julio 30, 2020; **Aceptado:** Octubre 6, 2020;

Publicado: Octubre 7, 2020

Derechos de reproducción: Este es un artículo en acceso abierto distribuido bajo la licencia [CC BY](#)



Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Ultrasound Applied in the Reduction of Viscosity of Heavy Crude Oil

David-Roberto Olaya-Escobar¹

Leonardo-Augusto Quintana-Jiménez²

Edgar-Emir González-Jiménez³

Erika-Sofia Olaya-Escobar⁴

Abstract

Reducing the viscosity of heavy oil through upgrading techniques is crucial to maintaining the demand for oil, which is growing at an annual rate of 1.8%. The phenomenon of acoustic cavitation occurs when ultrasound is applied in the treatment of heavy crudes. This is an emerging technology that is being developed to improve the physical and chemical properties of highly viscous crudes, which facilitates handling, increases the proportion of light fractions, and improves their price in the market. Taking into account that it does not yet operate on an industrial scale, a bibliographic review of the advances in acoustic cavitation technology with ultrasound for the improvement of heavy crude is justified, to contribute to the development of its industrial application by identifying new approaches and research guidelines in engineering and science. The objective of this article is to show the advance of said technology and describe the experiments carried out by various authors. For this purpose, a literature review was conducted with documents published from 1970 to 2020, which were compiled through a systematic search in academic databases. As a result of this review, some conceptual gaps and deficiencies in the phenomenological foundation were found, which explain the

¹ Ph. D. Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). d.olaya@javeriana.edu.co. ORCID: [0000-0002-5018-7454](https://orcid.org/0000-0002-5018-7454)

² Ph. D. Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). lquin@javeriana.edu.co. ORCID: [0000-0001-5625-0111](https://orcid.org/0000-0001-5625-0111)

³ Ph. D. Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá-Distrito Capital, Colombia) egonzale@javeriana.edu.co. ORCID: [0000-0003-3103-3959](https://orcid.org/0000-0003-3103-3959)

⁴ Ph. D. Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito" (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). erika.olaya@escuelaing.edu.co. ORCID: [0000-0001-6254-1169](https://orcid.org/0000-0001-6254-1169)

current difficulties to implement experimental tests and design the process at larger scales. These deficiencies limit the quality and repeatability of the results. A need was also identified to focus the efforts on a systematic experimentation that fulfills the laboratory and pilot plant phases, which are essential to take these technologies to an industrial scale.

Keywords: acoustic cavitation; asphaltenes; heavy oil; oil upgrading; petroleum; sonochemistry; ultrasound.

Ultrasonido aplicado en la reducción de viscosidad del crudo pesado

Resumen

La reducción de la viscosidad del crudo pesado mediante técnicas de mejoramiento es crucial para mantener la demanda de petróleo, que crece a una tasa anual de 1.8 %. El fenómeno de la cavitación acústica ocurre cuando el ultrasonido es aplicado en el tratamiento de crudos pesados. Esta es una tecnología emergente que se está desarrollando para mejorar las propiedades físicas y químicas de crudos altamente viscosos, lo cual facilita el manejo, aumenta la proporción de fracciones livianas y mejora su precio en el mercado. Teniendo en cuenta que aún no opera a escala industrial, se justifica una revisión de literatura de los avances de la tecnología de cavitación acústica con ultrasonido para mejoramiento de crudo pesado, con el fin de contribuir con el desarrollo de su aplicación industrial mediante la identificación de nuevos enfoques y lineamientos de investigación en ingeniería y ciencias. El objetivo de este artículo es mostrar el avance de la tecnología y describir los experimentos realizados por diversos autores. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica de los documentos que han sido publicados desde 1970 hasta 2020, dichos documentos se recopilaron mediante una búsqueda sistemática en bases de datos académicas. Como resultado de esta revisión, se encontraron algunos vacíos conceptuales y carencias en fundamentación fenomenológica, que explican las dificultades actuales para implementar tests experimentales y diseñar el proceso a escalas mayores. Estas carencias limitan la calidad y repetitividad en los resultados. También se identificó la necesidad de concentrar los esfuerzos en experimentación

sistemática que cumpla con las fases de laboratorio y planta piloto, aspectos esenciales para llevar estas tecnologías a escala industrial.

Palabras clave: asfaltenos; cavitación acústica; crudo pesado; mejoramiento de crudo; petróleo; sonoquímica; ultrasonido.

Ultrassom aplicado na redução de viscosidade do bruto pesado

Resumo

A redução da viscosidade do bruto pesado mediante técnicas de melhoramento é crucial para manter a demanda de petróleo, que cresce a uma taxa anual de 1.8 %. O fenômeno da cavitação acústica ocorre quando o ultrassom é aplicado no tratamento de brutos pesados. Esta é uma tecnologia emergente que se está desenvolvendo para melhorar as propriedades físicas e químicas de brutos altamente viscosos, o qual facilita o manejo, aumenta a proporção de frações leves e melhora seu preço no mercado. Tendo em conta que ainda não opera em escala industrial, justifica-se uma revisão de literatura dos avanços da tecnologia de cavitação acústica com ultrassom para melhoramento de bruto pesado, com o fim de contribuir com o desenvolvimento de sua aplicação industrial mediante a identificação de novos enfoques e lineamentos de pesquisa em engenharia e ciências. O objetivo deste artigo é mostrar o avanço da tecnologia e descrever os experimentos realizados por diversos autores. Para isso, realizou-se uma revisão bibliográfica dos documentos que têm sido publicados desde 1970 até 2020, tais documentos recopilaram-se mediante uma busca sistemática em bases de dados acadêmicas. Como resultado desta revisão, encontraram-se alguns vazios conceituais e carências em fundamentação fenomenológica, que explicam as dificuldades atuais para implementar testes experimentais e desenhar o processo em escalas maiores. Estas carências limitam a qualidade e repetitividade nos resultados. Também se identificou a necessidade de concentrar os esforços em experimentação sistemática que cumpra com as fases de laboratório e planta piloto, aspectos essenciais para levar estas tecnologias à escala industrial.

Palavras chave: asfaltenos; cavitação acústica; bruto pesado; melhoramento de bruto; petróleo; sonoquímica; ultrassom.

I. INTRODUCCIÓN

El crudo continúa siendo el principal recurso energético para responder a la creciente demanda global de energía, combustibles y materia prima para la industria. En la figura 1 se muestra un crecimiento anual que oscila entre 1 a 1.8% aproximadamente [1]. La energía renovable y su investigación es aún incipiente [2]. Además, la industria petrolera y petroquímica desempeña un papel fundamental en la economía y en la fabricación de diversos productos [3]. Existen varios tipos de petróleo, los cuales se diferencian por su densidad medida en grados en API (American Petroleum Institute) [4]. Mediante el API, los crudos se pueden clasificar en livianos ($31,3 - 39^\circ$), medianos ($22,3$ a $31,1$), pesados ($10-22.3^\circ$) y extrapesados ($< 10^\circ$) [5].

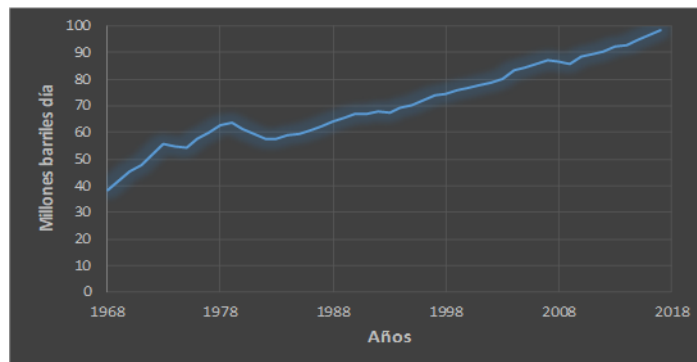


Fig.1. Incremento de la demanda mundial de petróleo. Fuente: ycharts.com

El petróleo pesado es un recurso abundante, corresponde al 70% de las reservas mundiales [6]. Sin embargo, es difícil de extraer, transportar y refinar, debido a que sus características afectan la eficiencia de procesamiento, incrementan los costos de operación y generan mayor impacto ambiental [6]. Entre las principales dificultades para el procesamiento de crudo pesado se destacan: bajo API ($< 20^\circ$), alta viscosidad (10^3 a 10^6 cP), concentraciones altas de asfaltenos (10%p) y azufre (1,3%p) [7]. Sus características físicas y químicas están relacionadas con la mayor concentración de asfaltenos y resinas respecto a los crudos livianos [8]. A pesar de las dificultades que presenta, este tipo de crudo es necesario para satisfacer la creciente demanda mundial de petróleo. Para procesar este tipo de crudo es necesario reducir su viscosidad mediante procesos de mejoramiento (*upgrading*),

los cuales representan ventajas importantes , por ejemplo: facilita el transporte por oleoductos, mejora el rendimiento de productos livianos, aumenta el valor comercial y facilita la refinación [9].

La técnica “*upgrading*” consiste en la hidrogenación de las moléculas mediante la adición de hidrógeno, que da lugar al crudo sintético más liviano [8,9]. Los métodos clásicos de mejoramiento de crudo aplicados en operaciones de superficie incluyen las diluciones y calentamiento, que por lo general implican una inversión muy alta en equipos e infraestructura compleja, lo cual se traduce en un aumento en costos de capital y operación [11].

También existen tecnologías emergentes, la cuales se basan en principios tales como: reducción de viscosidad, cambios químicos, y mitigación de fricción entre tubería y fluido. Algunas de ellas se encuentran relativamente desarrolladas mientras que otras se encuentran en fase de investigación e implementación. Algunas métodos involucran craqueo catalítico usando líquidos iónicos, así como también el uso de nanopartículas para mejorar las propiedades del crudo [11, 12]. Díaz, Martínez y Patiño [10] y Castañeda, Muñoz y Acheyta [11] presentan una revisión completa de tecnologías emergentes para el mejoramiento de crudo, agrupadas en cuatro categorías: i) Hidrogenación, ii) eliminación de carbono, iii) extracción y iv) ultrasonido.

Dentro de las tecnologías emergentes se destaca el ultrasonido, utilizado para generar el fenómeno de cavitación acústica [14]. Esta tecnología presenta beneficios potenciales para facilitar la operación y el manejo del crudo pesado [15]. La cavitación acústica permite liberar alta energía en el interior de un líquido, que en consecuencia induce reacciones químicas catalíticas, creando cambios en las propiedades del fluido, por ejemplo, reducción de la viscosidad [15–17].

El propósito de este artículo es presentar una revisión de literatura de diversos autores que proveen evidencia empírica y experimental, quienes muestran las posibilidades del ultrasonido para reducir la viscosidad del crudo.

En la sección II del artículo se presenta la metodología del estudio, mientras que en la sección III se describen los resultados, que incluye las características generales del ultrasonido y la cavitación acústica, también se presenta el estado del arte de

los trabajos de investigación aplicados al crudo pesado, realizados por diferentes autores en un periodo de tiempo que cubre aproximadamente 30 años.

II. METODOLOGÍA

La búsqueda de documentos se realizó mediante el siguiente procedimiento: Inicialmente se seleccionaron las bases de datos relevantes con la temática, tales como Scopus, Science Direct, EBESCO, IEEE, Web of Science y One Petro. Se tuvieron en cuenta publicaciones arbitradas desde enero de 1970 hasta diciembre de 2019. El algoritmo booleano establecido para la búsqueda fue el siguiente: (Ultrasound OR “ultrasonic waves” OR “acoustic cavitation” OR “ultrasound reactors” OR “Sonoreactor”) AND (Petroleum OR “Heavy oil” OR “heavy crude oil”) AND (Upgrading OR “viscosity reduction”).

En la Figura 2 se muestra el registro de documentos relacionados con la temática y su comportamiento en el tiempo. Se resalta como la temática ha crecido en los últimos 10 años. Este interés se justifica por cuanto las reservas de petróleo liviano han empezado a escasear [6]. Además, el tema cobra importancia debido a que algunos autores ven esta tecnología como una opción más sostenible para procesar crudo pesado [19].

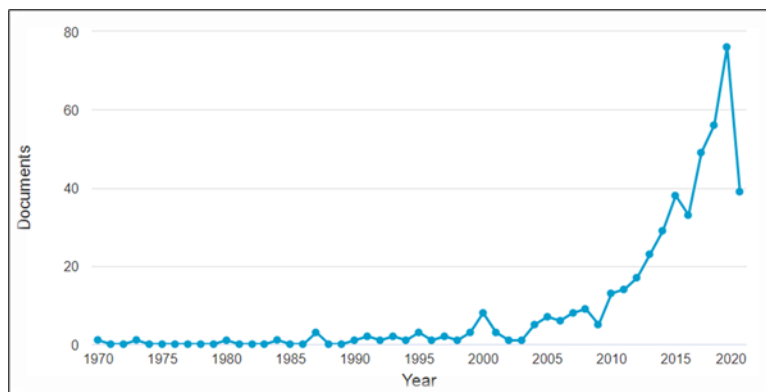


Fig.2. Documentos registrados por año.

La Figura 3 presenta los documentos registrados por país de origen. Cabe resaltar que en esta gráfica también se tienen en cuenta los documentos generados desde 1970.

Estados Unidos, China y el Reino Unido, lideran la producción intelectual en este tema. Cabe resaltar que para las economías de los dos primeros países es estratégico el mejoramiento de crudo pesado. En contraste, para el Reino Unido la aplicación de la tecnología se desarrolla de manera más amplia a otros sectores industriales.

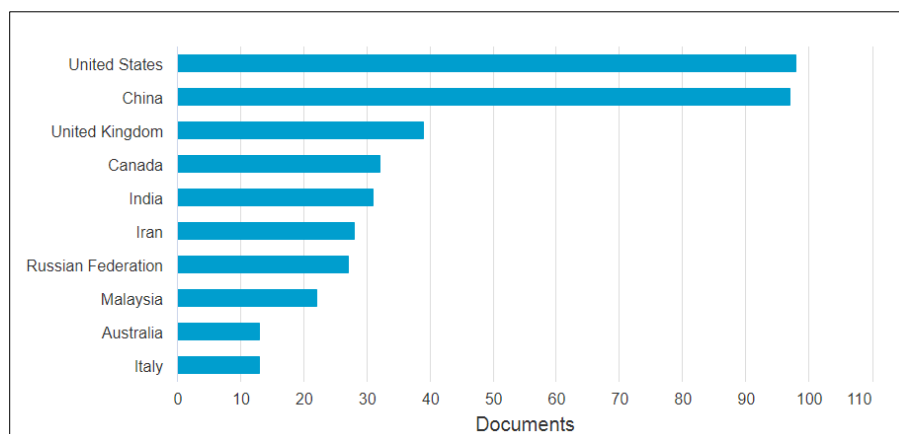


Fig.3. Documentos registrados por país de origen.

El alcance de este trabajo se limita a los estudios experimentales, evidencia empírica y revisiones relacionadas con los desarrollos aplicables a operaciones de superficie. Los experimentos orientados a la aplicación de la tecnología en yacimientos, para propósitos de recobro mejorado (*Enhance Oil Recovery*), se excluyeron, ya que corresponden a otra rama del desarrollo de esta tecnología, abordada por diversos autores [18–20]. Las simulaciones también se excluyeron, éstas son ampliamente discutidas por Niazi, Hashemabadi y Razi [21,22].

III. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de la revisión de literatura. La cual se presenta en dos bloques principales: el primero trata de una explicación general del ultrasonido aplicado a líquidos y el fenómeno de cavitación acústica. Mientras que en la segunda sección se describe el fenómeno aplicado al crudo pesado, y posteriormente se describen los hallazgos experimentales de diversos autores.

A. Ultrasonido y cavitación acústica

Aplicado al crudo pesado el fenómeno de la cavitación acústica desencadena reacciones químicas que descomponen los compuestos de alto peso molecular asociados a su viscosidad alta [24]. El fenómeno de cavitación consiste en la formación, crecimiento y colapso violento de burbujas en un líquido. Según Streeter [25], estas burbujas se forman en regiones donde la presión se reduce e iguala a la presión de vapor, para que esto ocurra se requiere la concentración de energía dentro del fluido [26].

La cavitación acústica ocurre cuando se propagan ondas de ultrasonido en un fluido [27]. A medida que las ondas longitudinales viajan con determinada frecuencia de oscilación inducen vibración molecular, creando ciclos de expansión y compresión en las partículas del líquido [28], lo cual se ve reflejado en oscilaciones de la presión (altas y bajas presiones). En las zonas donde se crean bajas presiones, existe mayor probabilidad de que se formen burbujas de cavitación. Estas burbujas absorben energía de las ondas e incrementan su tamaño hasta perder la capacidad de absorber energía de manera eficiente [29]. En consecuencia, el líquido circundante ejerce una compresión violenta debido a que la presión externa es mucho mayor, lo que produce una implosión de la burbuja [24]. Esta implosión es lo que genera condiciones ideales de temperatura y presión para favorecer las reacciones químicas [30]. Las burbujas cavitantes liberan energía en forma localizada a través de la emisión de ondas de choque. Durante el tiempo corto que dura el colapso se alcanzan temperaturas y presiones considerablemente altas [25,29,30]. En la figura 4 se muestra la representación gráfica del fenómeno acústico relacionado con la dinámica de las burbujas de cavitación.

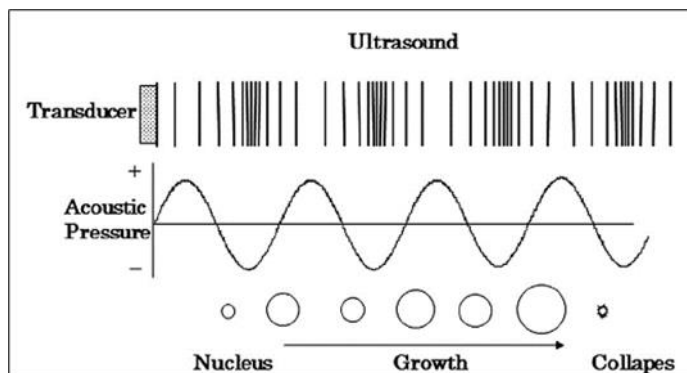


Fig.4. Dinámica de la burbuja de cavitación. Fuente: Adaptado de Nomura [33]

Varios efectos se pueden obtener con la cavitación acústica, incluyendo sonoluminiscencia y aumento de la actividad química en la solución [34]. La actividad química se incrementa debido a la formación de especies químicas nuevas que son relativamente estables, se pueden difundir en la solución y pueden crear efectos químicos [24]. Otro efecto es la formación de radicales libres en el interior o alrededor de las burbujas, originados por la descomposición térmica de las moléculas [33]. También existen efectos físicos significativos, tales como los micro flujos acústicos (*microstreaming*), micro chorros, micro corrientes y ondas de choque [35]. Los efectos mencionados pueden acelerar la mezcla a escala molecular y por consiguiente favorecer las reacciones químicas [36].

La cavitación acústica se puede utilizar en diversos procesos industriales, por ejemplo: en soldadura, destrucción de paredes celulares y dispersión de sólidos en líquidos [33,36]. Sin embargo, la descripción de otras aplicaciones no se contempla en este artículo.

B. Efecto del ultrasonido en crudo pesado

En esta sección se describe el fenómeno fisicoquímico del mejoramiento del crudo pesado sometido a ultrasonido. Las temperaturas y presiones extremas pueden causar cambios físicos y químicos que se evidencian en la ruptura de moléculas de alto peso molecular transformándolas en otras sustancias de menor peso (fracciones livianas) [24]. El aumento de la proporción de moléculas de menor peso, contribuye con la reducción viscosidad. El rompimiento de las fracciones pesadas

de petróleo con ultrasonido sigue los mecanismos de radicales libres, similar al craqueo térmico [38]. Los enlaces de los hidrocarburos se rompen, debido a la energía liberada en el colapso de las burbujas de cavitación [39]. Respecto a los compuestos químicos que sufren conversión, se ha identificado que los asfaltenos se reducen por acción del ultrasonido [40]. Cabe resaltar que éstos compuestos son los responsables de la viscosidad alta de los crudos pesados. Otros componentes de los que hay evidencia que se degradan son las resinas, los hidrocarburos saturados, aromáticos y nafténicos [41].

El proceso químico funciona de la siguiente manera: Después del colapso de las burbujas, se forman radicales libres, los cuales inician una serie de reacciones en cadena [42]. Los radicales libres tiene un poder de reacción muy agresivo, capaz de degradar moléculas grandes y complejas, su reactividad se debe a la presencia de un electrón no apareado [43]. Inicialmente se originan del agua asociada al crudo [44]. Dado que la energía liberada en la cavitación y la temperatura extrema favorecen la ruptura hemolítica de moléculas de agua, formándose dos radicales libres: el ion de hidrógeno (H^+) y el radical hidroxilo ($OH\cdot$) que son altamente reactivos. Posteriormente se rompen los enlaces C-C pertenecientes a hidrocarburos saturados (alcanos), de los cuales se forman radicales primarios adicionales y también radicales secundarios, los cuales reaccionan para formar alquenos de cadenas más cortas, así como sustancias gaseosas tales como H_2 , CH_4 , y C_2H_4 [44]. Después de esto, comienza el rompimiento de moléculas grandes como resinas y asfaltenos. Parte de los asfaltenos se convierten en gasóleo y otra en resinas, posteriormente la fracción de resina formada se convierte en gasóleo, que corresponde a la fracción saturada de compuestos livianos recién formados [38].

También ocurren fenómenos de tipo físico. El ultrasonido induce el cambio en la estructura coloidal de los hidrocarburos, en particular libera los compuestos de bajo peso molecular asociados a la estructura de los asfaltenos; además, los efectos de la cavitación debilitan las interacciones intermoleculares, y como resultado la viscosidad se reduce [45]. También se ha evidenciado que la asociación

intermolecular de los asfaltenos se reduce bajo los efectos de las vibraciones acústicas [38].

Una vez descrito el fenómeno aplicado al crudo, a continuación se describen los hallazgos de diversos autores que ha realizado trabajos experimentales y de revisión de esta tecnología aplicada al mejoramiento del crudo.

Los avances experimentales de sonoquímica fueron relevantes para dar fundamento a la aplicación de esta técnica al petróleo. Inicialmente Suslick [24] investigaron los efectos de la sonoquímica en líquidos orgánicos y establecieron que si la presión de vapor es suficientemente baja para permitir el colapso efectivo de las burbujas, casi todos los líquidos orgánicos generaran radicales libres cuando se someten a ultrasonido [24]. En la figura 5 se ilustra el nacimiento, crecimiento y colapso de las burbujas de cavitación, también la ruptura de los enlaces de hidrocarburos de alto peso molecular.

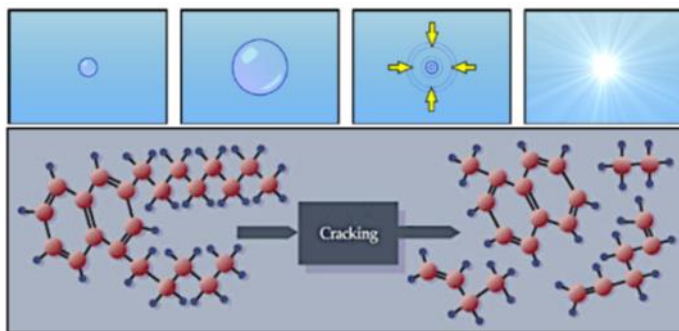


Fig. 5. Rompimiento de enlaces en moléculas de hidrocarburo. Fuente: Fomitchev [46]

Tradicionalmente se ha experimentado con esta tecnología en los residuos de los fondos de vacío de las torres de refinación. Pero en la actualidad se está explorando en crudos pesados para mejorar sus propiedades reológicas y su valor comercial [38]. Sadeghi y Yen [47] investigaron la recuperación de bitumen de las arenas bituminosas de Athabasca (Alberta-Canadá), a través de cavitación acústica utilizando un baño de ultrasonido (*ultrasonic bath UB*), aplicando también una solución alcalina acuosa de silicato de sodio. El residuo de carbono Ramsbottom (RCR) del bitumen recuperado ($523^{\circ}\text{C} +$) a través de cavitación acústica fue de 12 % en comparación con el 22 % de RCR del bitumen obtenido por el proceso de agua

caliente (*Syncrude*). La gravedad del bitumen recuperado después de la cavitación acústica fue 15°API en comparación con la 8°API del bitumen en las arenas de Athabasca.

Por su parte Lin y Yen [38] postularon que la asociación intermolecular de los asfaltenos es reducida bajo los efectos del ultrasonido. Identificaron la degradación de asfalteno a temperatura y presión ambiente. También se verificó que el gasóleo y las resinas se pueden obtener de asfaltenos; además, la fracción de resina obtenida, a su vez puede ser convertida en gasóleo. Por otro lado, se encontró que la adición de surfactante evita la aglomeración de los asfaltenos y aumenta su conversión a fracciones más livianas; debido a que se convierten más fácil cuando están en emulsión, lo cual se logra aplicando surfactantes. Los asfaltenos se redujeron 8 % en un tiempo de tratamiento de 60 min. Con la combinación de cavitación acústica, surfactante y un donador de hidrógeno (H_2O_2), lograron una reducción de 35%, en un tiempo de 15 min [10].

Chakma y Berruti [48] presentaron el primer estudio del efecto de las vibraciones ultrasónicas sobre la viscosidad de crudos extrapesados, en particular en el bitumen Athabasca y mezclas bitumen-solvente por diferentes periodos de tiempo (10, 30, 60 min). Reportaron que el bitumen puro presentó una reducción de viscosidad del 12%, mientras que en las mezclas bitumen-tolueno se redujo 4% [48].

Lin y Yen [38] determinaron que las reacciones de cracking forman fracciones livianas, mientras el agua asociada al crudo se descompone en radicales libres que suplen el hidrogeno que necesita la reacción. Años más tarde, Cataldo [41] analizó otras fracciones del petróleo y sugirió que tanto crackeo como pirólisis de hidrocarburos aromáticos y nafténicos son posibles mediante el uso de ultrasonido. En sus experimentos observaron escisión de los anillos aromáticos de benceno y tolueno, para convertirse en acetileno y otras fracciones más pequeñas.

Gopinath , Dalay y Adjaye [49] investigaron en detalle los efectos del tratamiento ultrasónico sobre la degradación de gasóleo pesado (*HGO: heavy gas oil*) proveniente del bitumen Athabasca, y sin el uso de aditivos. Los autores identificaron hidrocarburos livianos de baja volatilidad durante el tratamiento, como: metano, etano, etileno y propileno. En este estudio se reportaron conversiones

máximas de nitrógeno y azufre de 11% y 7%, respectivamente, y una reducción del 5% en la viscosidad de aproximadamente.

Nesterenko y Berlizov [39] demostraron que la energía liberada en el colapso de las burbujas de cavitación rompen los enlaces de hidrocarburos en las moléculas de los compuestos contenidos en el petróleo. Ellos encontraron que los hidrocarburos con un intervalo de peso molecular de 100-300 g/mol se fragmentan. Posteriormente, los experimentos de Sawarkar, Pandit y Samant [40] y Kaushik [50] corroboraron la reducción de los asfaltenos en crudos pesados que fueron sometidos a ultrasonido. Sawarkar Pandit y Samant [40] evaluaron tres diferentes residuos de vacío. Utilizaron un reactor de cavitación acústica para estudiar la influencia de tiempos de reacción desde 15 hasta 120 minutos a temperatura y presión ambiente. También fueron evaluados y comparados los sistemas de sonda UH y baño ultrasónico UB mostrando mejor desempeño la sonda de ultrasonido. El estudio reportó una reducción en contenido de asfaltenos para el tiempo de irradiación de 60 min en un rango de 30 a 59%. En la figura 6 se observan los dos tipos principales de mecanismos para introducir energía ultrasónica a los líquidos.

Kuashik, Kumar y Bhaskar [50] realizaron experimentos con residuos de las torres de fondo de vacío, los cuales tienen una viscosidad muy alta, similar a la del crudo pesado. Ellos ensayaron cavitación acústica para diferentes tiempos de reacción (15 a 90 min) y con diferentes diámetros de sonda, a una presión y temperatura ambiente. Compararon el efecto de los surfactantes y la aplicación de ultrasonido, analizando muestras que contenían con las que no contenían surfactante. Concluyeron que no había una diferencia significativa debido a la variación del diámetro de la sonda; sin embargo, hubo una reducción sustancial de asfalteno en presencia del surfactante, alrededor del 48%. Por otro lado, sin aplicación del surfactante se logró una reducción del 40% [50].

El ultrasonido y un donador de hidrógeno tienen un efecto sinérgico en el proceso de mejoramiento de fondos de vacío. Yang, Zhang y Gu [45] identificaron cambios en la estructura coloidal en los hidrocarburos, en particular libera compuestos de bajo peso molecular asociados a la estructura de los asfaltenos, observaron que los efectos de la cavitación debilitan las interacciones intermoleculares, y como

resultado la viscosidad se reduce. En sus experimentos, seleccionaron Tetralin como donador de hidrógeno; además de donar electrones, tiene la habilidad de reducir la viscosidad de los residuos de fondos de vacío. En la ausencia de donante de hidrógeno, la viscosidad de los fondos de vacío se redujo en un 11%. Por otro lado, sin ultrasonido, pero en presencia de Tetralin, la reducción fue de 31%, y con la combinación de ultrasonido más Tetralin, la viscosidad se redujo en un 39%. El efecto sinérgico del ultrasonido más el Tetralin permite estabilizar la viscosidad del producto, un porcentaje más alto de compuestos livianos, densidad más baja y un Punto de Fluido (*pour point*) más bajo que el obtenido cuando se aplican por separado estas tecnologías [45].

Mousavi, Ramazani y Najafi [51] estudiaron el efecto del ultrasonido sobre las propiedades reológicas de crudos asfálticos para diferentes intervalos de tiempo (5-240min). Los autores observaron un aumento en la viscosidad y en el valor del esfuerzo del límite elástico para las muestras tratadas. Además, los análisis reológicos indicaron que la relación (valores de módulo viscoso/ valores de módulo elástico) es menor a medida que se incrementa el tiempo del tratamiento, lo cual implica que el crudo se comporta más elásticamente, haciendo más difícil su manipulación.

Díaz, Martínez y Reyes [10] evaluaron la eficiencia del tratamiento de ultrasonido en la viscosidad del crudo pesado de los llanos orientales colombianos. El estudio evaluó un sistema de flujo continuo, en el cual se analizó la influencia de la temperatura del tratamiento (308 y 319K), tiempo de exposición (5,66 y 16,98s) e intensidad sónica (170-250 y 400-680kW/m²) sobre la viscosidad. El estudio reveló que la temperatura no tiene un efecto significativo para reducir la viscosidad. También se encontró que el incremento del tiempo de exposición favorece la reducción de la viscosidad, mientras que la intensidad sónica tiene un efecto favorable o desfavorable dependiendo de la magnitud del tiempo de exposición [10]. El porcentaje de reducción de viscosidad alcanzado fue de 1,5%.

Xu, Deng y Bai [52] estudiaron los efectos de las ondas de ultrasonido en una dilución de diésel, en petróleo extrapesado de Venezuela y en el crudo extrapesado Fengcheng de China. No lograron reducir la viscosidad en la dilución de diésel y el

crudo extrapesado de Venezuela, porque las ondas de ultrasonido aceleran la disolución de componentes pesados en el diésel, especialmente los asfaltenos. Sin embargo, una disminución de más del 25% de viscosidad para la emulsión de crudo /agua del crudo extrapesado Fengcheng fue lograda. Asimismo, se determinó que se requiere un 30% menos de químicos reductores de viscosidad [52].

Mullakaev, Volkova y Gradov [53] estudiaron los efectos del tratamiento de ultrasonido en las propiedades de temperatura y viscosidad de varios tipos de crudo con composición diferente. Ellos concluyeron que la eficiencia del ultrasonido depende del grupo principal que compone el crudo y del tiempo de tratamiento. En los crudos con bajo contenido de parafinas y alto contenido de resinas, alquitranes y asfaltos tienden a reducir su viscosidad de manera significativa, lo mismo sucede con el Punto de Fluido (*pour point*). Además, la eficiencia incrementa con el aumento del tiempo de exposición. Para los crudos con alto contenido de alcanos, el tratamiento no fue efectivo, además un incremento en el tiempo de radiación terminó en un aumento de la viscosidad, a este hallazgo los autores le atribuyen un fenómeno de intensificación de la cristalización de alcanos de alto peso molecular [53].

Salehzadeh, Akherati, Dabir [54] realizaron un estudio experimental del efecto del ultrasonido en la cinética de agregación y deposición de asfaltenos. Ellos concluyeron que se reducen los sedimentos y la tasa de decantación de estas sustancias, además que el ultrasonido permite reducir los agregados de asfaltenos que finalmente tendrán un efecto sobre la viscosidad [54].

Askarian, Vatani y Edalat [55] evaluaron el efecto de la presencia de donadores de hidrógeno en combinación con nanopartículas de metal, donde lograron un 20% de reducción de viscosidad. Avvaru *et al.* [56] muestran como esta tecnología puede aplicarse a varios procesos relacionados con el manejo del crudo pesado y explica los mecanismos teóricos de su funcionamiento.

Aliev *et al.* [57] mencionan la importancia del crudo pesado como fuente energética relevante. Discuten las dificultades actuales para su procesamiento y analiza varias tecnologías. Se enfoca en la descripción del ultrasonido como una alternativa atractiva para mejorar las características físico-químicas de los crudos pesados.

Montes *et. al.* [58] realizan experimentos para reducir la viscosidad del crudo pesado mediante la aplicación de ultrasonido, un catalizador de nanopartículas a base de níquel y agua como donador de hidrógeno. Lograron reducción de viscosidad que oscila entre 44 a 16%.

Sawarkar [59]. El autor presenta una revisión sistemática de las técnicas de mejoramiento de crudo pesado que se basan en el proceso de cavitación. Destaca los pocos avances en materia de cavitación acústica, y resalta la importancia que las tecnologías tienen en la actualidad y la necesidad de desarrollarlas para su aplicación a crudo pesado. Cui, J *et al.* [60] estudiaron los cambios estructurales de los componentes esenciales del crudo Tahe, al someterlo a tratamiento con cavitación acústica y un catalizador de níquel. Concluyeron que la cavitación afecta la estructura cristalina de las ceras o parafinas que componen el crudo, lo cual tiene implicaciones en la reducción de la viscosidad [60]. En la siguiente tabla se consolidan los resultados de algunos autores, donde se evidencian las variables estudiadas y los resultados logrados.

Tabla 1. Comparación de los hallazgos de diferentes autores. Elaboración propia

Tipo Hidrocarburo	Tecnología Ultrasonido	Aditivos	Variable	Porcentaje	Ref.
Bitumen Athabasca	UB	Silicato Sodio H ₂ O ₂	RCR API	12% ↓ 48% ↑	[47]
Asfaltenos	UH	Surfactantes	Concentración Asfalteno	35% ↓	[38]
Residuos destilación	UH	NO	Fracción destilados	15-71% ↑	[61]
Gasóleo Pesado	UH	NO	Viscosidad Azufre	5% ↓ 7% ↓	[49]
Residuos vacío	UH UB	Surfactantes	Concentración Asfalteno	30-59% ↓	[40]
Residuos Vacío	UH	Surfactantes	Concentración Asfalteno	48% ↓	[50]
Fondos vacío	UH	Surfactantes	Viscosidad	39% ↓	[62]
Crudo Pesado	UH	NO	Viscosidad	1.5 % ↓	[10]
Crudo-Extra pesado	UH	Surfactante y Agua	Viscosidad	25% ↓	[52]
Mix crudos	UH	NO	Viscosidad	60% ↓	[53]

IV. DISCUSIÓN

Los estudios encontrados muestran que la cavitación acústica tiene efectos sobre el crudo, y otros hidrocarburos no convencionales, tales como las arenas y bitúmenes de Athabasca, gasóleos y residuos de vacío. La mayoría de

investigaciones se han realizado con tecnología de *Ultrasonic Horn* o sondas de ultrasonido, la cual resulta ser más eficiente, según lo reportado por Sawarkar *et al.* [40]. Respecto a las variables estudiadas, se puede decir que hay gran dispersión de los resultados, y diversos enfoques metodológicos, algunos estudian la reducción de asfaltenos, otros ensayan con las pruebas de destilación, otros API, contenido de azufre y viscosidad [63]. Respecto a la viscosidad se han reportado grados de reducción en un rango muy amplio, desde porcentajes muy bajos cercanos al 1,5 % como es el caso de Diaz, Martinez y Reyes *et al.* [10] hasta porcentajes relativamente altos, del 60 % como los logrados por Mullakaev *et al.* [53]. Sin embargo, cabe resaltar que se ha comprobado de manera contundente la reducción de asfaltenos con el uso de la cavitación acústica.

Son frecuentes los estudios que utilizan aditivos para mejorar el rendimiento del proceso, se reportan diferentes tipos de surfactantes y donadores de hidrógeno; sin embargo, en todos es común que se omita los criterios de selección de estos aditivos. Únicamente Lin y Yen [38] muestran un esquema sistemático de evaluación de surfactantes. Si el proceso depende del uso de surfactantes es una desventaja importante por el aumento de costos, cuando se escale a tamaño industrial.

Los estudios experimentales analizados se podrían clasificar en dos: los que obtuvieron resultados favorables, y los que no lograron reducciones significativas. Sin embargo, los autores manifiestan puntos de vista convergentes respecto a la tecnología analizada, dado que todos reconocen las oportunidades que ofrece el ultrasonido, pero puntualizan en los desafíos y retos técnicos que se deben superar en la actualidad. Es importante resaltar que los autores que no lograron resultados prometedores, por lo general dan recomendaciones para futuros ensayos e identifican o explican la causa de los hallazgos, pero ninguno descarta la tecnología.

V. CONCLUSIONES

El ultrasonido es una tecnología emergente que puede utilizarse en las operaciones de producción de petróleo. Lograr una reducción significativa de la viscosidad en

este punto de la cadena del petróleo es muy importante, porque reducirá los costos y dificultades de operación en el transporte por oleoductos y en refinerías.

A nivel de laboratorio existen resultados prometedores, pero sin aplicación industrial hasta el momento, en parte por las dificultades de escalamiento, y porque todos los estudios son de tipo exploratorio, pero ninguno apunta al desarrollo sistemático de la tecnología.

Otra dificultad es que no hay aún consistencia con el grado de reducción de viscosidad que se puede lograr, pues el rango de variación que se observa en la literatura reportada es muy amplio, y así es difícil predecir el resultado del proceso. Además algunos autores reportan resultados contradictorios, en lugar de lograr una disminución en la viscosidad reportan un aumento [9,47].

Dado que muchos estudios se han realizado con aditivos para aumentar el porcentaje de reducción de viscosidad, se desconoce el verdadero potencial de la cavitación acústica sin el uso de estas sustancias. Determinar el rendimiento sin adjuntos permitiría minimizar la demanda de estas sustancias químicas, lo cual optimizaría costos.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

David-Roberto Olaya-Escobar: Conceptualización, Escritura – Borrador original, Investigación.

Leonardo-Augusto Quintana-Jiménez: Escritura – Revisión & Edición, Supervisión.

Edgar-Emir González-Jiménez: Escritura – Revisión & Edición, Validación.

Erika-Sofia Olaya-Escobar: Escritura – Revisión & Edición, Metodología.

FINANCIAMIENTO

Facultad de Ingeniería - Pontificia Universidad Javeriana, and Colciencias.

REFERENCES

- [1] D. Xu, J. Deng, W. Lin, C. Li, and L. Bai, "Ultrasonic batch processing of ultra heavy oil for viscosity reduction on the industrial scale," in *IEEE International Ultrasonics Symposium*, Taipei, Taiwan, 2015, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2015.0348>

- [2] F. Jiménez-García, A. Restrepo-Franco, and L. Mulcúe-Nieto, "Estado de la investigación en energía en Colombia: una mirada desde los grupos de investigación," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 28 (52), pp. 9-26, Jul. 2019. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n52.2019.9651>
- [3] D. Griesbaum, Karl. Behr and Arno. Biedankapp, "Hydrocarbons," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, pp. 133-189, 2012. https://doi.org/10.1002/14356007.a13_227
- [4] L. Meléndez, and A. Lache, "Preducción del Análisis SARA de crudos Colombianos aplicando espectroscopia FTIR-ATR y Métodos Quimiométricos," Grade Thesis, Universidad Industrial Santander, Bucaramanga, Colombia, 2010. <https://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/381/2/133801.pdf>
- [5] E. Aguirre, *El petróleo: una visión sencilla de nuestra industria petrolera*. Argentina: El Cid Editor - Ingeniería, 2007.
- [6] H. Alboudwarej, J. Felix, and S. Taylor "La importancia del crudo pesado," *Oilfield Review*, 2006. https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish06/aut06/heavy_oil.pdf.
- [7] C. Conaway, *The Petroleum Industry: A Nontechnical guide*. Tulsa: Pennwell Publishing Co, 1999.
- [8] R. Martínez-Palou, M.Mosqueira,B. Zapata-Rendón, and E. Mar-Juarez, "Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 75 (3-4), pp. 274-282, Jan, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.11.020>
- [9] A. Saniere, I. Hénaut, and J. F. Argillier, "Pipeline transportation of heavy oils, a strategic, economic and technological challenge," *Oil and Gas Science and Technology*, vol. 59 (5), pp. 455-466, Oct. 2004. <https://doi.org/10.2516/ogst:2004031>
- [10] J. C. Díaz Alvarez, R. Martínez Rey, E. J. Patiño Reyes, and R. Barrero Acosta, "Estudio experimental sobre la eficiencia de un tratamiento de ultrasonido en un sistema de flujo continuo para la reducción de viscosidad de crudo pesado," *Revista ION*, vol. 26 (2), pp. 47-63, Dec. 2013.
- [11] L. C. Castañeda, J. A. D. Muñoz, and J. Ancheyta, "Current situation of emerging technologies for upgrading of heavy oils," *Catalysis Today*, vol. 220-222, pp. 248-273, Mar. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.05.016>
- [12] J. C. Díaz Alvarez, R. Martínez Rey, and R. Barrero Acosta, "Líquidos iónicos: propiedades fisicoquímicas y aplicación potencial en el mejoramiento de crudos pesados," *Revista ION*, vol. 25 (1), pp. 61-87, Mar. 2012.
- [13] S. Rianza, F. Cortés, and J. Otlavaro, "Emulsion with heavy crude oil in presence of nanoparticles," *Boletín Ciencias la Tierra*, vol. 36, pp. 55-68, Jul. 2014. <https://doi.org/10.15446/rbct.n36.46282>
- [14] H. Hamidi, E. Mohammadian, R. Junin, R. Rafati, and A. Azdarpour, "The Effect of Ultrasonic Waves on Oil Viscosity," *Petroleum Science and Technology*, vol. 32 (19), pp. 2387-2395, Oct. 2014. <https://doi.org/10.1080/10916466.2013.831873>
- [15] C. Shi, W. Yang, J. Chen, X. Sun, H. An, and Y. Duo, "Application and mechanism of ultrasonic static mixer in heavy oil viscosity reduction," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 37, pp. 648-653, Jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.02.027>
- [16] N. A. Pivovarova, "Use of Wave Effect in Processing of the Hydrocarbonic Raw Material (Review)," *Petroleum Chemistry*, vol. 59 (6), pp. 559-569, Jun. 2019. <http://doi.org/10.1134/S0965544119060148>
- [17] M. Mullakaev, *Ultrasonic intensification of the processes of enhanced oil recovery, processing of crude oil and oil sludge, purification of oil-contaminated water*. Moscow: ANO History, Economics and Law Research Institute, 2019.

- [18] Q. Fan, G. Bai, Q. Liu, Y. Sun, W. Yuan, S. Wu, X. Song, and D. Zhao, "The ultrasound thermal cracking for the tar-sand bitumen," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 50, pp. 354-362, Jan. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.035>
- [19] H. Hamidi, E. Mohammadian, R. Rafati, and A. Azdarpour, "A role of ultrasonic waves on oil viscosity changes in porous media," in *IEEE Conference on Clean Energy and Technology*, Langkawi, Malaysia, 2013, pp. 1-6. <http://doi.org/10.1109/ceat.2013.6775589>
- [20] V. O. Abramov, A. V. Abramova, V. M. Bayazitov, M. S. Mullakaev, A. V. Marnosov, and A. V. Ildiyakov, "Acoustic and sonochemical methods for altering the viscosity of oil during recovery and pipeline transportation," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 35 (Part A), pp. 389-396, Mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.017>
- [21] V. O. Abramov, A. Abramova, V. Bayazitov, L. Altunina, A. Gerasin, D. Pashin, and T. Mason, "Sonochemical approaches to enhanced oil recovery," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 25, pp. 76-81, Jul. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.014>
- [22] S. Niazi, S. H. Hashemabadi, and M. M. Razi, "CFD simulation of acoustic cavitation in a crude oil upgrading sonoreactor and prediction of collapse temperature and pressure of a cavitation bubble," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92 (1), pp. 166-173, Jan. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.07.002>
- [23] S. Niazi, H. Hashemabadi, and S. Noroozi, "Numerical Simulation of Operational Parameters and Sonoreactor Configurations for the Highest Possibility of Acoustic Cavitation in Crude Oil," *Chemical Engineering Communication*, vol. 201 (10), pp. 1340-1359, Apr. 2014. <https://doi.org/10.1080/00986445.2013.808999>
- [24] K. Suslick, "The Chemical Effects of Ultrasound," *Scientific America*, vol. 260, pp. 80-86, Feb. 1989.
- [25] V. Streeter, *Fluid Mechanics*. New York: McGraw-Hill, 1962.
- [26] P. Gogate, R. Tayal, and A. Pandit, "Cavitation: A technology on the horizon," *Current Science*, vol. 91 (1), pp. 35-46, Jul. 2006.
- [27] S. Saito, "Ultrasound Field and Bubbles A2 - Grieser, Franz," in *Sonochemistry and the Acoustic Bubble*, P.-K. Choi, N. Enomoto, H. Harada, K. Okitsu, and K. Yasui, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2015, pp. 11-39. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801530-8.00002-5>
- [28] C. D. Harrison, C. E. Raleigh, and B. J. Vujnovic, "The Use of Ultrasound for Cleaning Coal," in *Proceedings of the 19th Annual International Coal Preparation Exhibition and Conference*, Lexington, USA, 2000, pp. 61-67.
- [29] K. Yasui, "Dynamics of Acoustic Bubbles," in *Sonochemistry and the Acoustic Bubble*, P.-K. Choi, Ed. Amsterdam: Elsevier, 2015, pp. 41-83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801530-8.00003-7>
- [30] T. J. Mason, and J. P. Lorimer, *Applied sonochemistry: The uses of power ultrasound in chemistry and processing*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2002.
- [31] P. Gogate, and A. Wilhelm, "Some aspects of the design of sonochemical reactors," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 10, pp. 325-330, 2003. [https://doi.org/10.1016/s1350-4177\(03\)00103-2](https://doi.org/10.1016/s1350-4177(03)00103-2)
- [32] K. S. Suslick and G. J. Price, "Applications of Ultrasound to Materials Chemistry," *Annual Review of Materials Science*, vol. 29, pp. 295-326, Aug. 1999. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.29.1.295>
- [33] H. Nomura y S. Koda, "What Is Sonochemistry? A2 - Grieser, Franz," in *Sonochemistry and the Acoustic Bubble*. Amsterdam: Elsevier, 2015, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801530-8.00001-3>
- [34] T. J. Mason, "Sonochemistry: A technology for tomorrow," *Chemistry and Industry*, vol. 1, pp. 47-50, Jan.

- 1993.
- [35] T. Y. Wu, N. Guo, C. Y. Teh, and J. X. Wen Hay, "Advances in ultrasoundTechnology for Environmental Remediation," in *SpringerBrief in Green Chemistry for Sustainability*. Netherlands: Springer, 2013, pp. 1-120-. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5533-8>
- [36] C. Dopazo, "¿Cavitar o no Cavitar? La inevitable ubicuidad de las burbujas," 2008. http://mafalda.cps.unizar.es/dopazo/sites/default/files/pdf/Refereed_Journals_CD/72RAI.Publicacion.Discurso.pdf
- [37] L. Almonacid-Jiménez, J. Vallejo-Rodríguez, R. Agudelo-Valencia, J. Hernández-Fernández, Ó. Ortiz-Medina, and D. Ovalle-González, "Evaluación de la hidrólisis enzimática de wet white asistida con ultrasonido para obtener colágeno hidrolizado," *Revista Facultad de Ingeniería.*, vol. 28 (52), 59-75, Jul. 2019. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n52.2019.9654>
- [38] J.R. Lin, and T. F. Yen, "An upgrading process through cavitation and surfactant," *Energy Fuels*, vol. 7 (1), pp. 111-118, Jan. 1993. <http://doi.org/https://doi.org/10.1021/ef00037a018>
- [39] A. I. Nesterenko, and Y. S. Berlizov, "The possibility of cracking hydrocarbons with cavitation. A quantitative energy assessment," *Chemistry Technology of Fuels and Oils*, vol. 43 (6), pp. 515-518, Nov. 2007. <https://doi.org/10.1007/s10553-007-0089-4>
- [40] A. N. Sawarkar, A. B. Pandit, S. D. Samant, and J. B. Joshi, "Use of ultrasound in petroleum residue upgradation," *The Canadian Journal of Chemichal Engineering*, vol. 87 (3), pp. 329-342, May. 2009. <https://doi.org/10.1002/cjce.20169>
- [41] F. Cataldo, "Ultrasound-induced cracking and pyrolysis of some aromatic and naphthenic hydrocarbons," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 7 (1), pp. 35-43, Jan. 2000. [https://doi.org/10.1016/s1350-4177\(99\)00019-x](https://doi.org/10.1016/s1350-4177(99)00019-x)
- [42] B. Jack, *Fundamentos de los ultrasonidos*. Madrid: Editorial Alhambra, S.A, 1967.
- [43] F. Restrepo, J. Restrepo, and L. Vargas,, *Química Básica*. Medellín: Susaeta Editores, 1978.
- [44] K. S. Suslick, J. J. Gawlenowski, P. F. Schubert, and H. H. Wang, "Alkane sonochemistry," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 87 (13), pp. 2299-2301, Jun. 1983. <https://doi.org/10.1021/j100236a013>
- [45] Z. Yang, C. Zhang, S. Gu, P. Han, and X. Lu, "Upgrading vacuum residuum by combined sonication and treatment with a hydrogen donor," *Chesmistry and Technology of Fuels and Oils*, vol. 48 (6), pp. 426-435, Jan. 2013. <https://doi.org/10.1007/s10553-013-0391-2>
- [46] M. Fomitchev-Zamilov, "Heavy Crude Oil Upgrading with Hydrodynamic Cavitation," in *CIM Canadian Institute Of Mining*, Vancouver, Canada, 2014, pp. 21-31.
- [47] K. M. Sadeghi M. Sadeghi, and T. F. Yen, "Novel Extraction of Tar Sands by Sonication with the Aid of In Situ Surfactants," *Energy Fuels*, vol. 4 (5), pp. 604-608, Sep. 1990. <http://doi.org/10.1021/ef00023a034>
- [48] A. Chakma, and F. Berruti, "The Effects of Ultrasonic Treatment on the Viscosity of Athabasca Bitumen and Bitumen-solvent Mixtures," *Journal of Canadian Petroleum Technology*, vol. 32 (5), pp. 48-51, May 1993. <https://doi.org/10.2118/93-05-04>
- [49] R. Gopinath, A. K. Dalai, and J. Adjaye, "Effects of ultrasound treatment on the upgradation of heavy gas oil," *Energy and Fuels*, vol. 20 (1), pp. 271-277, Nov. 2006. <http://doi.org/10.1021/ef050231x>
- [50] P. Kaushik, A. Kumar, T. Bhaskar, Y. K. Sharma, D. Tandon, and H. B. Goyal, "Ultrasound cavitation technique for up-gradation of vacuum residue," *Fuel Processing Technology*, vol. 93 (1), pp. 73-77, Jan. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.09.005>
- [51] S. M. Mousavi, A. Ramazani, I. Najafi, and S. M. Davachi, "Effect of ultrasonic irradiation on rheological

- properties of asphaltenic crude oils," *Petroleum Science*, vol. 9 (1), pp. 82-88, Mar. 2012. <https://doi.org/10.1007/s12182-012-0186-9>
- [52] D. Xu, J. Deng, C. Li, L. Bai, B. Ding, and J. Luo, "Research on viscosity reduction of oil in water for ultra heavy crude oil by using of ultrasonic wave," in *21st International Congress on Sound and Vibration*, Beijing, China, 2014, pp.152-158.
- [53] M. Mullakaev, G. Volkova, and O. Gradov, "Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions," *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, vol. 49 (3), pp. 287-296, Mar. 2015. <http://doi.org/10.1134/s0040579515030094>
- [54] M. Salehzadeh, A. Akherati, F. Ameli, and B. Dabir, "Experimental study of ultrasonic radiation on growth kinetic of asphaltene aggregation and deposition," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 94 (11), pp. 2202-2209, Nov. 2016. <http://doi.org/10.1002/cjce.22593>
- [55] M. Askarian, A. Vatani, and M. Edalat, "Heavy oil upgrading in a hydrodynamic cavitation system: CFD modelling, effect of the presence of hydrogen donor and metal nanoparticles," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 95 (4), pp. 670-679, Apr. 2017. <https://doi.org/10.1002/cjce.22709>
- [56] B. Avvaru, N. Venkateswaran, P. Uppara, S. B. Iyengar, and S. S. Katti, "Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 42, pp. 493-507, Apr, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.010>
- [57] F. Aliev, I. Mukhamatdinov, and A. Kemalov, "The influences of ultrasound waves on rheological and physico-chemical properties of extra heavy oil from Ashalcha field," in *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, Albena, Bulgaria, 2017, pp. 941-948. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/14/s06.118>
- [58] D. Montes, F. B. Cortés, and C. A. Franco, "Reduction of heavy oil viscosity through ultrasound cavitation assisted by NiO nanocrystals-functionalized SiO₂ nanoparticles," *Revista DYNA*, vol. 85 (207), pp. 153-160, Dec. 2018. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.71804>
- [59] A. N. Sawarkar, "Cavitation induced upgrading of heavy oil and bottom-of-the-barrel: A review," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 58, pp. 1-13, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104690>
- [60] J. Cui, Z. Zhang, X. Liu, L. Liu, and J. Peng, "Studies on viscosity reduction and structural change of crude oil treated with acoustic cavitation," *FUEL*, vol. 263, pp. 1-6 Mar, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116638>
- [61] D. Austin, *Method to Upgrade Hydrocarbon Mixtures*, U.S. Patent 2003001979A1, Jan. 2003.
- [62] Z. Yang, C.Zhang,S. Gu, P. Han, and X. Lu, "Upgrading vacuum residuum by combined sonication and treatment with a hydrogen donor," *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, vol. 48, pp. 426-435, Jan. 2013. <https://doi.org/10.1007/s10553-013-0391-2>
- [63] D. Olaya, L. Quintana, and C. Chávez, "Sonochemistry: The future of the profitable heavy crude oil operations," in *Conference and Exhibition Heavy Oil Latin America*, Bogotá D. C., Colombia, 2015.