

Unidad de tratamiento y proceso para la reducción de la viscosidad de un crudo pesado

Sector tecnológico

La presente solicitud de patente se refiere a un sistema y a un proceso que permiten reducir la viscosidad de crudos pesados y extrapesados en instalaciones de superficie por medio de aplicación de ultrasonido.

Tecnología anterior

Los crudos pesados y extrapesados son altamente viscosos, lo que conlleva costos altos en su manejo, baja eficiencia en su producción y altos impactos ambientales en su transformación. Por ejemplo,

- en las operaciones de extracción del yacimiento, la viscosidad alta del crudo pesado disminuye la eficiencia energética de la operación de los sistemas de levantamiento artificial («*artificial lifting*») puesto que afecta el rendimiento de los sistemas de bombeo electro-sumergible, lo cual se traduce en mayores costos.
- en la etapa de deshidratación, las operaciones son muy complicadas porque la separación de las fases en el crudo pesado es más difícil debido a que su densidad es similar a la del agua.
- el transporte de crudo pesado y extrapesado a través de tuberías —es el método más conveniente y económico para la evacuación del crudo y sus productos— es muy difícil debido a su alta viscosidad y baja movilidad.
- los procesos de refinación se hacen más complejos y costosos dado que las refinerías deben modificarse para este tipo de crudos, con el agravante que generan más residuos debido al escaso contenido de fracciones livianas.

- tienen un bajo precio en el mercado y una demanda reducida.

A pesar de los problemas señalados, el crudo pesado es necesario debido a que es un recurso muy abundante y existe una progresiva disminución de las reservas de crudos livianos. Por tanto, resulta indispensable encontrar nuevas maneras de reducir su viscosidad para mejorar su valor agregado.

Las tecnologías maduras que permiten resolver el problema de la viscosidad del crudo –aplicables actualmente a los campos de producción y estaciones recolectoras— consisten, principalmente, en operaciones de calentamiento y diluciones. El calentamiento de crudo a altas temperaturas se realiza por procesos de combustión que, por lo general, se llevan a cabo en las plantas deshidratadoras. Su principio de funcionamiento se basa en el aumento de temperatura del crudo para reducir la viscosidad. Esta alternativa tiene grandes desventajas tales como:

- Altos costos en equipos y requerimientos de combustible.
- Emisiones de gases de efecto invernadero, material particulado, óxidos de azufre y de nitrógeno. Estas emisiones son muy contaminantes porque normalmente se usa el mismo petróleo crudo como combustible.
- No implica un mejoramiento de las características fisicoquímicas del petróleo.
- El transporte a largas distancias representa un problema porque:
 - se requiere el diseño de tubería con aislamiento, lo cual incrementa costos y hace más compleja la operación.
 - se requiere expansión de la tubería
 - se requiere un buen número de estaciones de recalentamiento
 - implica alta tasa de corrosión en la parte interna del tubo.
 - el tratamiento térmico del crudo puede inducir a cambios en la estructura coloidal del crudo y empeorar sus propiedades reológicas [Cfr. Evdokimov, I.N., D.Y. Eliseev, and N.Y. Eliseev, Negative viscosity anomaly in liquid petroleum products after heat treatment.

Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2002. 38(3): p. 171-177]

- la técnica de calentamiento es altamente ineficiente, costosa y contaminante, dado que requiere el empleo del mismo o de otro tipo de hidrocarburos para quemar y proporcionar la energía necesaria para hacer más ligero el crudo original.

La dilución con hidrocarburos destilados livianos es uno de los métodos más eficaces para mejorar la fluidez. Esta técnica se basa en la mezcla del crudo pesado con hidrocarburos menos viscosos, tales como condensados, nafta, keroseno y/o crudos ligeros. Por lo general se usa nafta, lo cual acarrea costos adicionales dado que su manipulación requiere infraestructura adicional. La dilución es una estrategia acertada cuando se cuenta con crudo liviano o hay abundancia de solvente disponible en las cercanías de los campos de producción. Para cumplir con los límites aceptables de transporte, en promedio se requiere un 30% de volumen de diluyente. Dado que los diluyentes son sustancias volátiles, su manipulación y manejo durante el proceso crea problemas operacionales, que se manifiestan en la generación de emisiones fugitivas de compuestos orgánicos. Por esta razón, es frecuente que en estas plantas de tratamiento de crudo pesado se presenten problemas de contaminación atmosférica, relacionados con emisiones de Vapores Orgánicos Volátiles, gases ácidos y olores ofensivos. Estas emisiones provienen de los tanques API, tanques de tratamiento, unidades de enfriamiento por aspersión y, especialmente, tanques de almacenamiento, válvulas y tuberías de venteo. Estas mismas emisiones de gases generan problemas relacionados con Higiene Industrial y Salud Ocupacional por la presencia de vapores de nafta y otros hidrocarburos volátiles, lo cual compromete seriamente la salud de los trabajadores y de la comunidad aledaña. Debido a los inconvenientes mencionados, las soluciones que se llevan a cabo no son satisfactorias puesto que su beneficio se ve reducido por un incremento en los costos de operación y por los impactos ambientales asociados a estas prácticas. También es ineficiente por la necesidad de malgastar productos ya procesados y que pueden ser gestionados de manera muy

diferente. Además, en ocasiones, es necesario importar el diluyente, lo que genera unos costos muy elevados.

Otra opción tecnológica se denomina «*partial upgrading*» que consiste en modificar la composición del crudo, para hacerlo menos viscoso, utilizando métodos de hidrotratamiento («*hydrotreating*») o desasfaltado («*deasphalting*»). Estos procesos ya operan a escala comercial pero, debido a su grado de complejidad y tamaño, solo se usan en las refinerías. Por lo general, requieren infraestructura muy costosa y producen muchos lodos y otros subproductos. Las razones anteriores explican el hecho de que no se instalen este tipo de procesos en las plantas de recolección o estaciones de transporte.

Otras tecnologías también son empleadas para mejorar las características de los crudos pesados («*upgrading*») y de los residuos de refinación («*residue oil*»), tales como las técnicas de extracción de carbono («*carbon rejection*»), adición de hidrogeno («*hydrogen addition*») y su combinación. La tecnología de extracción de carbono («*carbon rejection*») se usa para diferentes combustibles e hidrocarburos pesados calentados bajo presión. A este grupo pertenecen los procesos de visco-reducción («*visbreaking*»), ruptura térmica («*thermal cracking*») y coquización («*coking*»). Por otro lado, la adición de hidrógeno («*hydrogen addition*») reduce la relación carbono/hidrogeno, mediante la saturación de las moléculas usando el gas natural como fuente de hidrógeno. La mayor ventaja de estas tecnologías es que se incrementa el régimen de producción y la calidad de los productos, se eliminan los productos de precio bajo y se reducen las impurezas. Cabe resaltar que todas las alternativas mencionadas implican inversiones fijas y costos de operación altos. Por lo general, las tecnologías mencionadas anteriormente son viables cerca de las refinerías y su relevancia radica en que mejoraría la calidad del crudo justo antes de alimentar el proceso de refinación.

Otra tecnología es la denominada «*emulsiones inversas*» la cual consiste en mezclar el crudo pesado con el agua y surfactantes para su transporte. Sin embargo, por razones económicas, hay restricción en la cantidad de agua que se

puede transportar por los ductos y el manejo adecuado de estas aguas en los terminales se convierte en un problema ambiental.

También pueden incluirse tecnologías que se basan en la reducción de la fricción entre la superficie de la tubería y el fluido, por ejemplo flujos anulares y reductores de fricción. Sin embargo, tienen varios inconvenientes que incluyen incrustaciones por precipitación de asfaltenos, necesidad de mayores presiones en el ducto, una estabilidad del sistema sensible a los cambios de temperatura y un aumento en los costos de capital y operación.

Existen varios métodos emergentes para reducir la viscosidad del crudo pesado. La tecnología conocida como *Jet Shear*[™] (no tiene traducción al español y se conoce de esta manera en el argot técnico) de *Fractal Systems* consiste en un proceso que combina tres etapas principales: mezcla del crudo con diluyente, calentamiento térmico y cavitación hidrodinámica. Al final, el producto resultante, pasa a una etapa de enfriamiento para luego ser transportado por tubería. Esta empresa también está desarrollando aplicaciones basadas en la tecnología conocida en el arte como ARP (por las siglas en inglés de «*Acid Reduction Process*», Proceso de reducción ácida) que reduce la acidez del crudo por medio de destrucción térmica de los grupos ácidos a temperaturas por debajo del punto de craqueo (810 °C). En Intevep-PDVSA se están realizando pruebas con un método que también se enfoca en la eliminación de compuestos ácidos, pero que se basa en neutralización. Este método no excluye la necesidad de dilución, sino que reduce la proporción de diluyente que se requiere. Este proceso genera aguas residuales que requieren tratamiento terciario.

Otras tecnologías emergentes pueden clasificarse en cuatro categorías: Hidrogenación («*hydrogen addition*»), eliminación de carbono («*carbon rejection*»), extracción y ultrasonido. En ultrasonido se destacan los avances a escala piloto de las compañías Nexgen y Sulphco («*sonocracking*»). Existen otras técnicas que involucran craqueo catalítico usando líquidos iónicos, así como también el uso de nanotecnología y nanopartículas para mejorar las propiedades del crudo.

Dentro de las nuevas alternativas, el ultrasonido ofrece los resultados esperados en la reducción de viscosidad, debido a que las ondas ultrasónicas –cuando se propagan en líquidos– generan cavitación acústica y otros cambios físicos y químicos en el medio que se propaga. Para el procesamiento de líquidos con ultrasonido se utilizan ondas mecánicas de alta energía caracterizadas por tener alta amplitud y baja frecuencia, que por lo general se denomina ultrasonido de alta intensidad. La energía de las ondas se transmite a través del contacto directo entre el fluido y una pieza cilíndrica metálica, que vibra longitudinalmente a frecuencias en un rango de 18 a 40 kHz. El proceso inicia con la generación de las ondas ultrasónicas –por medio de un generador ultrasónico– que se transmiten a los fluidos a tratar, desencadenando varios fenómenos físicos y químicos. Uno de los más destacados es el de la cavitación acústica, que consiste en la formación, crecimiento y colapso de microburbujas. El colapso de estas burbujas conlleva una implosión violenta –que se manifiesta con altas presiones y temperaturas a nivel molecular– que permite crear las condiciones ideales para la ruptura de moléculas grandes presentes en el crudo. La ruptura de moléculas grandes con la subsecuente formación de sustancias más livianas, favorece la reducción de la viscosidad en el petróleo.

También existe el proceso denominado «*cavitación hidrodinámica*». La diferencia principal entre la cavitación hidrodinámica y la cavitación acústica es la manera de introducir energía al líquido. En los dos tipos de cavitación, las burbujas que se generan requieren que previamente existan unas zonas de baja presión. La diferencia fundamental radica en los mecanismos que hacen posible la disminución de la presión, que en la cavitación hidrodinámica está asociada con el movimiento hidrodinámico de un fluido bajo ciertas condiciones de velocidad, mientras que en la cavitación acústica la disminución de la presión se debe a la propagación de ondas ultrasónicas en el fluido.

Algunos antecedentes ya mencionan el empleo de energía sónica para el tratamiento de hidrocarburos. Algunos se refieren específicamente a proceso de desulfuración. US 2004035753 enseña un proceso que aplica energía sónica a hidrocarburos que se combinan con una fase acuosa para formar una emulsión,

colocando las fases en íntimo contacto durante la exposición a la energía sónica. Entre las conversiones logradas por dicho desarrollo se incluyen la eliminación de compuestos orgánicos de azufre, la eliminación de compuestos orgánicos nitrogenados, la saturación de dobles enlaces y anillos aromáticos y la apertura de anillos en estructuras de anillos fusionados. Además de lo anterior, las densidades API de los combustibles fósiles y las fracciones de petróleo crudo aumentan (es decir, disminuyen las densidades) como resultado de los tratamientos. En este antecedente, si bien se menciona la importancia del empleo de energía sónica, no es desglosado con claridad cómo aplicarlo directamente en crudos pesados y cómo establecer las condiciones óptimas para lograr una disminución de la viscosidad deseada. El antecedente se centra en describir de una manera muy general la teoría, especialmente con el objetivo de retirar componentes indeseados, pero no explica cómo se puede hacer un control del proceso y alcanzar la disminución de la viscosidad de los hidrocarburos pesados. De la misma manera, US 2005205463 relaciona cómo fracciones de petróleo crudo —en particular, los residuos de petróleo— se pueden convertir en mezclas de bajo punto de ebullición mediante un proceso que aplica ultrasonidos a estos materiales en una emulsión acuosa. El proceso da como resultado una mejora del material de partida al aumentar la cantidad de aceite utilizable y otros productos que se pueden extraer del material de partida, y al aumentar la gravedad API y reducir la viscosidad del material. Este documento patente tampoco relaciona cómo estructurar de una manera estandarizada el proceso empleando el ultrasonido para alcanzar el objetivo de disminuir la viscosidad.

Otra manera de aplicar el ultrasonido en hidrocarburos lo relaciona el documento patente US 5824214. El petróleo crudo pesado, que contiene al menos un 1% en peso de agua, se somete a energía sónica a una frecuencia baja de 400 Hz a 10 kHz en el fondo del pozo en presencia de un catalizador de hidrogenación de metales que hace que el agua del petróleo crudo reaccione y forme hidrógeno. Se emplean catalizadores que incluyen níquel sobre polvo de zinc, platino sobre carbono y paladio sobre carbono. Al crudo pesado se le reduce la cantidad de asfaltenos y resinas lo que facilita su refinación y transporte por oleoducto.

Si bien existen antecedentes que proponen el empleo de ultrasonido para tratar, con diferentes objetivos, hidrocarburos pesados, es necesario un desarrollo que permita encontrar, de manera efectiva y eficiente, cómo lograr disminuir la viscosidad de un hidrocarburo pesado para disminuir su viscosidad de una manera significativa.

Descripción detallada de la invención

La presente invención se relaciona con un sistema y un proceso que emplea este sistema que conforma una unidad, para reducir la viscosidad de crudo pesado mediante la aplicación de procesos de cavitación acústica inducidos por la irradiación de ultrasonido de alta intensidad.

La unidad de tratamiento y el proceso objetos de la presente solicitud de patente son resultado de años de investigaciones y desarrollos asociados con la aplicación de ultrasonido, de manera que pueda reducirse la viscosidad de este tipo de crudos en porcentajes que oscilan entre el 60% y el 90% y se basan en la inducción de un proceso de cavitación acústica generado con ultrasonido para proporcionar cambios fisicoquímicos en el crudo original. De esta manera se logra la ruptura de macromoléculas (como las resinas y asfaltenos) transformándose en moléculas más livianas y disminuyendo su viscosidad original. Debe llamarse la atención que el sistema y el proceso están diseñados para integrarse fácilmente en plantas existentes de tratamiento de crudo, en especial está previsto para su integración en plantas donde se encuentre agua asociada al crudo, logrando resultados mucho más altos. El ultrasonido tiene el potencial de alterar las propiedades en líquidos a través de las vibraciones mecánicas y de los fenómenos que desencadena. Las alteraciones pueden ir desde un simple fenómeno de agitación turbulenta en un fluido, hasta modificaciones en la estructura, morfología y composición de los materiales que son sometidos a este tipo de vibraciones. Cuando se aplica en líquidos, se genera el fenómeno denominado cavitación acústica, que permite inducir transformaciones físicas y químicas que pueden descomponer las sustancias del crudo responsables de su alta viscosidad. Como se estableció, existen varias investigaciones y patentes que han explorado

y comprobado el potencial de esta tecnología en el tratamiento de crudo pesado. Sin embargo, se requiere de esfuerzos adicionales para establecer su aplicación comercial.

El tratamiento con ultrasonido se puede considerar como una etapa de pretratamiento para la refinería —no sólo como un paso necesario para su transporte— puesto que reducir la densidad y viscosidad, permite un desempeño más efectivo en el proceso de refinamiento. Al mejorar la viscosidad y API del crudo se reduce el contenido de los compuestos pesados y se aumenta la fracción de livianos. Al refinar se obtiene más proporción de productos valiosos y menos residuos en los fondos de las torres de destilación. Esto conlleva un beneficio doble, tanto económico como ambiental. Respecto a las ventajas ambientales, el tratamiento ultrasónico se considera una tecnología limpia para el mejoramiento de crudo.

La presente solicitud de patente está enfocada, principalmente, en su uso en plantas de deshidratación, aunque la persona versada en la materia entenderá —sin ninguna dificultad— las diferentes aplicaciones que tiene la presente invención. Se busca —en relación con otros desarrollos recientes y procesos similares donde el ultrasonido ya está operando a escala comercial— instalaciones mucho más simples y el acoplamiento a procesos existentes, algo que no logran los antecedentes. Además, el sistema permite efectuar numerosos experimentos a escala de laboratorio antes de instalarla en los campos de producción.

El ultrasonido en el rango de 20 a 100 kHz produce ondas de alta energía. Por esta razón también es conocido como ultrasonido de alta potencia. Los niveles altos de energía son útiles para inducir cambios en las propiedades químicas de las sustancias. El estudio de la sonoquímica se preocupa por entender los efectos del ultrasonido en los líquidos, dado su potencial en el mejoramiento o iniciación de la actividad química en la solución. Cuando el ultrasonido se propaga en líquidos orgánicos como el caso del petróleo, se observan varios fenómenos interesantes, que dependen de la polaridad de las moléculas constitutivas. En el caso de las moléculas no polares, tales como la fracción de los saturados y

aromáticos, se observa una absorción alta de la energía de la onda, mientras que los líquidos polares, como las resinas y los asfaltenos, muestran una absorción moderada y favorecen altas velocidades de propagación. Debido a que el fluido absorbe la onda, el momentum absorbido del campo acústico crea flujos o corrientes internas, denominados «flujos acústicos» («*acoustic streaming*»).

El fenómeno de cavitación consiste en la formación, crecimiento y colapso violento de burbujas en un líquido. Estas burbujas se forman en regiones donde la presión se reduce e iguala a la presión de vapor. Para que ocurra la cavitación se requiere concentración de energía dentro del líquido. Además se favorece cuando el líquido contiene burbujas previamente formadas, partículas o gases disueltos.

Existen varios tipos de cavitación según la manera de introducir energía al líquido, por ejemplo: hidrodinámica, acústica, óptica (laser) y por bombardeo de partículas. Aunque los más comunes son la cavitación hidrodinámica y la cavitación acústica. En los dos tipos de cavitación, las burbujas que se generan requieren que previamente haya unas zonas de baja presión. En la cavitación acústica el descenso de la presión por debajo de la presión de vapor de saturación es insuficiente para generar burbujas. La presión local del líquido necesita disminuir a valores de presión negativa, la cual se puede lograr cuando se introduce ultrasonido en un líquido. La presión negativa se refiere a la tensión que actúa para expandir el volumen de un líquido, de esta manera se pueden formar muchas burbujas.

La configuración de un sistema acústico es más sencilla que la de un sistema hidrodinámico, dado que carece de elementos móviles y se puede adaptar fácilmente a los ductos existentes en un proceso determinado. Mientras que el hidrodinámico requiere una serie de tuberías, ductos y sistemas de bombeo de alta presión. La desventaja del diseño de los equipos usados en hidrodinámica es que requieren velocidades muy altas del líquido. Por lo general, el flujo se conduce por orificios pequeños, lo cual restringe su uso en líquidos de baja viscosidad, porque este orificio es propenso a bloqueos. Por eso en el caso del crudo pesado que compete a este desarrollo, esta alternativa tecnológica

presenta dificultades, debido a la facilidad de obstrucción por la incrustación y formación de ceras asociadas al crudo.

La presente invención se relaciona con una unidad de tratamiento que permite la reducción de un crudo pesado y se compone de los siguientes elementos:

- Una tubería (110) –denominada aquí tubería inicial— para el transporte de crudo pesado.
- La tubería inicial (110) se divide entre 2 y 5 tuberías (120) en paralelo (denominadas aquí tuberías intermedias)
- Cada tubería intermedia (120) cuenta con una serie de entre 2 y 5 sonorreactores (200)
- Cada sonorreactor (200) tiene entre 1 y 5 celdas de reacción (210) —denominadas aquí celdas— colocadas en serie, envueltas en una carcasa
- Las tuberías de salida de los sonorreactores (250) se reúnen en una única tubería (300) –denominada aquí tubería final—
- La tubería final (300) cuenta con un mecanismo de bypass que se conecta con la tubería inicial (110)

Cada celda de reacción (210) tiene las siguientes características::

- Es cilíndrica
- Tiene una entrada para fluido (220A, 220B o 220C)
- Posee una zona de reacción (211)
- Posee una sonda de ultrasonido (212)
- Posee dos salidas, una de una mezcla de fluido crudo/agua (220B, 220C o 220D) y otra de mezcla de gases/vapores (230)
- Posee un sistema de recuperación de vapores, los cuales son ductos de ventilación de presión negativa que salen del interior de cada celda de reacción

En la salida de cada sonorreactor (200), la tubería de salida con mezcla crudo/agua (220D) y la tubería de mezcla de gases/vapores (230) se conectan a un mezclador estático aire-líquido.

La celda de reacción es el dispositivo encargado de proveer las condiciones adecuadas para que se manifieste el fenómeno de cavitación acústica. Para esto, se requiere la formación de un campo acústico caracterizado por la aparición intermitente de zonas de alta y baja presión hidrostática, inducida por los efectos a nivel molecular que crean las ondas ultrasónicas por su paso a través del líquido, donde en las zonas de baja presión aumentará la probabilidad de aparición de las burbujas de cavitación. Cuando se manifiesta el fenómeno se percibirá el ruido de cavitación, el cual se ha registrado en un rango de 85 a 100 dB(A). Si el fenómeno de cavitación se origina, se desencadenan todos los mecanismos de reacciones químicas que generan los radicales libres y las demás transformaciones de despolimerización y craqueo de cadenas de hidrocarburos que son los medios responsables de la reducción de la viscosidad.

La celda es preferible que tenga forma cilíndrica, dado que esta forma geométrica permite el desarrollo de un campo acústico con pocas interferencias destructivas para las ondas mecánicas. La geometría de la celda es un aspecto relevante, puesto que determina el patrón de comportamiento de las ondas y estos, a su vez, determinan el fenómeno de cavitación acústica. Experimentalmente se ensayaron tres figuras geométricas: cúbica, cilíndrica y octagonal. Los análisis estadísticos demostraron que hay diferencias significativas entre los resultados obtenidos con los contenedores construidos, lo que implica que la forma juega un papel fundamental en los resultados. Para identificar la figura geométrica de la celda con mejor desempeño, se realizaron varios experimentos, tales como medición en incrementos de temperatura, emisión de ruido de cavitación, energía suministrada al sistema y eficiencia calorimétrica.

Por otra parte, la operación propia del sistema electromecánico genera calentamiento. El sistema electromecánico consiste en los circuitos electrónicos que generan la señal de las ondas de ultrasonido, el convertidor piezoeléctrico y la sonda metálica que trasmite la energía al líquido. Su calentamiento ocurre por el movimiento de electrones en los sistemas electrónicos y por las piezas sometidas a altas tasa de vibración. Por tanto, es necesario disponer de elementos que favorezcan el enfriamiento. Puede ser un sistema neumático, que

disponga de aire a presión, para lo cual se conecta un compresor y mangueras flexibles a los ductos de enfriamiento del compartimiento que aloja los cristales piezoeléctricos.

Un sistema hidráulico también puede funcionar con un principio similar al neumático, en el cual se hace pasar agua a través de las paredes exteriores de los contenedores de que alojan los piezoeléctricos. Sin embargo, deben extremarse las medidas de seguridad, porque el agua puede dañar el sistema, por esta razón, esta estrategia es poco frecuente. El usuario puede definir el sistema de enfriamiento que mejor convenga y esté disponible para el sistema electromecánico que elija, también depende las condiciones locales de temperatura y de la ventilación del área donde se instalen los equipos.

El proceso para la reducción de la viscosidad de un crudo pesado contempla:

- Transportar un fluido que incorpore una mezcla de crudo pesado y agua por la tubería inicial (110)
- El flujo de la tubería inicial (110) se divide entre 2 y 5 tuberías intermedias (120)
- El flujo de cada tubería intermedia (120) se introduce en una serie de entre 2 y 5 sonorreactores (200) –uno a continuación del otro—, donde cada sonorreactor posee entre 1 y 5 celdas de reacción (210) también colocados en serie
- El fluido que circula por los sonorreactores es sometido a ondas sonoras con frecuencias entre 24 y 40 kHz
- A la salida de cada celda de reacción la mezcla de gases y vapor es retirada por una tubería (230) establecida para tal fin
- De la misma manera, a la salida de cada celda de reacción es retirada la mezcla de agua/crudo por una tubería (220B, 220C o 220D)
- Posteriormente se mezclan los gases/vapores provenientes de la tubería (230) con el crudo/agua proveniente de las tuberías (220B, 220C o 220D) a la salida de cada sonorreactor con la ayuda de un mezclador estático aire-líquido

- Después de que el fluido ha atravesado la serie de sonorreactores, cada mezcla obtenida es conducida por una tubería (250) hasta una única tubería de salida (300) donde se unen todas las mezclas.
- Para el control del proceso, se realiza una recirculación parcial con un sistema de bypass que va desde la tubería final (300) a la tubería de entrada (110).
- Por último, a la salida de la unidad, se recupera el crudo tratado que sale por la tubería final (300) obteniendo un crudo mucho más liviano.

Un componente esencial del sonorreactor es el sistema de recuperación de vapores, el cual consiste en un sistema de ventilación de presión negativa, que succiona los compuestos volátiles que se forman como producto de las reacciones sonoquímicas al interior de las celdas de reacción. Estos gases capturados se conducen al mezclador «*static-mixer*», donde se combinan las tres fases (líquido, agua y crudo). Por un lado, el flujo bifásico que ya fue tratado con ultrasonido y el flujo de gas cargado de los volátiles recuperados. La instalación de este novedoso sistema de recuperación de vapores no solo es importante a nivel ambiental porque evita emisiones atmosféricas, sino que también aumenta la eficiencia del proceso y grado de reducción de viscosidad, puesto que la mezcla de los volátiles formados en el proceso, ayuda a reducir (por dilución) la viscosidad. El sonorreactor tiene una carcasa («*casing*») que envuelve las celdas de reacción en cada reactor. Esta carcasa se diseña en función del nivel de presión sonora y del espectro de frecuencia. Por lo general los niveles de presión sonora emitidos por el sistema de cavitación acústica se encuentran en el rango de 85 a 105 dB y por tanto, debe construirse de una estructura exterior con láminas metálicas y una capa interna de materiales de alta densidad, por ejemplo, lana mineral.

En el interior de los reactores se encuentran las celdas de reacción. Se denominan celdas porque funcionan de manera independiente y el resultado final depende del efecto combinado del conjunto de dichas celdas. Este modo de uso permite ajustar la necesidad energética de las zonas de cavitación y, por ende, le brinda flexibilidad al proceso permitiéndole adaptarse a la condición propia de cualquier

crudo pesado. Esta característica hace parte importante de la novedad de esta invención.

En cada celda de reacción ocurre el fenómeno de cavitación. Las cámaras de reacción representan un componente importante de esta invención, su diseño debe permitir la formación de zona de cavitación donde la reacción y el fenómeno es más eficiente. Cada celda se compone de un contenedor (que aloja y permite la zona de cavitación), la sonda de ultrasonido (sonotrodo y generador) y el sistema de recuperación de vapores. Además debe contar con una entrada de fluido bifásico (crudo/agua) y con dos salidas, una para fluido bifásico y otro para salida de gases y vapores.

La celda es preferible que se fabrique de materiales metálicos que favorezcan una reverberación al interior del reactor. Su geometría cilíndrica permite un mejor desarrollo del campo acústico y aumenta las probabilidades de crear centros y zonas de cavitación de alta energía. Parte de la función de la celda es impedir que exista una excesiva pérdida de amplitud de onda y mantener un volumen activo de cavitación que sea significativo. Para lograr las condiciones descritas con anterioridad, es preferible que la celda cilíndrica cuente con un radio de aspecto en un rango de 2,5 a 3,5.

La unidad utiliza sonotrodos tipo pesa («*Barbell Horn*»), las cuales mantienen la amplitud de onda cuando se escala los sistemas a dimensiones mayores. Además este tipo de sonda puede proveer amplitudes de onda entre los 90 a 100 μm . Es preferible que la sonda se construya de materiales altamente resistentes a corrosión. Dispositivos únicamente de aluminio son poco recomendables. Las aleaciones más convenientes son aluminio-titanio. Los materiales piezoeléctricos deben ser tipo PZT (Titanio Zirconato de plomo), cuya frecuencia puede oscilar entre 24 a 40 kHz.

Cada celda debe tener el sistema de recuperación de vapores, el cual no se había contemplado en el arte previo. Este sistema evita la pérdida de volátiles y permite que la viscosidad se reduzca más fácilmente. La conservación de este tipo de compuestos ayudan al efecto de dilución.

Para llevar a cabo el proceso, es indispensable definir el sistema de transferencia de energía de la onda mecánica al petróleo. Una vez se define este sistema se realizan las adecuaciones de los sonorreactores que alojaran el crudo pesado. En una de las modalidades trabajadas en el presente desarrollo, se sumerge la sonda de ultrasonido directamente en el fluido. Esta última es la más utilizada en aplicaciones industriales. Los mejores dispositivos de transferencia permiten una amplitud de onda entre el 60 al 90 % para lograr un efecto significativo.

En el paso siguiente se caracteriza el crudo y según su densidad, viscosidad y API. Lo ideal es que el API este en un rango de 10 a 23°.

Posteriormente se debe establecer el porcentaje de agua adecuado que debe conservar el crudo para favorecer los eventos de cavitación. Entonces se dispone de la mezcla crudo/agua que alimenta el sistema de tratamiento con ultrasonido. Esto es una ventaja cuando se proyecten los montajes a escala industrial, dado que el crudo ya viene con agua asociada y simplemente se debe ajustar dicho porcentaje. La configuración óptima permite una mezcla agua/crudo adecuada para lograr el comportamiento hidrodinámico requerido y una fuente de iones (H^+) para acelerar los procesos de oxidación. El contenido de agua en la mezcla puede ser del 30 al 60% .

El comportamiento del flujo tiene un rol crucial en el dimensionamiento del sonorreactor y en la localización de los transductores. Una configuración óptima debe permitir una mezcla adecuada y ajuste de los parámetros de operación. Principalmente es necesario ajustar los niveles de potencia para asegurar el comportamiento hidrodinámico requerido y la mezcla.

Como se ha indicado, el crudo entra por una tubería inicial y se hace fluir por tuberías intermedias que se encuentran en paralelo y que tiene varios sonorreactores en serie. La configuración en serie ayuda a incrementar la capacidad en términos del caudal que se requiere tratar, dado que fracciona el flujo y lo reparte en diferentes unidades de procesamiento. Por otro lado, la configuración en serie ayuda a dar flexibilidad y extender el tiempo de sonicación, debido a que el crudo pasa por sonorreactores sucesivos, lo que aumenta el tiempo de contacto con la zona de cavitación. Resultados experimentales

sugieren un tiempo de retención hidráulica en el rango de 8 a 15 minutos. Adicionalmente, el diseño permite operar a ciclo cerrado, o con recirculación de flujo, lo cual permite extender aún más el tiempo de retención sin necesidad de aumentar considerablemente los requerimientos de unidades adicionales en serie. La recirculación se puede hacer desde el efluente de la planta hasta el afluente. Esta novedad ayuda a reducir considerablemente la necesidad de nuevos sistemas de transmisión de energía al petróleo.

Una de las variaciones que puede tener el sistema consiste en que pueden considerarse una serie de tanques antes de iniciar el proceso permitiendo la dosificación de los fluidos que van a entrar al sistema. Estos tanques pueden contar con un sistema de intercambio de calor que permiten el manejo de la viscosidad a la entrada de la unidad de tratamiento.

La tecnología de tratamiento ultrasónico para reducir la viscosidad del crudo pesado está conformada por los siguientes elementos y características novedosas

- Es un sistema de ensamblaje modular que permite mucha flexibilidad en el diseño, instalación y adaptación a las condiciones existentes de las plantas petroleras donde se puede instalar, esto es: plantas de producción, refinación y transporte.
- Su diseño permite trabajar con volúmenes variables, lo cual no se ha identificado en el arte previo. El sistema está concebido para trabajar con crudos pesados y la configuración modular garantiza flexibilidad y adaptación a las condiciones requeridas por diferentes tipos de crudo.
- El sistema puede trabajar sin la necesidad de suministro de hidrógeno adicional, diluyentes externos, o surfactantes que apoyen el proceso de mejoramiento de crudo. Sin embargo, no existe restricción si se requiere.
- La configuración en paralelo de los flujos de entrada permite aumentar la capacidad –en términos del caudal que se requiere tratar— dado que fracciona el flujo y lo reparte en diferentes unidades de procesamiento.
- La configuración en serie de los sonorreactores ayuda a dar flexibilidad para extender el tiempo de sonicación, lo que aumenta el tiempo de contacto con la zona de cavitación.

- El diseño de la planta permite operar en dos modos: ciclo cerrado y flujo continuo, lo cual permite aún mayor flexibilidad y extender el tiempo que sea necesario la permanencia del fluido con la celda de cavitación. Esta característica aumenta la capacidad volumétrica de la unidad, sin necesidad de recurrir a unidades adicionales de transmisión de vibraciones ultrasónicas.
- El sistema de recirculación permite controlar los tiempos de retención hidráulica
- Los tanques a la entrada de la unidad permiten la dosificación de los fluidos que ingresan al proceso. Opcionalmente los tanques pueden estar provistos de mecanismos de transferencia de calor, para lo cual el usuario puede escoger el método de preferencia, bien sea camisas de calentamiento o serpentines. La necesidad del calentamiento dependerán del punto de fluidez y grados API (10-23 °API) que tenga el crudo con el cual se está trabajando.
- La configuración de cada sonorreactor hace que el líquido bifásico fluya en sentido opuesto al campo acústico emitido por la sonda.
- El sistema de recuperación de vapores favorece la estabilidad y reducción de la viscosidad por dilución, donde los ductos de ventilación de presión negativa —que salen del interior de cada celda de reacción y se conectan al mezclador aire-líquido— permiten la combinación de las tres fases: líquido, agua y crudo.
- El diseño de la carcasa que envuelve las celdas de reacción en cada sonorreactor —construida preferiblemente con una estructura de lámina metálica en el exterior y una capa interna de materiales densos para la absorción de ondas mecánicas emitidas al ambiente durante el proceso de cavitación acústica— optimiza las condiciones de funcionamiento del equipo.
- Cada celda de reacción favorece la reverberación al interior del reactor
- La instalación es simple y el acoplamiento a los procesos existentes es muy factible. Además, demanda relativamente poco espacio.

- El estado del arte nunca refiere un sistema de ductos de ventilación de presión negativa que salen del interior de cada celda de reacción y se conectan al mezclador aire-líquido, con el fin de recuperar vapores y mezclarlos con agua y crudo para la reducción de la viscosidad por dilución.
- El sistema de recirculación permite controlar los tiempos de retención hidráulica.
- El recuperar los vapores de cada celda de reacción, y posteriormente mezclarlos con agua y crudo, permite que en el proceso de dilución de la mezcla, se reduzca y estabilice la viscosidad del crudo. Adicionalmente, gracias al sistema de recirculación y la pluralidad de sonorreactores, el crudo puede someterse repetidas veces al tratamiento acústico, lo cual también ayuda a reducir la viscosidad del petróleo pesado.
- El tratamiento con ultrasonido se puede considerar como una etapa de pretratamiento para la refinería, no sólo como un paso necesario para su transporte, puesto que reducir la densidad y viscosidad, permite un desempeño más efectivo en el proceso de refinamiento. Al mejorar la viscosidad y API del crudo se reduce el contenido de los compuestos pesados y se aumenta la fracción de livianos. Esto quiere decir que al refinar se obtiene más proporción de productos valiosos y menos residuos en los fondos de las torres de destilación. Esto implica un beneficio doble, tanto económico como ambiental.
- Este proceso puede llevarse a cabo en las estaciones de recolección o plantas deshidratadoras de una manera sencilla y fácil de replicar. El costo es muy favorable en relación con la tecnología existente.
- Respecto a las ventajas ambientales, el tratamiento ultrasónico se considera una tecnología limpia para el mejoramiento de crudo. En comparación con otros sistemas, es la que menor impacto ambiental presenta dado que no genera aguas residuales adicionales, no necesita solventes peligrosos ni manipulación de compuestos químicos. Además, no genera ningún residuo sólido, ni lodos como subproducto. Dado que tiene el potencial de sustituir o reducir el uso de los solventes como la

nafta, se mitigarían los problemas de olores ofensivos y de exposición de los trabajadores a compuestos orgánicos volátiles que son muy comunes en las plantas de tratamiento de crudo pesado diluido. Tampoco tiene procesos que impliquen generación de emisiones de gases de combustión o efecto invernadero.

- La tecnología ultrasónica tiene alta flexibilidad, puesto que se puede aplicar en refinerías, en yacimientos o en plantas de deshidratación, realizando algunas adaptaciones específicas.

La persona versada en la materia entenderá —sin mayor inconveniente— las posibles variantes que tiene este desarrollo.

Resumen de las figuras

La figura 1 relaciona una vista en perspectiva de toda la unidad de tratamiento de acuerdo con la presente invención.

La figura 2 relaciona una vista en perspectiva de un sonorreactor de acuerdo con la presente invención.

La figura 3 muestra un esquema del sonorreactor de acuerdo con la presente invención.

La figura 4 muestra un esquema de la unidad de tratamiento de acuerdo con la presente invención.

La figura 5 muestra un esquema de la celda de reacción de acuerdo con la presente invención.

Formas de llevar a cabo la invención

Se realizó una unidad de tratamiento de crudo pesado para reducir la viscosidad de acuerdo con las características aquí reivindicadas. La unidad de tratamiento cuenta con una tubería inicial (110) que se divide en tres tuberías (120), las

cuales, cada una, se conecta a un conjunto de tres sonorreactores (200) en serie, tal y como se muestra en las figuras anexas. Cada sonorreactor (200) cuenta con tres celdas de reacción (210).

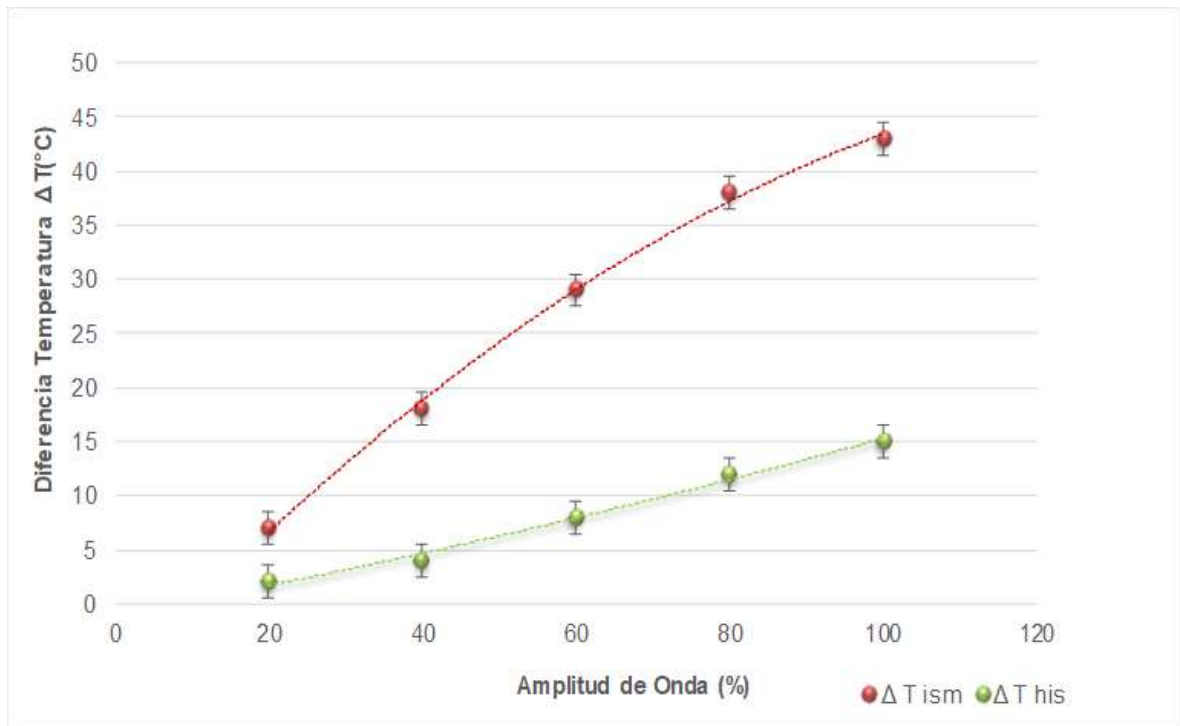
En la tabla siguiente se muestra los resultados de comparación de los crudos tratados, en función de las variables reducción de la viscosidad a igual temperatura (IT), reducción de viscosidad después del tratamiento (TT) y temperatura final de tratamiento.

Tabla 1. Resultados de los tratamientos de los crudos evaluados

Factor	Crudo A 10 API	Crudo B 12 API	Crudo C 18 API
Reducción Viscosidad IT (% a 20°C)	38	(-24)	83
Reducción Viscosidad TT (% a TF °C)	57	66	99
Temperatura Final TF °C	25	48	69

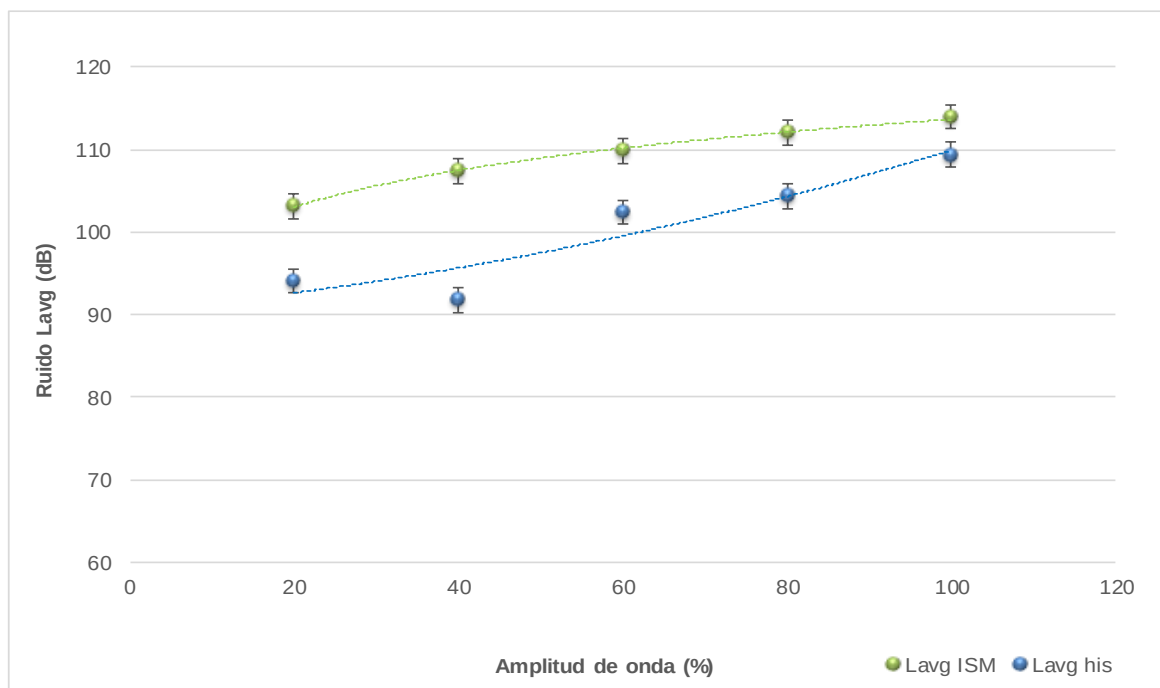
Las tecnologías de generación y transmisión de ultrasonido son aspectos importantes para el diseño y desarrollo de sonorreactores. Los sistemas tipo sonda (*Ultrasonic Horn*), son los equipos que mejor transfieren la energía a los fluidos, por tanto son los más usados en el procesamiento de líquidos. Sin embargo, los experimentos realizados permitieron identificar que pequeñas diferencias en su configuración son relevantes, estas diferencias son en el tipo de sonda, la potencia, la frecuencia, etc. Las siguientes gráficas muestran el comportamiento de la temperatura y de la emisión de ruido de cavitación, en donde se compara el desempeño de dos configuraciones de equipos (ISM 500/UP 400). El equipo ISM LSP-500 fue el mejor en términos de diferenciales térmicos y en la emisión de ruido de cavitación.

DIFERENCIAS DE TEMPERATURAS



ISM 500 /UP 400

EMISIÓN RUIDO CAVITACIÓN



ISM 500 / UP 400