

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Análisis conceptual del uso de nanopartículas magnéticas para la reducción de viscosidad en el transporte de crudos pesados.

Vivian Lucía López Galán y Alejandro Ardila Álvarez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Jimena Lizeth Gómez Delgado

Magíster en Ingeniería de Petróleos y Gas

Codirector

Juan Diego Ceballos Payares

Ingeniería de Petróleos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2021

Agradecimientos

A Dios por permitirme cumplir uno de mis objetivos académicos más importantes y guiarme en cada paso.

A mis padres por su infinito apoyo y confianza en este proceso que ha contribuido en mi formación profesional.

A mi familia que con su ejemplo de amor y dedicación han sido un soporte incondicional.

A mis amigos por compartir experiencias y crear recuerdos inolvidables.

Y finalmente, a mi alma mater, docentes, directivos, colaboradores y todas aquellas personas que hicieron parte de esta etapa y han aportado un aprendizaje constante para crecer íntegramente.

Alejandro Ardila Álvarez

Agradecimientos

Le doy gracias a Dios en primer lugar por bendecirme y darme la sabiduría necesaria a lo largo de mi carrera. A mi mamá por ser el apoyo constante en cada paso y decisión que doy. A mi hermana por ser mi amiga, soporte emocional y por darme la posibilidad de ser tía de Juanji. A mi familia, mis amigos y allegados que con su cariño y consejos me han permitido avanzar por el mejor camino y llegar a donde he llegado. Gracias a nuestra directora de tesis, codirector y maestros que nos guiaron y orientaron con comentarios y aprendizaje para la ejecución de este trabajo de grado, y durante la carrera universitaria. Y finalmente a la Universidad Industrial de Santander, por darme la oportunidad de ser su alumna y ofrecerme los espacios de aprendizaje que tuve, por forjarnos y crear profesionales de calidad, tanto académica como personalmente.

Vivian Lucía López Galán

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Información general del proyecto	13
1.1. Planteamiento del problema	13
1.2. Alcance.....	13
1.3. Objetivos	14
1.3.1. Objetivo general	14
1.3.2. Objetivos específicos.....	14
2. Generalidades de los crudos pesados	15
2.1. Propiedades de los crudos pesados.....	16
2.1.1. Densidad	16
2.1.2. Viscosidad	17
2.1.3. Color	17
2.1.4. Coeficiente de expansión.....	18
2.1.5. Flash Point	18
2.1.6. Punto de fluidez	18
2.2. Alternativas para el transporte de crudos pesados	20

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

2.2.1.	Dilución de crudo pesado	20
2.2.2.	Formación de emulsiones de crudo pesado en agua (O/W)	21
2.2.3.	Calentamiento de crudo pesado.....	23
2.2.4.	Depresores de Punto de Fluidéz	24
2.2.5.	Reductores de fricción.....	25
2.2.6.	Aditivos de reducción de arrastre	26
3.	Nanotecnología.....	28
3.1.	Propiedades de las Nanopartículas	29
3.2.	Clasificación de las nanopartículas	30
3.3.	Síntesis de nanopartículas	31
3.4.	Nanopartículas en la industria petrolera.....	33
3.4.1.	Nanotecnología en la exploración y caracterización de yacimientos	34
3.4.2.	Nanotecnología en la perforación y completamiento	35
3.4.3.	Nanotecnología en la producción	37
3.4.4.	Nanotecnología en la recuperación mejorada de petróleo.....	38
3.4.5.	Nanotecnología en recuperación de crudo pesado	41
3.4.6.	Otros usos de las Nanopartículas.....	42
3.5.	Nanopartículas Magnéticas	42
3.5.1.	Tipos de magnetismo.....	42
3.5.2.	Interacciones atractivas y repulsivas	46

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

3.5.3.	Características y propiedades de las nanopartículas magnéticas.....	50
3.5.4.	Nanopartículas magnéticas en la industria petrolera	56
4.	Fenómeno interfacial de las nanopartículas magnéticas	58
4.1.	Tensión interfacial.....	58
4.2.	Nanopartículas y su carácter anfífilico.....	59
4.3.	Efecto de las nanopartículas en la reducción de tensión interfacial	62
4.4.	Efecto en la reducción de viscosidad para facilitar el transporte de crudo pesado	64
4.4.1.	Calentamiento en presencia de un campo magnético.....	65
4.4.2.	Adsorción de asfaltenos.....	67
5.	Pruebas de laboratorio.....	68
5.1.	Caracterización básica.....	69
5.2.	Pruebas de compatibilidad fluido-fluido	69
5.2.1.	Sludge	70
5.2.2.	Mojabilidad Visual	70
5.2.3.	Rompimiento de Emulsiones.....	71
5.2.4.	Compatibilidad	72
5.3.	Pruebas de compatibilidad fluido-roca.....	73
6.	Conclusiones	75
7.	Recomendaciones.....	77
	Referencias Bibliográficas	78

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Propiedades típicas del aceite y del combustible a 15 °C..	19
--	----

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Porcentaje de crudos pesados en la producción del país	15
Figura 2. Emulsiones que se encuentran en la producción y el transporte de petróleo.	21
Figura 3. Reducción de viscosidad por conversión de emulsión de O/W.....	22
Figura 4. Efecto de la dilución con condensado sobre la viscosidad del crudo para diferentes densidades API.....	24
Figura 5. Perspectiva de la nanoescala. Comparativa de tamaños.....	28
Figura 6. Clasificación según dimensiones de las nanopartículas	31
Figura 7. Métodos de síntesis de nanopartículas.....	32
Figura 8. Contacto con presencia de nanofluidos	40
Figura 9. Material diamagnético que es repelido al contacto con un imán.....	43
Figura 10. Diferentes tipos de comportamiento magnético.	44
Figura 11. Dominios magnéticos según tamaño de partícula del material magnético.....	46
Figura 12. Esquemas de dos partículas con diámetro d en un líquido portador con una capa protectora de espesor δ	48
Figura 13. Esquemas de una nanopartícula recubierta con surfactante	49
Figura 14. Cuatro tipos de estructuras comunes de las nanopartículas magnéticas.....	53
Figura 15. Nanopartículas en presencia y ausencia de un campo magnético	55

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Figura 16. Fuerzas moleculares presentes en la interfase de dos líquidos	59
Figura 17. Diferentes condiciones de mojabilidad y preferencia a formar emulsiones descritas en términos del ángulo de contacto θ	61
Figura 18. Efecto de las nanopartículas sobre la tensión interfacial y la mojabilidad.....	64
Figura 19. Montaje experimental de una prueba de desplazamiento	75

Resumen

Título: Análisis conceptual del uso de nanopartículas magnéticas para la reducción de viscosidad en el transporte de crudos pesados.

Autor: Alejandro Ardila Álvarez, Vivian Lucía López Galán

Palabras Clave: Nanopartículas magnéticas, transporte, calentamiento, crudo pesado, tensión interfacial.

Descripción: Las nanopartículas se presentan como una tecnología innovadora que pretende ser aprovechada en diferentes ámbitos de la industria petrolera, suministrando técnicas que ayuden a solucionar problemas operacionales que día a día se presentan en la cadena productiva de la industria. Con ello, surge el estudio de las nanopartículas magnéticas, las cuales presentan características y propiedades químicas, metálicas y magnéticas únicas en comparación con materiales convencionales al interactuar con un campo magnético. En el caso de estudio, contribuyen a mejorar el transporte de crudo pesado y sus características llegan a cumplir con el objetivo de reducir la viscosidad. La interacción de nanopartículas magnéticas en presencia de un campo magnético busca aumentar la temperatura para que se de una rápida y significativa reducción en la viscosidad, logrando un efecto de autocalentamiento por pérdida de histéresis y pérdida de relajación, debido a esto, se encuentra la necesidad de buscar la propagación de una onda electromagnética a través del sistema en tubería, para que se generen las interacciones esperadas de las nanopartículas en la interfase agua-aceite. Por otra parte, estas nanopartículas también son propensas a adsorber asfaltenos e inhibir su autoasociación, a causa de sus propiedades fisicoquímicas altamente selectivas, reduciendo su capacidad para interactuar entre sí. Esta investigación proporciona una descripción general de las aplicaciones de las nanopartículas en la industria del petróleo, junto con el estudio de las propiedades e interacciones que hacen que las nanopartículas magnéticas tengan el efecto de reducir la viscosidad en crudos pesados, facilitando con ello su transporte. Igualmente se expondrán las pruebas necesarias para evaluar las nanopartículas magnéticas a nivel experimental.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Jimena Lizeth Gómez Delgado. Magíster en Ingeniería de Petróleos y Gas. Codirector: Juan Diego Ceballos Payares. Ingeniería de Petróleos.

Abstract

Title: Conceptual analysis of the use of magnetic nanoparticles for the reduction of viscosity in the transport of heavy crude oils.

Author: Alejandro Ardila Álvarez, Vivian Lucía López Galán

Key Words: Magnetic nanoparticles, transport, heating, heavy oil, interfacial tension.

Description: Nanoparticles are presented as an innovative technology that aims to be used in different areas of the oil industry, providing techniques that help solving operational problems that arise every day in the industry's production chain. Thus, arises the study of magnetic nanoparticles, which present unique chemical, metallic and magnetic characteristics and properties compared to conventional materials when interact with a magnetic field. In this study, they contribute to improve the transport of heavy oil and their characteristics help to reduce viscosity. The interaction of magnetic nanoparticles in the presence of a magnetic field seeks to increase the temperature, so there is a rapid and significant reduction in viscosity values, achieving a self-heating effect by loss of hysteresis and loss of relaxation. Due to this, it is found the need to seek the propagation of an electromagnetic wave through the pipeline system, so that the expected interactions of nanoparticles are generated at the water-oil interface. On the other hand, these nanoparticles are also susceptible to adsorb asphaltenes and inhibit their self-association, due to their highly selective physicochemical properties, reducing their ability to interact with each other. This research provides an overview of the applications of nanoparticles in the oil industry, along with the study of the properties and interactions that allow magnetic nanoparticles to have the effect of reducing viscosity in heavy oil, thus facilitating their transport. In addition, necessary tests to evaluate magnetic nanoparticles at an experimental level will be presented.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemicals. Petroleum Engineering School. Director: Jimena Lizeth Gómez Delgado. Master Oil and Gas Engineering. Co-director: Juan Diego Ceballos Payares. Petroleum Engineering.

Introducción

La importancia de los crudos pesados y extrapesados en la actualidad radica no solo en representar alrededor del 70% de las reservas en el mundo (Felix et al., 2013) sino también más del 50% de la producción total de crudo en Colombia (Malagón et al., 2016); por este motivo, se hace relevante mejorar las tecnologías utilizadas durante toda la cadena productiva del hidrocarburo en mención.

El uso de nanopartículas magnéticas se presenta como una técnica prometedora para el transporte de crudo por oleoducto con características difíciles ya que permite reducir significativamente la viscosidad gracias a sus aplicaciones magneto-reológicas bajo la influencia de un campo magnético externo; de esta manera, nanopartículas que generalmente están constituidas por elementos magnéticos como el hierro, níquel, cobalto y sus compuestos químicos, proporcionan direccionalidad selectiva y contribuyen con la correcta ejecución según el uso requerido.

El presente trabajo de investigación se enfoca en mejorar una etapa de gran relevancia en la industria, la cuál es el transporte del crudo, que, si bien es una fase de grandes problemas operativos, también representa altos costos de funcionamiento. Con el propósito del correcto desarrollo de la investigación, se realiza una búsqueda notable, en relación con los efectos que tiene el uso de las nanopartículas magnéticas para la reducción de la viscosidad. En primer lugar, se establece el uso de las nanopartículas en toda la industria petrolera, con el objetivo de entender

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

esta tecnología no solo en el transporte del crudo, sino también en las demás etapas. Así mismo se identifica mediante una revisión bibliográfica las propiedades y características principales de las nanopartículas magnéticas para su funcionamiento, y con ello establecer el efecto que estas tienen en el transporte de crudo pesado; por último, se establecen las pruebas necesarias para evaluar las nanopartículas magnéticas a nivel experimental.

1. Información general del proyecto

1.1. Planteamiento del problema

El aumento en la producción de crudos pesados ha generado la necesidad de transporte para este tipo de hidrocarburo, lo cual representa problemas operacionales y altos costos debido a su elevada viscosidad, pérdidas por fricción a lo largo de oleoductos y dificultad en el mantenimiento de equipos usados en tecnologías tradicionales, destacando la dilución con nafta, el calentamiento, uso de emulsificantes, entre otros. Esto genera posibles taponamientos en oleoductos por precipitación y deposición de parafinas y asfaltenos, formación de espuma, arenamiento y problemas de corrosión que deriva en grandes pérdidas de dinero.

1.2. Alcance

El alcance que tuvo el proyecto de grado fue identificar la problemática que existe en la actualidad sobre el transporte de crudo pesado, generando con ello la búsqueda de nuevas tecnologías para la reducción de viscosidad como el uso de las nanopartículas magnéticas,

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

identificando los fenómenos interfaciales que ocurren entre las nanopartículas y el crudo pesado. Igualmente se realizó una descripción detallada de las características y pruebas necesarias para llevar a cabo un análisis experimental con esta técnica.

1.3. Objetivos

1.3.1. *Objetivo general*

- Analizar conceptualmente del uso de nanopartículas magnéticas para la reducción de viscosidad en crudos pesados.

1.3.2. *Objetivos específicos*

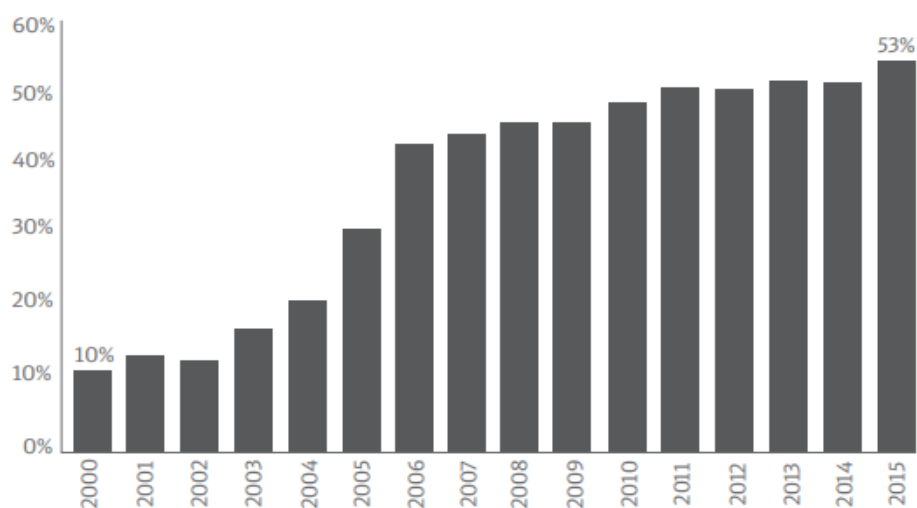
- Establecer el uso de las nanopartículas en la cadena productiva de la industria de los hidrocarburos.
- Enunciar las principales propiedades y características de las nanopartículas magnéticas.
- Describir el fenómeno interfacial de las nanopartículas magnéticas correspondiente a la reducción de viscosidad en crudos pesados, facilitando con ello su transporte.
- Establecer las pruebas necesarias para evaluar las nanopartículas magnéticas a nivel experimental.

2. Generalidades de los crudos pesados

El petróleo es uno de los pilares fundamentales para la economía colombiana, siendo uno de los principales contribuyentes a las finanzas del estado. Los crudos pesados no son ajenos a este crecimiento, ya que de acuerdo con Malagón et al., (2016) alrededor del 50% de la producción actual de crudo en el país son de este tipo de hidrocarburo como se muestra en la *Figura 1*. Así bien, el panorama de la industria en el país experimentó un incremento importante gracias a la producción de crudos pesados, pasando de un 10% a comienzos del siglo XXI, a un 53% en el año 2015 (Muñoz, 2017).

Figura 1.

Porcentaje de crudos pesados en la producción del país.



Nota: Adaptado de (Malagón et al., 2016)

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

La extracción de estos hidrocarburos ha significado un desafío, conociendo que su extracción y procesamiento conllevan una serie de problemas operativos y altos costos de funcionamiento. Los retos que representan este tipo de crudo son grandes y según la Agencia Nacional de Hidrocarburos (2015) se encuentran: buscar nuevas reservas de crudo pesado y extrapesado, incrementar el factor de recobro, reducir los costos de exploración y producción, y desarrollar reservas de crudo no convencional; todo esto de la mano del medio ambiente.

2.1. Propiedades de los crudos pesados

Las características fundamentales de los crudos pesados son alta viscosidad y densidad, complejidad química, alta acidez, alto contenido de asfaltenos, baja gravedad API y baja relación H / C. Debido a estas características desfavorables, los crudos pesados se denominan crudos de baja calidad y plantean muchos desafíos tecnológicos en su producción, transporte y procesamiento tanto para los productores como para los refinadores (Gounder, 2003).

Presenta un alto contenido de hidrocarburos de alto peso molecular y niveles elevados de heterocompuestos que incluyen azufre, nitrógeno, oxígeno y metales. Normalmente, las moléculas presentes en el petróleo pesado tienen más de quince átomos de carbono en la cadena, lo que hace que el proceso de refinación sea más complejo y costoso. Esta mezcla de compuestos de alto peso molecular genera productos con bajo contenido de gasolina de alto octanaje y diesel en la refinería (Santos & Lo, 2014).

2.1.1. *Densidad*

La densidad es la masa de una unidad de volumen de aceite, generalmente expresada como gramos por mililitro (g/ml) o, de manera equivalente, como kilogramos por metro cúbico (kg/m³).

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Es utilizado por la industria del petróleo para clasificar crudos ligeros o pesados. La densidad también es importante porque indica si un aceite en particular flotará o se hundirá en el agua. El petróleo pesado es el hidrocarburo con 22.3°API o menor densidad. Los crudos de 10°API o menor densidad se conocen como extrapesados porque son más densos que el agua (Felix et al., 2013).

2.1.2. *Viscosidad*

Es la resistencia a fluir en un líquido. Cuanto menor es la viscosidad, más fácilmente fluye el líquido. Se expresa en "Poise" o "centiPoise". La viscosidad de un aceite es función de su composición; por lo tanto, el petróleo tiene una amplia gama de viscosidades. En general, cuanto mayor es la fracción de saturados y aromáticos y menor es la cantidad de asfaltenos y resinas, menor es la viscosidad (Hollebone, 2011).

Uno de los aspectos más importantes de los crudos pesados es su viscosidad, ya que la alta viscosidad de estos impacta directamente en la recuperación y productividad del yacimiento. La viscosidad de los petróleos pesados y extrapesados puede fluctuar entre menos de 20 cP y más de 1,000,000 cP. El hidrocarburo más viscoso, el bitumen, es un sólido a temperatura ambiente y se ablanda fácilmente cuando se calienta (Felix et al., 2013)

2.1.3. *Color*

Según Anthony et al (2017) esta es la luz que se transmite a través de los crudos. Es de amarillento a rojo para los crudos ligeros y oscuro o incluso opaco para los petróleos pesados (o de baja gravedad API). Por lo general, como en el caso de los crudos pesados, su tonalidad se oscurece con el aumento de su peso específico, que se incrementa al aumentar su porcentaje de asfaltenos.

2.1.4. Coeficiente de expansión

Esta es la medida del aumento volumétrico de un crudo bajo influencia térmica. Aumenta con el aumento de la gravedad API. Los aceites que contienen una gran cantidad de gases (disueltos) y posiblemente de altas densidades API poseen altos valores de coeficiente de expansión. Los crudos pesados (gravedad API baja) tienen coeficientes de expansión más bajos (Chinenyeze & Ekene, 2017).

2.1.5. Flash Point

El punto de inflamación de un aceite es la temperatura a la que los volátiles que se elevan de la superficie del aceite calentado se encenderán con un destello, al pasar una llama sobre la superficie. De acuerdo con Chinenyeze & Ekene (2017) se considera que un líquido es inflamable si su punto de inflamación es inferior a 140 °F. El punto de inflamación es una consideración importante para la seguridad de las operaciones de limpieza de derrames. La gasolina y otros combustibles ligeros pueden encenderse en la mayoría de las condiciones ambientales y, por lo tanto, son un peligro grave cuando se derraman. Caso contrario ocurre con los crudos pesados, los cuales tienen puntos de inflamación mucho más altos.

2.1.6. Punto de fluidez

Es la temperatura a la que no se ve ningún flujo de aceite durante un período de 5 segundos desde un recipiente de medición estándar. El punto de fluidez del petróleo varía de 140 a 86 °F. Los aceites más ligeros con viscosidades bajas generalmente tienen puntos de fluidez más bajos. El punto de fluidez representa una temperatura constante a la que un aceite se vierte muy

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

lentamente y, por lo tanto, tiene un uso limitado como indicador del estado del aceite. Por ejemplo, los aceites cerosos pueden tener un punto de fluidez muy bajo, pero pueden continuar esparciéndose lentamente a esa temperatura y pueden evaporarse en un grado significativo (Hollebone, 2011).

En la *Tabla 1* se encuentra los valores generales de las propiedades de los crudos pesados:

Tabla 1.

Propiedades típicas del aceite y del combustible a 15 °C.

PROPIEDAD	UNIDAD	CRUDO PESADO
VISCOSIDAD	m.Pa . s	50 a 50,000
DENSIDAD	g/mL	0.88 a 1.00
GRAVEDAD API		10 a 30
TENSIÓN INTERFACIAL	mN/m	15 a 30
FLASH POINT	° C	-30 a 60
POUR POINT	° C	-30 a 30

Nota: Adaptado de (Hollebone, 2011)

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

2.2. Alternativas para el transporte de crudos pesados

Para transportar los aceites pesados de forma económica, la caída de presión en la tubería debe reducirse para minimizar la potencia de la bomba necesaria para empujar el aceite a una larga distancia; sin embargo, debido a su alta viscosidad en condiciones de yacimiento en comparación con los crudos ligeros convencionales, la tubería convencional no es adecuada para transportar crudo pesado a las refinerías sin reducir su viscosidad (Hart, 2014), por lo cual, se deben suministrar diversas herramientas para su óptimo transporte, entre las que se encuentran:

2.2.1. Dilución de crudo pesado

La alta viscosidad en condiciones de yacimiento es un revés importante para la recuperación y el transporte de crudo pesado a través de oleoductos, por lo tanto, la mezcla o dilución de crudo pesado para reducir la viscosidad es uno de los varios medios para mejorar el transporte a través de tuberías y representa una técnica comúnmente utilizada en la industria del petróleo desde la década de 1930 (Hart, 2014).

Este proceso consiste en la adición de hidrocarburos líquidos al petróleo pesado. Esta es una opción eficaz para reducir la viscosidad del aceite y facilitar su movilidad en la tubería, ya que una proporción de 20-30% de disolvente suele ser suficiente para evitar caídas de alta presión o la necesidad de altas temperaturas, además, diluir el crudo puede facilitar ciertas operaciones como deshidratación y desalación (Speight, 2014)

De acuerdo con Hart (2014) los diluyentes más utilizados incluyen: condensado de la producción de gas natural, nafta, queroseno, crudos más ligeros, entre otros; sin embargo, se ha investigado el uso de disolventes orgánicos como alcohol, metil terc-butil éter, terc-amil metil éter; el uso de estos disolventes se basa en la mejora del índice de octano de la gasolina.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

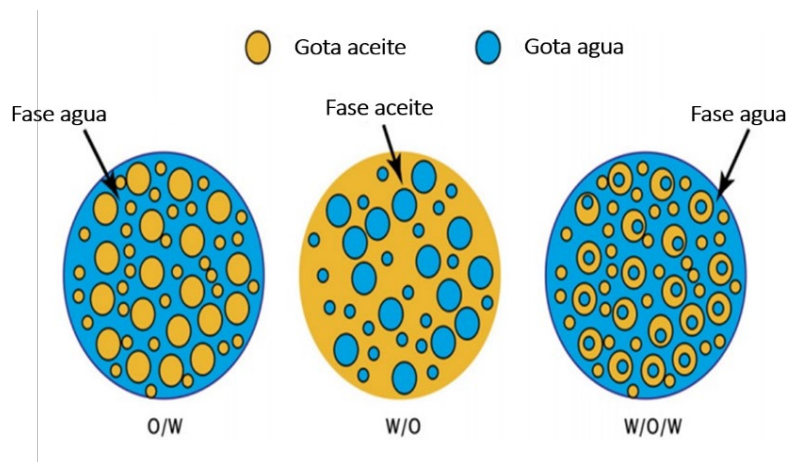
Esta tecnología es la solución más utilizada donde hay condensados o crudo más ligero disponible para transportar petróleos pesados por oleoducto, pero puede requerir inversiones sustanciales en bombeo debido al aumento del volumen de transporte y la necesidad de separar en algún momento el solvente, procesarlo y posteriormente devolverlo al sitio de producción del petróleo (Speight, 2014).

2.2.2. Formación de emulsiones de crudo pesado en agua (O/W)

Las emulsiones ocurren naturalmente en la producción de petróleo y tuberías, principalmente las de agua en aceite (W/O) Y unas aún más complejas como las de aceite en agua en aceite (O/W/O) como se muestra en la *Figura 2*. De acuerdo con Speight (2014) estas emulsiones son perjudiciales para la producción de petróleo, ya que aumenta la viscosidad del aceite, aumentan los problemas de corrosión y son difíciles de romper en las unidades de desalinización y deshidratación antes de la refinación.

Figura 2.

Emulsiones que se encuentran en la producción y el transporte de petróleo.



Nota: Adaptado de (Martínez-Palou et al., 2011)

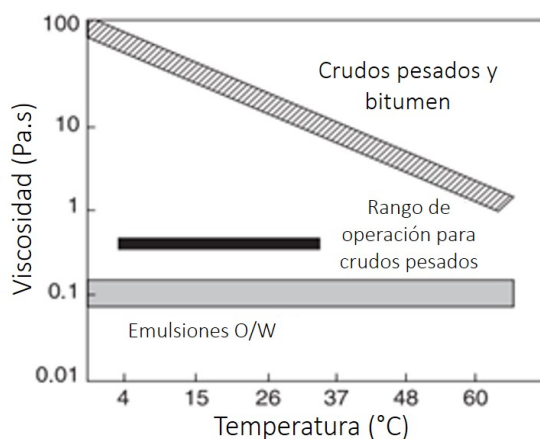
ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

El método de creación de emulsiones consiste en dispersar el crudo pesado en agua en forma de gotas, estabilizadas por tensioactivos, lo que conduce a una importante reducción de la viscosidad (Saniere et al., 2004). Se produce una emulsión de aceite en agua estable con viscosidad reducida. Los métodos utilizados para generar las gotas de aceite para crear las emulsiones incluyen el uso de dispositivos como máquinas de dispersión, mezcla con rotor-estator, molinos coloidales, homogeneizadores de alta presión que aplican altos esfuerzos de cizallamiento, emulsificación por membrana y ondas ultrasónicas (Hart, 2014).

Una emulsión típica se compone de un 70% de petróleo, un 30% de fase acuosa y 500-2000 ppm de aditivos químicos. La emulsión resultante como se observa en la *Figura 3* tiene una viscosidad en el rango de 50-200 cP en las condiciones de operación de la tubería y es particularmente estable (Saniere et al., 2004).

Figura 3.

Reducción de viscosidad por conversión de emulsión de O/W.



Nota: Adaptado de (Saniere et al., 2004)

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Muy a menudo, las emulsiones O / W se producen deliberadamente para reducir la viscosidad de los crudos altamente viscosos para que puedan transportarse fácilmente a través de la tubería. La emulsión aceite en agua reduce la viscosidad de los crudos pesados y puede proporcionar una alternativa al uso de diluyentes o calor (Speight, 2014).

2.2.3. *Calentamiento de crudo pesado*

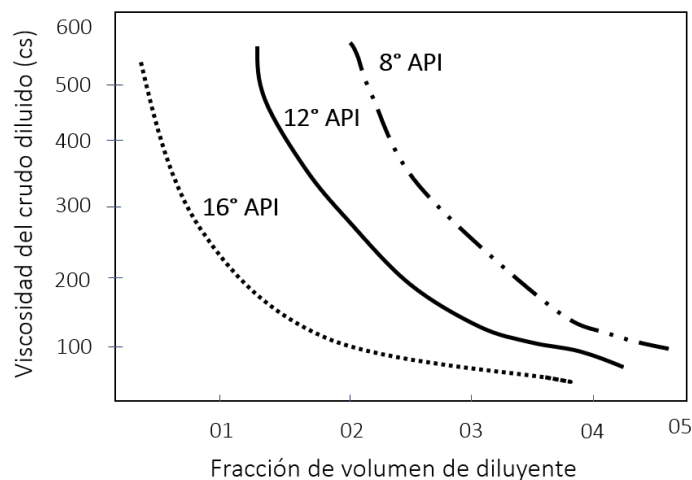
Este es el segundo método más utilizado para transportar petróleo pesado por oleoducto. Dado que la viscosidad disminuye rápidamente al aumentar la temperatura, el calentamiento es un método atractivo para mejorar las propiedades de flujo de los crudos pesados.

El principio según Speight (2014) es conservar la temperatura elevada (373.15 K) a la que se produce el petróleo en la boca del pozo a través del aislamiento de las tuberías; sin embargo, el calentamiento externo del petróleo pesado siempre es necesario debido a las pérdidas de calor que siempre ocurren, como resultado de un flujo bajo o una capacidad de tubería no utilizada. El método de calentamiento funciona solo cuando el aceite se recalienta en las estaciones de bombeo a través de calentadores de fuego directo.

La respuesta de la viscosidad a los cambios de temperatura para algunos aceites pesados se muestra en la *Figura 4*; por lo tanto, el calentamiento es un medio alternativo para mejorar las propiedades de flujo del petróleo. Esto se debe a que la viscosidad del petróleo pesado se reduce en varios órdenes de magnitud al aumentar la temperatura. Esto implica precalentar el crudo pesado seguido del calentamiento posterior del oleoducto para mejorar su flujo (Hart, 2014).

Figura 4.

Efecto de la dilución con condensado sobre la viscosidad del crudo para diferentes densidades API.



Nota: Adaptado de (Saniere et al., 2004)

Por otra parte, según Saniere et al (2004) se evidencia ciertos problemas como el diseño de tuberías con calefacción, implicando ciertas consideraciones como la expansión de tuberías, número de estaciones de bombeo/calefacción, pérdidas de calor, entre otras; también surgen problemáticas como los altos costos y la mayor tasa de corrosión de tubería interna debido a la temperatura. Evdokimov et al., (2002) muestra en su estudio que el tratamiento térmico podría inducir cambios en la estructura coloidal de los crudos y empeorar sus propiedades reológicas.

2.2.4. Depresores de Punto de Fluidez

La precipitación y agregación de macromoléculas de asfaltenos en el petróleo contribuyen en gran medida a su alta viscosidad y densidad, lo que resulta en su alta resistencia al flujo en tuberías;

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

por lo tanto, suprimir este efecto mediante el uso de depresores del punto de fluidez ayudará a mejorar las propiedades de flujo del aceite (Hart, 2014). Los depresores del punto de fluidez (PPD), también conocidos como modificadores de cristales de cera, son aditivos químicos que afectan la nucleación, adsorción y solubilidad de las ceras. La modificación de la cristalización de la cera puede ayudar a reducir apreciablemente el punto de fluidez, la viscosidad y el límite elástico del petróleo crudo, lo que facilita el transporte de los crudos cerosos.

Se han descrito de acuerdo con Speight (2014) muchos compuestos poliméricos como depresores del punto de fluidez, los más utilizados para los aceites pesados cerosos son poli- α -olefina altamente ramificada, ésteres de alquilo de copolímeros de ácido carboxílico insaturado- α -olefina, éster de ácido graso de etileno-vinilo, copolímeros de acetato de vinilo- α -olefina estireno anhídrido maleico, amidas de ácido graso de cadena larga y poli-n-alquil acrilatos y copolímeros de metacrilato.

La naturaleza compleja del crudo pesado crea muchos desafíos durante su transporte a larga distancia, especialmente cuando se utilizan oleoductos. Hart (2014) afirmó, que para superar el problema de la formación de cristales de cera como una red entrelazada de láminas finas que bloquean las tuberías, se utilizan PPD, los cuales contienen un grupo alquilo de cadena larga soluble en aceite y un resto polar en la estructura molecular. El grupo alquilo de cadena larga se inserta en el cristal de cera y el resto polar existe en la superficie de la cera y reduce el tamaño del cristal de cera. El PPD en la mayoría de los casos posee grupos funcionales altamente polares.

2.2.5. Reductores de fricción

El arrastre viscoso, la fricción de la pared y la caída de presión en la tubería son mucho mayores en el petróleo pesado en comparación con los crudos ligeros convencionales. El arrastre es el

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

resultado de tensiones en la tubería debido al cizallamiento del fluido que causa una caída en la presión del fluido. Esto dificulta el bombeo de aceite a grandes distancias (Hart, 2014).

Debido a esta caída de presión, el fluido debe transportarse con suficiente presión para lograr el rendimiento deseado. Cuando se necesitan tasas de flujo más altas, la deformación del fluido es mayor y los esfuerzos cortantes aumentan, por lo que se debe aplicar más presión para mantener el flujo a la misma velocidad promedio (Speight, 2014).

Por lo tanto, la reducción de arrastre es una técnica de lubricación basada en el flujo núcleo-anular para reducir la presión en el transporte de petróleo pesado por tuberías. Las técnicas comúnmente utilizadas para reducir la fricción y mejorar el transporte de petróleo crudo pesado por tuberías incluyen aditivos reductores de arrastre y flujo núcleo-anular. Ambas tecnologías reducen el arrastre del flujo variando el campo de velocidad, como amortiguar la fluctuación turbulenta en la región cercana a la pared del oleoducto, mientras que el flujo en el oleoducto de petróleo pesado es laminar o ligeramente turbulento con una resistencia mínima al flujo basada en la influencia de la viscosidad en el arrastre del flujo (Hart, 2014).

Sin embargo, la mayoría de los estudios sobre la reducción del arrastre por flujo prestan atención principalmente a reducir la viscosidad por métodos físicos o químicos, pero de acuerdo con la ley de viscosidad de Newton, el arrastre por flujo depende de la viscosidad del fluido y del perfil de velocidad.

2.2.6. Aditivos de reducción de arrastre

De acuerdo con Hart (2014) la reducción del arrastre fue descubierta hace décadas por Toms (1948), quien observó una reducción del arrastre de aproximadamente un 30-40% tras la adición de polímero (metacrilato de metilo) al monoclorobenceno turbulento que fluye a través de la

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

tubería. A este respecto, los aditivos reductores de arrastre ayudan a reducir la fricción cerca de las paredes de la tubería y dentro del núcleo del fluido turbulento en movimiento; por lo tanto, para la conservación de energía y la alta eficiencia de la transferencia de crudo pesado, la reducción de la resistencia es vital.

Los agentes reductores de arrastre se pueden dividir en tres grupos principales: tensioactivos, fibras y polímeros. El papel clave de estos aditivos es suprimir el crecimiento de remolinos turbulentos mediante la absorción de la energía liberada por la ruptura de la capa laminar; además, ayuda a reducir la fricción cerca de las paredes de la tubería y dentro del núcleo del fluido turbulento durante el transporte, lo que da como resultado un alto caudal a una presión de bombeo constante (Hart, 2014).

Los tensioactivos pueden reducir la tensión interfacial de un líquido, mientras que las fibras y los polímeros se orientan en la dirección principal del flujo, limitando la aparición de remolinos que dan como resultado una reducción de la resistencia. El requisito más importante es que el aditivo reductor de arrastre debe ser soluble en el petróleo y para el caso de los polímeros, se sabe que las siguientes propiedades influyen en su desempeño: alto peso molecular (1,000,000g/mol), resistencia a la degradación por cizallamiento, rápida solubilidad en el fluido y estabilidad frente al calor, la luz, agentes químicos y biológicos (Speight, 2014).

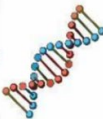
Las dificultades comunes encontradas en el uso de aditivos reductores incluyen la tendencia del aditivo a separarse cuando se almacena, la dificultad para disolverlos en el crudo pesado y el problema de la degradación por cizallamiento cuando se disuelve en este crudo; además, es un desafío determinar la dosis necesaria para mantener una caída de presión constante (Hart, 2014).

3. Nanotecnología

La nanotecnología se presenta como la técnica encargada del estudio y manipulación de la materia a escalas microscópicas, específicamente a escalas nanométricas (1×10^{-9} metros); buscando el aprovechamiento de sus fenómenos y propiedades únicas. Para tener una percepción más clara, se puede imaginar una nanopartícula como una millonésima parte de un milímetro, siendo partículas tan pequeñas, que al menos una de sus dimensiones debe tener una medida menor a 100 nanómetros (Patarroyo & Sandoval, 2019).

Figura 5.

Perspectiva de la nanoescala. Comparativa de tamaños.

1 m	1×10^{-1} m	1×10^{-2} m	1×10^{-3} m	1×10^{-4} m	1×10^{-5} m	1×10^{-6} m	1×10^{-7} m	1×10^{-8} m	1×10^{-9} m
									
Niño	Fruta	Abeja	Piojo	Pelo	Célula	Bacteria	Virus	ADN	Molécula
1 m	1 dm	1 cm	1 mm	100 μ m	10 μ m	1 μ m	100 nm	10 nm	1 nm

Nota: Adaptado de (Ayala, I. A. y Suarez M. 2019).

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Cuando se habla de nanotecnología, se refiere a la creación de materiales funcionales, dispositivos y sistemas mediante el control de la materia a nivel atómico y molecular (Santiago, 2013). Cabe mencionar que el estudio de esta tecnología requiere una fuerte actividad interdisciplinaria que involucra la física, la química, la medicina, la ingeniería, entre otras.

3.1. Propiedades de las Nanopartículas

A escalas tan pequeñas, las propiedades y fenómenos que pueden presentar los materiales nanométricos son diferentes a sus escalas más grandes, lo que se puede aprovechar para crear nuevos materiales y ser utilizados en nuevas aplicaciones. Algunas propiedades intrínsecas de cada material que cambian a un tamaño nano escalar son: incremento de tanto la conductividad eléctrica, resistividad eléctrica, dureza y resistencia de los materiales, ductilidad de cerámicas, de la propiedad luminiscente, reactividad, formación de estructuras cristalinas y colores diferentes. Las nanopartículas poseen características físicas y químicas únicas gracias a su alta área superficial y su tamaño de nano escala. Sus propiedades ópticas son dependientes del tamaño, que las llevan a presentar diferentes colores gracias a la absorción en la región visible. Su reactividad, dureza y otras propiedades también son dependientes de su tamaño único, forma y estructura.

Gracias a estas características, las nanopartículas se presentan como candidatos adecuados para incontables aplicaciones tanto comerciales como domésticas, donde su utilización ha trascendido a campos tan grandes como la energía, química, cosmética, petrofísica, medicina, industria de alimentos, textil, de construcción, electrónica, agricultura, ganadería, la ingeniería del petróleo y gas, entre otras (Khan, Saeed, & Khan, 2019).

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

3.2. Clasificación de las nanopartículas

Las nanopartículas tienen una amplia clasificación que no está determinada a ciencia cierta, pero de manera general se dividen en varias categorías dependiendo de su morfología, tamaño y propiedades químicas. Las diferencias son importantes para determinar su uso y área específica, de tal manera que cumplan su objetivo de manera adecuada.

Según su procedencia pueden ser de origen natural, incidental y sintética. Las primeras se encuentran en la naturaleza, las segundas son generadas por actividades humanas, como emisión de gases en procesos industriales o desechos producto de la combustión de gasolina; y por último, las sintéticas, que son producidas en laboratorio con un fin específico de desarrollo.

De acuerdo con su naturaleza química se dividen en orgánicas (nanopartículas basadas en carbono; como el grafeno, el fullereno, nanotubos de carbono, coloides orgánicos, nanopartículas poliméricas, negro de carbón, entre otros) e inorgánicas, que no tienen una base de carbono, pero sí una mineral o metálica. En esta última encontramos nano cristales, nanopartículas de óxidos, puntos cuánticos, nanoarcillas, entre otros (Chen & Wu, 2000).

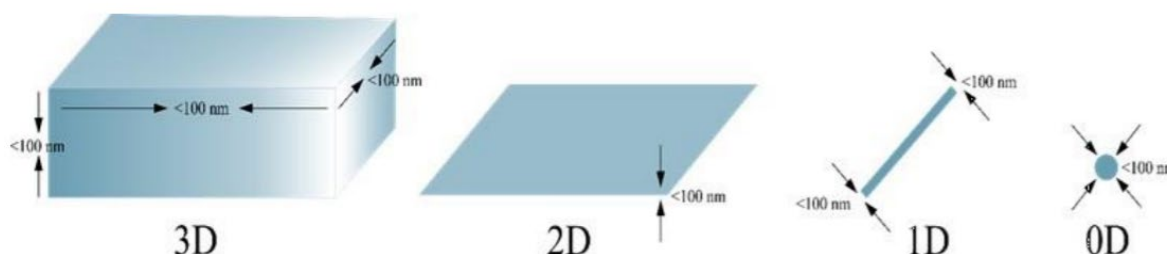
Otra clasificación y quizá una de las más acertadas depende del número de dimensiones presentes en el intervalo nanométrico como se muestra en la Figura 6. Por una parte, están los sistemas confinados en tres dimensiones, donde se incluyen principalmente las nanopartículas y los nanoporos; en este sistema la estructura no permite el libre movimiento de partículas en cualquier dimensión. También encontramos los sistemas confinados en dos dimensiones, o cuasi-unidimensionales, que incluyen nanocables, nanovarillas, nanotubos y nanofilamentos. Y, por último, los sistemas confinados en una dimensión, o cuasi-bidimensionales, que incluyen discos o plaquetas, materiales multicapas y películas ultrafinas sobre una superficie (Aceves, 2009). Y

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

finalmente, el sistema cero dimensional, en el cual los electrones están confinados en las 3 direcciones.

Figura 6.

Clasificación según dimensiones de las nanopartículas.



Nota: Adaptado de (Ayala. Suarez, M. 2019).

3.3. Síntesis de nanopartículas

Existen varios métodos que pueden ser empleados para la síntesis de nanopartículas con diferentes grados de calidad, rapidez y costos; sin embargo, estos pueden ser divididos a grandes rasgos en dos grupos: “*Bottom-Up*” y “*Top-Down*”. Estos acercamientos a su vez se clasifican en varias subclases basados en la operación, condiciones de reacción y protocolos adoptados.

El método *Top-Down* emplea un principio destructivo, donde inicialmente se tiene una molécula de gran tamaño, que se descompone en unidades más pequeñas (a escala nanométrica) para que posteriormente sean convertidas en nanopartículas de manera adecuada. Este método generalmente conlleva a elevados costos energéticos, imperfección en la superficie y contaminación, pero ofrece fiabilidad y complejidad en los dispositivos.

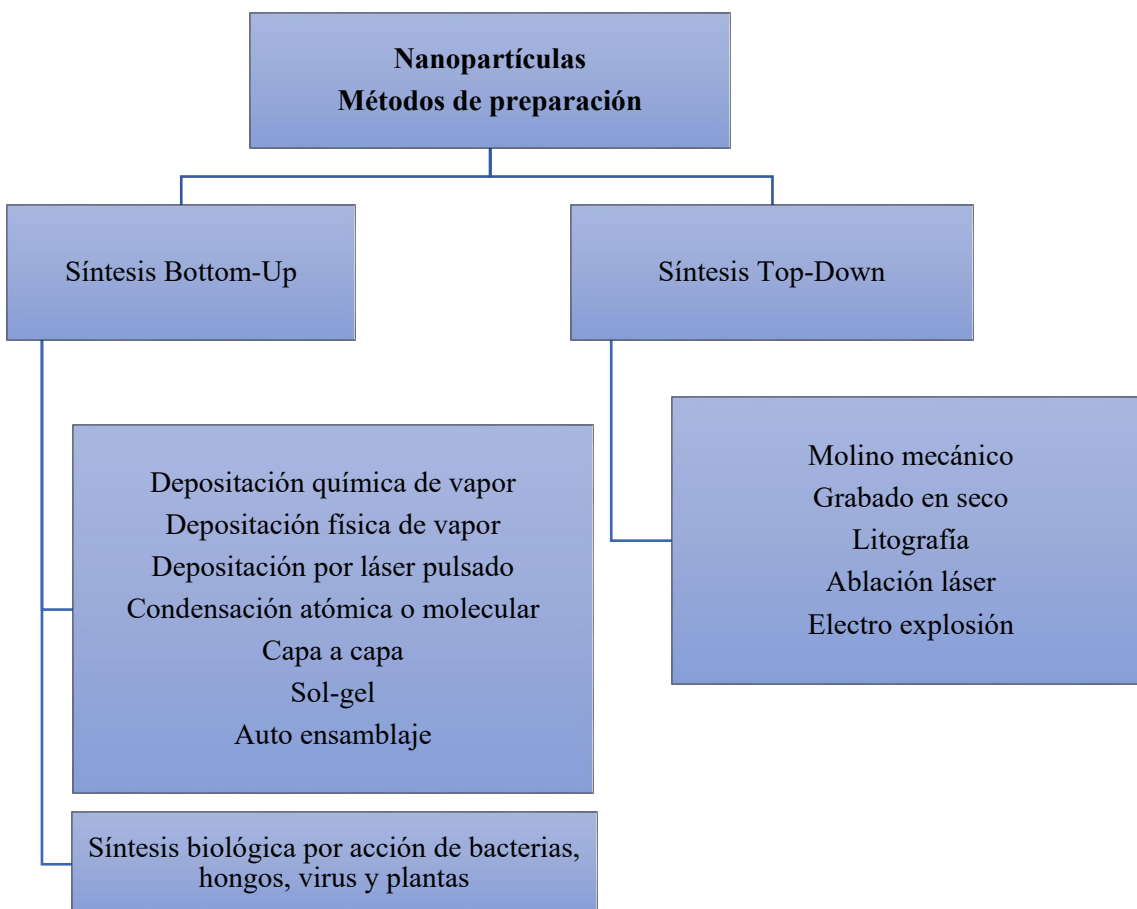
ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Por otra parte, el método *Bottom-Up* forma nanopartículas a partir de sustancias más pequeñas y simples, que pueden ser átomos o moléculas. Este acercamiento también es llamado “de construcción” e incluye técnicas de sedimentación y reducción, donde abarcan métodos coloidales como el sol-gel, pirólisis laser y métodos biológicos como la síntesis por acción de bacterias, hongos, virus y plantas.

En la Figura 7 se presentan las técnicas más usadas para la fabricación de nanopartículas:

Figura 7.

Métodos de síntesis de nanopartículas.



Nota: Adaptado de (Khan, I., Saeed, K., Khan, I. 2017).

3.4. Nanopartículas en la industria petrolera

Durante los próximos años, se prevé que la demanda mundial de energía aumente hasta casi un 60%, una tendencia desafiante que solo se puede superar con avances revolucionarios en la ciencia y tecnología de la energía (Mokhatab et al., 2006). Los avances en nanotecnología abren la posibilidad de ir más allá de las alternativas actuales de suministro de energía mediante la introducción de tecnologías más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

En primer lugar, la aplicación de la nanotecnología ha contribuido de manera significativa y se hace avanzar a través de una variedad de industrias, como la electrónica, productos farmacéuticos, biomédicos, la aeronáutica, y la fotografía (Santiago, 2013); además, hay que señalar que las aplicaciones de la nanotecnología en la industria petrolera no son completamente nuevas: las nanopartículas se han utilizado con éxito en lodos de perforación durante los últimos 50 años. Solo recientemente todas las demás áreas clave de la industria petrolera, como la exploración, la producción primaria y asistida, la refinación y la distribución, se están acercando a las nanotecnologías como la piedra filosofal potencial para enfrentar problemas críticos relacionados con ubicaciones remotas (como aguas ultra profundas y ambientes árticos), duras condiciones (formaciones de alta temperatura y alta presión), yacimientos no convencionales (crudos pesados, arenas bituminosas) (Ludeña et al., 2018).

Esta tecnología está preparada para impactar dramáticamente en todos los sectores de la industria y puede ser el fundamento de cualquier tecnología futura que ofrece la esperanza de extender la línea de vida de los recursos energéticos actuales, aportando soluciones innovadoras en toda la cadena petrolera, que se ha enfocado al estudio de materiales tanto naturales (rocas) como sintéticos (nanocatalizadores) (Santiago, 2013).

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

La fracturación hidráulica de lutitas, o fracking, también ha abierto a producción recursos previamente sin explotar y ha estimulado el desarrollo de nuevas técnicas. Así mismo, las regulaciones ambientales han impuesto estándares mucho más estrictos sobre los derivados del petróleo y el gas y han promovido la investigación de nuevos catalizadores también basados en nanotécnicas para la eliminación de, por ejemplo, compuestos que contienen azufre (Ludeña et al., 2018). De acuerdo con esto, se mostrará los avances que esta tecnología aporta a las diferentes ramas de la industria petrolera, evidenciando su importancia actual en las diversas áreas que concierne.

3.4.1. Nanotecnología en la exploración y caracterización de yacimientos

Recientemente, la exploración de hidrocarburos ha comenzado a realizarse en áreas más desafiantes que involucran alto riesgo e inversión. Una de las primeras metas consiste en crear nanopartículas que posean las propiedades correctas, tales como el tamaño, para atravesar las estructuras del yacimiento, y resistencia a la floculación para evitar el taponamiento de las estructuras. Un paso posterior consistirá en posibilitar que estas partículas midan las propiedades del yacimiento a medida que son transportadas (Cruz Santiago, 2013).

Actualmente según Esmacili (2011) los investigadores están desarrollando un conjunto de sensores confiables y económicos a partir de fibras ópticas para medir la temperatura y la presión, la tasa de flujo de petróleo y las ondas acústicas en los pozos. Estos “nanosensores” se proponen para la caracterización sísmica, la interpretación y la evaluación de formaciones en la exploración geoquímica. Cuando se inyectan nanopartículas en el yacimiento, algunos pasarán por los poros mientras que otros se adsorberán en la superficie del grano. La información sobre las propiedades químicas y físicas de la roca y la distribución 3D de la formación puede obtenerse del análisis de

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

las nanopartículas adsorbidas. Además, las características del núcleo y la superficie de las nanopartículas pueden diseñarse para inducir cambios significativos en las propiedades ópticas, magnéticas y eléctricas, lo que las convierte en candidatos ideales para sensores o agentes de formación de imágenes (Agista et al., 2018).

De acuerdo con Cruz Santiago (2013) las nanopartículas de silicio hiperpolarizados ofrecen una novedosa herramienta para la medición y la imagen en la explotación petrolera. Nanosensores desplegados en el espacio poroso por medio de nano ductos pueden proporcionar datos sobre la caracterización de yacimientos, el monitoreo del flujo de fluidos y el reconocimiento del tipo de fluido.

3.4.2. Nanotecnología en la perforación y completamiento

La nanotecnología para perforación y completamiento se ha estudiado ampliamente durante los últimos años, y juega un papel multifuncional en estos procesos, especialmente en formaciones complejas y entornos extremos, como pozos profundos de alta temperatura.

Según Peng et al (2018) son muchas las ventajas y utilidades que se le puede dar a estos materiales en diversos aspectos como lo son:

- **Pozo estabilizador.** Las nanopartículas pueden formar una torta de filtración compacta en el pozo, lo que puede evitar o reducir los fenómenos de hinchamiento de arcillas y colapso del pozo. Se pueden agregar nanopartículas al fluido de perforación para minimizar la permeabilidad de la lutita al taponar físicamente los poros de tamaño nanométrico y cerrar la pérdida de filtrado. Por lo tanto, las nanopartículas pueden proporcionar una solución potencial para áreas ambientalmente sensibles donde los lodos a base de petróleo se utilizan como una solución a los problemas de inestabilidad de las lutitas (El-Diasty & Salem Ragab, 2013).

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Agista et al (2018) sugirió nanomateriales como la sílice y el grafeno como aditivos para fluidos de perforación. El lodo a base de nanopartículas contiene al menos un aditivo que utiliza nanomaterial con un tamaño comprendido entre 1 y 100 nm.

- **Reducir la pérdida de filtrado.** Al introducir polímeros absorbentes en el fluido de perforación, las nanopartículas pueden sellar los poros de tamaño nano/micro en el pozo, reduciendo la pérdida de fluido de perforación. De acuerdo con El-Diasty & Salem Ragab (2013) la torta de filtración desarrollada durante la filtración del fluido de perforación a base de nanopartículas es muy delgada, lo que implica un alto potencial para reducir el problema de adherencia por presión diferencial y el daño a la formación durante la perforación.

Hoelscher et al., (2012) realizaron experimentos en lutitas Marcellus y Mancos con 3% en peso de nanopartículas de sílice como aditivos en lodos a base de agua y encontraron que estas nanopartículas podrían taponar físicamente la lutita y reducir significativamente la invasión de fluidos en la zona de lutita a un nivel de carga más bajo en el lodo a base de agua. Del mismo modo, Cai et al., (2012) realizaron pruebas experimentales con 10% en peso de seis tipos de nanopartículas de sílice en la lutita Atoka y encontró una reducción drástica en el deterioro de la permeabilidad de la lutita; también observaron que el lodo tenía una viscosidad plástica más alta, un límite de fluencia más bajo y una pérdida de fluido reducida.

- **Mejora de la reología.** Las nanopartículas pueden aumentar la viscosidad aparente y la fuerza de cizallamiento dinámica del sistema de perforación, mejorando así las propiedades reológicas.

- **Aumento de la estabilidad térmica.** Los fluidos de perforación y completamiento que contienen nanomateriales pueden poseer una mayor tolerancia a la temperatura y se pueden aplicar en la perforación de pozos profundos. La investigación sobre la perforación basada en

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

nanomateriales se ha centrado en la aplicación de nanomateriales como componente de los fluidos de perforación para lograr las ventajas anteriores.

También en aspectos de la broca, se espera que el lodo de perforación a base de nanomateriales con capacidad de formación de películas hidrófobas en la broca y las superficies del estabilizador elimine totalmente las bolas que se forman en la broca y el estabilizador. Debido a la alta relación área superficial - volumen y al requisito de concentración muy bajo, en comparación con los fluidos a base de macro y micromateriales, el fluido a base de nano puede ser el fluido de elección para perforar en lutitas, que es muy reactivo, altamente flexible y tenaz y, por lo tanto, puede adherirse fácilmente a la broca, estabilizadores, juntas de herramientas, entre otros; ya que evita la reducción de la ROP y del costo total de operación (El-Diasty & Salem Ragab, 2013).

Las nanopartículas también presentan muchas ventajas para los aditivos de cemento. Se han estudiado muchos tipos de nanopartículas como nanoarcillas, sílice, alúmina y óxido de magnesio como aditivos del cemento. Han demostrado mejorar la estabilidad, la reología y el grado de hidratación de la lechada de cemento al actuar como acelerador y potenciador de las propiedades mecánicas; según El-Diasty & Salem Ragab (2013) reducen la probabilidad de colapso de la tubería de revestimiento y previenen la migración de gas, que es uno de los problemas de cementación en pozos de gas; además, a menudo se requieren en pequeñas cantidades. Las nanopartículas también pueden mejorar la flexibilidad, reduciendo la permeabilidad y la resistencia a la compresión del cemento (Agista et al., 2018).

3.4.3. Nanotecnología en la producción

De acuerdo con Agista et al., (2018) varios problemas que ocurren durante el proceso de producción pueden reducir su eficiencia. Wu et al., (2016) propusieron la nanotecnología como

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

una solución alternativa al problema de carga de líquidos en pozos de gas profundos durante el proceso de producción. Demostraron que las nanopartículas de sílice con una resistencia a la temperatura de hasta 300 °F, una resistencia a la salinidad de aproximadamente 250 g/l y una resistencia al H₂S de hasta el 0.04% podrían resolver el problema de carga de líquido creando espumas estables de gas y líquido.

Por otra parte, el hidrato de gas es un sólido cristalino similar al hielo formado a partir de una mezcla de agua y gas natural, generalmente metano. Los hidratos pueden producir 160 veces su volumen de metano, que es una fuente infinita de energía a la espera de ser aprovechada (El-Diasty & Salem Ragab, 2013). También sugirieron la inyección de nanopartículas de Ni-Fe autocalentables suspendidas en aire (50 nm) en la formación de hidratos a través de un pozo horizontal. Estas partículas penetrarán profundamente en el yacimiento de hidratos al pasar a través de las cavidades (86-95 nm). El autocalentamiento de las partículas de Ni-Fe en un campo magnético es causado por pérdidas por histéresis y pérdidas por relajación. Estas partículas provocan un aumento de temperatura de hasta 108 °F en formación, lo que provoca una alteración en el equilibrio termodinámico y hace que la jaula de agua se descomponga y libere metano (El-Diasty & Salem Ragab, 2013).

3.4.4. Nanotecnología en la recuperación mejorada de petróleo

Debido al continuo crecimiento de la demanda mundial de energía, es necesario desarrollar nuevas tecnologías para encontrar fuentes de hidrocarburos o para mejorar la recuperación de petróleo. El hecho de que sea difícil encontrar nuevas fuentes de hidrocarburos y de que la mayoría de los campos petrolíferos tengan entre un 60% y un 70% de hidrocarburos no producibles en sitio, impulsa el desarrollo de nuevas tecnologías para EOR (Agista et al., 2018).

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Una parte importante de las nuevas tecnologías que influyen en la industria del petróleo y el gas se basan en la nanotecnología (Ludeña et al., 2018), la razón surge claramente de las propiedades excepcionales de las nanopartículas; además, para los procesos que implican recuperación mejorada de aceite, el hecho de que las nanopartículas tengan un tamaño de 1 a 100 nanómetros les permite fluir libremente a través de medios porosos sin el peligro de obstruir los poros. Asimismo, las nanopartículas muestran una relación mayor de área superficial frente a volumen, una propiedad que las hace muy activas para fines catalíticos. Para mejorar la recuperación de petróleo, por ejemplo, se han utilizado nanopartículas para cambiar la mojabilidad de las superficies de las rocas y reducir la tensión interfacial entre las interfaces de agua y aceite.

Agista et al (2018) afirmaron que el uso de nanopartículas en EOR tiene varias ventajas tales como:

- Buena estabilidad, porque la fuerza superficial es más dominante que la gravedad.
- El tamaño y la forma de las nanopartículas pueden modificarse fácilmente durante el proceso de fabricación con gran flexibilidad.
- Las propiedades químicas de la superficie de las nanopartículas pueden adaptarse fácilmente para que sean hidrófilas o hidrófobas.
- Las nanopartículas en EOR que se aplica con mayor frecuencia según Miranda et al., (2012) es dióxido de silicio, que a su vez es una sustancia dominante en la roca arenisca y, por tanto, respetuosa con el medio ambiente.

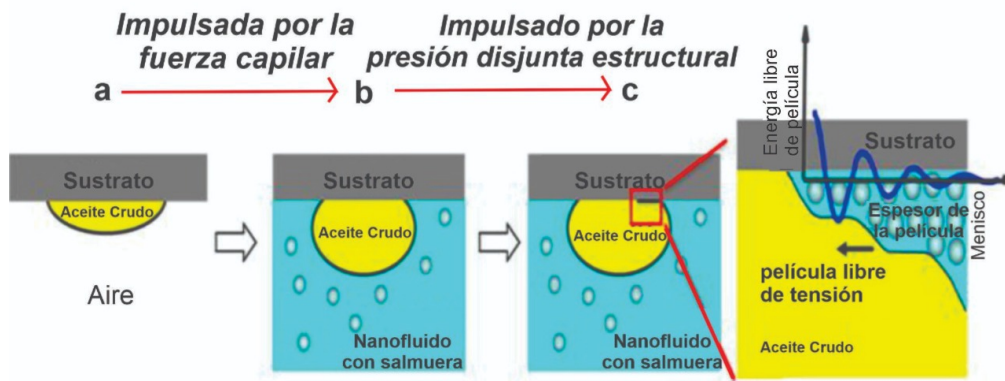
La técnica de los nanofluidos de acuerdo con Peng et al (2018) tiene el potencial de aumentar aún más la producción en comparación con los métodos de recobro químico tradicionales, y también de mejorar el efecto de inyección, que ha ganado atención en todo el mundo. El número capilar, la mojabilidad de la superficie del yacimiento y las propiedades de los nanomateriales son

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

factores que deben tenerse en cuenta en esta técnica. Zhang et al., (2014) llevaron a cabo experimentos EOR utilizando dispersiones de nanopartículas utilizando arenisca de Berea (mojada por agua). Sus resultados mostraron que los nanofluidos preparados se pueden aplicar en un entorno de alta salinidad en el que las suspensiones de nanopartículas de sílice no pueden sobrevivir, y donde la recuperación de petróleo utilizando los nanofluidos puede alcanzar aproximadamente tres veces la de la solución de salmuera sola. Como se observa en la *Figura 8*, la línea de contacto trifásica comienza a contraerse rápidamente, impulsada por fuerzas capilares en presencia de nanofluidos.

Figura 8.

Contacto con presencia de nanofluidos.



Nota: Adaptado de (Peng et al., 2018)

El desarrollo futuro de nano-EOR enfrenta muchos desafíos. Los principales desafíos según Agista et al (2018) para la industria del petróleo son las limitaciones de la tecnología, los aspectos económicos y los problemas ambientales y de salud. Aunque numerosos estudios han demostrado

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

que las nanopartículas podrían aumentar la recuperación de petróleo, la mayoría de ellos se limitan a pequeñas escalas de laboratorio y aún no son aplicables para la implementación de campo a gran escala.

3.4.5. Nanotecnología en recuperación de crudo pesado

En los últimos años, la producción de aceite pesado y extrapesado ha crecido continuamente en respuesta al consumo; sin embargo, su alta viscosidad, alta densidad y alto contenido de heteroátomos hacen que su proceso de producción sea más complicado y costoso que el aceite convencional. La nanotecnología brinda oportunidades sin precedentes para promover técnicas de recuperación de alta eficiencia para la producción de petróleo pesado. Las nanopartículas, como los óxidos metálicos, se pueden utilizar como catalizadores en la mejora in situ de petróleo pesado, lo que ofrece el potencial de mejorar la recuperación de petróleo pesado y reducir los costos de refinación y transporte terrestre; además, las impurezas, como azufre, vanadio, hierro y níquel, se retienen en el yacimiento durante el proceso de mejora in situ, reduciendo así la eliminación de impacto de estos minerales como subproducto en la producción de petróleo (Peng et al., 2018).

También se ha demostrado que la adsorción de asfaltenos sobre nanopartículas de sílica y alúmina modificada superficialmente permite reducir la aglomeración, precipitación y deposición de esta fracción petrolera a las condiciones de presión y temperatura del yacimiento; este hallazgo constituye una potencial solución a los daños de la formación causado por la ocurrencia de asfaltenos sólidos en el medio poroso (Franco et al., 2013).

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

3.4.6. *Otros usos de las Nanopartículas*

Una impresionante e innovadora aplicación comercial de acuerdo con Delgado Linares et al (2015) de la nanotecnología en la industria del petróleo ha sido desarrollada por la empresa Baker Hughes; esferas hechas de un material nanoestructurado y que se emplean en los procesos de fractura hidráulica multietapa de pozos horizontales. El objetivo de estas esferas es aislar la sección de la tubería de producción que será perforada y a través de la cual se estimula (fractura) hidráulicamente el yacimiento; el procedimiento se repite de manera secuencial hasta que se perforan todas las secciones requeridas. Una vez que concluye el procedimiento, el sello aislante “desaparece” por la disolución progresiva de las esferas.

3.5. Nanopartículas Magnéticas

Son aquellas que pueden manipularse utilizando un campo magnético. Estas partículas se componen principalmente de un núcleo magnético, como hierro, níquel, cobalto y sus compuestos químicos; y han sido el foco de gran cantidad de estudios recientemente debido a que poseen características atractivas con alto potencial para su uso en catálisis, termometría, biomedicina, imágenes de resonancia magnética, imágenes de partículas magnéticas, datos de almacenamiento, remediación ambiental, nanofluidos, filtros ópticos, aplicaciones magneto-reológicas, entre otros.

3.5.1. *Tipos de magnetismo*

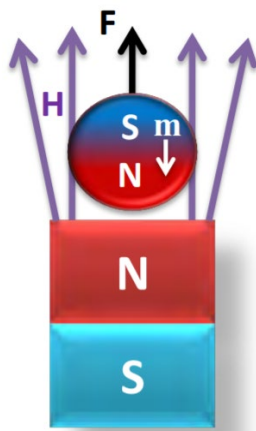
Los materiales se pueden clasificar según el tipo de respuesta frente a un campo magnético externo aplicado: diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos y ferrimagnéticos. Las sustancias diamagnéticas son aquellas que poseen campo y permeabilidad magnética nula, y al ser colocadas en un campo magnético externo sus dipolos se orientan en

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

sentido contrario al del campo aplicado, de tal manera que se obtiene un campo magnético final de menor valor que el inicial. El sentido opuesto de la magnetización al campo hace que estos materiales sean repelidos por los imanes, siendo esta su principal característica; también son conocidos por presentar susceptibilidad magnética negativa, que permanece constante al variar la temperatura (Fernández, 2013). En la *Figura 9* se presenta un esquema, como ejemplo, donde una partícula diamagnética es situada encima del Norte de un imán, con un campo magnético que va hacia arriba; por esto el momento “m” de la partícula se direcciona en sentido contrario al campo (hacia abajo). Una vez la partícula se acerca al polo norte del imán, con su correspondiente polo norte, la partícula es repelida. Este mismo efecto se presenta en el polo sur del imán.

Figura 9.

Material diamagnético que es repelido al contacto con un imán.



Nota: Adaptado de (Chamé, K. 2013).

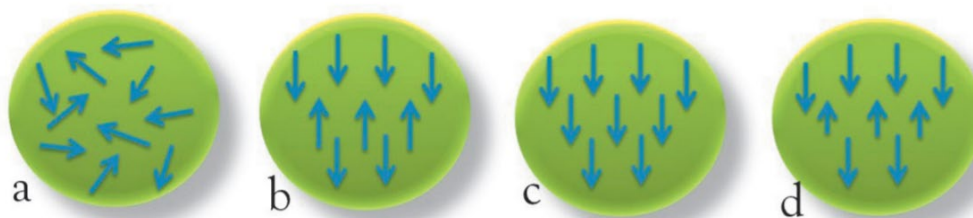
En el caso de los materiales paramagnéticos como se muestra en la *Figura 10*, presentan una susceptibilidad magnética positiva, que deriva de los dipolos magnéticos permanentes capaces de

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

ordenarse bajo influencia de un campo magnético externo; sin embargo, es necesario el uso de campos magnéticos extremadamente grandes para llevar a cabo la alineación, ya que los dipolos no interactúan o están débilmente acoplados. Algunos dipolos se alinean en posiciones paralelas y otros en posiciones anti-paralelas con respecto al campo, y entre mas grande sea este, los dipolos se ordenarán de manera más precisa provocando un mayor momento magnético neto por unidad de volumen, es decir, mayor magnetización. No obstante, la principal característica de los materiales paramagnéticos radica en que si bien interactúan en presencia de un campo magnético externo (son atraídos por imanes), no se convierten en materiales permanentemente magnetizados, lo que conlleva a que los dipolos se desordenen una vez deje de aplicarse el campo.

Figura 10.

Diferentes tipos de comportamiento magnético.



Nota: a) Paramagnetismo. No hay alineamiento permanente. b) Antiferromagnetismo. Momentos alternando de átomo a átomo. c) Ferromagnetismo. Momentos de átomos individuales alineados. d) Ferrimagnetismo. Momentos desiguales alternados. Adaptado de (Escobaro, A., Pizzioa, L. y Romanelli, G 2018).

En cuanto a los materiales ferromagnéticos, estos se caracterizan porque alinean todos sus momentos magnéticos en la misma dirección y sentido al aplicarles un campo magnético; asimismo, presentan una magnetización en ausencia del campo aplicado (los momentos

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

permanecen alineados); sin embargo, aun cuando el material puede presentar una magnetización grande, también puede presentar una condición donde haya poca o nula magnetización permanente. Elementos como el Níquel, Hierro y Cobalto hacen parte de estos materiales.

La temperatura se presenta como un factor clave en su comportamiento, haciendo que la magnetización sea máxima a temperaturas ordinarias, pero, por el contrario, cuando el material se calienta hasta alcanzar temperaturas muy elevadas (Temperatura de Curie), se comporte como una sustancia paramagnética, ya que las vibraciones térmicas logran destruir la alineación de los dominios alcanzada previamente. Adicionalmente, los materiales ferromagnéticos pueden presentar un estado no-magnetizado en algunas ocasiones, debido a la gran tendencia de la sustancia a desdoblarse en dominios (regiones en las que los dipolos están alineados), cada uno con una dirección de magnetización distinta, lo cual resulta en una magnetización neta igual a cero (Fernández, 2013).

En efecto, los materiales clasificados como ferrimagnéticos poseen átomos que bajo la presencia de un campo magnético, tienden a posicionarse en la misma dirección, pero no en el mismo sentido, haciendo que se anulen entre sí parcial o completamente; no obstante, la magnetización no llega a ser cero ya que sus átomos están distribuidos de forma aleatoria y no son equivalentes generando magnetización permanente y punto de saturación, como en los materiales ferromagnéticos aunque con valores mejores. Los óxidos de hierro como la magnetita son los ejemplos más importantes dentro de esta clasificación (Escobaro, Pizzioa, & Romanelli, 2018).

Finalmente, los materiales antiferromagnéticos presentan magnetización nula, debido a que en presencia de un campo magnético externo, los momentos magnéticos producidos en los dipolos circundantes se alinean oponiéndose unos a otros en el campo magnético. Su susceptibilidad

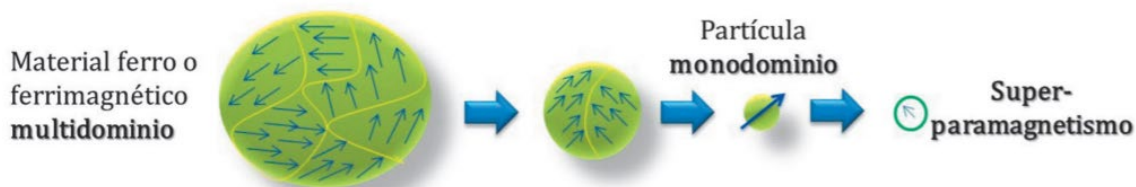
ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

magnética es pequeña (casi cero) y positiva. Algunos compuestos que hacen parte de esta clasificación son la hematita, el fluoruro de níquel y el óxido de hierro.

En cuanto a los materiales nanométricos, las partículas de los materiales magnéticos actúan como monodominios, generando el fenómeno del superparamagnetismo, como se muestra en la *Figura 11*; donde cada partícula presenta el comportamiento de una sustancia paramagnética pero con un gran momento magnético debido a que todavía hay un orden definido en cada nanopartícula.

Figura 11.

Dominios magnéticos según tamaño de partícula del material magnético.



Nota: Adaptado de (Escobaro, A., Pizzio, L. y Romanelli, G 2018).

3.5.2. Interacciones atractivas y repulsivas

Las nanopartículas presentes en un fluido o en la interfase de dos fluidos inmiscibles, experimentan diferentes tipos de interacción que generan fluctuaciones en su estabilidad; de esta manera se pueden diferenciar y clasificar los fluidos magnéticos. Las principales interacciones atractivas son las dipolo-dipolo (interacción dipolar magnética) y la interacción de Van Der Waals;

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

por contraparte, es necesario introducir interacciones repulsivas que se opongan a las atractivas, como son las estéricas y coulombianas, que serán descritas a continuación.

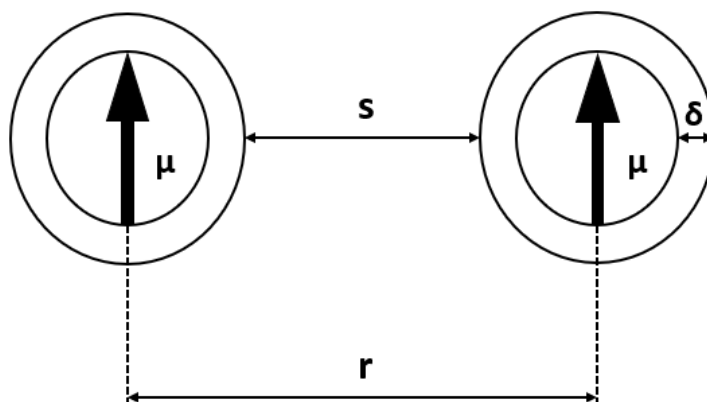
A manera de ejemplo, tenemos el caso de los ferrofluidos iónicos (IFF), los cuales evitan la aglomeración mediante una interacción electrostática; mientras que los ferrofluidos surfactados (SFF) evitan este fenómeno indeseado mediante el recubrimiento de la nanopartícula con un surfactante, el cual produce una repulsión estérica que se contrapone a la fuerza de Van Der Waals y de Dipolo Magnético (Medina, 2010).

3.5.2.1. Interacción dipolar magnética. Dentro de un fluido magnético se efectúan constantemente colisiones entre partículas debido a la gran cantidad que se encuentra por metro cúbico (10^{23} partículas). Analizando un poco más a detalle, dentro de estos materiales magnéticos existen dominios, donde los electrones que giran en torno al núcleo (spines electrónicos) producen momentos dipolares magnéticos que no se pueden cancelar entre sí, quedando una zona de dominio magnético que causa el magnetismo permanente.

Teniendo en cuenta esta explicación, se entiende que entre partículas va a haber una fuerza que tiende a unir las, basados en el simple concepto de que los polos opuestos se atraen. Esta interacción dipolar genera una fuerza o energía que depende de la permeabilidad magnética del vacío, la magnetización de las partículas y su volumen. Cuando las partículas están en contacto, este valor de energía aumenta considerablemente. En la *Figura 12* se presenta un esquema de dos partículas con una capa protectora inmersas en un líquido portador.

Figura 12.

Esquemas de dos partículas con diámetro d en un líquido portador con una capa protectora de espesor δ , s es la separación entre superficies y r es la distancia entre los centros de las partículas



Nota: Tomado de (Lopez, J. A. 2010).

3.5.2.2. Interacción de Van Der Waals. La interacción atractiva de Van der Waals, es la facilidad con la que átomos neutros o moléculas son atraídos por cargas eléctricas debido a fluctuaciones de energía de fuerzas dipolo – dipolo que siempre están presentes (Medina, 2010). Esta interacción está presente en moléculas polares, donde el elemento con mayor electronegatividad ejercerá más fuerza sobre los electrones presentes en el enlace y quedará con una carga parcial negativa, haciendo que el otro elemento de la molécula quede cargado positivamente. De esta manera, cuando varias moléculas polares coexisten, las moléculas con cargas parciales contrarias tenderán a unirse, generando interacciones de este tipo.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

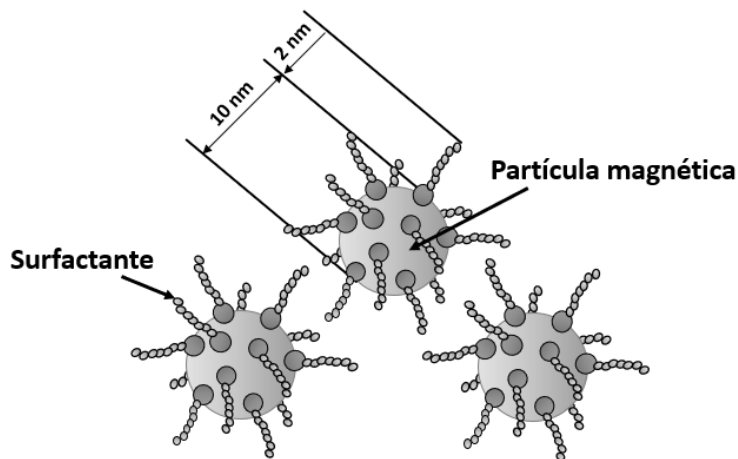
3.5.2.3. Interacción estérica. Este tipo de interacciones se logran por la disposición de moléculas de cadena larga que son adsorbidas en la superficie de las nanopartículas magnéticas.

La adsorción depende del tratamiento superficial realizado a la nanopartícula y el fenómeno se da entre las moléculas con alta afinidad por el fluido portador (Kodama, 1999). Este es el caso producido por los surfactantes (moléculas anfifílicas), donde su cabeza se adhiere a la nanopartícula y su cola interactúa con el líquido en el que están inmersos.

Las interacciones estéricas evitan que la atracción de Van Der Waals predomine y por ende que se aglomeren las nanopartículas.

Figura 13.

Esquemas de una nanopartícula recubierta con surfactante.



Nota: Adaptado de (Lopez, J. A. 2010).

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

3.5.2.4. Interacción Coulombiana o Electrostática. Este tipo de interacción repulsiva también se usa para buscar estabilizar el ferrofluido, gracias a que la ionización, la adsorción de iones y la disolución de iones en un medio polar hace que las partículas adquieran cargas eléctricas superficiales. Cuando estas poseen potenciales superficiales iguales, tienden a repelerse creando una barrera que impide la aglomeración (Medina, 2010).

3.5.3. Características y propiedades de las nanopartículas magnéticas

Algunas propiedades de las nanopartículas magnéticas (NPMs) destacan principalmente en el área de la catálisis, donde se busca la recuperación eficiente del catalizador para minimizar pérdidas, reducir costos de producción y evitar la contaminación del producto final. En este sentido, dichas nanopartículas despiertan un gran interés e importancia ya que su alto valor de magnetización permite controlar de forma reversible su dispersión en el medio de reacción mediante la aplicación de un campo magnético, solucionando los problemas de separación y recuperación (Escobaro, Pizzioa, & Romanelli, 2018) a diferencia de las partículas grandes, que comúnmente requieren de reactores o ser separados por filtración convencional o centrifugación, lo que acarrea grandes costos operativos para su uso en la industria.

Otras virtudes de las nanopartículas magnéticas radican en sus propiedades fisicoquímicas, donde se cuenta con gran área superficial, baja toxicidad, facilidad de síntesis, viabilidad económica, entre otras; haciendo que sea prometedor su uso en diferentes aplicaciones, siendo una técnica limpia y amigable con el medio ambiente. De igual manera y recalcando lo mencionado en la explicación general de nanopartículas, los materiales nanomagnéticos exhiben propiedades físicas y químicas únicas, en comparación con sus homónimos de gran tamaño, que las habilitan para ser usadas en nuevas aplicaciones. Dichas manifestaciones están fuertemente relacionadas

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

con el tamaño y la morfología de la nanopartícula, teniendo en cuenta siempre el objetivo de esta y el área en la que se va a utilizar. Por ejemplificar un caso, se tiene que entre más pequeña es la nanopartícula, mayor es su área superficial, por lo que cambian propiedades como la conductividad eléctrica y magnética, y cada partícula se empieza a comportar como un monodominio magnético, dando lugar a que se presente el superparamagnetismo (Khosroshahi & Ghazanfari, 2010).

La gran área superficial de las nanopartículas también tiene un efecto contraproducente, que se toma como desventaja en el uso de esta tecnología, y es la tendencia de las partículas a agregarse para reducir su energía de superficie, y en el caso de las NPMs, la interacción dipolar magnética, junto con las interacciones de Van der Waals, aumenta la posibilidad de aglomeración (Escobaro, Pizzioa, & Romanelli, 2018). La solución a dicho problema, con objetivo de suprimir las interacciones entre las NPMs, es mediante el recubrimiento con una matriz no magnética orgánica / inorgánica o con surfactantes adecuados como los ácidos grasos; haciendo que se reduzca el efecto de Van der Waals y se produzca una modificación positiva para el proceso que se vaya a llevar a cabo. Los recubrimientos evitan la oxidación de las NPMs, que se da por el oxígeno presente en el ambiente; también evita su descomposición en medios ácidos y finalmente, permite introducir especies catalíticas, actuando como punto de anclaje (Du, Liu, Xia, Chu, & Zhang, 2006).

Esta variación de material de recubrimiento y fase activa hace que se pueda obtener una gran variedad de catalizadores magnéticos, permitiendo una amplia gama de reacciones orgánicas en los que se puedan utilizar, incluyendo reacciones de acoplamiento C-C, hidrogenación, oxidación, condensación aldólica y polimerización. En adición, en la mayoría de los casos, el proceso de recuperación de catalizadores magnéticos presenta alta efectividad sin pérdida de actividad catalítica y se lleva a cabo mediante un simple proceso de separación magnética.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

En particular, existe un interés significativo en el ensamblaje magnético de partículas ferromagnéticas, que proporciona direccionalidad selectiva a través de asociaciones dipolares (bajo la influencia de un campo magnético externo); y está demostrado, tanto teórica como experimentalmente, que los campos magnéticos generan fuertes interacciones dipolo dipolo, lo que ocasiona que las partículas se ensamblen en matrices o cadenas 2D y 3D (Aseri, Garg, Nayak, Trivedi, & Ahsan, 2015).

Las nanopartículas magnéticas con diámetros menores a 30 nanómetros exhiben un comportamiento supra magnético, lo que significa que, en ausencia de un campo magnético externo, estas partículas tienen magnetización cero y menos tendencia a aglomerarse (Patarroyo & Sandoval, 2019). Generalmente estas nanopartículas poseen un núcleo de hierro y debido a su alta área superficial, pueden ser recubiertas con material orgánico o inorgánico, generando una dualidad, ya que hacen que el producto pueda ser biocompatible y funcional con materiales como enzimas, anticuerpos o medicamentos.

3.5.3.1. Efecto de superficie. Como se mencionó anteriormente, las nanopartículas magnéticas suelen recubrirse con una matriz no magnética orgánica / inorgánica para evitar los efectos de aglomeración, lo que proporciona una dualidad en su funcionalidad, debido a que poseen tanto las características magnéticas, como las características del material de recubrimiento; sin embargo, dado que las propiedades físicas y químicas de las NPMs dependen en gran medida de sus revestimientos, la modificación en su superficie juega un papel crítico en las aplicaciones de yacimientos petrolíferos y áreas subsecuentes (Zhou, Zhou, Liu, & Huang, 2020).

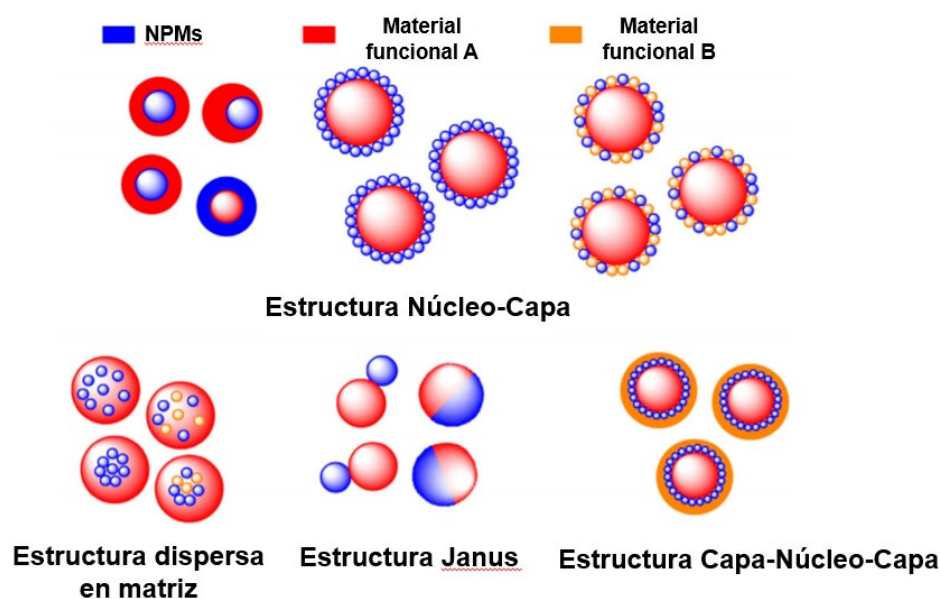
Materiales como la amina, citrato, polivinilpirrolidona (PVP), hidróxido de tetrametilamonio (TMAOH), ácido oleico, quitosano, polímero, tensioactivo y materiales inorgánicos han sido

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

utilizados para modificar la superficie de las nanopartículas magnéticas. Y se han aplicado varios enfoques para su síntesis, como la coprecipitación, el método sol-gel, la micela inversa, el método hidrotermal, electroquímico, el método de fase de vapor, el reactor de vapor y la descomposición térmica. Basados en estas estrategias de síntesis, se pueden fabricar cuatro estructuras típicas de nanopartículas magnéticas, como se muestra en la Figura 14; destacando las partículas heterogéneas o “Janus”, donde el recubrimiento se puede restringir a un área particular de la superficie únicamente.

Figura 14.

Cuatro tipos de estructuras comunes de las nanopartículas magnéticas.



Nota: El color azul representa nanopartículas magnéticas, y los colores rojo y naranja representan materiales funcionales no magnéticos. Adaptado de (Zhou, Liu y Huang 2020).

La modificación de la superficie no solo mejora la estabilidad de las NPMs, sino que también mejora su dispersabilidad y biocompatibilidad en solución acuosa; además, también ayuda a

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

mejorar la actividad superficial de las nanopartículas y a mejorar las características fisicoquímicas (Zhou, Zhou, Liu, & Huang, 2020).

Aplicar un recubrimiento específico puede satisfacer las necesidades de la industria para que las NPMs puedan ser implementadas en aplicaciones de yacimientos petroleros, que incluyen: Estabilidad de las nanopartículas magnéticas por un largo periodo de tiempo sin generar aglomeraciones cuando se dispersan individualmente en una suspensión, que puedan ser transportadas a través de los poros del yacimiento a una gran distancia con una retención mínima y que adsorban únicamente en las ubicaciones requeridas en yacimiento, por ejemplo, adsorbiéndose en la interfase agua / aceite residual.

3.5.3.2. Efecto de magnetización. Las nanopartículas magnéticas están clasificadas en ferromagnéticas o paramagnéticas dependiendo de su magnetización espontánea. Estas propiedades magnéticas están fuertemente afectadas por el tamaño de la nanopartícula, que cuando es menor a cierto valor crítico, forma un único dominio magnético.

Dado que el diámetro de la nanopartícula de dominio magnético único es mucho menor que el valor crítico en el que aparece el superparamagnetismo (generalmente entre 3 y 50 nm dependiendo de los materiales), la fuerza coercitiva llega a cero y estas nanopartículas muestran un comportamiento superparamagnético (Zhou, Zhou, Liu, & Huang, 2020). Este fenómeno se debe principalmente a efectos térmicos; y a diferencia del ferromagnetismo, la curva de magnetización no presenta histéresis, haciendo que sea el objetivo cuando se sintetizan las nanopartículas magnéticas.

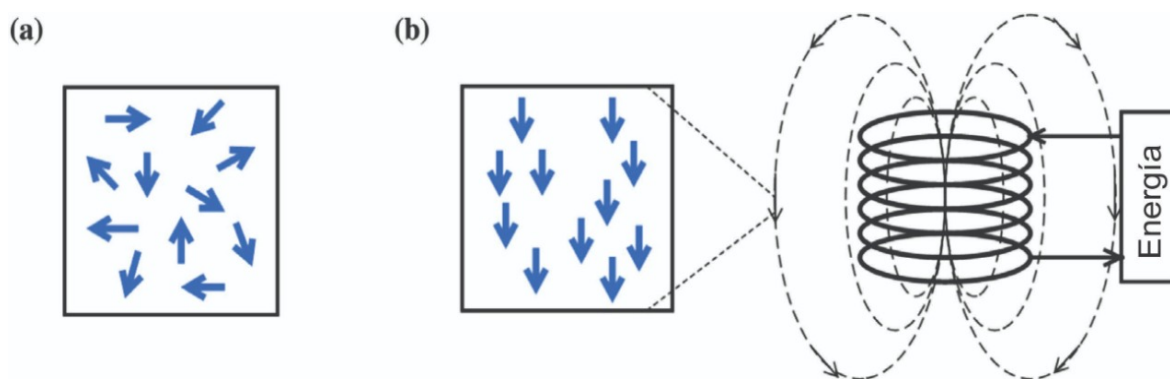
Como se observa en la *Figura 15*, las nanopartículas superparamagnéticas dispersas en un fluido no muestran comportamiento magnético en ausencia de un campo magnético externo. Cuando se

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

impone un campo débil, la agitación térmica puede generar una tendencia parcial de alineación del momento dipolar hacia el campo; y a medida que la intensidad aumenta, las nanopartículas superparamagnéticas se alinean gradualmente hasta tal punto en el que estarán completamente alineadas cuando el campo magnético excede cierto valor y la magnetización alcanza el estado de saturación.

Figura 15.

Nanopartículas en presencia y ausencia de campo magnético.



Nota: a) Nanopartículas superparamagnéticas dispersas en un fluido muestran un comportamiento no magnético en ausencia de un campo magnético externo. (b) Nanopartículas superparamagnéticas completamente alineadas cuando se aplica un campo magnético externo lo suficientemente fuerte, debido a que la tendencia de la alineación del momento dipolar hacia el campo supera la agitación térmica. Adaptado de (Zhou, Liu y Huang 2020).

La magnetización de nanopartículas superparamagnéticas está descrita por la función modificada de Langevin y depende de la fuerza del campo magnético aplicado y la magnetización de saturación de las nanopartículas superparamagnéticas. Gracias a sus características de magnetización, pueden generar un campo de inducción cuando se someten a un campo magnético externo, lo que conduce a revelar sus posiciones y ser detectadas de forma remota.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

3.5.3.3. Efecto magnetomecánico y calentamiento por inducción magnética. Las nanopartículas magnéticas pueden ser dirigidas a una ubicación deseada cuando son expuestas a un campo magnético de gradiente, debido a la fuerza que ejerce el campo sobre ellas. Al cuantificar cómo varía el campo alrededor, se pueden describir las fuerzas generadas en las nanopartículas por el campo magnético.

La fuerza magnética que actúa sobre las NPMs depende del volumen de nanopartículas, la magnetización y el gradiente del campo magnético. Esta propiedad única ofrece una ventaja adicional para que las NPMs sean manipuladas e implementadas en algunas aplicaciones de la industria petrolera. Por ejemplo, las nanopartículas magnéticas que sirven como adsorbentes de aceite pueden acelerar el proceso de separación de aceite del agua producida con un campo magnético de gradiente aplicado (Ko et al., 2014).

3.5.4. Nanopartículas magnéticas en la industria petrolera

Este tipo de nanomateriales presentan gran importancia e interés en distintas áreas de la cadena productiva de los hidrocarburos. En cuanto a las etapas de perforación y completamiento, las NPMs mejoran las propiedades reológicas de los fluidos de perforación, mejoran la eficiencia de limpieza de los fluidos espaciadores, mantienen la estabilidad e integridad reológica de los fluidos de perforación en condiciones adversas del yacimiento, entre otras aplicaciones. Para la lectura e interpretación de imágenes del yacimiento, generan áreas de señal específicas y de alto contraste de las fracturas, mejoran la interpretación de los datos de resonancia magnética nuclear para la evaluación de distribución de la porosidad, crean zonas de contraste de permeabilidad magnética del frente fluido y pueden llegar a rastrear la fuente del crudo.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

En procesos EOR han tenido gran aceptación ya que mejoran la inyección tradicional de surfactantes, al reducir la tensión interfacial debido a la presencia de estos materiales en los ferrofluidos; y también generan un aumento en la eficiencia de barrido del aceite, debido a que producen un efecto pistón en yacimiento. En el área de control de flujo, las nanopartículas magnéticas previenen la deposición de asfaltenos y la formación de hidratos de metano mediante el calentamiento de la tubería de producción, y reducen la producción incremental de agua en yacimientos maduros, mediante el control de la formación de gel o de estructuras magnéticas de tipo sólido.

Las propiedades de estas nanopartículas también confieren aplicaciones en el área de la separación magnética, ya que permiten disgregar el crudo o el polímero inyectado del agua de producción, permiten remover el agua emulsionada del crudo y el bitumen, y finalmente permiten la remoción de cationes divalentes.

Otras aplicaciones, y quizá las más relevantes para nuestros fines, son en el área del transporte de crudo pesado, donde su uso genera reducción en la viscosidad principalmente por dos razones; inicialmente por la adsorción de asfaltenos en la superficie de las nanopartículas, inhibiendo la formación de la red viscoelástica; y segundo, mediante el calentamiento por inducción magnética. También, al mezclar las NPMs con el crudo pesado se genera un mejoramiento o “*upgrading*” del hidrocarburo, creando soluciones para facilitar tanto la extracción desde el yacimiento como su transporte y tratamiento.

4. Fenómeno interfacial de las nanopartículas magnéticas

Las nanopartículas presentan fenómenos y comportamientos específicos según el área donde sean empleadas, por ende, es necesario comprender a detalle la interacción que ocurre tanto entre ellas con el medio donde se fijan, como entre ellas mismas. A continuación, se explicará a detalle el fenómeno que ocurre cuando nanopartículas magnéticas funcionalizadas se agregan en la tubería en presencia de crudo pesado y agua de producción.

4.1. Tensión interfacial

Cuando dos líquidos inmiscibles entran en contacto se crea una capa llamada interfase, la cual exhibe propiedades distintas al resto del sistema. La tensión interfacial es una de estas propiedades y se define como la fuerza neta por unidad de longitud que se ejerce en la superficie de contacto entre las fases líquidas, donde la fuerza neta es perpendicular al área de contacto y está dirigida hacia el interior de las fases.

Para tener un mayor acercamiento al concepto, es necesario entender que las fuerzas de atracción y repulsión existentes entre las moléculas de un líquido son de diferente magnitud dependiendo de la zona del líquido en la que se encuentren. En el seno del fluido, las moléculas interactúan con sus vecinas de igual naturaleza, por lo tanto, la fuerza neta interior tiende a equilibrarse debido a que las interacciones atractivas y repulsivas son iguales en todas las direcciones posibles; sin embargo, en la zona superficial las moléculas no están rodeadas

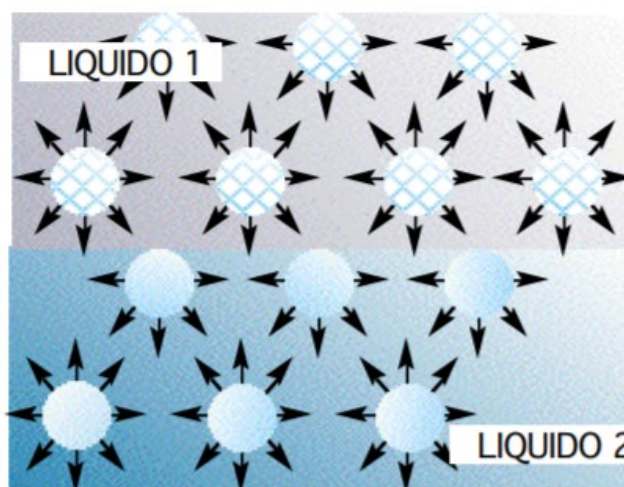
ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

completamente por otras moléculas del mismo tipo, generando un desequilibrio molecular con efecto neto hacia el seno del líquido (Flores, 2019).

En este orden de ideas, las moléculas de una interfase entre dos líquidos inmiscibles estarán sometidas a fuerzas de diferente magnitud, ya que existirán moléculas en la superficie de una fase que interactuarán con las moléculas de la superficie de la otra fase; dando como resultado una fuerza neta que no es nula y está dirigida hacia el interior del líquido en el cual hay mayor interacción (Salager, 2005).

Figura 16.

Fuerzas moleculares presentes en la interfase de dos líquidos.



Nota: Adaptado de (SALAGER, R. E. A. 2005).

4.2. Nanopartículas y su carácter anfifílico

Como ya ha sido descrito anteriormente, las nanopartículas pueden ser utilizadas en un amplio campo de aplicaciones y presentan dos características muy atractivas para su implementación en procesos industriales: su tamaño y la habilidad para manipular su comportamiento.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Para el caso del transporte de crudo pesado, las nanopartículas usadas deben tener unas características específicas que permitan cumplir el objetivo deseado de reducir la viscosidad mediante su correcta ubicación en la interfase agua-crudo, sin embargo, su ubicación dependerá de la mojabilidad que presenten. Inicialmente, cada nanopartícula, bien sea a base de grafeno, silicio, hierro, níquel, entre otros; presenta unas propiedades que pueden variar según su tipo, donde se han encontrado partículas que presentan comportamientos hidrofílicos o hidrofóbicos. Sin embargo, su capacidad de manipulación les permite modificar su actividad superficial, o como también es conocido, les permite ser funcionalizadas mediante la imposición de capas adicionales para cumplir una actividad dada. Gracias a esto, y teniendo en cuenta los requerimientos necesarios para cumplir el propósito, las nanopartículas son modificadas mediante un recubrimiento que les proporciona propiedades anfífilas, de tal manera que estén parcialmente mojadas tanto por agua como por aceite. Estas nanopartículas sólidas ubicadas en la interfase cumplen con un propósito dual de catálisis y de ser estabilizadores de emulsiones (Rajinder, 2017).

Otros beneficios del recubrimiento, que usualmente se lleva a cabo con una matriz no magnética orgánica o inorgánica, son que suprime el efecto de Van Der Waals así como las interacciones magnéticas entre las nanopartículas, haciendo que se reduzca su tendencia de aglomeración. También, protegen a las nanopartículas de degradarse frente al medio ambiente, oxidarse en presencia de oxígeno o de descomponerse en medios ácidos, así como también pueden funcionar como punto de anclaje, permitiendo introducir especies catalíticas.

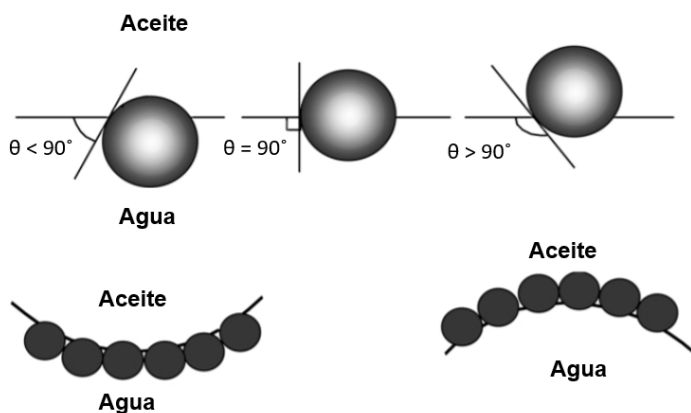
La mojabilidad relativa de las nanopartículas por una fase líquida u otra está determinada por el ángulo de contacto de las tres fases. Como se muestra en la *Figura 17*, si el ángulo, medido a través de la fase acuosa, es mayor a 90° , las nanopartículas son relativamente mojadas por aceite y se formarán emulsiones W/O. Por el contrario, si el ángulo es menor a 90° , las partículas son

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

preferencialmente mojadas por la fase agua y se favorecerá la formación de emulsiones O/W. Cuando el ángulo es de 90° , ambos fluidos mojan las nanopartículas de igual manera, por lo tanto, no hay una emulsión preferida. Las monocapas de las nanopartículas se curvarán de manera que el área más grande de la superficie de la partícula permanezca en el lado externo de la emulsión, propiciando un tipo de emulsión según su ángulo de contacto como fue descrito anteriormente (Rajinder, 2017).

Figura 17.

Diferentes condiciones de mojabilidad y preferencia a formar emulsiones descritas en términos del ángulo de contacto θ .



Nota: Emulsión O/W para $\theta < 90^\circ$ y Emulsión W/O para $\theta > 90^\circ$. Adaptado de (Binks, B. 2002).

La emulsión formada recibe el nombre de emulsión Pickering o Ramsden, ya que es la dispersión de dos líquidos inmiscibles (agua y crudo) donde las gotas se estabilizan por la presencia de partículas sólidas en la interfase (nanopartículas), evitando así el fenómeno de coalescencia (Rajinder, 2017). Para producir una emulsión estable, la energía de desorción debe ser significativamente mayor que la energía térmica. En general, el ángulo de contacto para la

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

estabilización de emulsiones O/W debe estar en el rango de $15^\circ < \theta < 90^\circ$; y para emulsiones W/O en el rango de $90^\circ < \theta < 165^\circ$ (Kaptay, 2006).

Si las nanopartículas sólidas son demasiado hidrófobas, $\theta \approx 180^\circ$, estas permanecerán dispersas en la fase oleosa y, en consecuencia, las emulsiones W/O producidas serán inestables. De manera similar, si las nanopartículas son demasiado hidrófilas, es decir, $\theta \approx 0^\circ$, permanecerán dispersas en la fase acuosa y, por lo tanto, no producirán emulsiones O / W estables (Rajinder, 2017).

4.3. Efecto de las nanopartículas en la reducción de tensión interfacial

Una vez las nanopartículas se posicionan en la interfase agua-crudo, crean una “Capa” que genera una reducción interfacial significativa. Esto ocurre dado que se pierde un área interfacial plana de alta tensión (alta energía molecular) entre el agua y el crudo, debido a que es reemplazada por las nanopartículas en la interfase, esto implicaría una disminución en las fuerzas de interacción entre ambas fases y, por lo tanto, una reducción en la tensión interfacial.

Este fenómeno obtenido es de gran importancia para el interés de esta investigación, ya que al haber una reducción en la fuerza interfacial que ejercen estos dos fluidos, se facilita la formación de emulsiones estables O/W y por ende contribuye a que el transporte de crudo pesado por tubería se vea mejorado significativamente. El fenómeno ocurre gracias a que el crudo (de alta viscosidad y propiedades complejas) se traslada en pequeñas gotas dentro del agua, que posee un valor mucho menor de viscosidad y que representa la fase continua de la emulsión tratada; disminuyendo considerable la fuerza de arrastre generada entre el fluido y la tubería.

Por ejemplo, se ha encontrado el uso de nanopartículas de sílice recubiertas con un polielectrolito para estabilizar emulsiones de aceite en agua, y más recientemente Saigal et al

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

(2010) reportaron emulsiones estables usando nanopartículas de sílice recubiertas con un polímero sensible al pH.

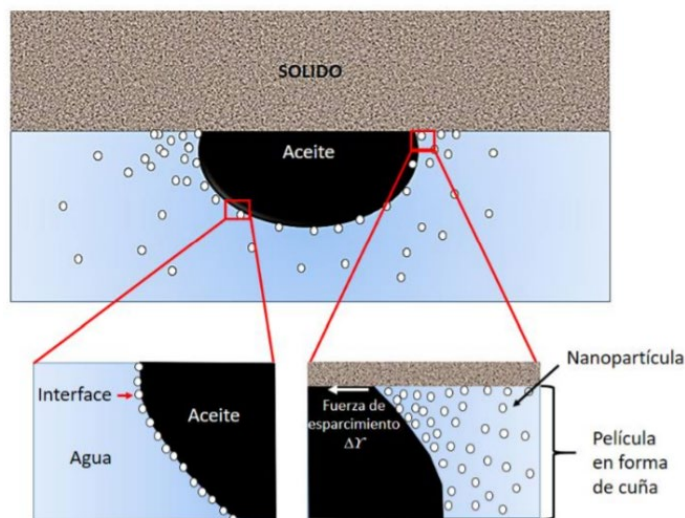
Adicionalmente, (Kothari, Raina, Chandak, Iyer, & Mahajan, 2010) y (Betancur, y otros, 2019) han reportado el efecto positivo en la reducción de la tensión interfacial mediante la adición de surfactantes, creando soluciones de nanofluidos. Estos autores afirmaron que la presencia de nanopartículas cambió las propiedades reológicas y aumentó el efecto de la solución de surfactante en los procesos de recuperación de petróleo. En este caso, el tensoactivo potencializa el nanofluido, y puede ayudar a que la nanopartícula no se precipite a altas temperaturas y que genere una mayor estabilización en la emulsión. Además, hay un cambio de valor de tensión interfacial en la interfase tensoactivo/aceite de manera más efectiva (Cheraghian & Hendraningrat, 2016), reduciendo en mayor proporción las fuerzas interfaciales entre el crudo y el agua en comparación al uso de las nanopartículas únicamente.

También cabe destacar el comportamiento de las nanopartículas cuando son inyectadas en yacimiento, ya que no solo generan beneficios en la interfase agua-aceite, sino también interactúan con la roca, ordenándose entre la gota de aceite y la superficie rocosa, formando una película con geometría de cuña como se muestra en la *Figura 18*.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Figura 18.

Efecto de las nanopartículas sobre la tensión interfacial y la mojabilidad.



Nota: Adaptado de (Cardenas, N., Hernández, D. 2018).

La reactividad de la superficie genera una alteración en la mojabilidad de la superficie rocosa, generando una reducción de la presión capilar que favorece la movilidad del aceite (Cárdenas & Hernández, 2018). Las nanopartículas modifican el gradiente de presión disyuntiva estructural entre el aceite y la roca, haciendo que la adsorción reduzca y permita la liberación de la gota. Esta presión disminuye al aumentar el espesor de la cuña, lo que se traduce en un alejamiento del punto de contacto entre el aceite y la superficie rocosa (Wasan, Nikolov, & Kondiparty, 2011).

4.4. Efecto en la reducción de viscosidad para facilitar el transporte de crudo pesado

A este punto ya hemos estudiado algunos fenómenos que ocurren al agregar nanopartículas en la mezcla crudo pesado y agua de producción, sin embargo, la finalidad del trabajo es buscar una reducción significativa en la viscosidad del hidrocarburo para que pueda ser transportado con facilidad. A continuación, se explicarán las principales razones por las que se genera esta reducción

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

al adicionar nanopartículas magnéticas. Inicialmente, al generarse una emulsión Pickering de aceite en agua, se ocasiona una pequeña reducción de viscosidad explicada por la ley de emulsiones, que resalta que la emulsión va a mostrar un valor de intermedio de viscosidad, siendo menor al fluido más viscoso (crudo pesado), y mayor al menos viscoso (agua de producción), aun así, este cambio no es significativo y no se analizará a detalle.

4.4.1. Calentamiento en presencia de un campo magnético

Al igual que la técnica tradicional de calentamiento de crudo pesado a través de fuego directo, el calentamiento mediante la interacción de nanopartículas magnéticas en presencia de un campo magnético busca aumentar la temperatura para que se dé una rápida y significativa disminución en la viscosidad y por ende se pueda transportar con mucha más facilidad el hidrocarburo. Este método se presenta como una alternativa prometedora que puede superar las limitaciones de otros métodos tradicionales.

Cuando se impone un campo magnético con cierta frecuencia, las NPMs generan un efecto de autocalentamiento por pérdida de histéresis y pérdida de relajación contribuyendo al calentamiento del petróleo pesado (Bhatia & Chacko, 2011). En otras palabras, el fenómeno ocurre porque la energía transferida por el campo magnético es absorbida por el material magnético sometido a radiación (aumenta su estado energético) y luego mediante un proceso de relajación, el nanomaterial disipa esta energía produciendo un aumento en la temperatura del medio circundante mediante distintos mecanismos de transferencia de calor.

Gracias a esto se identifica la necesidad de buscar la propagación de una onda electromagnética a través del sistema en tubería, para que genere interacciones en las nanopartículas magnéticas ubicadas en la interfase agua-crudo y la energía sea absorbida por el material. Asimismo, se busca

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

que la temperatura a alcanzar sea suficiente para que ocurran las reacciones de pirólisis y acuatermólisis gracias al calentamiento y a la presencia de nanopartículas con propiedades catalíticas (Zhou, Zhou, Liu, & Huang, 2020).

Un estudio realizado por Pramana et al (2010) concluye que un nanoferrofluido se calienta más rápido que el fluido de grafito y la salmuera mediante inducción electromagnética, lo que indica que este tipo de fluidos pueden ser mejores estimulantes para reducir la viscosidad del petróleo.

Dado que las nanopartículas ferromagnéticas se consideran mejores adsorbentes y catalizadores de ondas electromagnéticas, se han realizado varias investigaciones para implementar su uso en el calentamiento con miras en reducir la viscosidad del crudo. Bera & Babadagli (2017) compararon la actividad de las nanopartículas de hierro y níquel, encontrando que las nanopartículas de níquel presentaron mejor rendimiento en la recuperación de aceite ya que mostraron mejor eficiencia de calentamiento electromagnético y mejor eficiencia catalítica. Igualmente, estas nanopartículas ayudaron a mejorar o crear un “*upgrading*” del crudo pesado durante el calentamiento electromagnético. Debido a esto, las nanopartículas de níquel se presentan como una opción interesante ya que exhiben mejor comportamiento catalítico; además, se han realizado otros estudios como el de Lin et al (2018) que reportaron que el catalizador magnético sintético $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolita}$ pudo romper los enlaces C – S y descomponer los asfaltenos y resinas en moléculas pequeñas, haciendo que redujera la viscosidad del petróleo.

Estudios muestran que el calentamiento producido cuando se usan frecuencias bajas y medianas es bajo, generando un incremento en la temperatura que no es significativo y no logra la ventana de temperatura donde la acuatermólisis se produce, que se encuentra en un rango de 200 a 300°C, sin contar los valores superiores necesarios para que se den las reacciones de pirólisis (Sahni, Kumar, & Knapp, 2000). Por el contrario, estudios de calentamiento electromagnético a alta

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

frecuencia, en el rango de las microondas, pueden alcanzar temperaturas superiores a 400°C en menos de una hora de incidencia, propiciando condiciones para que las reacciones de acuatermólisis sean termodinámicamente posibles (El harfi, Mokhlisse, Chanâa, & Outzourhit, 2000).

Lo descrito anteriormente, conlleva a que se proponga la búsqueda de realizar un calentamiento electromagnético a alta frecuencia, en el rango de las microondas, en cabeza de pozo o en zonas de superficie cercanas a esta, de tal manera que se de una alta reducción de viscosidad del crudo pesado y así permita su transporte de manera sencilla y eficiente.

4.4.2. *Adsorción de asfaltenos*

Debido a las características de los asfaltenos y los consiguientes problemas en la producción y transporte de petróleo, la investigación sobre la mejora del crudo pesado mediante la eliminación de asfaltenos se vuelve importante. Recientemente, se ha demostrado que la nanotecnología permite la reducción de la viscosidad del aceite pesado en experimentos en los que se incorporaron nanopartículas al aceite. Estas partículas interactúan con las fracciones más pesadas del fluido y, por lo tanto, alteran los componentes viscoelásticos del crudo pesado. Debido a sus características excepcionales, como tamaño de partícula pequeño (1-100 nm), gran área de superficie disponible, alta dispersabilidad y características fisicoquímicas ajustables, las nanopartículas son propensas a adsorber selectivamente asfaltenos e inhibir su autoasociación (Taborda et al., 2017).

La eliminación de asfaltenos se puede lograr aprovechando las nanopartículas magnéticas, debido a sus propiedades fisicoquímicas altamente selectivas, ya que la adsorción de asfaltenos en la superficie de las nanopartículas reducirá su capacidad para interactuar entre sí (Nassar et al., 2015). Cuando se agregan nanopartículas magnéticas al sistema de agregación de asfaltenos, la

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

interacción entre el asfalteno y las nanopartículas se vuelve mayor que entre los mismos asfaltenos, lo que restringe la formación de redes viscoelásticas y reduce la viscosidad del petróleo pesado (Betancur et al., 2016).

Aristizábal et al., (2018) observaron que las nanopartículas magnéticas en los ferrofluidos eran capaces de adsorberse en la superficie del asfaltenos, logrando una reducción en el tamaño promedio de los agregados de los asfaltenos. Sus experimentos mostraron que el esfuerzo cortante y la viscosidad del crudo pesado se redujeron en un 78% y 81%, respectivamente. Por otra parte, (Nassar et al., 2012; Shayan & Mirzayi, 2015; Setoodeh et al., 2018) estudiaron la adsorción y eliminación de asfaltenos de una solución de tolueno preparada utilizando nanopartículas magnéticas de Fe_3O_4 . También investigaron la cinética, la termodinámica y la isoterma del proceso de adsorción; además, debido a la catálisis de las nanopartículas magnéticas, los asfaltenos separados adsorbidos en las nanopartículas magnéticas pueden potencialmente usarse para producir hidrógeno mediante gasificación con vapor (Nassar et al., 2012).

5. Pruebas de laboratorio

Las pruebas a nivel de laboratorio se presentan de suma importancia para evaluar las interacciones fluido-fluido y roca-fluido que pueden llegar a presentar las nanopartículas en yacimiento y/o en superficie, con el fin de evaluar los diferentes parámetros como temperatura, salinidad, tamaño, entre otros, que pueden alterar las propiedades de las nanopartículas en estudio; a continuación se describe una metodología basada en León et al., (2016) con las diversas pruebas

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

y equipos que se deben utilizar para seleccionar la nanopartícula que cumpla las condiciones de estudio .

5.1. Caracterización básica

La primera etapa que se debe tener en cuenta para establecer un control de calidad a la nanopartícula que se evalúa es realizar una caracterización básica de esta, la cual contempla propiedades como:

- Densidad
- pH
- Solubilidad
- Índice de Refracción
- Viscosidad
- Espectro Infrarrojo

5.2. Pruebas de compatibilidad fluido-fluido

La segunda etapa que se evalúa es la interacción fluido-fluido, entre el fluido con las nanopartículas y los fluidos de la formación, las pruebas que se realizan para analizar esta etapa se basan en la NORMA API RP42 de 1990, la cual señala las prácticas recomendadas para las pruebas de laboratorio de los agentes activos de superficie para la estimulación de pozos; entre ellas se encuentran:

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

5.2.1. *Sludge*

Algunos crudos en contacto con algunas sustancias químicas tienen precipitados llamados sludges, aunque el sistema pueda no exhibir la tendencia a emulsionar; estas pruebas se realizan para demostrar la tendencia a formar un sludge en condiciones de laboratorio. Con este método no puede determinarse si existe o no la tendencia a formar sludge en condiciones de campo o si el agente antisludge realiza satisfactoriamente su función en estas condiciones. En el caso de los nanofluidos, con esta prueba también se puede evaluar si se precipitaron asfáltenos, siendo un tema clave para no causar un daño a la formación ni taponamiento en líneas de flujo.

El procedimiento consiste en adicionar el nanofluido en proporción 1:1 con aceite libre de sólidos y emulsión, después se cubre la botella y se agita vigorosamente durante 60 segundos a la temperatura de formación durante 24 horas (mínimo 4 horas). Al culminar las 24 horas, se vierte la muestra a través de una malla de acero inoxidable de 100 mesh. Posterior se procede a examinar la malla, si no quedaron sólidos remanentes en ella, no habrá formado sludge, por el contrario, si los sólidos están presentes, se debe lavar la malla alternadamente con agua tibia y aceite mineral para remover emulsiones y parafinas sin remover los Sludge que pudieran ser causados por el nanofluido.

5.2.2. *Mojabilidad Visual*

Esta prueba proporciona un procedimiento simple y rápido para determinar cualitativamente las tendencias de humectación de las nanopartículas, si la tendencia a humedecer por agua o por aceite es grande, se puede distinguir fácilmente, por el contrario, los grados intermedios de humectación no se caracterizan fácilmente.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

El procedimiento se basa en colocar 50 ml del nanofluido a la concentración deseada en un beaker de 150ml y se agregan 10 cm³ de arena de prueba (arena limpia de 40-60 Mesh). Después de 30 minutos, se vierte lentamente 50 ml de agua en la botella, teniendo cuidado de evitar una mezcla y emulsificación excesivas.

Se procede a observar la dispersabilidad relativa de las partículas o su tendencia a formar grumos tanto en la fase acuosa como en la oleosa levantando una pequeña cantidad de arena con una espátula en la fase oleosa y dejándola caer de nuevo al agua.

5.2.3. Rompimiento de Emulsiones

La prueba de rompimiento de emulsiones indica la tendencia de un producto o agente tensoactivo a aumentar o disminuir la formación de emulsión en un sistema muestra-crudo a nivel de laboratorio y se desarrolla bajo los lineamientos de la norma API RP 42:1990 sección 1.

Inicialmente, se ajusta el agitador a un valor de 10000 rpm y se realiza la verificación de la velocidad con un Foto tacómetro láser angosto marca EXTECH.

La prueba se desarrolla en tres proporciones, 25:75, 50:50 y 75:25, el primer valor indica la cantidad de muestra y el segundo de crudo. Se pesan 2,5 g de finos de formación si se cuenta con ellos, sino su equivalente; para este caso se puede usar arena Ottawa de tamaño 200 mesh. Se adiciona en el vaso de agitación el fluido a evaluar en la cantidad correspondiente a la proporción (25, 50 o 75) seguido de la cantidad de crudo (75, 50 o 25) y los 2,5 g de finos. Se emulsiona la mezcla con un agitador por 30 segundos a revoluciones de 10000 rpm y se coloca la mezcla inmediatamente en una probeta graduada de 100 ml. Se realizan las anotaciones a los 15 min, 1 y 24 h y se toma el registro fotográfico de los ensayos.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

5.2.4. *Compatibilidad*

La compatibilidad de los productos químicos y los fluidos de la formación constituye uno de los criterios más importantes de selección. Un fluido no compatible puede causar daño a la formación ocasionando pérdidas de producción y la necesidad de costosos tratamientos de remediación.

Cuando los productos químicos y el agua de formación no son compatibles, pero llegan a mezclarse, se generan depósitos minerales inorgánicos llamados incrustaciones. Las incrustaciones son causadas generalmente por la precipitación de cationes multivalentes como el calcio, hierro y magnesio, al reaccionar con aniones de sulfato y carbonato, afectando la permeabilidad de la formación.

Esta prueba se divide en evaluar dos etapas fundamentales, la compatibilidad con agua de formación (o salmuera sintética) y compatibilidad con el crudo.

Compatibilidad con Salmuera: Para esta prueba se utiliza el agua de formación (o se prepara una salmuera sintética, de composición eléctrica equivalente al agua de formación del pozo en estudio). En frascos de cierre hermético se dosifican diferentes concentraciones de nanofluidos, previamente conocido su CMC, al 1%, 2,5%, 5%, 10% y 20%, en el agua de formación o en la salmuera preparada según sea el caso. Luego, se agita a 14.000 rpm por 60 segundos y se va calentando gradualmente, a 50, 60, 80 y 95 °C respectivamente, todos en intervalos de 1 hora. La temperatura de yacimiento se mantiene hasta completar 24 horas de evaluación.

Para cada temperatura se realizan observaciones, detallando el aspecto de la solución y la cantidad de precipitados que se presenten.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Compatibilidad con Crudo: En frascos de cierre hermético se realizan mezclas 1:1 entre el crudo del pozo en estudio y las soluciones que no presentaron incompatibilidad en la prueba con el agua de formación o salmuera sintética, luego se agitan a 14.000 rpm por 60 segundos y se colocan en un horno a la temperatura de yacimiento. Igual que en la sección previa se realizan observaciones a los tiempos de 1, 2 y 24 horas de evaluación, detallando la detergencia, la calidad en la separación de las fases y los signos de incompatibilidad.

Compatibilidad con iones del agua de formación: Para la realización de esta prueba se sigue el procedimiento usado en las anteriores compatibilidades, y depende de los iones del agua que se evalúe específicamente según el pozo.

Pruebas Técnicas:

Estabilidad Térmica: Para esta evaluación se preparan soluciones de los nanofluidos y se colocan en reactores para digestión (bombas PaaR), inertes y herméticos, a condiciones de yacimiento durante 5 días. Al final del período los reactores se dejan enfriar y se toman los espectros IR, que consisten en la medida de la luz infrarroja absorbida, que da lugar a tránsitos entre los diferentes niveles de energía de los estados vibracionales cuando la energía de la radiación iguala exactamente a la diferencia de energía entre dos de dichos estados, para cada muestra. Por comparación del espectro inicial con el final, se determina si el producto sufrió o no cambios en su composición.

5.3. Pruebas de compatibilidad fluido-roca

Por último, para la tercera etapa se tiene en cuenta la interacción Fluido-Roca, para evaluar estos fenómenos se realizan pruebas de desplazamiento, con la finalidad de simular a nivel de

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

laboratorio las condiciones dinámicas que se presentan durante la interacción fluido roca a condiciones de yacimiento con el nanofluido en estudio, además el objetivo es realizar diseños experimentales en los cuales las variables a evaluar serán la temperatura, concentración de nanofluido y tasa de inyección. Estas pruebas son realizadas a presión y temperatura de yacimiento sobre un plug en estado nativo o restaurado, empleando una tasa de inyección constante (diferencial de presión variable).

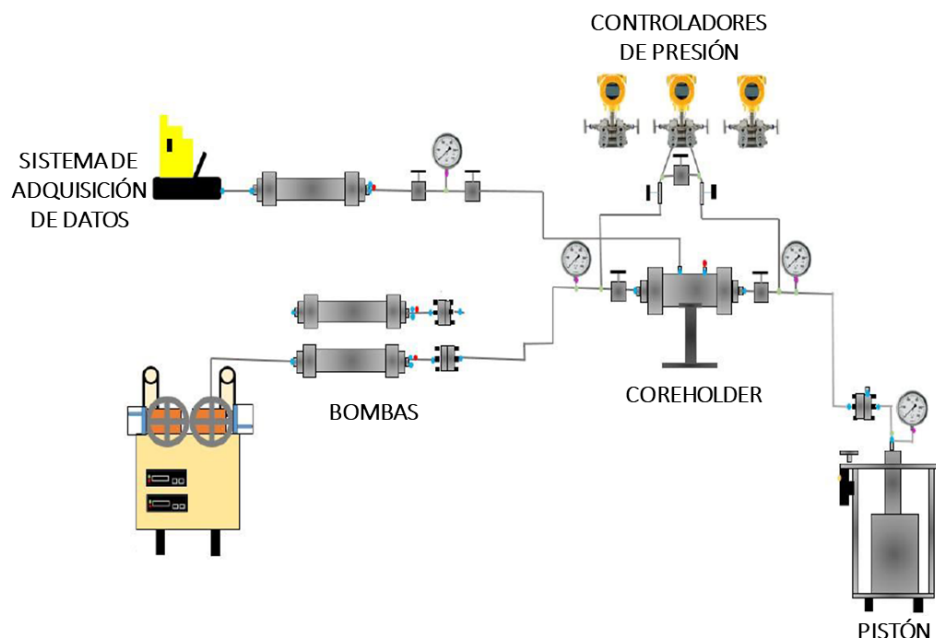
Antes de realizar la prueba de desplazamiento se somete la muestra a un proceso de restauración de la mojabilidad al plug, con el fin de recuperar su tendencia natural a dejarse humectar por un fluido, cuando se encuentra en presencia de varios fluidos inmiscibles. Aquí se deben tener en cuenta las condiciones de presión y temperatura de yacimiento. El plug se monta bajo condiciones de presión de confinamiento (psi), temperatura de yacimiento (°C) y presión de inyección (psi). La prueba consiste en inyectar en el plug los sistemas de fluidos por baches, cuyas características y volúmenes son establecidas de acuerdo con el protocolo de prueba.

Las pruebas de desplazamiento se llevan a cabo sobre tapones de núcleos de Berea y corazones de roca de yacimientos, esta prueba se realiza con el fin de determinar la compatibilidad entre los nanofluidos, la roca y los fluidos de formación. El plug se monta en un equipo Liquid Fluid System Automatizado y se suministran las condiciones requeridas. La prueba consiste en inyectar en el plug los sistemas de fluidos por baches, cuyas características y volúmenes se deben establecer previamente. La metodología está descrita en la norma API RP-42 para pruebas de desplazamiento. En la *Figura 19* se puede observar un montaje experimental del coreholder y las bombas para realizar el desplazamiento.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Figura 19.

Montaje experimental de una prueba de desplazamiento.



Nota: Adaptado de (Grupo de Investigación en Tomografía Computarizada para Caracterización de Yacimientos. GIT 2020)

6. Conclusiones

-El uso de nanopartículas magnéticas se presenta como una técnica prometedora para mejorar el transporte de crudo pesado por tubería, al reducir significativamente su viscosidad en presencia de un campo magnético y proporcionarle características que generan un mejoramiento o “Upgrading”, así como la capacidad que tienen de adsorber asfaltenos en su superficie modificando la red viscoelástica y previniendo su autoasociación.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

-El principal mecanismo que aporta una significativa reducción de viscosidad al crudo pesado es el autocalentamiento de las nanopartículas magnéticas al estar en presencia de un campo magnético, gracias a un aumento en su estado energético que conlleva al aumento de temperatura de todo el sistema. El efecto de las nanopartículas en la adsorción de asfaltenos y la presencia de una emulsión O/W también son factores que ayudan a reducir la viscosidad, pero en menor medida.

-Las nanopartículas magnéticas deben llevar un proceso de revestimiento o funcionalización, de tal manera que presenten un comportamiento anfifílico; es así como se logran situar en la interfase agua-crudo permitiendo la formación de emulsiones Pickering que facilitará el transporte del crudo pesado en tubería. Con el fin de que se genere una emulsión O/W más estable se varía el ángulo de contacto entre la nanopartícula y la interfase en un rango de 15 a 90°.

-Las pruebas en laboratorio proporcionan las condiciones óptimas para el uso de un tipo específico de nanopartícula magnética, resaltando las pruebas de solubilidad, donde se realiza la prueba de estabilidad térmica que determina hasta qué temperatura es estable y soluble el nanofluido. Igualmente, y con el objetivo de prevenir la precipitación de asfaltenos y taponamiento en tubería, se lleva a cabo la prueba de Sludge donde las nanopartículas se ponen en presencia del crudo observando si hay precipitación de estos, y se funcionalizan en caso de que el fenómeno ocurra, variando algunas propiedades.

- Las nanopartículas magnéticas presentan desafíos claves para su aplicación, debido a que es una tecnología relativamente nueva en la industria del petróleo; se busca avanzar en el estudio de estas nanopartículas mediante una mayor investigación de las propiedades y mecanismos únicos que poseen y así mismo iniciar o intensificar las pruebas a escala de laboratorio para su uso en el transporte del crudo pesado o en el área de ingeniería deseado.

7. Recomendaciones

Se recomienda continuar con una etapa experimental en la cual se pueda estudiar a detalle la variación de las diferentes propiedades de las nanopartículas magnéticas y el crudo pesado, con el uso de los conceptos y las pruebas expuestas en el presente estudio, y una revisión detallada de la nanopartícula a utilizar.

De igual forma se recomienda la construcción de un prototipo a escala de laboratorio donde se puedan evaluar la potencia electromagnética aplicada, tiempo y distancia de aplicación de las microondas para poder determinar la cantidad de energía necesaria para incrementar la temperatura de un volumen determinado de crudo a transportar o en yacimiento, dependiendo del caso estudio. Con este estudio sería posible conocer el mejoramiento del crudo y el perfil de temperatura.

Referencias Bibliográficas

- Aceves, S. B. (2009). *Síntesis de Nanopartículas de Hierro con Propiedades Magnéticas Obtenidas Vía Precursores Organometálicos*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
- Agista, M. N., Guo, K., & Yu, Z. (2018). A state-of-the-art review of nanoparticles application in petroleum with a focus on enhanced oil recovery. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/app8060871>
- Aristizábal, J. E., Cortés, F. B., & Franco, C. A. (2018). Viscosity reduction of extra heavy crude oil by magnetite nanoparticle-based ferrofluids. *Adsorption Science and Technology*, 36(1–2), 23–45. <https://doi.org/10.1177/0263617417704309>
- Aseri, A., Garg, S., Nayak, A., Trivedi, S., & Ahsan, J. (2015). Magnetic nanoparticles: magnetic nano-technology using biomedical applications and future prospects. *Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res*, 119-131.
- Bera, A., & Babadagli, T. (2017). Effect of native and injected nano-particles on the efficiency of heavy oil recovery by radio frequency electromagnetic heating. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 153, 244-256.
- Betancur, S., Carrasco-Marín, F., Pérez Cardenas, A., Franco, C., Jiménez, J., Manrique, E., . . . Cortés Farid. (2019). Effect of Magnetic Iron Core–Carbon Shell Nanoparticles in Chemical Enhanced Oil Recovery for Ultralow Interfacial Tension Region. *Energy*

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Fuels, 4158–4168.

Betancur, S., Franco, C. A., & Cortés, F. B. (2016). Magnetite -Silica Nanoparticles With a Core-Shell Structure for Inhibiting the Formation Damage Caused By The Precipitation/Deposition Of Asphaltene. 21(3), 4729.

Bhatia, K., & Chacko, L. (2011). Ni-Fe Nanoparticle: An Innovative Approach for Recovery of Hydrates. SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, 23-26.

Cai, J., Chenevert, M. E., Sharma, M. M., & Friedheim, J. (2012). Decreasing water invasion into Atoka shale using nonmodified silica nanoparticles. SPE Drilling and Completion, 27(1), 103–112. <https://doi.org/10.2118/146979-PA>

Cárdenas, N., & Hernández, D. M. (2018). Efecto de los Nanofluidos de Óxido de Grafeno y Óxido de Silicio Sobre la Acción de un Surfactante en la Mojabilidad y la Tensión Interfacial para Recobro Mejorado Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Chen, D.-H., & Wu, S.-H. (2000). Synthesis of Nickel Nanoparticles in Water-in-Oil Microemulsions. Chemistry of Materials.

Cheraghian, G., & Hendraningrat, L. (2016). A review on applications of nanotechnology in the enhanced oil recovery part A: effects of nanoparticles on interfacial tension. Springer.

Chinenyeze, M. A. J., & Ekene, U. R. (2017). Physical and chemical properties of crude oils and their geologic significances. International Journal of Science and Research, 6(6), 1514–1521. <https://doi.org/10.21275/ART20174603>

Cruz Santiago, J. francisco. (2013). Nanotecnología Aplicada a la Industria Petrolera. 109. Delgado Linares, J. G., Bullón, J., & Salager, J.-L. (2015). Nanopartículas : Fundamentos y Aplicaciones.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

- Du, G., Liu, Z., Xia, X., Chu, Q., & Zhang, S. (2006). Characterization and application of Fe₃O₄/SiO₂ nanocomposites. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 39, 285–291.
- El-Diasty, A. I., & Salem Ragab, A. M. (2013). Applications of nanotechnology in the Oil & Gas industry: Latest trends worldwide & future challenges in Egypt. *Society of Petroleum Engineers - North Africa Technical Conference and Exhibition 2013, NATC 2013*, 2(February 2015), 1036–1048. <https://doi.org/10.2118/164716-ms>
- El harfi, K., Mokhlisse, A., Chanâa, M., & Outzourhit, A. (2000). Pyrolysis of the Moroccan (Tarfaya) oil shales under microwave irradiation. *Fuel*, 733-742.
- Escobaro, A., Pizzioa, L., & Romanelli, G. (2018). Catalizadores magnéticos basados en Óxidos de Hierro: Síntesis, Propiedades y Aplicaciones. *Ciencia en Desarrollo*, 79-101.
- Esmaceli, A. (2011). Applications of nanotechnology in oil and gas industry. *AIP Conference Proceedings*, 1414, 133–136. <https://doi.org/10.1063/1.3669944>
- Evdokimov, I. N., Eliseev, D. Y., & Eliseev, N. Y. (2002). Negative viscosity anomaly in liquid petroleum products after heat treatment. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 38(3), 171–177. <https://doi.org/10.1023/A:1016208518778>
- Felix, J. J., Bremner, C., Brough, B., Baker, A., Pattison, K., Brown, G., Hathcock, R., Koerner, K., Hughes, T., & Cárdenas, J. L. De. (2013). La importancia del petróleo pesado. *Oilfield Review*, 18, 38–59.
- Fernández, K. C. (2013). *Síntesis y Caracterización de Nanopartículas Magnéticas*. León: Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
- Flores, A. C. (16 de Mayo de 2019). *Lifeder*. Obtenido de <https://www.lifeder.com/tension-interfacial/>
- Franco, C. A., Nassar, N. N., Ruiz, M. A., Pereira-Almao, P., & Cortés, F. B. (2013). Nanoparticles

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

for inhibition of asphaltenes damage: Adsorption study and displacement test on porous media.

Energy and Fuels, 27(6), 2899–2907. <https://doi.org/10.1021/ef4000825>

Gounder, R. M. (2003). Processing of Heavy Crude Oils and Crude Oil Residues. In *Crude Oil Chemistry*. <https://doi.org/10.1201/9780203014042.ch9>

Hart, A. (2014). A review of technologies for transporting heavy crude oil and bitumen via pipelines. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 4(3), 327–336. <https://doi.org/10.1007/s13202-013-0086-6>

Hoelscher, K. P., De Stefano, G., Riley, M., & Young, S. (2012). Application of nanotechnology in drilling fluids. *Society of Petroleum Engineers - SPE International Oilfield Nanotechnology Conference 2012, June*, 297–303. <https://doi.org/10.2118/157031-ms>

Hollebone, B. (2011). Measurement of Oil Physical Properties. In *Oil Spill Science and Technology*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-943-0.10004-8>

Kaptay, G. (2006). On the equation of the maximum capillary pressure induced by solid particles to stabilize emulsions and foams and on the emulsion stability diagrams. *Colloids Surf*, 387-401.

Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 908-931.

Khosroshahi, M., & Ghazanfari, L. (2010). Preparation and characterization of silica-coated iron-oxide bionanoparticles under N₂ gas. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 1824-1829.

Ko, S., Prigiobbe, V., Huh, C., Bryant, S., Bennetzen, M., & Mogensen, K. (2014). Accelerated Oil Droplet Separation from Produced Water Using Magnetic Nanoparticles . *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

- Kodama, R. (1999). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* , 359-372.
- Kothari, N., Raina, B., Chandak, K., Iyer, V., & Mahajan, H. (2010). Application of Ferrofluid for Enhanced Surfactant Flooding in EOR. *SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition*.
- Lin, D., Feng, X., Wu, Y., Ding, B., Lu, T., Liu, Y., . . . Yang, C. (2018). Insights into the synergy between recyclable magnetic Fe₃O₄ and zeolite for catalytic aquathermolysis of heavy crude oil. *Applied Surface Science*, 456, 140-146.
- Ludeña, E. V, Cornejo, M., Baykara, H., Iza, P., Arroyo, D., & Corregidor, J. (2018). Nanotecnología Y La Industria Petrolera: Aplicaciones Potenciales En El Ecuador. *(Prueba)MOMENTO (Prueba)*, 0(56E), 54–64.
- Malagón, J., Montoya, G., & Ruiz, C. (2016). La competitividad del sector de hidrocarburos en las diferentes regiones de Colombia. *Cuadernos Programa de Las Naciones Unidas Para El Desarrollo (PNUD)*, 1–82. <https://bit.ly/32MT0gQ>
- Medina, J. A. (2010). *Síntesis y Caracterización de Nanofluidos de Ferritas de Co(1-x)ZnxFe₂O₄ (0 < x < 0.75)*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Miranda, C. R., De Lara, L. S., & Tonetto, B. C. (2012). Stability and mobility of functionalized silica nanoparticles for enhanced oil recovery applications. *Society of Petroleum Engineers - SPE International Oilfield Nanotechnology Conference 2012, April 2016*, 311–321. <https://doi.org/10.2118/157033-ms>
- Mokhatab, S., Fresky, M. A., & Islam, M. R. (2006). *Applications of Nanotechnology in Oil and Gas E&P - SPE-0406-0048-JPT 2006. April*.
- Muñoz, J. H. (2017). Crudos pesados: la realidad del sector hidrocarburos de Colombia.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

- Nassar, N. N., Betancur, S., Acevedo, S., Franco, C. A., & Cortés, F. B. (2015). *Development of a Population Balance Model to Describe the Influence of Shear and Nanoparticles on the Aggregation and Fragmentation of Asphaltene Aggregates*.
- Nassar, N. N., Hassan, A., Carbognani, L., Lopez-Linares, F., & Pereira-Almao, P. (2012). Iron oxide nanoparticles for rapid adsorption and enhanced catalytic oxidation of thermally cracked asphaltenes. *Fuel*, 95, 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.022>
- Patarroyo, I. A., & Sandoval, M. S. (2019). *Metodología para la caracterización de nanopartículas en aplicaciones de estimulación de pozos de petróleo*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Peng, B., Tang, J., Luo, J., Wang, P., Ding, B., & Tam, K. C. (2018). Applications of nanotechnology in oil and gas industry: Progress and perspective. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 96(1), 91–100. <https://doi.org/10.1002/cjce.23042>
- Pramana, A., Abdassah, D., Rachmat, S., & Mikrajuddin, A. (2010). Electromagnetic induction heat generation of nano-ferrofluid and other stimulants for heavy oil recovery. *The Third Nanoscience and Nanotechnology Symposium*.
- Rajinder, P. (2017). A Simple Model for the Viscosity of Pickering Emulsions. *Fluids*.
- Saigal, T., Dong, H., Matyjaszewski, K., & Tilton, R. D. (2010). Pickering Emulsions Stabilized by Nanoparticles with Thermally Responsive Grafted Polymer Brushes. *Langmuir*, 15200–15209.
- Salager, R. A. (2005). *Tensión interfacial*. Mérida: Cuaderno FIRP S203-A, módulo de enseñanza en fenómenos interfaciales.
- Santiago, J. F. (2013). *Nanotecnología Aplicada a la Industria Petrolera*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

- Saniere, A., Hénaut, I., & Argillier, J. F. (2004). Pipeline transportation of heavy oils, a strategic, economic and technological challenge. *Oil and Gas Science and Technology*, 59(5), 455–466. <https://doi.org/10.2516/ogst:2004031>
- Santos, R. ., & Lo. (2014). Brazilian Journal of Chemical Engineering - An overview of heavy oil properties and its recovery and transportation methods. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31(03), 571–590.
- Sahni, A., Kumar, M., & Knapp, R. (2000). Electromagnetic Heating Methods for Heavy Oil Reservoirs. *SPE/AAPG Western Regional Meeting*.
- Setoodeh, N., Darvishi, P., & Esmailzadeh, F. (2018). Adsorption of asphaltene from crude oil by applying polythiophene coating on Fe₃O₄ nanoparticles. In *Journal of Dispersion Science and Technology* (Vol. 39, Issue 4). <https://doi.org/10.1080/01932691.2017.1339607>
- Shayan, N. N., & Mirzayi, B. (2015). Adsorption and removal of asphaltene using synthesized maghemite and hematite nanoparticles. *Energy and Fuels*, 29(3), 1397–1406. <https://doi.org/10.1021/ef502494d>
- Speight, J. G. (2014). The Chemistry and Technology of Petroleum. *The Chemistry and Technology of Petroleum*. <https://doi.org/10.1201/b16559>
- Taborda, E. A., Alvarado, V., & Cortés, F. B. (2017). Effect of SiO₂-based nanofluids in the reduction of naphtha consumption for heavy and extra-heavy oils transport: Economic impact on the Colombian market. *Energy Conversion and Management*, 148, 30-42.
- Taborda, E. A., Franco, C. A., Ruiz, M. A., Alvarado, V., & Cortes, F. B. (2017). Experimental and theoretical study of viscosity reduction in heavy crude oils by addition of nanoparticles. *Energy & Fuels*, 31(2), 1329-1338.

ANÁLISIS DEL USO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

- Taborda, E. A., Alvarado, V., Franco, C. A., & Cortés, F. B. (2017). Rheological demonstration of alteration in the heavy crude oil fluid structure upon addition of nanoparticles. *Fuel*, 189, 322–333. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.110>
- Vanegas, C. L., Buendia, H., & Carrillo, L. F. (2016). Evaluación y selección de un inhibidor multiscale para prevenir la formación de incrustaciones inorgánicas en un campo petrolero colombiano. *Fuentes, el reventón energético*, 14(2), 111-120.
- Wasan, D., Nikolov, A., & Kondiparty, K. (2011). The wetting and spreading of nanofluids on solids: Role of the structural disjoining pressure. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 16, 344-349.
- Wu, J., Lei, Q., Xiong, C., Cao, G., Zhang, J., Li, J., Fang, J., Tan, J., Ai, T., Li, N., & Jia, M. (2016). A nano-particle foam unloading agent applied in unloading liquid of deep gas well. *Petroleum Exploration and Development*, 43(4), 695–700. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(16\)30081-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(16)30081-7)
- Zhang, H., Nikolov, A., & Wasan, D. (2014). Enhanced oil recovery (EOR) using nanoparticle dispersions: Underlying mechanism and imbibition experiments. *Energy and Fuels*, 28(5), 3002–3009. <https://doi.org/10.1021/ef500272r>
- Zhang, L., He, R., & Gu, H.-C. (2006). *Applied Surface Science*.
- Zhou, K., Zhou, X., Liu, J., & Huang, Z. (2020). Application of magnetic nanoparticles in petroleum industry: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*.