



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

Nanotecnología Aplicada a la Industria Petrolera

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A:

JUAN FRANCISCO CRUZ SANTIAGO



TUTOR:

ING. OSCAR OSORIO PERALTA

2013

DEDICATORIA.

A mis padres Francisco y María por ser los pilares más importantes y por demostrarme siempre su cariño, gracias por todo por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre han estado apoyándome, por todo esto les agradezco de todo corazón el que estén con migo a mi lado.

A mis hermanos por ser parte importante de mi vida a esas personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyos, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están conmigo y otras en mis recuerdos gracias a todos.

AGRADECIMIENTOS.

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A mi director de tesis el Ing. Oscar Osorio Peralta por todo el apoyo brindado a lo largo de la carrera, por su tiempo, amistad y por los conocimientos que me transmitió.

A la Universidad Autónoma de México por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

"La dicha de la vida consiste en tener siempre algo que hacer, alguien a quien amar y alguna cosa que esperar". Thomas Chalmers

Índice

	Paginas
Introducción	1
Capitulo 1	
1 <i>Introducción ¿Qué es Nanotecnología?</i>	
1.1 Introducción.	3
1.2 <i>¿Qué es Nanotecnología?</i>	5
1.3 ¿Que es la Nanociencia?	6
1.4 Nanomateriales.	8
1.4.1 Técnicas de Nanofabricación.	8
1.4.2 Buckyballs/ Fullerene.	10
1.4.3 Nanotubos de Carbono.	10
1.4.4 Nanopartículas.	11
1.4.5 Nanocompuestos.	12
1.4.6 Nanoestructuras.	13
1.5 Ramas de investigación de la Nanotecnología.	14
1.5.1 La nanotecnología Seca.	14
1.5.2 La nanotecnología Húmeda.	14
1.5.3 La nanotecnología Computacional.	14
1.6 Áreas de Aplicación de la Nanotecnología.	14
1.6.1 Aplicaciones en la Actualidad.	16
1.6.2 Beneficio y Riesgos de la Nanotecnología.	17
1.6.2.1 Beneficios.	17
1.6.2.2 Riesgos.	18

Capítulo 2

2 *La nanotecnología en la Ingeniería del Petróleo*

2.1	La Nanotecnología en la Industria Petrolera.	21
2.1.1	La Nanotecnología en la Industria del Gas.	23
2.1.2	La Nanotecnología en la Industria del Aceite.	25
2.2	Nanotecnología en la Ingeniería de Yacimientos.	27
2.3	Beneficios de la Nanotecnología en la Ingeniería de Yacimientos.	30
2.3.1	Nanopartículas.	31
2.3.2	Nanosensores.	33
2.3.3	Nanomateriales.	34
2.4	Ejemplos de nanotecnología.	37

Capítulo 3

3 *La Nanotecnología Aplicación a la Ingeniería de Perforación.*

3.1	Ingeniería de Perforación.	39
3.2	Aportación de la nanotecnología a la ingeniería de perforación.	41
3.2.1	Apuntalantes para Fractura.	43
3.2.2	Nanomateriales.	45
3.2.3	Fluidos inteligentes.	46
3.2.3.1	Definición de Fluidos Inteligentes	47
3.2.3.2	Tipos de Fluidos	48
3.3	El Papel de Nano para Superar los Desafíos de la Perforación.	51
3.3.1	Problemas de Flujo en Aguas Superficiales.	52
3.3.2	Fluidos de Circulación.	54
3.3.3	Torque y Arrastre.	57
3.3.4	Problemas en la Tubería de Perforación.	57

3.3.5	La Aplicación en Altas Presiones y Altas Temperaturas.	58
3.3.6	Hidratos de Gas.	59
3.4	Terminación de Pozos.	60

Capítulo 4

4 *La Nanotecnología en la Recuperación Mejorada de Aceite.*

4.1	Procesos de Recuperación Mejorada.	65
4.2	Nanotecnología en la Recuperación de Aceite.	67
4.2.1	Efecto del Tamaño de las Nanopartículas.	70
4.2.2	Propagación de las Nanopartículas a Través de Medios Porosos.	73
4.2.3	Migración de Finos.	74
4.3	Procesos de EOR.	75
4.3.1	Movimiento de la nano-escala en el Medio Poroso.	76
4.3.2	Áreas Superficiales Específica de la Nanopartícula.	77
4.3.3	Suministro de Agentes Inteligentes para EOR.	77
4.3.4	Nanofiltración en los Procesos de EOR.	77
4.3.5	Nanosensores.	78
4.3.6	Nano análisis.	78
4.3.7	Asfáltenos.	79
4.4	Complejidad de la EOR.	80
4.4.1	Como Impacta la Nanoescala en una Escala Macro.	80
4.4.2	Visualización de Procesos.	81
4.5	Aplicación de Nanofiltración en Yacimientos.	84
4.5.1	Nanorobots.	87
4.6	Aplicación de la Nanotecnología en un caso de EOR.	89

4.6.1	Problema.	89
4.6.2	Solución.	90
Conclusiones.		95
Referencias.		97
Referencia de Imágenes.		101

Introducción

La nanotecnología, o lo que sería lo mismo la ciencia aplicada para resolver problemas de la vida diaria del ser humano a una escala nanométrica (10^{-9} de un metro), ha causado una gran inquietud en el mundo. Desde hace dos décadas los gobiernos y compañías han destinado millones de dólares de sus presupuestos a la investigación en esta área. Hay varios aspectos por lo que esta nueva disciplina es tan interesante, por ejemplo: el cambio de propiedades de la materia a esta escala; la promesa de poder manipular átomos y consecuentemente poder hacer dispositivos sólo imaginables en este momento en vez de que los átomos aleatoriamente hagan una estructura y luego se encuentre el uso para dicha estructura.

La nanotecnología es una nueva disciplina de la cual la Ingeniería Petrolera ha empezado a participar en la evolución de esta tecnología con el Consorcio de Energía Avanzada (AEC), tiene como objetivo desarrollar nueva tecnología para poder explotar un yacimiento desde su descubrimiento hasta su abandono, a pesar de que solo una década que comenzó el despegue mundial de este nuevo campo científico, hoy existen cerca de 3 mil productos generados con nanotecnología, la mayoría para usos industriales, aunque las investigaciones más avanzadas se registran en el campo de la medicina y la biología.

Actualmente, muchos productos generados por la nanotecnología han sido aplicados a la vida cotidiana de millones de personas, como el uso de materiales más livianos y resistentes, catalizadores con nanopartículas de platino en los vehículos para hacer más eficiente el consumo de combustible, hasta tecnología de punta en el desarrollo de proyectos espaciales.

La nanotecnología y el conocimiento de los procesos biológicos, químicos y físicos a nivel molecular, se convertirán en una de las revoluciones científicas más importantes para la humanidad, la cual debe ser difundida e incorporada en la sociedad con una amplia participación y apoyo por parte del estado e iniciativas privadas.

A corto plazo, la nanotecnología dará lugar a materiales más ligeros y fuertes con propiedades distintas a las de los materiales que conocemos hoy, lo que supondrá una importante transformación en la Industria Petrolera. Las propiedades de estos materiales podrán ser modificados y controlados como se quiera; materiales más ligero y a su vez mucho más fuertes, nanosensores que podrán dar un pronósticos del yacimiento, fluidos inteligentes que podrán evitar catástrofes en la perforación, etc.

Este trabajo se orienta a realizar una investigación bibliográfica sobre los avances de la nanotecnología y el enfoque en la Ingeniería Petrolera, los usos, beneficios y riesgos futuros.

El Capítulo I.- Está dedicado a la recopilación de información sobre que es la nanotecnología, y su aplicación en áreas de investigación.

El Capítulo II.- Proporcionar los conocimientos necesarios para comprender lo que es la nanotecnología en la Industria Petrolera y gas, sus aportaciones en la Ingeniería de Yacimientos sus beneficios y un ejemplos de su aplicación.

El Capítulo III.- Se menciona la aplicación de la nanotecnología en otra área que es la Ingeniería de Perforación, la aportación que puede generar la nanotecnología, los desafíos puede a ver en la perforación y en la terminación.

El Capítulo IV.- Proporcionara información sobre otro punto importante que se considera en este proyecto, la Recuperación Mejorada de Aceite (EOR), como se sabe que las reservas probadas de aceite están disminuyendo y el precio sube y baja y los gigantesco yacimientos ya han sido seleccionado para algún método de EOR, con la nanotecnología se podrá transformar esos mecanismos y procesos de EOR con nanopartículas nos ofrecerán una manera de controlar los procesos de recuperación de aceite que con otros métodos no se han podido.

Capítulo 1

Introducción: ¿Qué es la Nanotecnología?

1.1 Introducción

Nanotecnología es todavía una palabra desconocida para la mayoría de la población. Sin embargo, todo indica que se trata de la próxima revolución tecnológica y que ya despegó. La nanotecnología es la manipulación de la materia a escala del nanómetro (la millonésima parte de un milímetro), es decir, a escala de átomos y moléculas. A esa escala, la materia puede cambiar sus propiedades físicas y químicas, por ejemplo el color, la conductividad eléctrica, la resistencia. En esta perspectiva se borra el límite entre lo vivo y lo no vivo: todo tiene átomos.

Sus más destacados proponentes prometen que esta tecnología nos va a liberar de casi todos los males: terminaría con la contaminación ambiental y la escasez de recursos (todo podría ser construido a partir de átomos ya existentes), por tanto, con la pobreza; encontraría la cura a las enfermedades y la mejor forma de administrar al organismo; prolongaría la vida con nanorrobots que diagnosticarían enfermedades o desgaste de tejidos y los repararían; se crearían nuevos materiales, etcétera¹.

La nanotecnología habla de máquinas pequeñas al extremo de lo invisible capaces de construir edificios, detener enfermedades, pelear guerras y producir alimentos. Pero lo más escalofriante es que no se trata de algo descabellado: la revolución ya comenzó y en unos 50 años los humanos podrían ver cosas que la ciencia ficción más atrevida apenas comienza a intuir, ver Figura 1.1. Hace 40 años el físico Richard Feynman,² ganador del Premio Nobel, fue invitado a pronunciar un discurso en una institución tecnológica de California. Sus reflexiones generaron un eco que cada vez suena con más fuerza.

Richard Feynman (premio Nobel de Física en 1965)⁹ fue quien sugirió por primera vez, en 1959, la posibilidad de construir materiales y dispositivos a escala atómica y molecular. En

¹ *Referencias al final.*

1981 Gerd Binnig y Heinrich Rohrer inventaron el ScanningTunnelMicroscope (STM)² que permite ver la imagen de los átomos; por ello recibieron el Premio Nobel de Física en 1986, junto con Ernst Rusaka, quien contribuyó a su mejora. Este instrumento constituyó un punto de inflexión en la investigación y manipulación de átomos. En 1984, Richard Smalley, Robert Curl y Harold Kroto descubrieron la existencia de un tipo de molécula de carbono hasta entonces desconocida (sólo se conocían tres tipos: diamante, grafito y amorfo).³ Esta molécula, que llamaron fullereno (buckyball),³ se compone de 60 átomos de carbón, y tiene la forma de una pelota de fútbol. Este descubrimiento que le's valió el Premio Nobel de Química de 1996 fue esencial para el desarrollo de la nanotecnología al mostrar las propiedades de los fullerenos, como la de ser súper conductivos, altamente estables, capaces de soportar altas temperaturas y presión.

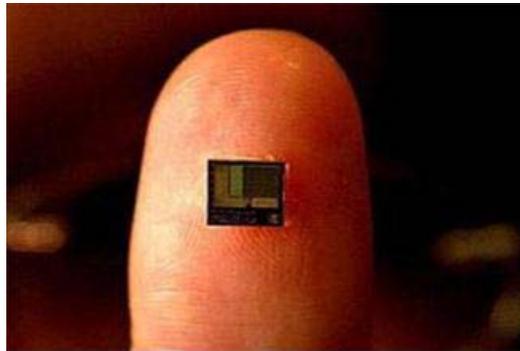


Figura 1.1.-La nanotecnología fabricará computadoras súper potentes.^{1.1}

Otro aspecto intrigante es la capacidad de los átomos de carbono de esta molécula de reaccionar con otros átomos y moléculas manteniendo su estructura y forma estable. Los investigadores vieron en ello la posibilidad de formar moléculas que pudieran ser adheridas a los fullerenos para diversos propósitos. Posteriormente, en 1991, Sumiolijima descubrió los nanotubos de carbono, que consiguió reproducir artificialmente en 1993; y que también presentan propiedades novedosas asociadas a su escala. Al cambiar su diámetro, por ejemplo, cambia su conductividad eléctrica, de manera que pueden comportarse como metal, como semiconductor o como superconductor. Actualmente la investigación en nanotubos de carbono es una de las más promisorias.

"Los principios de la física, tal y como yo los entiendo, no niegan la posibilidad de manipular las cosas átomo por átomo... Los problemas de la química y la biología podrían evitarse si desarrollamos nuestra habilidad para ver lo que estamos haciendo, y para hacer cosas al nivel atómico", Feynman en 1959.²

^{1.1}Referencia de la imagen al final

1.2 ¿Qué es la Nanotecnología?

La nanotecnología es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nano escala, y la explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nano escala,⁴ ver la Figura 1.2.

Cuando se habla de la nanotecnología se refiere a la creación de materiales funcionales, dispositivos y sistemas a través del control de la materia a nivel atómico y molecular. Es una actividad fuertemente interdisciplinaria que involucra, entre otras, a la física, la química, la biología, la medicina y la ingeniería. Desde un punto de vista formal, la nanotecnología se refiere a la comprensión y al control de la materia en escalas de tamaño menor a los 100 nm ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-7} \text{ cm}$).¹² En esta escala que se denomina escala mesoscópica, aparecen fenómenos únicos, originados en la naturaleza cuántica de la materia, que pueden ser utilizados para nuevas aplicaciones.



Fig.1.2.- Perspectiva de la nanoescala. Tres ejemplos de la nanoescala, ADN, un nanotubo de carbono y una nanopartículas comparados con elementos con tamaños comunes.^{1.2}

1.3 ¿Que es la Nanociencia?

La **Nanociencia** es un área emergente de la ciencia que se ocupa del estudio de los materiales de muy pequeñas dimensiones.¹²

No puede denominarse química, física o biología dado que los científicos de este campo están estudiando un campo dimensional muy pequeño para una mejor comprensión del mundo que nos rodea, ver Fig. 1.3.



Fig.1.3.-La Nanotecnología nos permite afrontar los más atrevidos y fascinantes adelantos tecnológicos.^{1,3}

El significado de la "**nano**" es una dimensión: 10^{-9} .

- Esto es: 1 nanómetro = 0,000000001 metros.
- Es decir, un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro, o millonésima parte de un milímetro.
- También: 1 milímetro = 1.000.000 nanómetros.

Una **definición de nanociencia** es aquella que se ocupa del estudio de los objetos cuyo tamaño es desde cientos a décimas de nanómetros.⁵

Hay varias razones por las que la Nanociencia se ha convertido en un importante campo científico con entidad propia. Una es la disponibilidad de nuevos instrumentos capaces de "tocar y ver" a esta escala dimensional. A principios de los ochenta fue inventado en Suiza (IBM-Zurich) uno de los microscopios capaz de ver átomos. Unos pocos años más tarde el AtomicForceMicroscope, ver Fig. 1.4. Fue inventado incrementando las capacidades y tipos de materiales que podían ser investigados. En la actualidad hay un gran número de instrumentos que ayudan a los científicos en el reino de lo nano.



Fig.1.4.-Microscopio de fuerza atómica (AFM).^{1,4}

En respuesta a estas nuevas posibilidades los científicos han tomado conciencia de potencial futuro de la actividad investigadora en estos campos. La mayor parte de los países han institucionalizado iniciativas para promover la nanociencia y la nanotecnología, en sus universidades y laboratorios. Con los recientes aumentos en los fondos destinados a este tipo de investigación muchos científicos están llevando a cabo programas de investigación y la cantidad de descubrimientos y avances científicos se han incrementado de forma muy importante.¹²

Es una práctica habitual hablar de nanociencias y nanotecnologías sin precisar las diferencias entre ambos conceptos. Sin embargo, existe un consenso entre los especialistas en que las nanociencias son las generadoras del conocimiento básico sobre esta fenomenología específica de la escala mesoscópica, tanto desde el punto de vista de la física, como de la química o de la biología, mientras que las nanotecnologías propiamente dichas se refieren a las técnicas de observación, manipulación y fabricación de nanoestructuras y de dispositivos en esa escala. Por ello, las nanotecnologías son consideradas ya, estrictamente, como nuevas ingenierías del siglo XXI, basadas en los conocimientos aportados por la investigación en nanociencias.

1.4 Nanomateriales.

La nanotecnología nos da ciertos materiales a nanoescala los cuales se conocen como nanomateriales cuya principal característica son sus dimensiones estructurales que están en el rango de los 1 a 100 nanómetros¹, ver Fig.1.5.

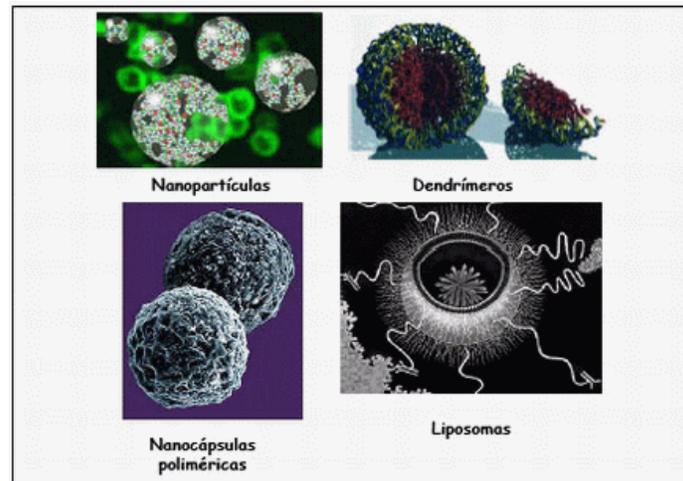


Fig. 1.5.- Materiales con propiedades morfológicas más pequeñas que un micrómetro.^{1,5}

Lo principal que está siendo explotado por la nanotecnología, es que los materiales tengan propiedades físicas diferentes de la que tienen en el tamaño con que aparecen normalmente en la naturaleza. Un mismo material, como el carbono (el grafito de los lápices de escribir), manipulado molécula a molécula, puede llegar a ser más duro que el diamante y tener un peso menor que el acero. Además puede tener una conductividad eléctrica prácticamente perfecta en el sentido de que la transmisión de la electricidad puede no sufrir debilitamiento con la distancia. Otros materiales pueden presentar propiedades magnéticas, ópticas, reactivas, etcétera, diferentes de las conocidas en los tamaños que normalmente son manipulados por la industria.

1.4.1 Técnicas de Nanofabricación.

Existe una gran variedad de técnicas capaces de crear nanoestructuras con varios grados de calidad, rapidez y costos. Todas ellas se pueden agrupar en dos grandes grupos, “**BOTTOM-UP**” y “**TOP-DOWN**”, que aunque se trata de técnicas opuestas en cuanto a su filosofía de operación, convergen en su finalidad.¹

El **top-down**, comienza el proceso de fabricación de nanoestructuras, a partir de materiales grandes, que se van reduciendo hasta tamaños a escala nanométrica. Estos métodos ofrecen fiabilidad y complejidad en los dispositivos, aunque normalmente conllevan elevados costos energéticos, una mayor imperfección en la superficie de la estructura así como problemas de contaminación. Los principales tipos de técnicas empleadas en este campo, son el corte mediante ingeniería de ultra precisión, empleada

sobre todo en la industria microelectrónica de materiales y la litografía, en donde se exponen los materiales a luz, iones o electrones, para conseguir los tamaños de material deseados.⁶

La fabricación mediante métodos **bottom-up** abarca la construcción de estructuras, átomo a átomo, o molécula a molécula. El grado de miniaturización alcanzable mediante este enfoque, es superior al que se puede conseguir con el **top-down** ya que gracias a los microscopios de escaneado, se dispone de una gran capacidad para situar átomos y moléculas individuales en un lugar determinado.⁶

La gran variedad de enfoques de este último conjunto de técnicas, se puede dividir en tres grandes categorías:

- **Síntesis química:** Consiste en la producción de materias primas, como moléculas o partículas, que pueden usarse directamente en productos en forma desordenada, formando bloques o niveles más avanzados de ordenamientos. El tipo de nanomaterial más conocido, empleando esta técnica, son las nanopartículas.
- **Ensamblaje posicional:** Esta es la única técnica, capaz de manipular y posicionar átomos y moléculas, uno a uno. Aunque contamos con instrumentación capaz de realizar estos procesos, el ensamblaje posicional es extremadamente laborioso y actualmente no es apropiado para llevarse a cabo a escala industrial. El famoso logotipo de IBM es uno de los ejemplos de ensamblaje posicional en donde EiglerSchweizer, mediante STM (microscopio efecto túnel) consiguió desplazar átomos de xenón sobre una superficie de níquel hasta formar el logotipo.
- **Self-assembly o autoensamblaje:** En este método de producción, los átomos o moléculas se colocan por si mismas en nanoestructuras ordenadas mediante interacciones químicas o físicas entre subunidades. Estos fenómenos se han dado en la naturaleza desde hace miles de años (cristales de sal, copos de nieve), sin embargo, a nivel industrial es relativamente novedoso.

Al igual que la formación de las micelas, los copos de nieve siguen siendo fenómenos de autoensamblaje espontáneo. El empleo de esta técnica a nivel industrial, supone una gran revolución puesto que no sería necesaria la intervención de ninguna clase de máquina, abaratando enormemente los costos.

1.4.2 Buckyballs/ Fullerene

La molécula de Carbono 60, denominada buckyball o fullereno (buckminsterfullereno) descubierta en 1985 por Robert F. Curl Jr., Harold W. Kroto y Richard E. Smalley³, tiene

un papel relevante en nanotecnología por múltiples aplicaciones: puede actuar como cápsula flexible y resistente, presenta propiedades superconductoras, ofrece una elevada estabilidad térmica, etc.

Definición de Buckyballs.- Es una nano-estructura compuesta de 60 átomos de carbono (su nombre químico es C₆₀) estructurados en un espacio cerrado y perfectamente simétrico, tienen propiedades extra ordinarias, especialmente como superconductores,³ ver Fig.1.6.

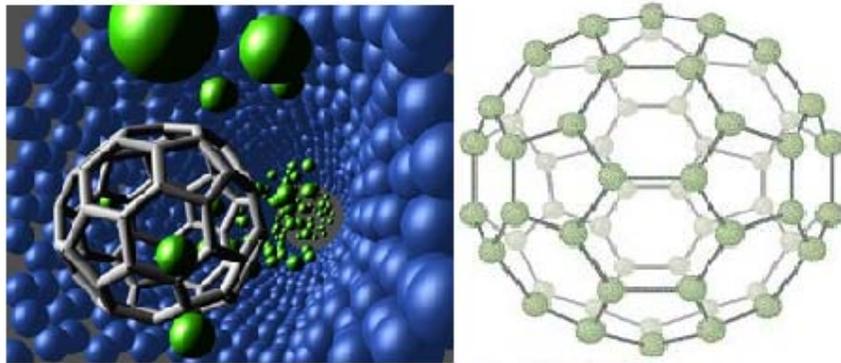


Fig. 1.6.-Estructura del Fullerenos en forma de balón de fútbol.^{1.6}

Es una nueva forma del carbono y tiene una geometría similar a un icosaedro, con la estructura en forma de balón de fútbol. Las buckyballs superconductoras muestran la temperatura crítica más alta que se haya encontrado en compuestos orgánicos y se asocian en la nanotecnología a los "*nanotubos*".

1.4.3 Nanotubos de Carbón

Los **nanotubos** se componen de una o varias láminas de grafito u otro material enrolladas sobre sí mismas. Algunos nanotubos están cerrados por media esfera de fullerene, y otros no están cerrados. Existen nanotubos monocapa (un sólo tubo) y multicapa (varios tubos metidos uno dentro de otro, al estilo de las famosas muñecas rusas)¹². Los nanotubos de una sola pared "single wallnanotubes (SWNTS)" y los nanotubos de múltiples paredes "multiplewallnanotubes(MWNT),³" ver Fig.1.7.

Los nanotubos tienen un diámetro de unos nanómetros ($1\text{nanometro} = 10^{-9}$ metros) y, sin embargo, su longitud puede ser de hasta un milímetro, por lo que dispone de una relación longitud y anchura tremendamente alta.

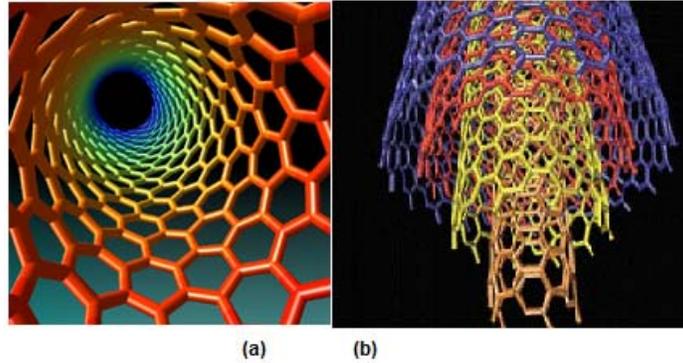


Fig.1.7.-Existen dos tipos principales de nanotubos de carbono (a) Nanotubos de carbono de una sola pared (SWNT), (b) Vista de un nanotubo de múltiple paredes (MWNT).^{1.7}

Los nanotubos de carbono son las fibras más fuertes que se conocen. Un solo nanotubo perfecto es de 10 a 100 veces más fuerte que el acero por peso de unidad y poseen propiedades eléctricas muy interesantes, conduciendo la corriente eléctrica cientos de veces más eficazmente que los tradicionales cables de cobre.

1.4.4 Nanopartículas

Las **nanopartículas** son todas aquellas que tiene una dimensión en el rango de los 1nm a 100 nm, estas unidades son más grandes que los átomos y las moléculas,⁷ ver Fig.1.8.

Estando a nanoescala se observan cambios en las propiedades físicas de las partículas, en particular mediante el aumento de la proporción de la superficie que afecta el volumen y el área, se da la aparición de los efectos cuánticos. El aumento de superficie en el área también resulta útil en las interacciones entre los materiales y nanopartículas, dando lugar a propiedades especiales tales como incremento de la fuerza o aumento de resistencia química o calorífica.

Las nanopartículas están avanzando constantemente en muchos frentes. Es el caso de los biosensores, las nanopartículas con base hierro contra tejidos cancerosos, etc. En general, la biomedicina y la biotecnología son dos campos muy prometedores en la aplicación.

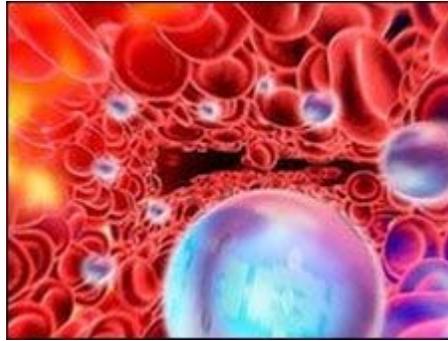


Fig.1.8.-Las nanopartículas se adhieren a la pared de la arteria y liberan medicamento para curar el tejido dañado.^{1.8}

Las nanopartículas exhiben la absorción óptica a unas longitudes de onda muy específicas en función de su tamaño. Este efecto puede ser explotado para fabricar sensores ópticos extremadamente precisos en el rango que va desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, planeándose extender este rango a otras longitudes de onda. Las posibles aplicaciones pueden ser: biocerámicas, optoelectrónica, almacenamiento de gases, reactores catalíticos, baterías, membranas filtradoras entre otros.

1.4.5 Nanocompuestos

Se trata de materiales creados introduciendo, en bajo porcentaje, nanopartículas en un material base llamado matriz. Con el resultado se obtiene materiales con propiedades distintas a las de los materiales constituyentes. Por ejemplo en propiedades mecánicas (como la rigidez y la resistencia), como los nanopolímeros son usados para relleno de grietas en estructuras afectas por sismos.¹²

En los materiales nanocompuestos, abarca una extensa variedad de sistemas tales como uni-dimensional, bi-dimensional, tri-dimensional y materiales amorfos, hechos a partir de distintos componentes y trabajados en escala nanométrica.⁷ Las propiedades de los materiales nanocompuestos dependen no solo de las propiedades de sus patrones individuales sino también de su morfología y de sus características interfaciales.

1.4.6 Nanoestructuras

Una nanoestructura es una estructura con un tamaño intermedio entre las estructuras moleculares y microscópicas (de tamaño micrométrico). Las propiedades fundamentales de los materiales y por consiguiente de los objetos dependen de su conformación a nano

escala, (Ledon Roig, 2006). Generalmente, estas estructuras experimentan efectos cuánticos que no son tan obvios en estructuras de mayor tamaño y tienen por tanto propiedades físicas especiales, ver Fig.1.9.

Como podemos observar la nanociencia se encarga del estudio de las partículas más diminutas de las cuales se tenga conocimiento, llamadas nanoestructuras, y como bien se define, éstas conforman nano-objetos que de acuerdo con su manipulación se transformarán en materiales o productos requeridos por los diferentes sectores del mercado.

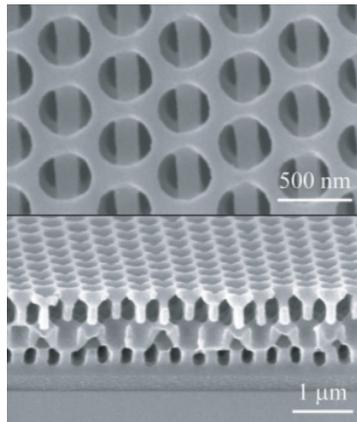


Fig. 1.9.-Nanoestructuras, pueden tener diferente dimensiones a una nanoescala.^{1.9}

Para describir nanoestructuras necesitamos diferenciar entre el número de dimensiones en la nanoescala. Las superficies sin textura tienen en la nanoescala una dimensión, es decir, el grosor de la superficie de un objeto está entre 0.1 y 100 nm. Los nanotubos tienen dos dimensiones en la nanoescala, es decir, el diámetro del tubo está entre 0.1 y 100 nm; su longitud puede ser mucho mayor de 0.1 a 200 nm. Finalmente, las nanopartículas esféricas tienen tres dimensiones en la nanoescala, es decir, la partícula tiene entre 0.1 y 100 nm en cada dimensión espacial.

1.5 Ramas de investigación de la Nanotecnología

En esta tecnología reciente hay tres ramas que fueron propuestas por el químico, LAUREATE RICHARD SMALLEY, las cuales son:⁸

1.5.1 La nanotecnología seca.

Se encarga del diseño de dispositivos mecánicos diminutos pero tradicionales con pequeñas cantidades de átomos. Se centra en la fabricación de estructuras en carbón (Ej: nanotubos), silicio, materiales inorgánicos, metales y semiconductores. Está presente en electrónica, magnetismo y dispositivos ópticos.

1.5.2 La nanotecnología húmeda.

Esta tecnología se basa en sistemas biológicos que existen en un entorno acuoso incluyendo material genético, membranas, enzimas y otros componentes celulares. También se basan en organismos vivientes cuyas formas, funciones y evolución, son gobernados por las interacciones de estructuras de escalas nanométricas.

Las últimas propuestas tienden a usar una combinación de la “nanotecnología húmeda” y la “nanotecnología seca”. Una cadena de ADN se programa para forzar moléculas en áreas muy específicas dejando que uniones covalentes se formen sólo en áreas muy específicas. Las formas resultantes se pueden manipular para permitir el control posicional y la fabricación de nanoestructuras.

1.5.3 La nanotecnología computacional.

Se encarga de modelado y simulación de estructuras complejas de escala nanométrica. Se puede manipular átomos utilizando los nanomanipuladores controlados por computadoras.

1.6 Aplicación de la nanotecnología.

La nanotecnología representa una de las áreas más prometedoras para la innovación industrial, con un importante potencial tanto para el aumento de la competitividad de las empresas tradicionales como para la creación de nuevos productos con una incidencia positiva en nuestras vidas, ver Fig.1.10. En realidad, el término está referido a un amplio campo de la tecnología, más que un algo específico, hecho que hace que la nanotecnología tenga un marcador carácter transversal a la mayor parte de las disciplinas científico-tecnológicas.⁵

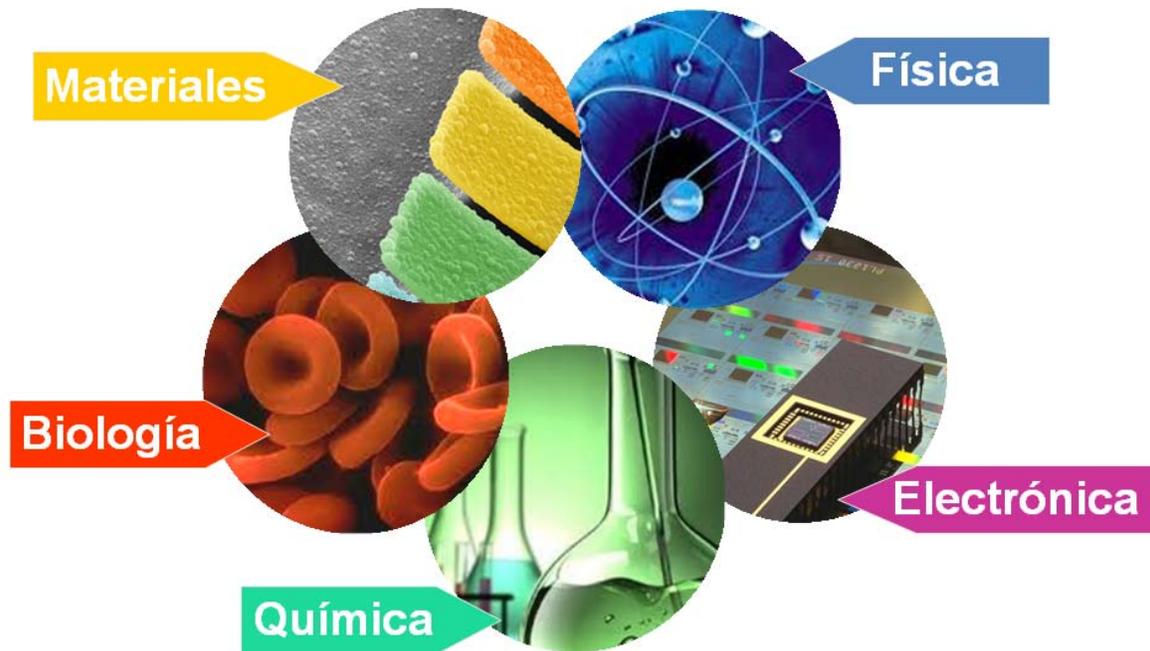


Fig.1.10.- Relación de la nanotecnología con otras áreas.^{1.10}

De este modo, sus avances y desarrollo son previsibles en la mayor parte de los sectores industriales como:

-**Medicina.** Sistemas de diagnóstico a nanoescala, recubrimientos nanotecnológicos que puedan mejorar la compatibilidad de los implantes, sistemas de administración de medicamentos e implantación de nanopartículas al interior de células cancerosas para su tratamiento.

-**Electrónica.** Sistemas de almacenamiento de datos de muy alta densidad de registro (por ejemplo, 1 terabyte/pulgada cuadrada) y las nuevas tecnologías de visualización a base de plásticos flexibles.

-**Energía.** Baterías de combustible nanoestructuradas que tienen el potencial para un almacenamiento eficaz del hidrógeno. Células solares fotovoltaicas eficaces y de bajo costo. Mejoramiento en la conducción y distribución de la energía.

-**Ciencia de los materiales.** Las nanopartículas ya se emplean para reforzar materiales o cosméticos. Se recurre al uso de nanoestructuras superficiales para conseguir superficies resistentes al rayado, hidrófugas, limpiar o esterilizar.

-**Alimentos, agua y medio ambiente.** La nanotecnología ayudará en el desarrollo de instrumentos que se especialicen en la detección y neutralización de microorganismos,

plaguicidas o cualquier otro tipo de elemento peligroso. Se podrá desarrollar mecanismos de limpieza y purificación de agua y aire.

-Energías renovables y no renovables.⁴ Las nanotecnologías tendrán un papel preponderante en el aprovechamiento de la energía solar mediante nanomateriales sustitutos del silicio, que permitirán aprovechar las radiaciones infrarrojas y ultravioletas para generar energía, incluso materiales que permitan la producción directa de vectores energéticos como el hidrógeno a partir de luz del sol mediante sistemas bio-inspirados y su utilización en pilas de combustible. Numerosos nanomateriales han revelado importantes propiedades como nanocatalizadores con un potencial titánico de aplicaciones en temas como la obtención de biocombustibles, el tratamiento de vegetales generadores de gasolinas con altos rendimientos, etc. Para economías basadas en el petróleo el rol de los nanocatalizadores, nanomarcadores en los distintos procesos de perforación, exploración, refinación y petroquímica es colosal.

En el campo de medio ambiente y de las energías renovables están considerados, como unos de los sectores más importantes del futuro. Para garantizar el suministro de energía global a largo plazo, no solamente para desarrollar fuentes de energía existente, si no para minimizar las pérdidas de energía que surgen durante el transporte desde la fuente hasta el usuario final.⁵

1.6.1 Aplicación de la nanotecnología en la actualidad.

Al día de hoy ya se han comercializado diferentes productos desarrollados gracias a las nanotecnologías. La nanotecnología ya no es solo una promesa del futuro. Un informe de la Institute of Nanotechnology (iniciativa británica parecida a la National Nanotechnology Initiative de los Estados Unidos) sobre la Nanotecnología en Europa hace un balance de aplicaciones que utilizan técnicas de la nanotecnología y que ya están disponibles para el consumo o están a punto de lanzarse al mercado donde nos van a ayudar en la vida cotidiana.⁹

Dichas aplicaciones incluyen:

- Nuevos sensores para aplicaciones en la medicina, en el control medioambiental y en la fabricación de productos químicos y farmacéuticos
- Mejores técnicas fotovoltaicas para fuentes de energía renovable
- Materiales más ligeros y más fuertes para la defensa, las industrias aeronáutica y automóvil y aplicaciones médicas⁴

- Envolturas "inteligentes" para el mercado de alimentos, que dan a los productos una apariencia de alimento fresco y de calidad
- Tecnologías visuales que permiten pantallas mejores, más ligeras, finas y flexibles
- Cremas de protección solar con nanopartículas que absorben los rayos UV
- Gafas y lentes con capas totalmente resistentes e imposibles de rayar
- Y aparatos tan diversos y comunes como impresoras, tocadores de CDs, etc., cuya versiones más modernas contienen componentes logrados a través de la nanotecnología.

1.6.2 Beneficios y Riesgos de la nanotecnología.

Es vital, contar con una energía económica y fiable que nos permita el uso de otras tecnologías y que nos ofrece muchas más ventajas. La tecnología de hoy en día está basada en la producción distributiva, algo que necesita de máquinas especializadas, muchos materiales y de una mano de obra cada vez más calificada. Alcanzar el desarrollo de una base tecnológica adecuada en una zona asolada resulta ser un proceso lento y difícil.

1.6.2.1 Beneficios

Con la tecnología se puede resolver varios tipos de problemas que nos van a beneficiar, donde la nanotecnología daría soluciones a los problemas humanos. El uso de la nanotecnología molecular (MNT),⁴ en los procesos de producción y fabricación podría resolver muchos problemas actuales donde se pueden tener algunos beneficios por ejemplo:

- La escasez de agua es un problema serio y creciente. La mayor parte del consumo del agua se utiliza en los sistemas de producción y agricultura, algo que la fabricación de productos mediante la fabricación molecular podría transformar.
- Las enfermedades infecciosas causan problemas en muchas partes del mundo. Productos sencillos como tubos, filtros y redes de mosquitos podrían reducir este problema.
- La información y la comunicación son herramientas útiles, pero en muchos casos ni siquiera existen. Con la nanotecnología, los ordenadores serían extremadamente baratos.
- Muchos sitios todavía carecen de energía eléctrica. Pero la construcción eficiente y barata de estructuras ligeras y fuertes, equipos eléctricos y aparatos para

almacenar la energía permitirían el uso de energía termal solar como fuente primaria y abundante de energía.

- El desgaste medioambiental es un serio problema en todo el mundo. Nuevos productos tecnológicos permitirían que las personas viviesen con un impacto medioambiental mucho menor.
- Muchas zonas del mundo no pueden montar de forma rápida una infraestructura de fabricación a nivel de los países más desarrollados. La fabricación molecular puede ser auto-contenida y limpia: una sola caja o una sola maleta podría contener todo lo necesario para llevar a cabo la revolución industrial a nivel de pueblo.¹⁰
- La nanotecnológica molecular podría fabricar equipos baratos y avanzados para la investigación médica y la sanidad, haciendo mucho mayor la disponibilidad de medicinas más avanzadas.

Muchos problemas sociales se derivan de la pobreza material, los problemas sanitarios y de la ignorancia. La nanotecnología molecular podría contribuir a reducir en grandes medidas a todos estos problemas y al sufrimiento humano asociado con ellos.

1.6.2.2 Riesgos

La nanotecnología a nivel molecular es un avance tan importante que su impacto podría llegar a ser comparable con la Revolución Industrial pero con una diferencia destacable - que en el caso de la nanotecnología el enorme impacto se notará en cuestión de unos pocos años, con el peligro de estar la humanidad desprevenida ante los riesgos que tal impacto conlleva. Algunas consideraciones que se debe de tener en cuenta:¹

- Importantes cambios en la estructura de la sociedad y el sistema político.
- La potencia de la nanotecnología podría ser la causa de una nueva carrera de armamentos entre dos países competidores. La producción de armas y aparatos de espionaje podría tener un coste mucho más bajo que el actual siendo además los productos más pequeños, potentes y numerosos.
- La producción poco costosa y la duplicidad de diseños podría llevar a grandes cambios en la economía.
- La sobre explotación de productos baratos podría causar importantes daños al medio ambiente.
- El intento por parte de la administración de controlar estos y otros riesgos podría llevar a la aprobación de una normativa excesivamente rígida que, a su vez, crease una demanda para un mercado negro que sería tan peligroso como imparable porque sería muy fácil traficar con productos pequeños y muy peligrosos como una nano fábricas.
- Existen numerosos riesgos muy graves de diversa naturaleza a los que no se puede aplicar siempre el mismo tipo de respuesta.

- Las soluciones sencillas no tendrán éxito. Es improbable encontrar la respuesta adecuada a esta situación sin entrar antes en un proceso de planificación meticulosa.

Para poder disfrutar de los enormes beneficios de la nanotecnología a nivel molecular, es imprescindible afrontar y resolver los riesgos.⁴ Para hacer esto, debemos primero comprenderlos, y luego desarrollar planes de acción para prevenirlos. La nanotecnología molecular permitirá realizar la fabricación y prototipos de una gran variedad de productos muy potentes.⁶

Esta capacidad llegará de repente, ya que previsiblemente los últimos pasos necesarios para desarrollar la tecnología serán más fáciles que los pasos iniciales, y muchos habrán sido ya planificados durante el propio proceso.¹² La llegada repentina de la fabricación molecular no nos debe coger desprevenidos, sin el tiempo adecuado para ajustarnos a sus implicaciones. Es imprescindible estar preparados antes.¹⁰



Capítulo 2

La Nanotecnología en la Industria de Yacimiento.

2.1 La Nanotecnología en la Industria del Petróleo.

Durante los próximos 30 años se prevé que la demanda mundial de energía aumentará casi tanto como el 60%, esto representa todo un reto que puede ser satisfecho únicamente por los revolucionarios avances en la ciencia y la tecnología energética. La industria necesita impresionantes descubrimientos fundamentales basados en la ciencia y la ingeniería.²⁰ Los avances en la nanotecnología abren la posibilidad de ir más allá de las actuales alternativas para el suministro de energía mediante la introducción de tecnologías más eficientes y ecológicamente racionales. La nanotecnología se caracteriza por la colaboración entre diversas disciplinas, por lo que es intrínsecamente innovadora y más precisa que otrastechnologías.²¹

Si bien 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. La nanotecnología ofrece un enorme potencial para modernizar la infraestructura, aumentar la recuperación neta de los yacimientos nuevos y existentes, ampliar el área de aplicaciones para aguas profundas, y encontrar soluciones para la producción de hidrocarburos no convencionales. Esta tecnología puede ser la piedra angular de cualquier tecnología futura de energía que ofrece la esperanza de extender la línea de vida de nuestros recursos energéticos actuales, aportando soluciones innovadoras, ver Fig.2.1.



Fig.2.1.-Con la nanotecnología se podrá tener un mejor aprovechamiento en la industria del petróleo.^{2,1}

La investigación en la industria petrolera se ha enfocado al estudio de materiales tanto naturales (rocas) como sintéticos (nanocatalizadores). Ahora es posible estudiar detalladamente fenómenos como la corrosión en instalaciones y la mojabilidad en rocas productoras de hidrocarburos, donde se tendrá un mayor aumento en las oportunidades para desarrollar recursos geotérmicos mediante la mejora de la conductividad térmica, mejorando la separación de fondo del pozo y desarrollar materiales no corrosivos para las instalaciones.²¹

Las reservas se agotan, la exploración y producción del aceite y gas se enfrentan a crecientes desafíos técnicos. El resto de las reservas se encuentran en lugares mas profundos y remotos, exponen a lo equipos de perforación y producción a conducciones hostiles. El gradiente de temperatura geotérmico y el gradiente de presión geoestadístico significan que mas profunda es la perforación trae altas temperaturas y altas presiones. Profundidades muy por encima de 20.000 [ft] están convirtiendo en algo habitual, con sus correspondientes temperaturas de fondo de pozos superior a 400° F y presiones superiores a 20.000 [psi]. Esto es especialmente difícil para los elastómeros y componentes electrónicos.

La nanotecnología tendrá una oportunidad de entrar a la industria petrolera, como los nanomateriales, nanopartículas de polímero, nanopulvos de metal, nanoresina sensitiva a la radiación, donde serán vinculadas con la fabricación de supermateriales y superaleaciones (cero corrosión, cero fricción, cero erosión, propiedades térmicas según

requerimientos, superconducción); recubrimientos para componentes de equipos rotativos (cero fractura, cero impacto, cero fatiga, cero fricción, cero desgaste, cero corrosión), para hacerlos más eficientes; sistemas de sellado no deformables y duraderos para equipos rotativos. Donde compañías están investigando compuestos que involucran sustancias cristalinas, donde contribuyen a las resistencias del desgaste y materiales más duros donde los equipos de perforación pueden ser más duraderos, otro nanomaterial son los nanotubos que se podrán utilizar para crear materiales más ligeros, más fuertes y más resistentes a la corrosión, donde estos se pueden utilizar no solamente para los equipos sino también para las estructuras de plataformas mar adentro. Con la nanotecnología se podrá tener un mejor aprovechamiento de los yacimientos y poder extraer el mayor porcentaje de petróleo del subsuelo.

2.1.1 Nanotecnología en la industria del gas.

La nanotecnología podría revolucionar la industria del gas desde la extracción hasta sus procesos, los retos a corto plazo se centran en el gas natural licuado (GNL), la infraestructuras y la eficiencia, la calidad del gas natural y el desarrollo de tecnología para transformar el gas a líquido (Gas to Liquids GTL), en términos petroleros es el proceso que se utilizan para convertir gas natural a líquidos carburantes, ver Fig.2.2, donde se podrá transportar el gas en barriles.²¹

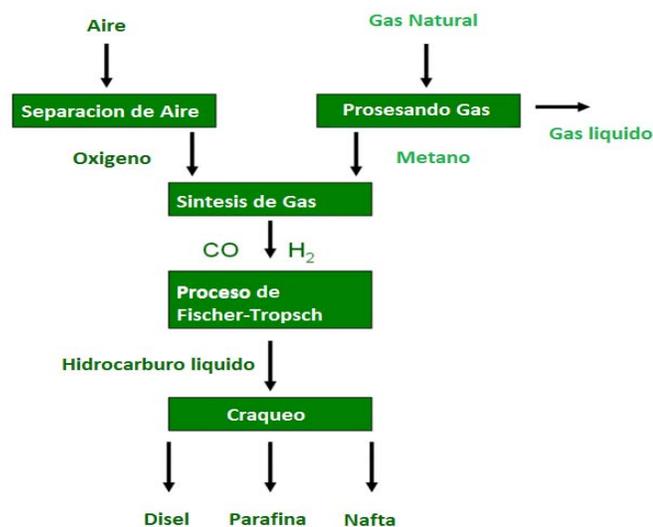


Fig. 2.2.-Diagrama del proceso GTL usando el método de Fischer-Tropsch.^{2.2}

Los desafíos que se tienen para el desarrollo; la construcción de plataformas flotantes para el GLT, producción, regasificación, y los problemas de almacenamiento y transporte comprimiendo el gas natural,¹⁷ ver Fig. 2.3. Es importante destacar que la industria del gas utiliza materiales y procesos especialmente adecuados para la mejora mediante la aplicación de las tecnologías de nanoescala. Diseñar y crear materiales en la nanoescala conduce a menudo a los productos que logran un rendimiento excepcional posiblemente permitiendo a los procesos de fabricación más eficientes y menos costosos.²⁰



Fig.2.3.-Con la nanotecnología se tendrá una mejor infraestructura, mejores centros de licuado de gas con mayor capacidad, sin necesidad de transportar el gas comprimidos a otros países o centros de almacenamiento.^{2,3}

La comercialización de nuevos nanomateriales promete tener un efecto profundo en múltiples industrias en las próximas décadas. Dependiendo de la aplicación, los nanomateriales se incorporan en una amplia variedad de extracción de hidrocarburos, separaciones de gases, sensores de estado sólido de gas para vigilancia de la contaminación del aire, materiales nanos adsorbentes para separaciones ambientales, reducción o inhibiendo contaminantes peligrosos, e inhibidores de corrosión que se utilizan en una amplia gama de mercados de la industria de gas.

La nanotecnología puede resolver los problemas asociados con el acceso a la cadena de gas natural de los recursos mediante el desarrollo de nanocatalizadores y las membranas a escala nanométrica para la producción de GLT y de nanoestructuras para comprimir el gas natural y el transporte adecuado para largas distancias.²⁰

Un material que puede beneficiar a la industria del gas, sería las nanomembranas, donde se inspiraron por el éxito de las zeolitas, que son materiales capaces de separar los gases pequeños, tales como oxígeno y nitrógeno, una nueva generación de escala, ligero y resistente nanomembranas están siendo desarrollado e implementando,¹⁶ ver Fig.2.4. Estas nanomembranas mejoran significativamente la explotación de gas ajustadas a métodos eficientes para eliminar impurezas, separar los flujos de gas y permitir la producción de GTL. Mediante la explotación de los métodos comunes en la industria de la microelectrónica, el costo de fabricación de membranas altamente uniformes y reproducibles es muy competitivo. Materiales nanoporosos y nanopartículas son también muy prometedoros para gestionar los riesgos ambientales, de salud y seguridad que se derivan de la presencia de CO_2 y H_2S en mezclas de hidrocarburos.²¹

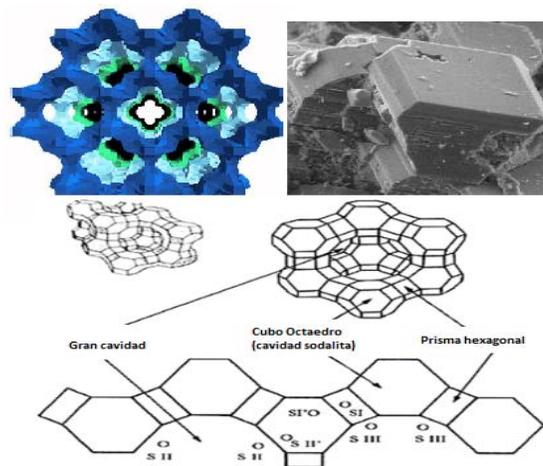


Fig.2.4.-La estructura de las zeolitas y con la nanotecnología beneficiaría a la industria del petróleo eliminando las impurezas del gas.^{2.4}

2.1.2 La Nanotecnología en la Industria del Aceite.

Los combustibles fósiles seguirán siendo la principal fuente de energía por lo menos unos 30 años más, por lo que la industria petrolera necesita materiales fuertes y estables en prácticamente todos sus procesos. Mediante la consolidación de dichas sustancias en una escala nanométrica, podría producir un equipo que es más ligero, más resistente y más fuerte, ver Fig.2.5. Por ejemplo la compañía, GPNano (Technology Group Limited), fue uno

de los primeros en desarrollar el carburo de silicio, un polvo de cerámica, de tamaño nano, donde produce un material duro. La compañía está investigando otros compuestos, y cree que las sustancias nanocristalinas pueden contribuir a la más dura, más resistente al desgaste y el equipo de perforación más duraderos.²¹



Fig.2.5.-Con el avance de la nanotecnología se tendrá un aumento en la producción de petróleo.^{2.5}

Los nanotubos tienen muchas aplicaciones potenciales en la industria petrolera. Por ejemplo, los nanotubos se podrían utilizar para crear materiales para las estructuras de plataformas de perforación mar adentro que sean más ligeras, más fuertes y más resistentes a la corrosión.³ La nanotecnología podrá ayudar a mejorar la producción de aceite y gas, por lo que será más fácil separar el aceite y gas en los depósitos, por ejemplo a través de una mejor comprensión de los procesos a nivel molecular. Hay muchas otras fuentes potenciales de energía limpia que se podrían mejorar mediante el uso de la nanotecnología.

Se abre una perspectiva interesante para la recuperación mejorada del petróleo, gracias a una mejor comprensión de los procesos en la interfase entre líquidos y sólidos. El objetivo es comprender cómo el petróleo y el agua se puede separar más eficazmente. La nanotecnología podría ser aplicada a la recuperación mejorada en forma de surfactantes o agentes activos.²¹ Estos pueden ser añadidos al yacimiento de una manera más controlada que con las sustancias existentes, liberando así más petróleo. También podría ayudar a desarrollar nuevas técnicas de medición con sensores pequeños para proporcionar una mejor información sobre el yacimiento.

La Nanotecnología en la industria del petróleo presenta ventajas sensibles, donde nos permite el mejoramiento de materiales, herramientas y dispositivos que no se pueden realizar con tecnologías convencionales, debido a que tienen combinaciones únicas de propiedades mecánicas, térmicas, electrónicas, ópticas y magnéticas observadas a esas

escalas. Por ejemplo los nanodispositivos tienen el potencial de mejorar sustancialmente la caracterización e imagen de los yacimientos, ver Fig.2.6. También se tendrá una mejora resolución sísmica, también se podrá para caracterizas la complejidad natural de la interacciones roca-fluido, identificación de aceite y gas atrapado, y mediciones de presión y temperatura en medios hostiles.

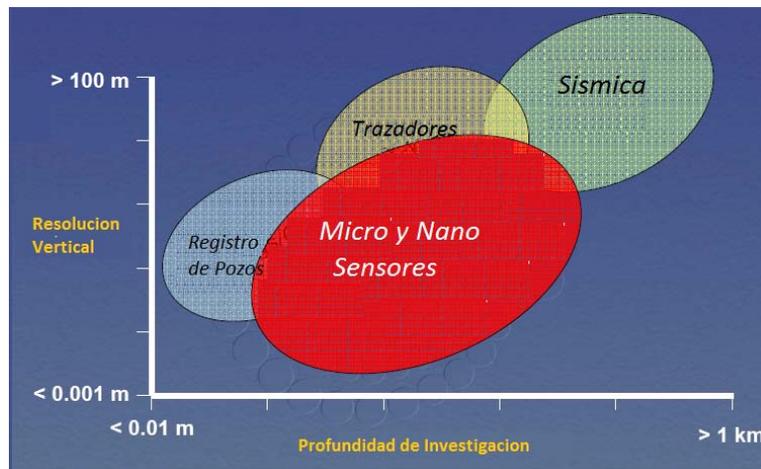


Fig.2.6.-Los nanodispositivos, tienen el potencial para poder tener una mejor caracterización del yacimiento.^{2,6}

2.2 Nanotecnología en la Ingeniería de Yacimientos.

Si bien las nanotecnologías están siendo cada vez más utilizadas en otras industrias, la industria del aceite y el gas recién transita las primeras etapas de exploración de este nuevo campo. La principal dificultad que implica la aplicación de los éxitos experimentados por otras industrias es el ambiente operativo hostil del fondo del pozo, que incluye condiciones de alta temperatura y alta presión, y a menudo una diversidad de fluidos corrosivos.²¹

Por consiguiente, no solo la industria de Exploración y Producción debe considerar como aprovechar la nanotecnología para resolver los problemas asociados con los campos petroleros, sino que además las actividades de investigación deben contemplar el desarrollo de nanoestructuras capaces de sobrevivir a las regiones (duras o severidad excesiva),¹³ y que imponen estas condiciones tan complejas. No obstante, la industria ha logrado ciertos avances en diversas áreas de la exploración, que son beneficiadas con la nanotecnología como se puede ver a continuación, ver Fig.2.7.

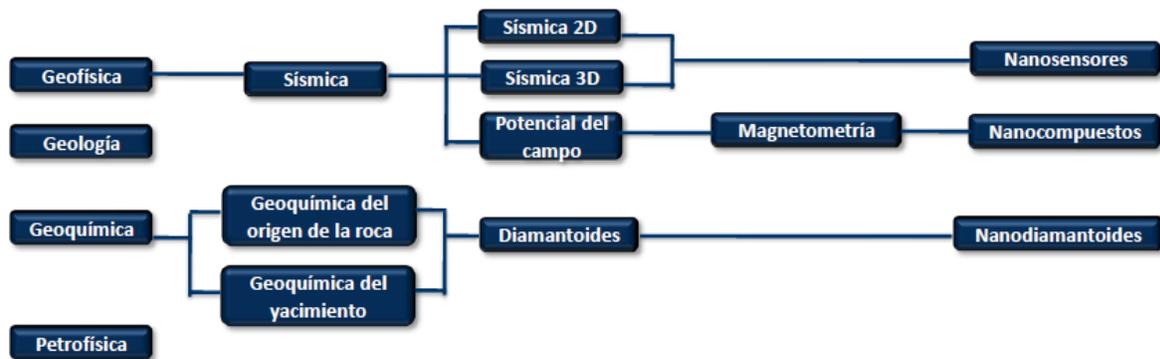


Fig.2.7.-En el diagrama se puede ver que en la exploración de los yacimientos se tiene un gran avances con nuevas tecnología.^{2,7}

La caracterización de yacimientos requiere un software de modelado y una avanzada simulación para pronosticar cómo se comportarán los fluidos del yacimiento y las rocas durante la fase de producción. La disponibilidad de datos físicos precisos es esencial para reducir la incertidumbre asociada con estas predicciones. Diversas fuentes, incluidos estudios geológicos, levantamientos sísmicos, registros y pruebas de pozos, y datos de producción, proporcionan datos de entrada para generar un panorama preciso del yacimiento.¹³ Pero las herramientas de adquisición de registros de alta resolución pueden recolectar datos solamente en las proximidades del pozo, y los levantamientos sísmicos, si bien cubren áreas extensas, poseen un grado de resolución comparativamente bajo, ver Fig.2.8.

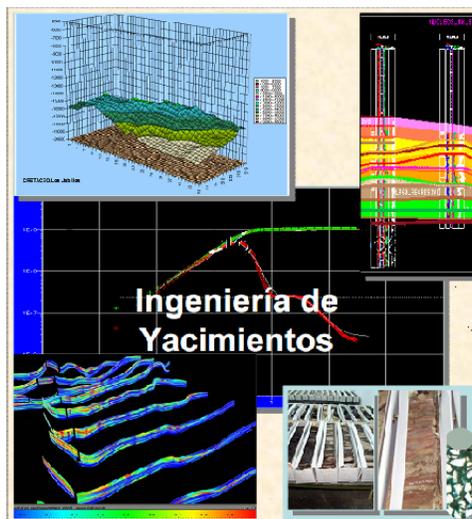


Fig.2.8.-Para poder tener una buena caracterización se debe de tener una buena información para poder crear nuestro modelo y poder saber cómo explotar el yacimiento, donde con esta nueva tecnología se podrá tener una mejor información y maximizar el valor económico del yacimientos.^{2,8}

No obstante, si fuera posible conocer las propiedades físicas y químicas del yacimiento y sus fluidos, al mismo tiempo que se mantienen los niveles de resolución de los datos más cercanos a los de los registros, los operadores podrían hallar formas de mejorar considerablemente la eficiencia de la recuperación. A estos efectos, los investigadores están investigando el empleo de nanopartículas que puedan ser inyectadas en un yacimiento para asistir en su caracterización. 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. Se están desarrollando dos tipos de aplicaciones para explotar este potencial: los nanosensores y las nanopartículas que acentúan los contrastes.²⁶

Inyectados en los yacimientos, los sensores explorarán físicamente los fluidos y las rocas yacimiento a medida que son transportados por el flujo de fluido. Los datos serán recuperados mediante la ejecución de un análisis directo de los nanosensores recuperados con los fluidos de producción, o en forma más ambiciosa, mediante la comunicación inalámbrica con los sensores en sitio. Por otro lado, las nanopartículas que acentúan los contrastes no poseen capacidades de recolección de datos, ver Fig.2.9. Pero se utilizarán para mejorar los métodos tradicionales de adquisición de datos, tales como la generación de imágenes mediante resonancia magnética nuclear (NMR) o los levantamientos electromagnéticos con fuentes controladas (CSEM),²⁶ de un modo similar al que los agentes de contraste mejoran la generación de imágenes médicas.

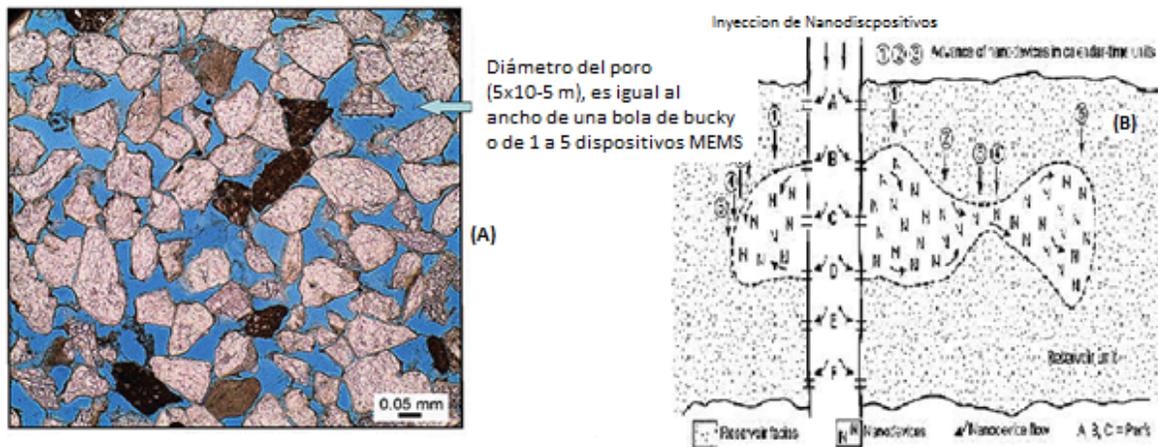


Fig.2.9.-En la figura (A) se hace una comparación de tamaño de poro con nanodispositivos, en la figura (B) un concepto de aplicación de nanodispositivos en la caracterización de yacimientos, nanoagentes inyectados recolectan información para poder explotar mejor el yacimiento.^{2.9}

Las nanopartículas con alteraciones notables en las propiedades ópticas, magnéticas y eléctricas en comparación con sus contrapartes a granel, son excelentes herramientas

para el desarrollo de sensores y la formación de agentes de contraste de imagen. 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. Además la nanotecnología tiene el potencial de contribuir al desarrollo de los recursos geotérmicos mediante la mejora de la conducción térmica.

2.3 Beneficios de la nanotecnología en la industria del petróleo

Si bien la nanotecnología está siendo cada vez más utilizada en otras industrias, la industria del petróleo y el gas recién transita las primeras etapas de exploración de este nuevo campo. La principal dificultad que implica la aplicación de los éxitos experimentados por otras industrias es el ambiente operativo hostil del fondo del pozo, que incluye condiciones de alta temperatura y alta presión, y a menudo una diversidad de fluidos corrosivos. Por consiguiente, no solo la industria de Exploración y Producción, debe considerar como aprovechar la nanotecnología para resolver los problemas asociados con los campos petroleros, sino que además las actividades de investigación deben contemplar el desarrollo de nanoestructuras capaces de sobrevivir a los rigores que imponen estas condiciones tan complejas. No obstante, la industria ha logrado ciertos avances en diversas áreas.¹⁵



Fig. 2.10.-Empresas que forman el ADVANCED ENERGY CONSORTIUM.^{2.10}

En 2008, con el propósito de explorar el potencial de la nanotecnología, The ADVANCED ENERGY CONSORTIUM (AEC)¹⁴ se constituyó en los EE.UU., en cooperación con la mayoría de las grandes compañías petroleras y de servicios, como BP, ConocoPhillips, Shell, Total, OXY, BR, Marathon, BH y Schlumberger, ver Fig.2.10 y con la colaboración de algunas distinguidas Universidades del mundo,¹⁵ ver Fig.2.11. Este consorcio, con un presupuesto anual de varios miles de millones de dólares, fue el encargado de la explotación de las nanotecnologías para mejorar la producción de aceite y gas. La misión del AEC es impulsar la investigación precompetitiva en micro y nanotecnología, con un énfasis inicial en los sensores y materiales que puedan evolucionar la industrial del petróleo y gas.¹⁵



Fig. 2.11.-Universidades que colaboran a la investigación.^{2.11}

2.3.1 Nanopartículas

Las nanopartículas tienen propiedades potenciales útiles para los procesos de recuperación, evaluación y el control de la formación, donde se sabe que las nanopartículas son unidades más grandes que los átomos y las moléculas que van de diámetros de 1 a 100 [nm], poseen propiedades físicas especiales y se pueden manipular de diversas maneras.¹⁴ Son de gran interés científico, ya que efectivamente reduce el volumen de la materia y de las estructuras atómicas o moleculares. Cuando el tamaño de las partículas se aproxima o es menor que la longitud de las ondas de un electrón, las

condiciones periódicas resultan dañarse, la presión interna, la resistencia térmica, el punto de actividad química sufren grandes cambios. El efecto de superficie es el cambio de las propiedades de las nanopartículas que se producen cuando el número de átomos de la superficie aumenta a medida que el tamaño de las partículas disminuye.¹⁴

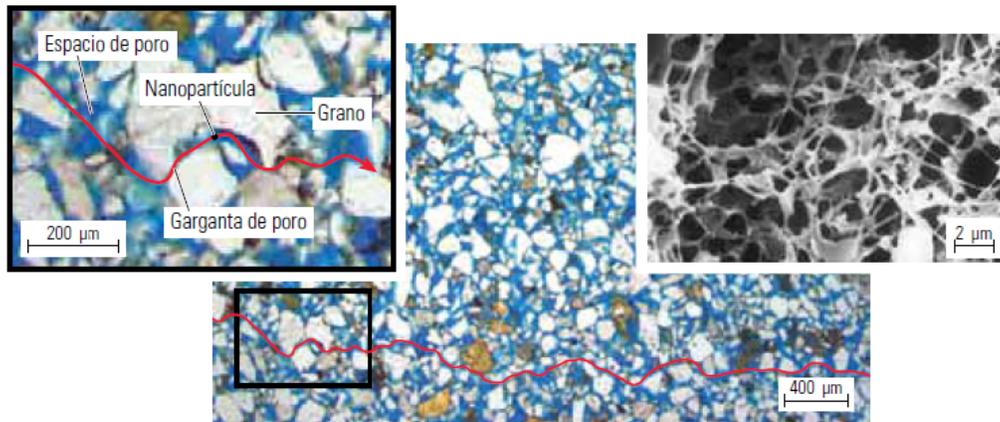


Fig.2.12.-Con la nanotecnología se podrá tener una mejor exploración del yacimiento.^{2,12}

Por modificación química, las nanopartículas preferentemente se segregan en regiones diferentes de los fluidos de los poros, permitiendo una mejor dimensionamiento y caracterización del yacimiento y aplicación de los métodos de barrido empleadas para mejorar la recuperación de petróleo mediante la supervisión del flujo de fluidos y por la monitorización en tiempo real del yacimiento,¹⁴ ver Fig.2.12. Para tener éxito con la nanotecnología en un yacimiento, es preciso que los agentes de contrastes o los nanosensores atraviesen (líneas rojas) una formación sin flocular, obturar los poros, o dañar la permeabilidad del yacimiento. Una visualización 3D más compleja de los poros y las gargantas se observa en la imagen del extremo superior derecho y se podrá implementar una buena explotación del yacimiento. El uso de nanopartículas (en oposición a los análogos de macroescala) para formación de imágenes es crucial debido al tamaño de los poros, la mayor área superficial de las nanopartículas, y la movilidad asociada con ellos. El aumento de la sensibilidad de las sondas y la fuerza de las firmas ópticas y espectroscópicas de las nanopartículas requieren sólo pequeñas cantidades de nanopartículas, lo que podría conducir al desarrollo de la instrumentación y los métodos para la evaluación de pequeños agujeros de prueba que reduzcan al mínimo la marca de una perforación y reducir los costos de perforación de pozos exploratorios.²¹ También se les pueden encontrar como agentes de contrastes, que son ocupados en la

medicina. Por ejemplo se inyecta en un paciente a nanopartículas para obtener una buena resolución de los rayos x o imágenes de resonancia magnética. De un modo similar, los especialistas pronostican que las mediciones de la región vecinal al pozo, tales como las mediciones derivadas de los registros de resonancia magnética nuclear, susceptibilidad magnética, acústica y de resistividad, puede ser mejoradas, utilizando nanopartículas preparadas especialmente para este trabajo, donde respondería como son fluidos del yacimiento en situ o la roca del yacimiento y se podrá explotar mejor el yacimiento, donde estas partículas se utilizaría con una técnica de inundación del yacimiento similar a las de las operaciones de campo petroleros de nuestros días.²²

2.3.2 Nanosensores

Los nanomateriales son excelentes herramientas para el desarrollo de sensores y agentes de contraste de imagen, debido a las alteraciones significativas en sus propiedades ópticas, magnéticas y eléctricas (en comparación con sus análogas granel), junto con su capacidad para formar (eléctricamente y/o geométricamente) estructuras percoladas en fracciones de bajo volumen, nanomateriales fabricar herramientas excelentes para el desarrollo de sensores y la formación de agentes de contraste de imagen.¹⁴ Tales nanomateriales, cuando se combina con fluidos inteligentes, se puede utilizar para desarrollar sensores de alta resolución y sensores extremadamente sensibles para la medición de temperatura, presión, y de fondo de pozo bajo condiciones extremas,¹⁶ ver Fig.2.13.



Fig.2.13.-Sensores que se podrán colocar en herramientas para poder tener una buena resolución de imagen del yacimiento.^{2,13}

Estos nuevos sensores son de tamaño pequeño, trabajar con seguridad en la presencia de campos electromagnéticos, son capaces de trabajar en altas temperaturas y presiones, y se puede cambiar sin interferir en el proceso de exploración de petróleo.¹⁶ La última evolución de los dispositivos para la prospección está representada por nanorobots, que en

realidad debería proporcionar una asignación eficaz del depósito. Hoy en día, nanorobots siguen siendo un sueño, compartido por los sectores médicos y el petróleo. Pero los avances en la miniaturización de nanosensores están ocurriendo rápidamente y numerosas investigaciones teóricas y experimentales sobre el flujo de fluidos multifásicos contienen nanopartículas en medios porosos enriquecer la literatura técnica reciente. De manera similar, cuando se combina de manera significativa para mejorar sondas magnéticas y espectroscópicas, en la presencia de las nanopartículas se tienen un problema considerable como marcadores para tener una buena formación de imágenes.

2.3.3 Nanomateriales.

Un material inteligente se define como aquel que responde ante un estímulo exterior cambiando sus propiedades o incluso su forma, algunos de estos materiales se están reflejando en los recubrimientos que se aplican para proteger las estructuras y equipos, contra la corrosión a veces no son suficientes para la protección, porque hay muchos agentes agresivos que pueden hacer acortar el rendimiento de los materiales.¹⁶

Recubrimientos.-Es un material que se están empleando para los recubrimientos de polímeros inteligentes/multifuncional. Estos pueden ser recubrimientos inteligentes o Smart, que se combinan en la protección con funciones de sensores, donde se confían con las capacidades para responder a los estímulos físicos, químicos o mecánicos mediante el desarrollo de las señales de las lecturas mecánicas.¹⁹ Este tipo de nanomateriales se esperan que se use no solo como material funcional avanzado, sino también como una parte integral de las estructuras completas inteligentes compuestas de varios elementos, incluyendo sensores, actuadores dispositivos de control, etc.

Algunos de los principales desafíos en las áreas más avanzadas de investigación son la comprensión del mecanismo de protección contra la corrosión impartida por los polímeros conductores y el avance del micronanoencapsulación como un medio para impartir auto curación en el material. Sin embargo, algunas aplicaciones innovadoras parecen estar listas para su comercialización en un futuro muy cercano, tal como un revestimiento usando nanotubos de carbono para conducir una corriente para calentar uniformemente la superficie, que podría ser utilizado en tuberías para reducir la formación de hidrato de gas para eliminar el hielo de las cuchillas de las turbinas de viento.

Un innovador resistente a la corrosión solución de material también podría ser representado por nanométricas películas delgadas y materiales compuestos

nanoestructurados con rellenos,¹⁹ ver Fig.2.14, donde es un revestimiento donde se le aplica al tubo de acero mediante electrostáticamente, la resina se aplica a una temperatura de hasta 230°F y luego se endurece termoplásticamente, para lograr una protección adicional, se puede aplicar una segunda capa.

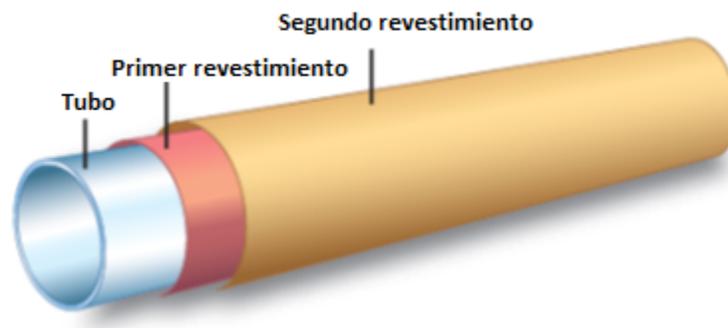


Fig. 2.14.-Revestimientos de resina epoxica adherida por fusión para la protección contra la corrosión y el daño mecánico.^{2.14}

Aparte del aspecto económico, que no es muy favorable, sin embargo, los materiales resistentes a la corrosión son sin duda algo muy importante en la industria petrolera, básicamente debido a la combinación de varias condiciones: el riesgo es relativamente bajo, la eficacia es alta y se tiene una baja complejidad donde se tendrá un aumento de vida útil de la tubería y estructuras, induciendo así un ahorro de costos notables. Lo mismo se aplica a los inhibidores de la corrosión de nano-capas en las tuberías o tanques, que actúan a través de la creación de una capa permanente molecular en la superficie de los metales, lo que elimina o dificulta la corrosión inducida por ácido clorhídrico (HCl) o ácido sulfhídrico (H_2S), además de ofrecer soluciones para mejorar nuestro medio ambiente:

- No contaminan.
- Brindan protección y mayor durabilidad de los materiales, evitando su descomposición temprana, su oxidación adelantada y su daño molecular por microorganismos dañinos vivos como microbios, bacterias y virus.

Nanocables.- Son materiales que se están fabricando con los nanotubos de carbono y los buckyballs, que están avanzando hacia la conductividad eléctrica vista en cables de metal, donde esto puede encender el interés no solamente a la industria petrolera si no en diversas industrias. Baker Hughes ha elaborado cables de alimentación hechos de

nanotubos de carbono de doble pared dopado de yodo son tan eficientes como los cables de alimentación tradicional, teniendo una sexta parte del peso de cobre y plata, donde se podrán encontrar un amplio uso en aplicaciones donde el peso es un factor crítico,¹⁸ ver Fig.2.15, donde la imagen se pueden observar que los cables llevan la misma cantidad de energía. Los dos, de la izquierda a derecha, están hechos de aluminio y cobre. A la derecha, el nanocable más grueso, lo que pesa una sexta parte que los otros cables tradicionales, cuando más delgado sea una representación el potencial son mayores y se tendrá un menor peso. Con los nuevos descubrimientos de nuevas estructuras de carbono, tales como las buckyballs y los nanotubos de carbono,³ han abierto la puerta a los materiales que son más ligeros, más fuertes y conducen la electricidad mejor que cualquier cosa disponible, se tienen los Nanocables.

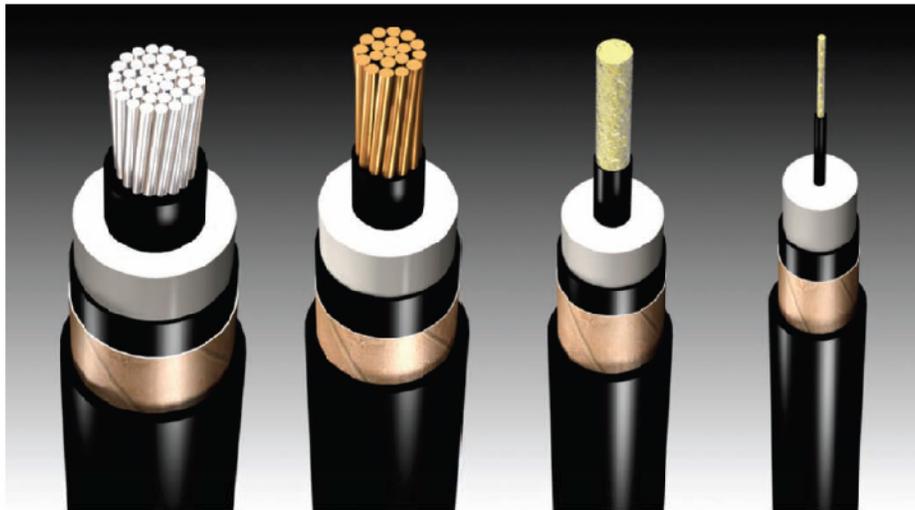


Fig.2.15. -Nanocables de Baker Hughes.^{2.15}

Los nanocables, por ser tan estrechos, limitan el flujo de los electrones mucho más de lo que lo hacen los cables convencionales, hasta el punto de que la corriente eléctrica circula de un modo distinto a como lo haría en un cable de grosor cotidiano. Esta característica de la nanoelectrónica, a su vez, magnifica un efecto que en la microelectrónica es tan débil que resulta irrelevante. Descrito de manera sencilla, este efecto, cuando opera a distancias nanométricas, hace que los electrones en un cable puedan "sentir" a los electrones individuales que se mueven en otro lugar cercano, y eso lleva a las citadas alteraciones de voltaje, donde su estructura hace que el recorrido de los electrones no se vea afectado y por lo tanto sufre menos pérdidas de energía resultando una mayor eficiencia.¹⁸

4.4 Ejemplo de la nanotecnología.

Un ejemplo sin precedentes de nanotecnología aplicada a los campos petroleros proviene de Medio Oriente, en el año 2007, la empresa SaudiAramco²² puso en marcha un proyecto de investigación a largo plazo, que pudo utilizarse en los yacimientos carbonatados de Arabia. En una etapa inicial del proyecto se determinó cuán pequeñas necesitaban ser las nanopartículas para atravesar las gargantas de poros; es decir, los canales de fluidos permeables más pequeños presentes en las rocas yacimiento. Se efectuaron pruebas de inyección de mercurio a alta presión en aproximadamente 850 núcleos pequeños de diferentes áreas del campo Ghawar.²² El análisis resultante indicó la existencia de gargantas de poros de tan solo $0.5 \mu\text{m}$ de diámetro. En base a estudios previos sobre fenómenos de transporte, los científicos dedujeron que un límite de tamaño seguro para las nanopartículas equivalía a una quinta o séptima parte del límite de las gargantas de poros, o un valor oscilante entre 70 y 100 [nm]. Con estas restricciones, los científicos investigaron diversos métodos de funcionalización de las nanopartículas para abordar la compatibilidad con las condiciones rigurosas del yacimiento,²⁴ ver Fig.2.16, donde se observa que después de la inyección de nanopartículas con funcionalización inadecuada, grandes cantidades de nanopartículas quedaron en la superficie de los granos de roca (izquierda). Este hecho indudablemente reduciría la permeabilidad del yacimiento; por consiguiente, los científicos buscaron formas de modificar la química de la superficie de las nanopartículas. Después de que los científicos inyectaron nanopartículas bien funcionalizadas, los granos de rocas quedaron limpios (derecha).

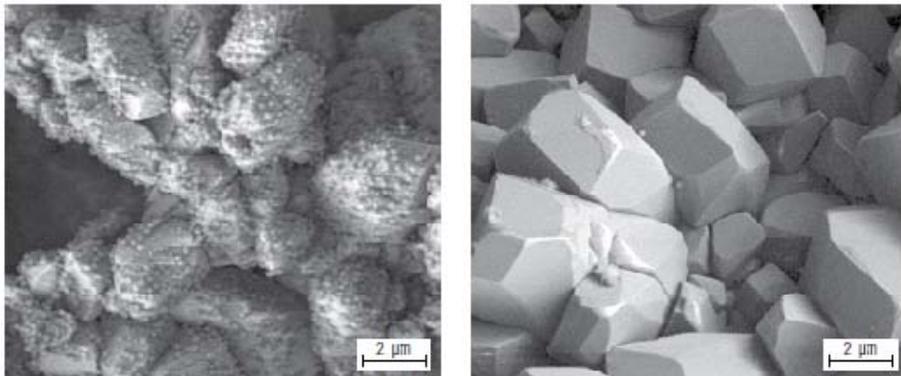


Fig.2.16.- Después de inyectar partículas donde los granos de la roca quedaron limpios.^{2.16}

Recientemente, el proyecto logro un hito importante en la inyección y producción de nanopartículas en un yacimiento activo. En el primer semestre de 2010, los científicos dispersaron nano partículas de 10 nm en 250 bbl de agua de inyección. La solución nanoenriquecida, de 100 partes por millón (ppm), fue bombeada luego en la formación Arab-D del campo Ghawar. A continuación, se inyecto salmuera para transportar la mezcla a lo largo de una distancia estimada de 15 a 20 ft lejos del pozo. Luego, se cerró el pozo de inyección durante tres días antes de explotar el yacimiento.²³ Los ingenieros realizaron un muestreo extensivo de los fluidos de producción durante dos días a fin de determinar la presencia de nanopartículas mediante la técnica de espectroscopia de fluorescencia, ver Fig.2.17.

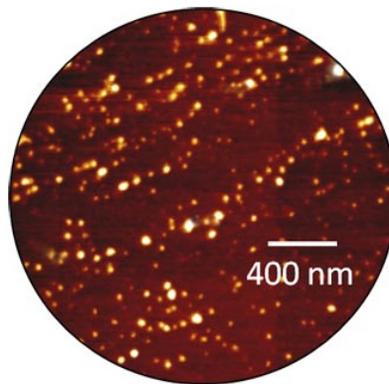


Fig. 2.17.-La imagen tomada con un microscopio de fuerza atómica de las nanopartículas, utilizadas en la prueba de campo.^{2.17}

A través de la comparación de las concentraciones de nanopartículas presentes en las muestras de agua producida y en el agua a inyectar, los investigadores de SaudiAramco confirmaron un factor de recuperación alto de aproximadamente 86%, lo que demostró la capacidad de las nanopartículas para mantenerse coloidalmente estables en condiciones de alta temperatura y alta salinidad.²⁴ La alta recuperación indico además que las nanopartículas lograron atravesar las gargantas de poros sin ninguna afinidad con la formación carbonatada. Las pruebas aceleradas de laboratorio y las mediciones de presión de boca de pozo, obtenidas durante la prueba de pozo, no mostraron signos de reducción de las tasas de flujo de fluido ni de la permeabilidad del yacimiento.

Instituciones académicas están procurando hacer proyectos similares, donde investigan el transporte de los nanosensores a través de los yacimientos. Entre las diversas aplicaciones potenciales se encuentra la detección del petróleo residual y de otras propiedades del yacimiento, tales como acidez, salinidad, presión y concentraciones de dióxido de carbono [CO_2] y acido sulfhídrico [H_2S]. Si bien son aun incipientes, muchos proyectos ya han registrado avances.²⁵

Capítulo 3

La Nanotecnología Aplicada a la Ingeniería de Perforación

3.1 Ingeniería de Perforación

A medida que las reservas se agotan, la industria de la Exploración y Producción se enfrenta cada vez a problemas técnicos debido a los cambios en la profundidad de trabajo, la naturaleza del subsuelo, la longitud de salida horizontal para maximizar la producción, la complejidad de las operaciones de perforación y el diseño de los pozos laterales de un motherbore para maximizar el contacto con el yacimiento, como Campos autónomos inteligentes, con auto ejecución, para simular, pronosticar producción y definir escenarios de producción con información en tiempo real de fondo y superficie, identificando comportamiento anómalo de presión y producción por pozo y permitiendo el cierre de válvulas en superficie, ver Fig.3.1. Estos aspectos se conducen con el aumento de los costos y limitan la operación de perforación y las tecnologías de producción.⁴¹ La industria también se enfrenta a una serie de materiales relacionados con los desafíos debido a los cambios significativos en las condiciones físicas, químicas y térmicas en las zonas más profundos, junto con las regularidades ambientales cada vez más estrictas.

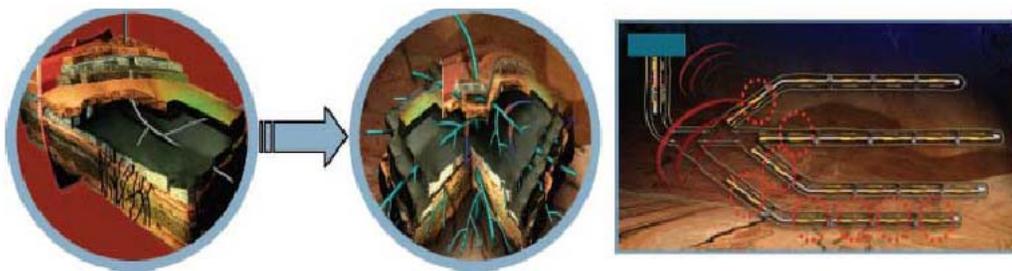


Fig.3.1.-Campos autónomos inteligentes.^{3.1}

Hoy en día, la industria del aceite y gas esta buscando fuentes mecánicas, físicamente pequeñas, química y térmicamente estables, biológicamente degradables,

productos químicos que no afecten el medio ambiente, polímeros o productos naturales para el diseño de fluidos inteligentes para su uso en la perforación y la producción. Como se ha pronosticado la producción futura es alrededor del 40-50% de la recuperación de hidrocarburos serán costa afuera.²⁶

Hay numerosos riesgos de perforación en la Exploración y Producción en aguas profundas, reservas que no se encuentran a condiciones como en tierra firme o en aguas someras. Debido a las condiciones de operación, tales como la profundidad o un cambio de un pozo horizontal a pozo vertical, la perforación convencional y fluidos de estimulación funcionan mal.⁴¹ Perforación convencional con macro o micromateriales basados en normas, una perforación in-situ, los fluidos de terminación y la estimulación son solo una concentración y el efecto del tamaño de los materiales junto con la restricción de la capacidad funcional de la macro y micro partículas.³⁹ Además, la industria de la perforación debe hacer mejoras en; materiales ligeros y resistentes, tales como la reducción de peso de las plataformas costa afuera, la eficiencia energética para buques de transporte, y un mejor rendimiento de piezas de perforación.

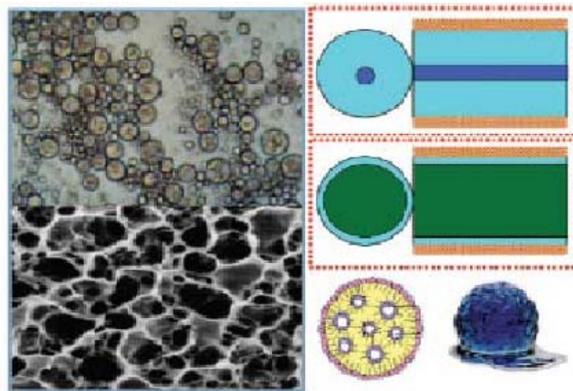


Fig.3.2.- Fluidos inteligentes automáticamente modifican el comportamiento del yacimiento. Con tales fluidos se hidratan en presencia de agua (arriba a la izquierda) y se deshidratan con aceite (abajo a la izquierda).^{3.2}

Estos retos representan una oportunidad en el mercado para las soluciones basadas en nanomateriales, que pueden lidiar con las impurezas corrosivas, altas temperaturas y presiones, cargas de choques y otras condiciones ambientales hostiles. El equipo de perforación y plataforma pueden ser hechos o recubiertos con nanomateriales para mejorar la resistencia a la corrosión, la resistencia al desgaste, resistencia a los golpes y la conductividad térmica. Estas capacidades que mejorará enormemente a las empresas para producir en condiciones más extremas.⁴¹ Las nanopartículas, especialmente los nanosílice, han sido ampliamente utilizados para aumentar la resistencia a la compresión y

a la flexión de los cementos Portland y belita. Los nanomateriales se consideran los materiales más prometedores para el futuro “fluidos inteligentes” de diseño para aplicaciones de campo de la industria del aceite y gas,³⁹ ver Fig.3.1.

La nanotecnología ha abierto la puerta al desarrollo de una nueva generación de fluidos definida como “fluidos inteligentes” para la aplicación de perforación, producción y relacionados con la estimulación. Tales fluidos inteligentes mejoraran aun más la perforación mediante la adición de beneficios tales como la alteración de la mojabilidad reducción de la resistencia avanzada y terminación de pozos con empaque de grava. Con fluidos avanzados y con la mezcla con partículas nanométricas y polvos superfino, se tendrá un mejoramiento significativo en la velocidad de perforación. Tales nanofluidos podrán eliminar el daño de la formación, por lo que será posible extraer más hidrocarburos.³⁹

3.2 Aportación a la Ingeniería de Perforación.

Los yacimientos de hidrocarburos de fácil acceso están disminuyendo rápidamente y la recuperación de aceite y gas también disminuye rápidamente, la industria del aceite y gas están en busca de nuevas reservas de aceite y gas en todos los rincones de la tierra. El océano ocupa tres cuartas partes de la tierra, donde se tiene altas probabilidades de descubrir hidrocarburos, además de otros valiosos recursos marinos, se ha incrementado las actividades en aguas profundas con un aspecto importante en la perforación, las reservas de hidrocarburo han disminuido tanto en tierra como en aguas someras y se tienen altas perspectiva en yacimientos en aguas profundas, la cual es la fuerza impulsora más importante para cambios de enfoque en la industria de perforación.²⁶ Donde se sabe que más del 20% de las reservas probadas a nivel mundial se encuentran en aguas profundas.

Sin embargo, la exploración y explotación de los recursos de hidrocarburos en agua se tiene, un conjunto de riesgos en la perforación en aguas profundas que no se encuentran normalmente en las operaciones de perforación en tierra y aguas someras. Por otra parte, debido a las operaciones de perforación de cambio vertical a horizontal, perforaciones de alcance extendido, más tarde la perforación multilateral. Por lo tanto, las formulaciones de fluidos inteligentes que son capaces de superar estos problemas es probable que mejore las herramientas para resolver estos problemas relacionados a la perforación. Debido a las únicas características de los nanos en comparación con los materiales

originales y su fácil manipulación de realizar ciertas tareas, los nanomateriales son considerados como uno de los mejores candidatos para la formulación de fluidos inteligentes.⁴¹

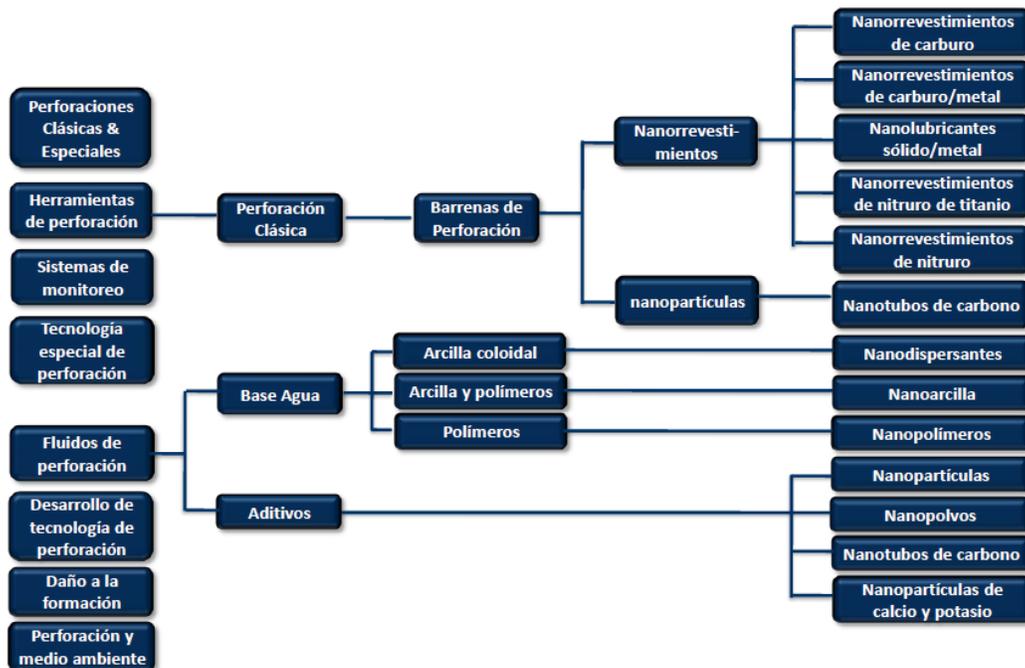


Fig.3.3 La nanotecnología mejora las herramientas y materiales en el área de la Ingeniería de Perforación.^{3.3}

Debido a un aumento en la perforación en general y los costos de producción con una tendencia decreciente en la producción y la rentabilidad de la inversión, la industria del aceite y gas están interesada en evitar problemas en primer lugar la perforación, en segundo lugar la perforación convencional, los nanomateriales tendrán una solución para los problemas, en barrenas, en la terminación, en fluidos de estimulación, debido a efectos de la concentración y la dimensión de los materiales, junto con la restringida capacidad funcional de los macro y micro partículas. Sin embargo por el tamaño de las partículas ultra fina, las necesidades de una concentración muy baja, donde el acceso ilimitado a la superficie externas e internas de la formación del pozo, la fabricación de nanopartículas especiales para una cierta funcionalidad, los nanos puede ejercer su papel funcional completa en la prevención de estos problemas en primer caso y luego su control en el segundo caso. Esto destaca el gran potencial de la nanotecnología y los

nanomateriales en el desarrollo de fluidos inteligentes para superar el desarrollo actual, así como la perforación futura, ver Fig.3.3, donde se podrá ver que en diferentes ramas de la perforación será beneficiada con esta nueva tecnología.

3.2.1 Apuntalantes para Fracturas.

Unas de las empresas del ADVANCED ENERGY CONSORTIUM (Baker Hughes), ha formado en forma de una bola de plata opaca, un compuesto que es lo suficientemente ligero para fluir a través de un pozo, lo suficientemente fuerte como para soportar el impacto y la presión, donde estas bolas llamadas "In – Tallic",¹⁸ se componen de componentes controlados por electrolitos metálicos, es un material nanoestructurado que es mas ligero que el aluminio y mas fuerte que algunos aceros suaves, pero unas de sus propiedades es que se desintegra cuando se expone a ciertos fluidos apropiados. El proceso de desintegración trabaja a través de reacciones electroquímicas que son controlados por los revestimientos nanoescala dentro de la estructura del grano compuesto. La nanomatrix del material es de alta resistencia y tiene propiedades químicas únicas que los materiales convencionales no lo hacen.

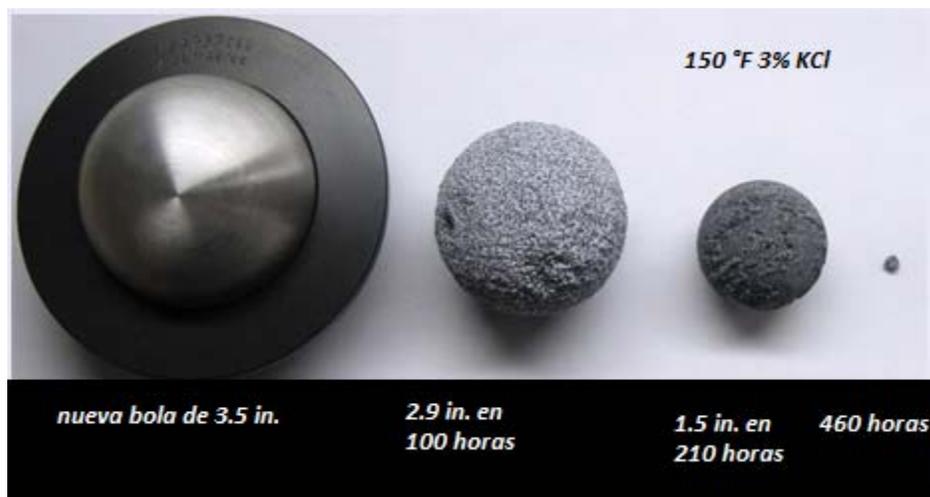


Fig. 3.4.-La bola llamada "In – Tallic".^{3,4}

Lo que parece aluminio es un nanomaterial, ver Fig.3.4, la bola In-Tallic de 3.5 pulgadas mostrada a la izquierda se utiliza para la fractura, los mas pequeños de la derecha muestra como se va a desaparecer con el tiempo en las condiciones del pozo, hasta dejar solo un polvo gris.¹⁸ Que es una combinación de magnesio, aluminio y otras aleaciones. Es una clase de material llamado nanoestructurados metálicos que ofrecen tanto la fuerza y la

capacidad de disolverse bajo ciertas condiciones. Las bolas están diseñadas para ser utilizados en el sistema de fracturación de multietapas de FracPoint. Las bolas mantiene la forma y la fuerza durante el proceso de fractura y luego de desintegran antes o poco después de que el pozo se pone en producción, ver Fig.3.5. Estas bolas se desintegran en el tiempo previsto, por la exposición a los fluidos de salmuera, el tiempo de desintegración depende mucho de la temperatura y la concentración de la salmuera, con los ácidos se desintegraría con mayor velocidad. Esto permite la flexibilidad necesaria para bombear el ácido sobre la bola después que se allá completado la fractura, esto para acelerar el proceso de la desintegración.

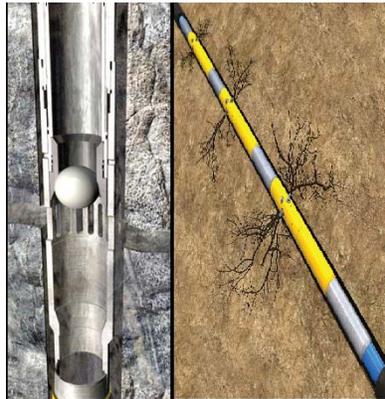


Fig.3.5.- Con la bola In-Tallic podrá tener un buen fracturamiento sin tener esa preocupación de que se atasca el material.^{3.5}

Una ventaja de la bola In-Tallic proporcionará al operador correr el riesgo de eliminar la pérdida de producción debido a las bolas. En caso los operadores reportaban variaciones de producción que aparecieron vinculados a las bolas utilizadas para desplazar mangas abiertas permitiendo el fracturamiento hidráulico. Una teoría era que las bolas hechas de materiales como el nylon se atascaban, debido a esto se eliminaron, la arena también fue vista como una posible fuente de problemas.

Las bolas In-Tallic son un ejemplo de la primera generación de aplicación de la nanotecnología, donde se pueden aplicar a pozos:

- Formación que requieren múltiples etapas de fracturamiento hidráulico.
- Los pozos que tienen presiones diferenciales entre etapas.

Algunas características y beneficios.

- Bolas de fracturas se desintegran antes o poco después de que el pozo se pone en producción.
- Asegura que las bolas de fractura no estén bloqueando la producción.
- Permite la producción de todas las etapas del pozo
- Evita que las bolas con los recortes se acumulen en los puntos bajos del pozo, y evitando la obstaculización de los residuos en cadenas de producción.
- Se desintegra en salmuera, una fracción común.
- No requiere de un líquido especial o una intervención para eliminar las bolas.
- Mas ligero que el aluminio pero tan fuerte como el acero.
- Supera las calificaciones de alguna tecnología de fracturamiento existente de bolas activas.

3.2.2 Nanomateriales

En la industria del aceite y gas se necesita materiales fuertes y estables en casi todos sus procesos, mediante la construcción de este tipo de sustancia en nanoescala, se podrían producir equipos más ligeros, más resistentes y más fuertes, ver Fig.3.6. Por ejemplo, GP Nano Technology Group Ltd en Hong Kong es una compañía en desarrollar el carburo de silicio, un polvo de cera en tamaño nano, donde la compañía ahora está investigando otros compuestos y cree que sustancias nanocrystalina pueden contribuir a equipos de perforación más duraderos y más resistentes al desgaste, los nanotubos tienen más aplicaciones potenciales en la industria del petróleo; por ejemplo, los nanotubos podrían ser utilizados para crear materiales más ligeros estructurales, fuertes y resistentes a la corrosión en las plataformas de perforación mar adentro.

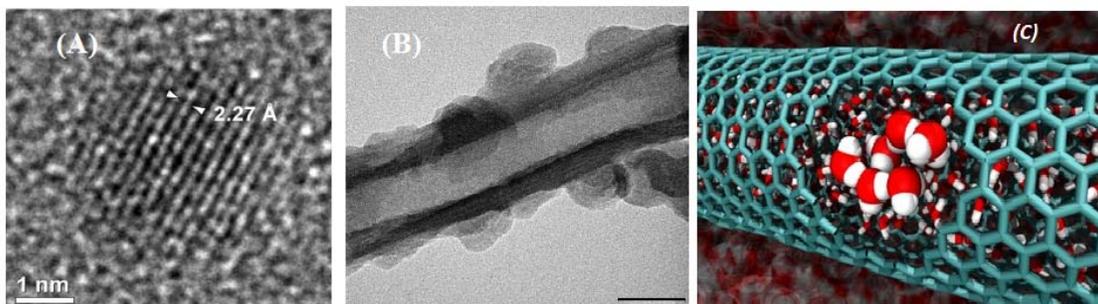


Fig.3.6.- En la imagen se observa diferentes materiales nanoestructurados, (A) nanopartículas, (B) nanotubos de sílice, (C) en la combinación de las dos estructuras se pueden desarrollar materiales ligeros y fuertes, que beneficiaría a la industria petrolera.^{3.6}

Con la creaciones de estos materiales se podrá solucionar el desgaste de las piezas de perforación tanto barrenas como equipos, se podrá combatir la corrosión de la tubería y en la infraestructura, ver Fig.3.7. El objetivo con estos materiales es aumentar la durabilidad de las piezas en movimiento y poder que tenga una vida más larga y un menor costo del equipo a través del tiempo.



Fig.3.7 Con la nanotecnología se podrá tener una mayor durabilidad de los equipos de perforación a través del tiempo.

3.2.3 Fluidos inteligentes

Los nano-fluidos han atraído recientemente la atención en la industria petrolera, como posibles soluciones a varias deficiencias de los fluidos de perforación convencionales.²⁶ El fluido de perforación está a cargo de numerosas funciones durante la operación de perforación que incluye el transporte de los recortes a la superficie, mantener la presión del pozo y la estabilidad, la lubricación y refrigeración de la barrena y el aislamiento de fluidos de la formación mediante la formación de un enjarre alrededor del pozo. Las cuestiones más problemáticas de perforación están directa o indirectamente provocada por problemas relacionados con el fluido como la pérdida de fluido de perforación y la inestabilidad del pozo. Pérdida de circulación que se define como la pérdida gradual o accidental de fluido de perforación a la formación de huecos es uno de los problemas de

perforación más conocidos que pueden dar lugar a aumentos de costos y el tiempo requerido para alcanzar la profundidad del objetivo de perforación, la pérdida de control de presión, el aumento de las preocupaciones sobre las plataformas, la contaminación de las capas de agua, así como varias otras consecuencias. Una gran cantidad de capital y el tiempo se ha gastado en el desarrollo de nuevos materiales de pérdida de circulación y tecnologías para taponar las aberturas de los pozos con diferentes niveles de éxito.²⁷

3.2.3.1 Definición de Fluidos Inteligentes

Un fluido inteligente o nanofluido es una mezcla que consiste en partículas de tamaño nanométrico (partículas de tamaño nanométrico de metal, óxido, carburos, nanotubos), y fibras dispersas en un líquido, el resultado de esta mezcla es la alteración de las propiedades físicas de la base líquida, tales como viscosidad, densidad y transferencia de calor, entre otros.²⁰ Estas partículas son transportadas por el líquido en una suspensión, normalmente se denomina una dispersión coloidal, como cualquier mezcla de sólidos y líquidos, los sólidos tienden a abandonar, o se agrupan y que tienden a espesar los líquidos, añadiendo a su viscosidad, con la creación de fluidos inteligentes se podrá evitar la aplicación de aditivos a los fluidos para que realicen cierta función en el pozo, como agentes espumantes, agentes humectantes, algún lubricante o dispersantes adelgazantes, etc. y con un solo fluido podemos realizar alguna otra operación,³⁰ ver Fig.3.8.



Fig.3.8.-Con la creación de fluidos inteligentes se podrán realizar muchas tareas que con un fluido normal.

Este fluido puede ser clasificado dependiendo de sus aditivos, donde pueden ser como un nano-fluido simple y nano-fluido avanzado. Los nano-fluidos con un solo tamaño, o una sola escala se van a considerar nano-fluidos simples y cuando hay una diferencia de variaciones de tamaños se consideran nano-fluidos avanzados, desde un punto de vista funcional, un nanomaterial puede ser funcional o multifuncional. Donde un nanomaterial funcional solamente se programara para realizar una estricta tarea y un multifuncional puede realizar varios trabajos en los sistemas de fluidos para realizar tareas funcionales de los fluidos con una dramática reducción en solidos totales o el contenido químico de un lodo y también el costo total del fluido.³⁹ Se podrá tener una capacidad mayor de funciones con una reducción de costos totales de los fluidos a pesar de los altos costos de los aditivos individuales que se le podrán modificar, se espera que sea uno de las características de los fluidos inteligentes.³³

Los fluidos que se utilizan en las operaciones de perforación, son sistemas complejos que contienen una fase líquida, una fase sólida y una fase química, a parte las fases (agua o aceite o ambos), los productos químicos y polímeros que se utilizan en el diseño de un fluido juegan un papel importante en el comportamiento funcional de los fluidos. A pesar de los factores que guían la elección de una base de líquidos y los aditivos de los lodos son complejos, la elección de los aditivos deben tener en cuenta tanto los desafíos técnicos y ambientales. La capacidad de la nanotecnología para fabricar nanomateriales que estén diseñados hechos con propiedades y características específicas, se espera que desempeñe un papel protagónico en la superación de los desafíos técnicos y ambientales que se enfrentan durante la perforación.

3.2.3.2 Tipos de Fluidos

Un nuevo tipo de líquido, que puede ser etiquetado como “fluido inteligente”, se está convirtiendo cada vez más a disposición de la industria del aceite y gas, donde sus propiedades son controlables por algún agente externo, estos tipos de nanofluidos están diseñados mediante la adición de partículas nano fabricados a un fluido con el fin de aumentar o mejorar algunas de sus propiedades.³³ Los materiales inteligentes que son colocados en el fluido tienen una o más propiedades que pueden ser drásticamente alteradas mediante la aplicación de una señal de control de baja potencia, ver Fig.3.9. La mayoría de esos materiales cotidianos tienen propiedades físicas, que no pueden ser alterados de manera significativa, tales como la viscosidad, el volumen y la conductividad.³⁶

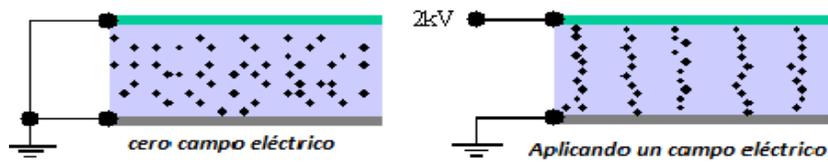


Fig. 3.9.- Sería el principio de funcionamiento de los fluidos aplicándoles un campo eléctrico de baja potencia.^{3,9}

Recientes experimentos han demostrado algunos nanofluidos prometedores con propiedades asombrosas, como: electroreológicos (**ER**) y magnetoreológicos (**MR**), que pueden experimentar un cambio dramático en su viscosidad, estos fluidos pueden cambiar de un líquido espeso hasta casi una sustancia sólida en el lapso de un milisegundo cuando se expone a un campo magnético o eléctrico, el efecto puede ser invertido completamente con la misma rapidez cuando el campo es removido.³⁶

El fluido ER son suspensiones de partículas conductoras extremadamente finas en fluidos no conductores, donde los fluidos al recibir una carga eléctrica pasan de condición líquida a viscosas, la cual depende de la potencia de la carga recibida y esta condición se revierte en pocos segundos al soltar la descarga. Este fluido está formado por un medio continuo, generalmente un líquido aislante y un medio disperso que puede ser sólido o líquido. El primer caso son llamadas suspensiones electroreológicas y en el segundo emulsiones.

Tabla 1. Propiedades ideales de un Fluido ER

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Esfuerzo de cedencia (kPa) a 2 kV/mm.	5
Baja corriente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	< 20
Temperatura operación ($^{\circ}\text{C}$)	- 30 a 120
Tiempo de respuesta (seg.)	10^{-3}
Estabilidad sedimentación	Alta
Estabilidad química	Buena

Las propiedades reológicas (viscosidad, esfuerzo de cedencia, módulo de corte, etc.). Estas propiedades de flujo puede ser fácilmente controladas (desde un líquido viscoso hasta un

sólido elástico) y por ello los fluidos ER pueden ser usado como un interfaces eléctricas y, mecánicas en esta área,³⁶ ver Tabla 1. Su cambio en la estructura y propiedades reológicas de un líquido o su suspensión , bajo la aplicación de un campo eléctrico, es llamado efecto ER, el líquido o suspensión que responde (cambios en propiedades del flujo) ante la acción de campo eléctrico es comúnmente conocido como fluido ER, este efecto se puede explicar como un cambio en el arreglo estructural de una dispersión desde una situación aleatoria a una uniforme del tipo fibrilar debido a la polarización de la fase dispersa en presencia de un campo eléctrico,³⁶ ver Fig.3.10.

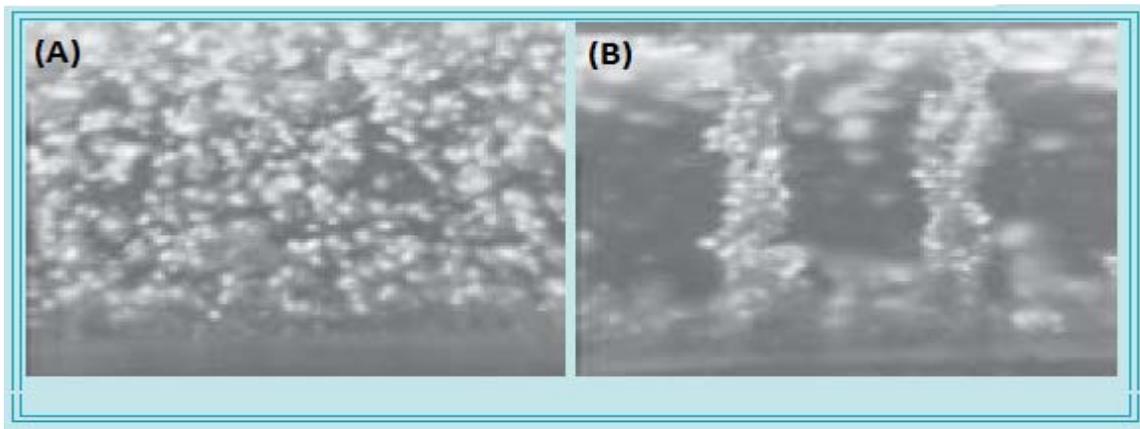


Fig.3.10.-Efecto electroreológico: (a) suspensión sin campo eléctrico; (b) suspensión a 1 kV/mm.^{3.10}

Como se ha mencionado otro fluido inteligente es el fluido magnetoreológicos son fluidos compuestos por partículas ferromagnéticas, de tamaño nano o micrométrica, dispersas en un líquido portador, que poseen propiedades viscoelásticas controlables mediante campos magnéticos externos. La formación de estos agregados cambian drásticamente las propiedades mecánicas y ópticas de las suspensiones.³⁸

La respuesta de los fluidos magnetoreológicos es resultado de la polarización inducida en las partículas suspendidas mediante la aplicación de un campo magnético externo, la interacción entre los dipolos inducidos resultantes obliga a las partículas a formar estructura columnas paralelas al campo aplicado, estas estructuras tipo cadena restringen el movimiento del fluido dando lugar a un incremento a las características viscosas de la suspensión. La energía mecánica necesaria para producir estas estructuras tipo cadena se incrementa conforme crece el campo aplicado, dando como resultado un esfuerzo dependiente del campo. Sus propiedades reológicas están determinadas por lo siguiente:

- Concentración y densidad de las partículas.
- Distribución de forma y tamaño de las partículas.
- Las propiedades del fluido portador.
- Aditivos adicionales.
- La intensidad de campo magnético aplicado.
- La temperatura.

En la actualidad el fluido MR, son utilizados en diferentes áreas por ejemplo:³⁸

Automotriz.- En el área automotriz se lo aplica en la atenuación de las vibraciones esto es en el sistema de suspensión, específicamente en los amortiguadores. El confort en los vehículos se asegura con estos amortiguadores magnetoreológicos, porque mediante un control electrónico se puede ajustar en una fracción de segundo la rigidez del amortiguador garantizando así un viaje cómodo y seguro.

Construcciones civiles.- Como se indicó la aplicación de los fluidos magnetoreológicos es la atenuación de las vibraciones. Una de las aplicaciones importantes en el mundo de las construcciones la atenuación de los movimientos producidos por los terremotos y las ráfagas de viento.

En ambos casos, el mecanismo de flujo es el mismo: excitación del fluido por el campo apropiado (eléctrico o magnético, respectivamente) hace que la alineación de polarización y posterior de las partículas suspendidas en el líquido. La estructura de la cadena resultante se mantiene en su lugar por el campo aplicado, y por lo tanto, resiste el flujo de fluido. El comportamiento resultante es análogo a la clase de fluidos conocidos como plásticos de Bingham, fluidos no newtonianos capaces de desarrollar una tensión de fluencia. Para fluidos inteligentes, esta tensión de fluencia es una función del campo aplicado eléctrico o magnético.³⁸ Sin embargo, una vez que esta tensión de fluencia se supera, el comportamiento del fluido inteligente se desvía de la de un plástico de Bingham. Esto es atribuible a una ruptura de las cadenas de partículas menores de las fuerzas del flujo de fluido, y los resultados en una característica del esfuerzo cortante / velocidad de cizalla, que es altamente no lineal. Cuando se utiliza en un dispositivo de amortiguación, el resultado es un amortiguador cuya fuerza / velocidad característica no es lineal, pero se puede cambiar por medio del campo eléctrico aplicado o campo magnético.³⁶

3.3 El Papel de Nano para Superar los Desafíos de la Perforación.

La industria de la perforación se enfrenta a difíciles retos distintos, como problemas de historia geológica del yacimiento, los perfiles de presión del subsuelo, la ubicación geológica del campo, la sensibilidad del medio ambiente y las características de la formación del subsuelo, etc. Algunas de las dificultades técnicas que suelen enfrentar durante la perforación se describirán a continuación junto con los aspectos más destacados de la función de los nanomateriales para combatir estos problemas.²⁷

3.3.1 Problemas de Flujo en Aguas Superficiales.

El flujo de agua superficial (SWF), es un peligro de perforación serio encontrado en varias áreas del Golfo de México, donde numerosos incidentes han tenido lugar en el que los fluidos intensos en aguas superficiales han interrumpido la perforación, las capas se encuentran con frecuencia en zonas de aguas profundas en arenas pocos consolidadas geopresurizados, ver Fig. 3.11, estas arenas cuando fluyen pueden causar grandes daños a un pozo, añadiendo millones de dólares para el costo de un pozo, donde este puede provocar el abandono del pozo.²⁷



Fig.3.11.-Problema de flujo de agua superficial se encuentran en perforación en aguas profundas.^{3.11}

El flujo de agua superficial en arenas se sabe que se producen en aguas profundas de 1476[ft] o más y por lo general 984a 1968 [ft], por debajo de la línea de lodo. Se sabe que

está presente en casi todas las cuencas oceánicas de aguas profundas, donde la tasa de sedimentación es alta. El espesor de la arena se encuentra entre 50 a 300 [ft], con una permeabilidad de un rango de 1 a 20 [darcy], una porosidad de un intervalo de 35-40% y un potencial de flujo de 35,000 a 40,000 barriles /día.²⁸ Se puede decir “superficial”, en términos de poca profundidad, utilizado para describir estos flujos de aguas destructivas es un poco engañoso, este fenómeno se origina en los estratos que se encuentra en profundidades de aguas de 1640 [ft] o más, el intervalo de flujo de agua es relativamente cercano al fondo marino. Un aspecto interesante del SWF tiene una alta tasa de producción de agua, lo que implica que el factor de tiempo de retardo está implicado en la génesis de la producción de agua, este problema es un desafío en la perforación debido a su capacidad de actuar como un mecanismo de activación de otros problemas de perforación, la inestabilidad del equipo del subsuelo, el colapso del pozo, fracturamiento inducido, la pérdida de lodo, la erosión del fondo del mar, etc. propiedades durante la perforación, como se puede ver en la Fig.3.12, el flujo de agua superficial se encuentra en aguas profundas del Golfo de México a poca profundidad de suelo marino. El flujo comienza a menudo mucho después del intervalo de flujo ha sido penetrado y la broca está a una profundidad profunda o incluso después de que el pozo ha sido colocado en producción, el flujo es fuera de la estructura de la carcasa exterior y su cemento.²⁸

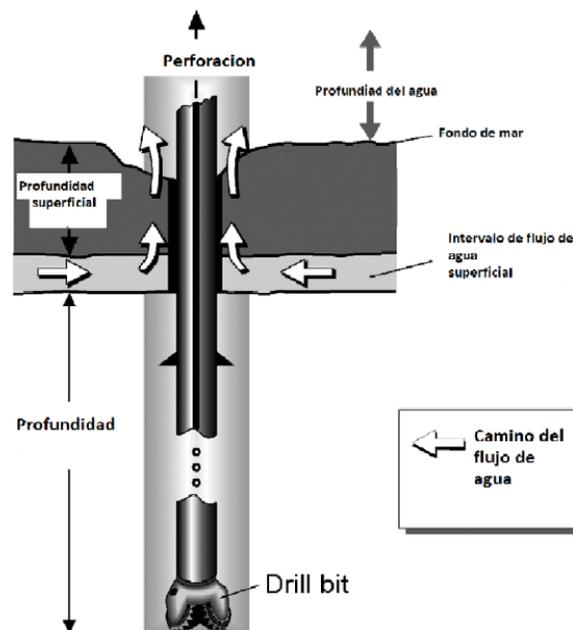


Fig.3.12.-Problemas de Flujo en Aguas Superficiales.^{3.12}

En este caso la nanotecnología entraría con un fluido inteligente donde un número de partículas de tamaño nano y micro que pueden ser producidos a partir de esferas de 3.3[ft] de un material madre, debido al tamaño de los materiales ultra finos, donde estas partículas tendrán un fácil acceso a los poros e intergranular, las superficies de contacto de las partículas. También el enorme número de ejércitos nanométricos de partículas son capaces de entrar en la mayoría de los límites intergranulares de la zona de arena de SWF y la matriz porosa y permeable.²⁸ Por lo tanto, adaptando nanomateriales hechos con encolado, sellado, llenado y propiedades de cementación se espera que aumenten la resistencia de la unión entre granular, reducir la porosidad y permeabilidad de las formaciones cercanas al pozo, teniendo un aumento drástico de desgarro y resistencia al corte de las partículas de la zona flujo de agua superficial.³⁵

Estos nanos también estarán diseñados también para reducir el potencial de flujo de la matriz en la zona SWF debido a un sellado efectivo de la zona cercana al pozo y la unión entre las partículas y la matriz efecto de refuerzos del fluido nano a la zona cerca del pozo, se espera también para mejorar la estabilidad cama del equipo del pozo utilizando en la perforación mar adentro.²⁷

3.3.2 Fluidos de circulación.

La pérdida de circulación es una pérdida parcial o completa del fluido de perforación a la formación y puede ocurrir debido a las fracturas que ocurren naturalmente, grietas, canales y el tipo de formación como:⁴⁰

- Formaciones no consolidadas grueso permeable, tales como arena, gravilla y algunos lechos de grava gruesa, capas de conchas y depósitos de arrecifes.
- Formaciones Vugular y cavernosa, como arrecifes de coral, piedra caliza, yeso y formaciones dolomíticas.
- Las fisuras o fracturas, tanto naturales como inducidas.

El perforador no tiene control sobre estas circunstancias y se produce debido a las propiedades del fluido de perforación o lodo. Un problema que consume más tiempo y costo se presenta en la pérdida de circulación de fluidos, donde se estima que el costo a la industria de perforación es más de mil millones de dólares anuales en tiempo de equipo, materiales y otros recursos financieros.²⁰ A veces, la pérdida puede ser inducida por el uso inadecuado del peso del lodo en una formación estrecha, es por eso que en los pozos de aguas profundas, la pérdida de circulación puede ser por la diferencia de los límites consolidados superior e inferior, ver Fig.3.14, donde el mecanismo de la perforación,

durante la circulación del lodo (Flecha verde), donde se puede encontrar una pérdida de circulación si la roca es naturalmente fracturada, es vugular o es altamente porosa, también si la presión del pozo es mayor que es la resistencia a la tracción de la roca, las fracturas se forman, etc...²⁷ La diferencia entre estos es que en los límites superiores el peso del lodo puede ser al alguno caso cero. Por lo tanto, el requisito del lodo con alto peso es para evitar el colapso del pozo y el de bajo peso es para evitar la fractura inducida por el trabajo.⁴⁰

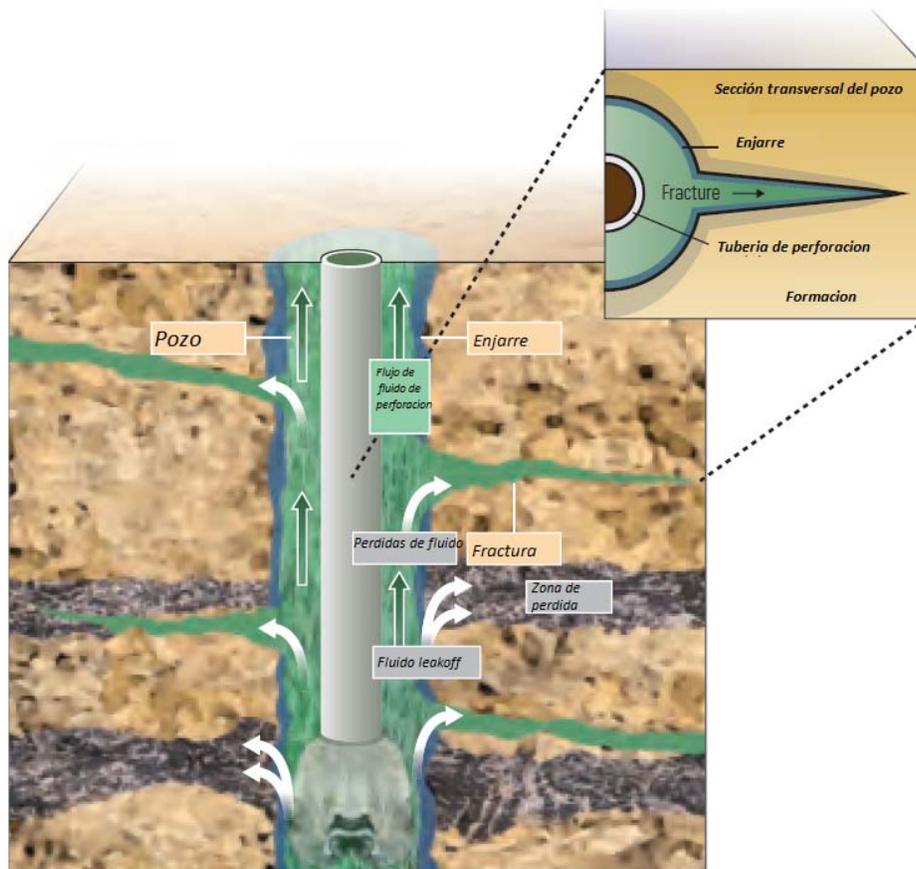


Fig.3. 14.- Pérdida de lodo por algún problema que se encuentre en la perforación.^{3.14}

El peso del lodo sigue aumentando debido a recortes en suspensión como una consecuencia de la falta de capacidad de los fluidos de perforación para llevar y transportar los residuos de perforación a la superficie.²⁷ El uso de nanopartículas impartirá una capacidad de carga suficiente para transportar y dejar cortes de manera eficiente y para mantener su densidad y por lo tanto la presión sobre un amplio rango de

condiciones operativas, conduciendo finalmente a la reducción de la pérdida de circulación, ver Fig.3.15, donde se muestra la reducción esperada en el coeficiente de fricción mediante el uso de nanopartículas, en comparación con el fluido ordinario y el fluido con adictivos habituales.³⁰

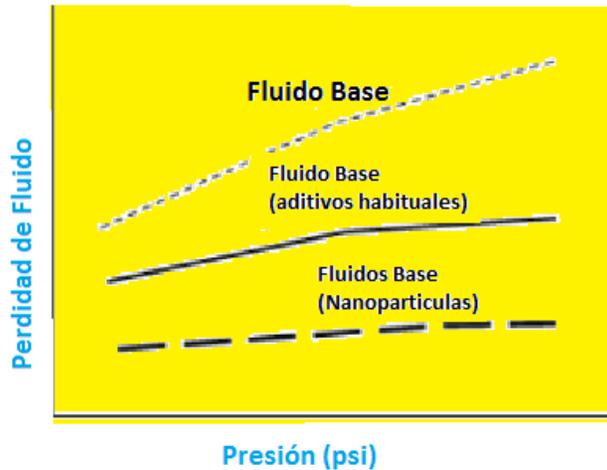


Fig.3.15.-Mejor resultado al aplicar un fluido con nanopartículas.^{3.15}

Con materiales macro y micro se podrá tener un potencial para construir barreras estructurales de acuerdo con el tamaño y forma de las trayectorias de la pérdida, donde se espera que proporcione un sellado efectivo en las zonas porosas y permeables, fracturadas y formaciones cavernosas.⁴⁰ Con propiedades multi-funcionales que poseen tanto un nano sellado y tenga un potencial para eliminar la pérdida inducida de circulación en las formaciones de estrecho margen, mejorara las propiedades mecánicas y físicas de la formación,³¹ ver Fig.3.16.

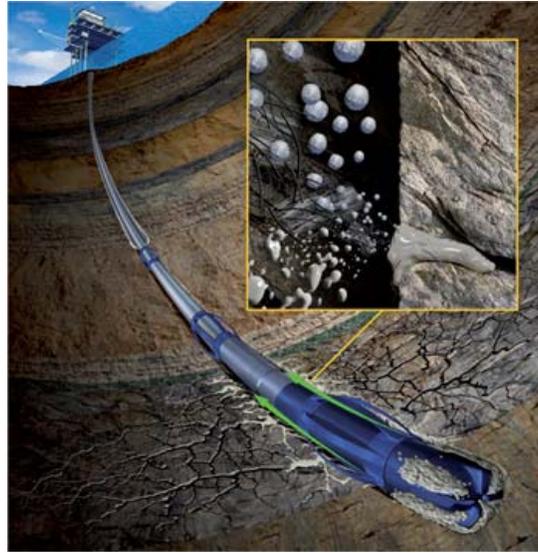


Fig.3.16.-El funcionamiento de las nanopartículas es evitar tener una pérdida de circulación y costo de operación.^{3.16}

3.3.3 Torque y arrastre.

En la perforación de alcance extendido hay un aumento dramático en los problemas de torsión y arrastre que son debidas a la fricción entre la sarta de perforación y la pared del pozo, el fluido de perforación tiene un papel importante en la reducción del problema de torque y arrastre. El uso de gránulos de carbón esféricos con un tamaño de partícula de malla de -10 a 325, para mejorar la lubricación de los fluidos de perforación han informado en la literatura y demostraron algún grado de mejora en la funcionalidad del fluido de perforación.⁴⁰

Debido a la película fina y muy delgada que pueden formar los nanomateriales, pueden proporcionar una deducción significativa a la resistencia de la fricción entre el tubo y la pared del pozo, debido a la formación de una película lubricante continua y fina en la interfaz de la pared del pozo. La fricción aumentara entre la sarta de perforación y la pared del pozo cuando hay un aumento de carga, con el uso de nanopartículas se podrá reducir, al tener un fluidos inteligentes se podrá reducir el esfuerzo de torsión y arrastre en los problemas de alcance horizontal, multilateral y perforación con tubería flexible.²⁷

3.3.4 Problemas en tubería de Perforación.

El atascamiento diferencial en el tubo tiene un efecto importante sobre la eficiencia de la perforación y en los costos, este problema se ve afectado por muchos parámetros, tales

como las propiedades del fluido de perforación, las características del enjarre de lodo donde esto es causado por la pérdida del filtrado en la pared del pozo o los cortes de sedimentos que se forma durante la perforación, también es posible cuando la presión hidrostática es menor de la necesaria.²⁷

Tradicionalmente los problemas de tubería atascada se resuelven mediante el uso de algunos métodos y técnicas estándar después de que ocurren, pero la verdadera clave para el ahorro y el éxito está, en la prevención de los riesgos asociados con el tubo pegado. Si estos problemas se identifican por adelantado, se tendrá una mejor solución donde se pueden reducir los costos asociados por estos problemas.³⁴ Una vez que se pegue la tubería diferencial o mecánica se podrá introducir nanomateriales en los fluidos donde desempeñaran un importante papel en la recuperación de la tubería atascada.⁴⁰ Con nanomateriales en el fluido de perforación se tendrá un potencial para reducir la tendencia adhesiva de la torta de lodo mediante la formación de una delgada no adhesiva de nano película en la superficie de la sarta de perforación. Estos nanofluidos (geles), podrán ser capaces de depositar un revoque de filtración fina en las zonas de alta permeabilidad se espera que reduzca el alcance de atascamiento diferencial de manera significativa y reduciendo así la adherencia del tubo.²⁷

3.3.5 La Aplicación en Altas Presiones y Altas Temperaturas.

Existen enormes reservas de hidrocarburo en lugares remotos donde las fronteras son desafiantes que son propensos a altas presiones y altas temperaturas (HPHT), estos lugares que prometen reducir la brecha entre la demanda y la oferta de energía. Sin embargo, las perspectivas HPHT puede tener desafíos formidables, el peso del lodo (que es mayor para pozos HPHT) deben ser controlados con precisión debido a las estrechas ventanas de peso del lodo.²⁷ Este requisito de peso alto del lodo, conduce a problemas de cargas de sólidos y hundimientos de barita. La tecnología para controlar eficazmente las condiciones de presión y temperatura de fondo del pozo no están muy desarrolladas, la tripulaciones de los quipos de perforación deben estar capacitadas adecuadamente para adoptar las mejores prácticas en la perforación a HPHT para reducir al mínimo el riesgo de problemas de control de pozo.⁴⁰

Como se sabe la rotura o asociación de las cadenas de polímeros y las ramas de la variación de temperatura puede causar una reducción drástica de la viscosidad, por lo tanto el mantenimiento de la estabilidad en condiciones de HPHT es obligatorio cumplir con las tareas funcionales de un sistema de fluidos, como temperaturas superiores a 392[°F] y presiones de fondo por encima de 20000[psi] son comunes en HTHP en pozos y

también en pozos profundos de más de 65,616[ft], con fluidos térmicamente estables son esenciales para perforar un pozo seguro y económico en tales condiciones.²⁷ Los nanomateriales tiene un excelente conductividad térmica se espera que sean los materiales de elección para tales entornos, la viscosidad del fluido de perforación disminuye con un aumento de la temperatura y el rendimiento por lo tanto, se deteriora limitando la capacidad para perforar profundo, el uso de nanopartículas en diferentes tipos, tamaños y composición cantara con servicios de fluidos de perforación con viscosidades definidas que son térmicamente estables,⁴⁰ ver Fig.3.17.

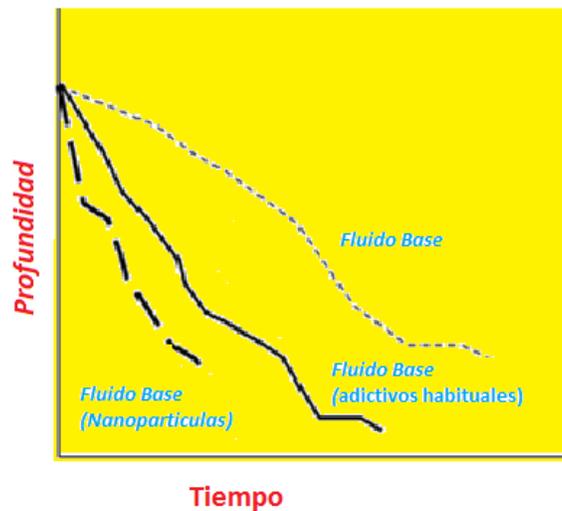


Fig. 3.17.-Con la nanotecnología mejorar la taza penetración.^{3.17}

3.3.6 Hidratos de Gas

Los hidratos de gas son acumulaciones cristalinas similares al hielo que está formado por el atrapamiento de gas natural por el agua en ambientes de alta presión y baja temperatura puede ser termogénico y/o biogénico en la naturaleza, el bloque constructor de este solido cristalino es una estructura denominada “clatrato”, en la cual las moléculas de agua forman un celda cuyo interior está ocupado por gas.²⁷ Muchos gases tiene tamaño moleculares adecuados para formar hidratos, incluyendo los gases que ocurren en forma natural, como el dióxido de carbono, ácido sulfhídrico (sulfuro de hidrogeno) y varios hidrocarburos de bajo número de carbono, en la naturaleza, sin embargo el más común de los hidratos de gas es el hielo de metano, ver Fig.3.18.

Independientemente del origen del hidrato de gas, la presencia de hidratos es uno de los retos de perforación que hacen que la operación de perforación sea muy difícil, especialmente en aguas profundas, la presencia de gases ya sea como vapor o sólido, disueltos en la formación subterránea son peligrosos debido a su efecto adverso sobre la estabilidad del pozo y del equipo. Sin embargo el riesgo de formaciones de hidratos de gas son un peligro si los hidratos se disocian durante la perforación debido a un cambio termodinámico. Se sabe que en condiciones de presión y temperatura estándar, la descomposición de $35[ft^3]$ de hidrato de metano produce $5791[ft^3]$ de metano gaseoso y $28 [ft^3]$ de agua.³⁵

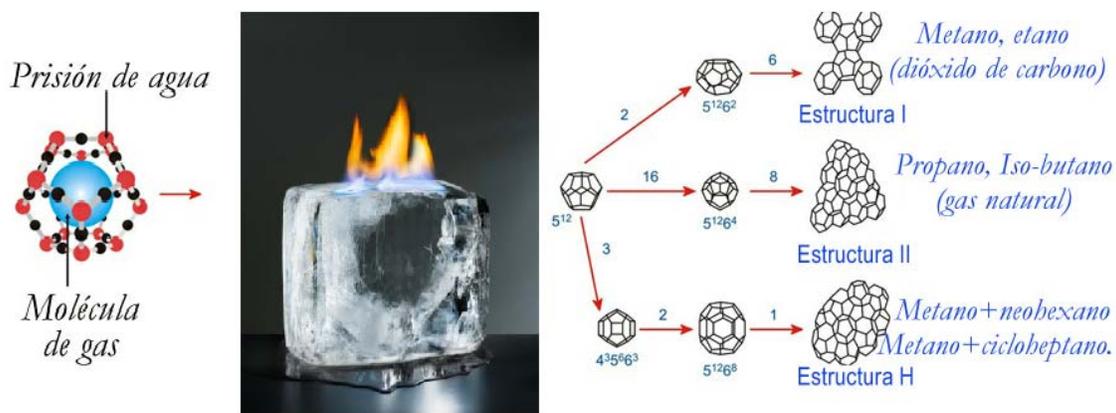


Fig. 3.18.-La forma cristalina de un hidrato es como un hielo, se piensa en explotar como combustible fósil es precisamente porque las reservas de estos hidratos son inmensas.^{3.18}

A medida de que un fluido inteligente pueda desempeñar un importante papel en la prevención de la inestabilidad y los cambios de la propiedad geomecánicas del lodo, como una disociación incontrolada de hidratos de gas puede causar un cambio significativo en la densidad del lodo, la reología del lodo, la presión en la columna del lodo, etc, que conduce a grandes problemas en la perforación.³⁵ La entrada y la incorporación de nanopartículas en un sistema de lodo inteligente, se podrá evitar la disociación de los hidratos, donde se podrá recuperar la integridad de la matriz inicial que pueda evitar la degradación de la formación y la inestabilidad del pozo. También se podrá mantener la densidad y propiedades reológicas del lodo, donde se tendrá un mejor lodo de calidad.²⁷

3.4 Terminación de Pozos.

Diferentes situaciones causan preocupación durante las operaciones de terminación de un pozo: la colocación de minerales ácidos en pozos horizontales, la remoción incompleta del revoque o torta en pozos empaquetados con grava, la estimulación de redes de fracturas naturales, formaciones de baja permeabilidad en pozos horizontales que crean caídas de presión más bajas, de manera que el levantamiento del revoque o torta por la contrapresión es muy difícil de alcanzar. Y, por último, la corrosión que afecta la zona productora generando daños de formación, hace que las operaciones normales de empaquetamiento con grava tengan una opción que elimine todos estos factores de riesgo.³⁷

Por ejemplo el éxito de un empaquetamiento de grava esta dado por la capacidad de transportar la grava hasta el fondo del intervalo, a que la perdida de fluido exista permitiendo transportar la grava hasta el fondo del intervalo, a que la perdida de fluido exista permitiendo transportar la grava y a que el pozo este limpio y libre de solidos que puedan taponar los espacios porosos de la grava o de la malla ranuradas. Para esto se acostumbra bombear una serie de fluidos, ácidos, oxidantes, de alta viscosidad, lo que conlleva una serie de operaciones en los pozos que consume tiempo y por el carácter agresivo de los productos usados, se coloca en riesgo la salud de los operarios y la vida útil de los tubulares.

Los trabajos de bombeo de ácidos son por lo general costosos, peligrosos, reaccionan muy rápido, son corrosivos y requieren de equipo especial para poderlos bombear; adicionalmente, los tratamientos de ácido crean el efecto de "GUSANO", que no son más que la creación de túneles a medida que el ácido penetra en el revoque y luego continua creándolos en la formación u otra causa del empaquetamiento con grava es que puede haber una remoción incompleta del revoque o enjarre,³⁷ ver Fig.3.19.

Para estos casos lo que se necesita es un fluido, que en una sola circulada, mezclado junto con el fluido de transporte de la grava y sin riesgo en superficie de manejo de productos corrosivos, pueda generar en el fondo, en función de la temperatura, primero un oxidante y posteriormente un ácido, que destruya todos los polímeros presentes y posteriormente disuelva el contenido de carbonato de calcio, eliminado toda posibilidad de taponamiento de la grava o las mallas, sería la solución a los principales problemas de un empaque de grava exitoso.

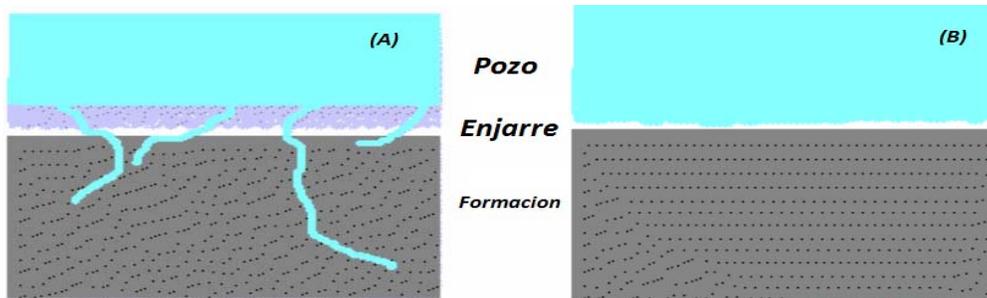


Fig. 3.19.-En la Fig.(A) se ve el efecto de Gusano generado por el ácido, y en la Fig. (B) se ve la remoción incompleta del revoco o enjarre que es otra causa de los empaquetamientos con grava.^{3.19}

Debido a toda las interrogantes una empresa del Consorcio de Energía Avanzada (Halliburton), realizo un sistema de ruptor de revoco, conocido como N – FLOW,²⁹ donde esta integrado todas la nuevas técnicas de manejo de acido y polímero, para que inteligentemente el fluido se transforme, in-situ, en oxidante y ácido y remueva el 100% de revoco, ver Fig.3.20.

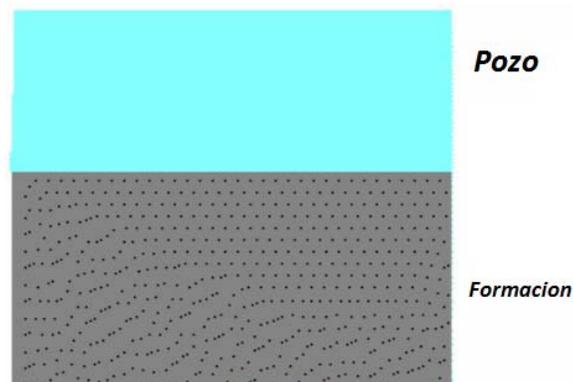


Fig.3.20.-Revoque removido con el N – FLOW.^{3.20}

El sistema N-FLOW es una combinación de enzimas (catalizadores bilógicos) con químicos específicos para generar un ácido orgánico a una tasa controlada este sistema puede ser modificado para satisfacer los requisitos de la formación. Las reacciones del N-FLOW pueden ser retardadas de 2 a 72 horas, según las temperaturas de fondo y las formulaciones del ruptor.²⁹ La reacción retardada permite asegurar que la solución del ruptor está distribuida de manera uniforme por todo el intervalo de terminación antes de que empiece a trabajar, sin “puntos calientes” como los que suelen producirse cuando los ruptores convencionales hacen contacto inicialmente con el revoco.

La mayor parte del ácido es producido después de colocar los rompedores en el sistema, permitiendo una colocación eficiente en toda la zona objetivo, maximizando la tasa de

producción del pozo, las reacciones químicas viene de usar un ácido precursor, con la encima catalítica, generando un ácido más un alcohol, ver Fig.3.21.

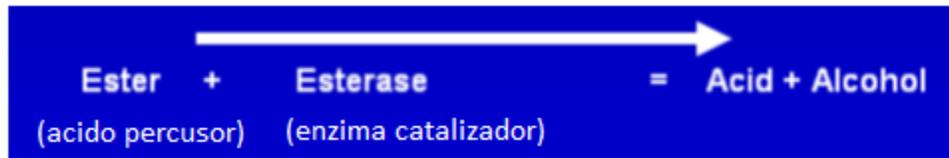


Fig.3.21.-Reacción generadora del ácido.^{3.21}

Donde las encima rompedora de polímero trabaja mejor en condiciones leves de acidez, creando condiciones ideales de ph para obtener la actividad máxima de la encima rompedora de polímero/almidones, mientras que el ácido producido ataca el carbón de calcio, puede ser formulado para una reacción segura y control de en una amplia variable de tipos de pozos y formaciones, ver Fig.3.22. La cantidad de ácido producida es determinada por la concentración de este ácido precursor y la velocidad de producción es determinado por la temperatura y la formación en la que se usara el sistema, minimizando el riesgo de daño por corrosión, también nos ayudaría en la eliminación de posibles lesiones y daños relacionados con el manejo de ácidos peligroso en la superficie.³⁷

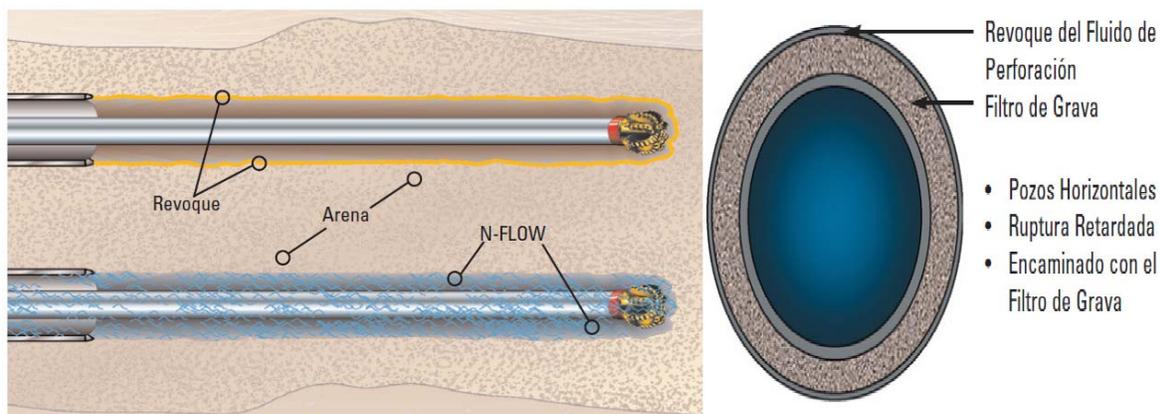


Fig.3.22.-Aplicando el N-FLOW, el ácido no daña la formación y limpia por completo la pared del pozo.^{3.22}

Este fluido es compatible con los fluidos portadores de filtro de grava, lo cual permite ahorrar tiempo y dinero para la colocación de ruptor y también puede reducir considerablemente la posibilidad de eliminación irregular del revoque. El empaquetamiento y la pérdida de fluido hacia la formación, a un tiempo específico y previamente determinado; el ácido orgánico es liberado para disolver y remover el revoque y el bloque causado por el carbonato de calcio en la cara del pozo, especialmente en formaciones arenosas.²⁹

Sus ventajas de este fluido son:

- Puede asegurar la entrega de un ruptor eficaz en donde se encuentre el fluido.
- Puede controlar la reacción retardada de 2 horas hasta 72 horas.
- Seguro para el medio ambiente.
- Puede ser más seguro para el personal y el equipo que los ruptores convencionales.

Aplicaciones:

- Ruptor de revoque (cuando el revoque contiene materiales solubles en ácido)
- Pozos con filtro de grava (incluido en los fluidos portadores)
- Terminaciones de pozo abierto
- Pozos verticales
- Estimulación de pozos maduros
- Mallas expansibles para eliminación de revoque
- Reparación y terminación
- Pozos de inyección para eliminación de revoque
- Eficaz en la mayoría de las salmueras

El sistema de ruptor N-FLOW, puede proporcionar una alternativa eficaz a la eliminación convencional del revoque en arenisca, formaciones de carbonato o arenisca que contiene capas de lutitas reactiva al ácido. Este fluido puede ser introducido con el fluido portador del filtro de grava para ahorrar tiempo y costos de operación.²⁹

Capítulo 4

La Nanotecnología en la Recuperación Mejorada de Aceite

4.1 Procesos de Recuperación Mejorada.

Técnicas mejoradas para la recuperación de aceite están ganando más atención en todo el mundo, como las reservas probadas de aceite están disminuyendo y el precio del aceite sube, aunque muchos de los yacimientos gigantes en el mundo fueron seleccionados ya para los procesos de Recuperación de Aceite Mejorado (EOR), los principales retos como; la eficiencia de barrido en el yacimiento, los posibles daños en la formación, el transporte de grandes cantidades de agentes de EOR en los campos, especialmente para los casos en alta mar y la falta de herramientas para estos métodos, dificultan los procesos EOR.²⁶

Después de las recuperaciones primaria y secundaria, el yacimiento contiene todavía 60-80% (promedio 72%) del crudo originalmente en el sitio.⁴³ Esto se debe a que la eficiencia de los métodos de recuperación primaria y secundaria está limitada por dos factores:

- A la escala de los poros, el crudo alcanza una saturación residual suficientemente baja para encontrarse en forma de glóbulos discontinuos, atrapados por las fuerzas capilares.
- A la escala del yacimiento existen ciertas zonas en las cuales el fluido inyectado durante la recuperación secundaria no penetra, por la baja permeabilidad de estas zonas, porque siguen caminos preferenciales, o porque la geometría de implantación de los pozos no es favorable.

Los métodos EOR, su propósito es mejorar la eficiencia del desplazamiento mediante una reducción de las fuerzas capilares, se pueden citar la utilización de solventes miscibles con el crudo y la obtención de baja tensión interfacial con soluciones de surfactantes o soluciones alcalinas. Para mejorar la eficiencia de barrido se puede reducir la viscosidad del crudo mediante calentamiento, aumentar la viscosidad del agua con polímeros hidrosolubles, o taponar los caminos preferenciales por ejemplo con espumas.⁴⁵

Con la nanotecnología se tiene el potencial de transformar los mecanismos y procesos de EOR, esta tecnología tiene la posibilidad de introducir cambios revolucionarios en varias áreas de la industria petrolera como se ha mencionado, por ejemplo, nanosensores, podrán proporcionar información más detallada y precisa sobre los yacimientos, las fabricación de nanopartículas puede ser utilizadas para la inhibición de la escala, los nanomateriales estructurales podrán permitir el desarrollo de mejores equipos para la industria petrolera que sería mucho más ligero y más fiables y de larga duración, y mejorando la nanomembranas se podrá separar el gas y se eliminaría las impurezas del aceite. Otra aplicación de la nanotecnología son los nuevos tipos de “Fluidos Inteligente” para la EOR y la perforación, estas nanopartículas ofrecen una manera de controlar los proceso de recuperación de aceite que es inigualable por cualquier otra tecnología actual o anterior.²⁶

Estos nano agentes integrados en los fluidos, pueden aumentar drásticamente la recuperación del aceite mediante la mejora de las geomecánicas del depósito, mejorando la tensión superficial, mediante el enfoque de copiar los principios de los geosistemas en la tecnología para completar el entorno natural, utilizando partículas del orden de 1 a 100 nm con ciertas especificaciones como; térmico, propiedades ópticas, eléctricas reológicas y interfacial que son directamente útiles para liberar el aceite atrapado en los espacio porosos del orden de 5 a 50 micras que se encuentra en la formación. La viscosidad de un fluido que se inyecta para desplazar el aceite, tal como una solución de agua, Dióxido de carbón [CO_2] o surfactantes, suelen ser menor que la viscosidad del aceite.⁴⁵ En esta situación, la adición de nanopartículas puede ajustar la viscosidad del fluido inyectado a un nivel óptimo, con el efecto de mejorar la movilidad del fluido, y tener una mejor recuperación de aceite de los yacimientos, donde estudios han demostrado que agregando nanopartículas a estos fluidos se pueden incrementar como la densidad, viscosidad conductividad térmica y el calor. Con estas nanopartículas pueden penetrar pequeñas gargantas de poros sin llegar a ser atrapados, ver Fig.4.1, y la cantidad de inyección puede ser menos costosa, por lo tanto, un proceso rentable de EOR se puede lograr.⁴²

A medida que aumenta la necesidad mundial de energía, las reservas gigantes de petróleo y gas que alimenta la industria mundial de los últimos 100 años se están agotando, la demanda mundial de petróleo aumenta drásticamente, la creciente demanda de petróleo solo puede ser satisfecha a través de dos vías:

- La exploración de nuevos yacimientos de hidrocarburos.
- Mejorando la recuperación de petróleo de las reservas disponibles.

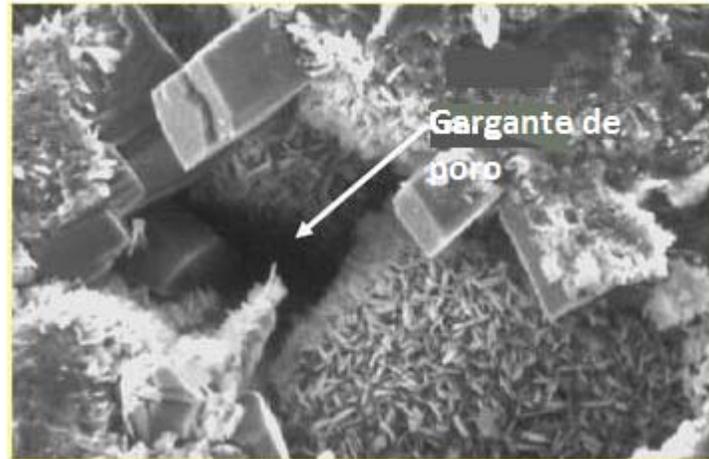


Fig.4.1.-Con la nanotecnología se podrá ir más adentro que un proceso químico o térmico y recuperara un porcentaje más que otro método de EOR.^{4.1}

4.2 Nanotecnología en la Recuperación de Aceite.

El rápido crecimiento de la demanda mundial de petróleo se puede cumplir de manera efectiva en solo dos maneras; mediante la búsqueda de nuevos recursos de hidrocarburos o por una recuperación de aceite mejorado (EOR), en las reservas disponibles. Sin embargo la tasa de descubrimientos de yacimientos petrolíferos están disminuyendo, y la mayoría de los yacimientos de petróleo que producen están en etapas finales de producción. La meta de los procesos de recuperación mejorada es producir el aceite “residual” desde todo el yacimiento. Esto es llevado a cabo mediante el mejoramiento del desplazamiento microscópico del aceite y las eficiencias de barrido volumétrico.⁴⁵

Las eficiencias de desplazamiento del aceite pueden ser las siguientes, ver Fig.4.2:

- **Métodos térmicos**, lo que implica la introducción de calor, tales como la inyección de vapor para reducir la viscosidad del aceite viscosos pesado y mejorar su capacidad de fluir a través del yacimiento.⁵⁰
- **La inyección de gas**, que utiliza gases tales como gas natural, nitrógeno o dióxido de carbono que se expande en el yacimiento para tener un empuje adicional en la producción u otros gases que se disuelve en el aceite para reducir su viscosidad y mejorar se velocidad de flujo.⁵⁰
- **Métodos químicos**, inyección de productos químicos lo que puede implicar el uso de cadenas de moléculas largas llamadas polímeros para aumentar la eficiencia de la inyección de agua, o el uso de detergentes como surfactantes para ayudar a

reducir la tensión superficial o las fuerzas capilares que a menudo impide que las gotas de aceite se muevan a través del yacimiento.⁵⁰

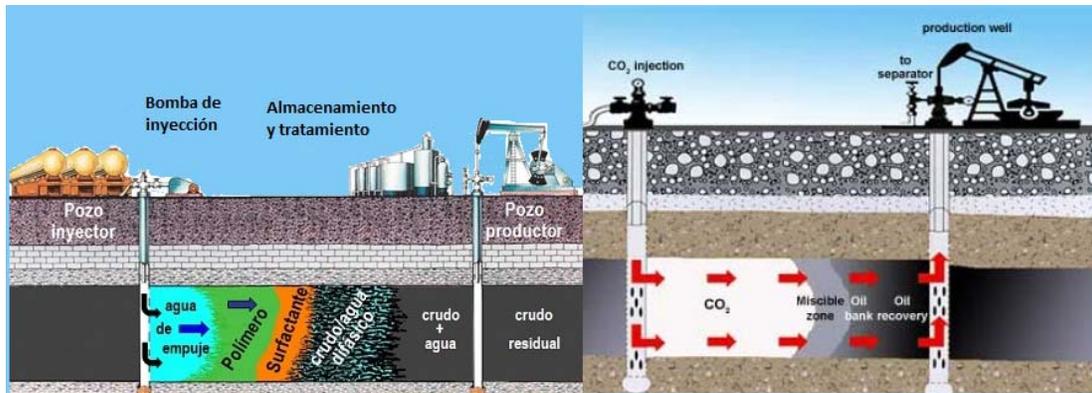


Fig. 4.2.-Después de las recuperaciones primarias y secundarias, el yacimiento contiene todavía 60-80% del crudo original en sitio, donde con métodos para la recuperación ya sea gas, agua y químicos obtener ese aceite residual.^{4.2}

El hidrocarburo que se encuentra en la roca del yacimiento(aceite, gas, y agua), es dependiendo del tipo yacimiento, puede ser yacimientos de gas seco, gas condensados, de aceites y pesados, estos fluidos que se inyectan se distribuyen de manera diferente sobre la estructura de la formación de la roca porosa, la composición de los fluidos son también diferente de un yacimiento a otro, tanto para la fase acuosa (salmuera hecha de diferentes minerales en forma de iones), que afectan a la tensión superficial y la fase oleosa (fluidos compuestos de moléculas muy ligeras hasta tipos sólidos como asfáltenos), que afectan la mojabilidad.⁵⁰

Sin embargo, cada una de estas técnicas ha sido obstaculizada ya sea por su costo elevado o en algún caso por la recuperación de aceite ineficiente. Estas técnicas se han ocupado desde hace años para la recuperación mejorada para aumentar la producción en los pozos, pero la idea de combinar estas prácticas con la nanotecnología pueden ser la llave para muchísimas mejoras en lo pertinente a la producción de hidrocarburo, la cual puede aumentar debido a la implementación de estos métodos, ya que estos se podrían constituir una manera más económica y sencilla de producir mayor cantidad de petróleo en menor tiempo.

Las aplicaciones de nanopartículas se han reportado en muchas disciplinas, estas nanopartículas pueden modificar la reología, la movilidad, mojabilidad y otras propiedades de los fluidos y por lo tanto se necesitan investigaciones exhaustivas. Estas

nanopartículas están diseñados de tal manera que no se adhieran a la superficie de la roca o al hidrocarburo y se muevan más rápidos que los trazadores químicos tradicionales. Con esta tecnología a dimensiones moleculares, nos han cambiado nuestros puntos de vista en muchos aspectos científicos, ha demostrado nuevas métodos para resolver viejos problemas que se han quedado sin resolver con tecnologías anteriores. Como resultados de nuevas propiedades y la introducción de los fenómenos especiales que ocurren con estas dimensiones de tamaño, estos materiales encuentran un potencial considerable para hacer frente a estos desafíos que parecen lejos de alcance a través de la tecnología a nano-escalas.

Estos nanoagentes tienen la función de ajustar la viscosidad del fluido inyectado para poder desplazar el aceite, ya sea con Dióxido de carbono [CO_2], surfactantes, etc... La adicción de nanopartículas se podrá ajustar la viscosidad del fluido inyector a un nivel óptimo. Estudios que se han hecho en laboratorios mostraron que la viscosidad del CO_2 combinado con nanopartículas al 1% de CuO y una cantidad pequeña de dispersantes ver Fig.4.3, es mayor que si fuera una CO_2 convencional, esto hace que al combinar las nanopartículas con el dispersantes en un fluidos de conducción de CO_2 , se tendrá una mejor movilidad y una eficiencia de barridos en el yacimientos para tener una mejor EOR.



Fig.4.3.-Surfactante en suspensión después de un tiempo con una temperatura de 800F, la muestra de la izquierda es un fluido con nanopartícula y el otro es sin nanopartículas.^{4.3}

4.2.1 Efecto del Tamaño de las Nanopartículas.

Hay dos tipos de mecanismos principales de atrapamiento de aceite en un yacimiento, ver Fig.4.4, una es el atrapamiento macroscópica donde la matriz está saturado de aceite

y las capas excluidas en gran parte debido a la estratificación y las fracturas, el segundo tipo de mecanismo es que permanece en la escala de poros de la roca más conocido como atrapamiento microscópica esto es debido a la heterogeneidad de la red de poros-garganta, mojabilidad y tensión interfacial conocido como la eficiencia del desplazamiento microscópica. Los varios tipos de heterogeneidades más conocidos son:⁴³

- Heterogeneidad macroscópica de la roca; estratificación y formaciones fracturadas.
- Heterogeneidad microscópica en el cuerpo de la formación rocosa; red de poros garganta.
- Heterogeneidades superficiales de energía en el límite roca-fluido; conocidas como mojabilidad.
- Heterogeneidad de la tensión en la interfaces liquido-liquido.
- Heterogeneidad en las propiedades de los fluidos, tales como diferencia de viscosidad y la densidad (relación de movilidad).
- Diferencia de fuerzas durante la imbibición / procesos de drenaje (histéresis).

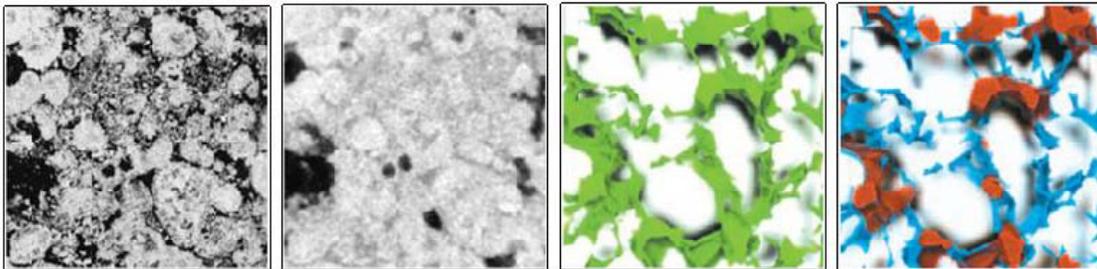


Fig. 4.4.-Imágenes de atrapamiento de aceite dentro de un carbonato con un microscopio electrónico de barrido (MEB), y rayos X de fotoelectrones de espectroscopia (XPS).^{4.4}

El efecto del tamaño de las nanopartículas es muy importante, como se sabe los diámetros de los poros de los yacimientos, normalmente son del orden de un micrómetro, ver Fig.4.5, por lo que las nanopartículas no solo entran en los poros de la yacimientos, sino que muestran un efecto de penetración excitado por energía térmica y dinámica en consecuencia de los cambios del depósito.⁴⁵ Como resultado de esto, la difusividad de los materiales en los espacios de la roca mejoran, las interfaces de los fluidos en los canales de micro-escala se modifican, la fuerza de cohesiva del petróleo crudo en la roca se reduce, la mojabilidad cambia, algunos daños a causa de las partículas no deseados y el

movimiento de líquido son tratados y finalmente la eficiencia de recuperación de aceite se incrementa.

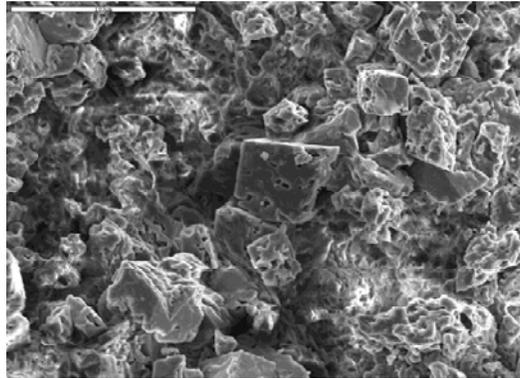


Fig.4.5.-Imagen con el microscopio electrónico (SEM) se analiza como puede ser el barrido de la roca del yacimiento.^{4,5}

Las nanopartículas pueden aumentar drásticamente la recuperación de aceite, mejorando las propiedades de los fluidos inyectados (mejorando la viscosidad, densidad, la reducción de la tensión superficial, mejorar las emulsiones y la conductividad térmicas) y también las propiedades del líquido cuando hay interacción con la roca (alteración en la mojabilidad y el coeficiente de transferencia de calor), esto debido a las fuerzas elevadas en la superficie, estas nanopartículas como la de van der Waals y las fuerzas electroestáticas, podrán controlar eficazmente la formación de la migración de los finos, lo que es un problema evidente, porque obstruye la garganta del medio porosos debido al desplazamiento de las partículas finas de las arenas superficiales.⁴³

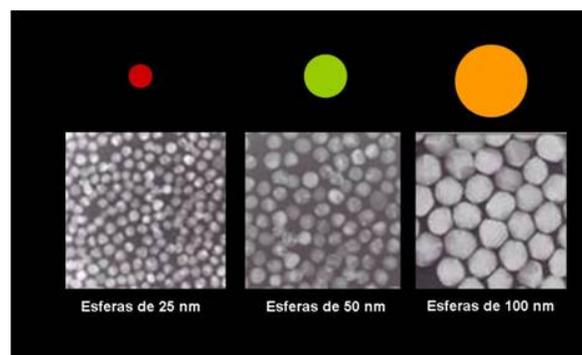


Fig.4.6.-Imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de transmisión de la nanopartícula de oro a diferentes tamaños.^{4,6}

Estas partículas se pueden clasificar el tamaño en términos del diámetros, las partículas gruesas tiene un tamaño de 10000 -2500 nm, las partículas finas tienen un rango entre 2500-100 nm, las nanopartículas (partículas ultra fina) cubren el rango de entre 100-1 nm y otra nanopartícula llamada nanoclusters tiene una dimensión de entre 10 y 1 nm con una distribución de tamaño estrecha.⁴⁵ Por ejemplo la nanopartículas de oro, sus propiedades son muy distintos a las del oro que conocemos, pueden ser rojas, naranjas o hasta verdosas, ver Fig.4.6, dependiendo de su tamaño, cambiando también sus otras propiedades físicas y químicas. En particular, las nanopartículas de oro son muy reactivas y se piensa que se pueden usar como catalizadores en reacciones químicas importantes como la oxidación del monóxido de carbono (CO).

Las partículas que están presentes en esta región de contacto de tres fases tienden a formar una estructura en forma de cuña, ver Fig.4.7, esta partículas presente en el líquido a granel ejercen presión, forzando a las partículas en las regiones confinada hacia adelante, impartiendo la fuerza de presión disociado, la fuerza impartida por una sola partícula es extremadamente débil, pero cuando la masa de pequeñas partículas están presentes, referido como la fracción de volumen de partícula la fuerza puede ser más de 7.3 [psi] en el vértice.⁴⁵ Tanto el tamaño y la densidad de la partícula asociada afectan a estas fuerzas, cuando menor sea el tamaño de la partícula, mayor es la densidad de carga, y también es mayor la repulsión electrostática, entre las partículas, como cualquier sistema coloidal, el tamaño, la temperatura, la salinidad del fluido portador y la características de la superficie de sustrato también afecta a la magnitud de la fuerza disociado.⁴⁷

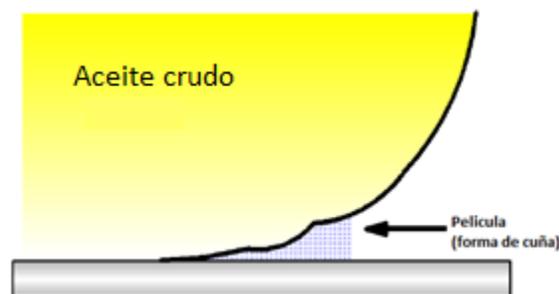


Fig. 4.7.-Esto ilustra el efecto de cuña, las partículas pequeñas son empujadas debajo de la fase discontinua, la repulsión electrostática de las partículas en el líquido a granel siguen impulsando a las partículas.^{4.7}

Mejorando las propiedades de los fluidos inyectados se podrán solucionar problemas como las emulsiones que es otra manera de aumentar la viscosidad, pero muchos de estos

métodos para estabilizar las emulsiones son caras o pocos adecuados para aplicarlo a gran escala. Sin embargo al estabiliza las emulsiones con nanopartículas se podrán soportar altas temperaturas durante periodos prolongados, permitiendo taponear la zona de alta permeabilidad y así obligaría el fluido inyectado a penetrar en las otras zonas y tener un buen EOR.⁴⁷ Estudios han demostrado que las emulsiones a base de nanopartículas pueden ser muy estables, y podría formar una capa en el interfaz de la gota, además se tiene el potencial para superar muchas limitaciones encontradas con emulsiones estabilizados por solidos coloidales o surfactantes, tales como la inestabilidad a alta temperatura y a condiciones de alta salinidad. Estas emulsiones también se podrán utilizar como un buen método para el secuestro de CO_2 , ya que puede permanecer estable bajo las condiciones de yacimiento.⁴⁵

4.2.2 Propagación de las Nanopartículas a Través de Medios Porosos.

Estudios en laboratorios han considerado que el flujo de nanopartículas a través de diferentes medios porosos, los factores que afectan la movilización de las nanopartículas puede ser como la carga del suelo o partícula, el tipo de inyección, el tamaño de partícula y los iones o moléculas presentes en el sistema.

Se observó que es menor la retención en la superficie con una carga negativa debido a las grandes fuerzas de repulsión cargando negativamente las nanopartículas, al inyectar una nanopartícula de hierro en el medio poroso, los resultados dieron una menor negatividad de retención, esto se debe a las grandes fuerzas de repulsión con las nanopartículas, pero la retención no solo depende de la superficie si no también tiene que ver las diferente cargas de las partículas, y el tamaño de las partículas inyectadas. Científicos como Pelley y Tufenkji mostraron que entre mayor es la partículas mayor es la retención en la columna, por otra parte al inyectar nanopartículas de fullerenos [C_{60}], mostraron una menor retención mediante el aumento de la velocidad de inyección debido a partículas que tiene menos contacto con la arena a mayor velocidad.

También la retención de las nanopartículas también puede cambiar dependiendo del carácter hidrófobo o hidrófilo de las moléculas presentes en el sistema, ver Fig.4.8, también pueden cambiar debido a los iones presentes, porque estos pueden modificar las fuerzas de atracción entre la superficie y las nanopartículas, las fuerzas iónica no solo reducen la carga de superficie, sino también aumenta la retención de las nanopartículas mediante el incremento de la fuerza de van de Waals.

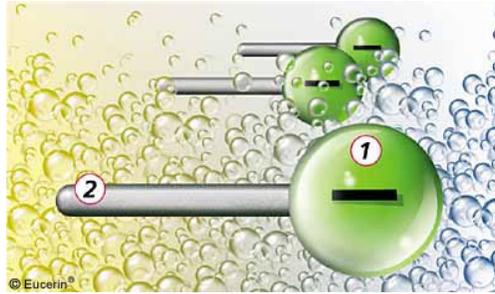


Fig. 4.8.-Representación esquemático de los surfactantes, (1) parte hidrófila, (2) parte lipófila (hidrófoba).^{4,8}

La movilización de las nanopartículas depende fuertemente de la viscosidad del fluido dispersante, lo que hace que aumente la estabilidad de la dispersión, en algunos experimentos que se han hecho se observó que la viscosidad importa mucho para poder desplazar estas partículas a través del medio poroso, el potencial de transporte de las nanopartículas se ha mejorado mediante la dispersión con polímeros dispersando las nanopartículas (20-200 nm), mostraron que las funciones químicas de la superficie de las partículas pueden mejorar la estabilidad de la dispersión y por lo tanto la reducción de la floculación, otra tipo de movilidad es dispersándolos en una concentración mayor a la normal.

La movilización de nanopartículas mejoran constantemente, entre varias es inyectar una concentración de nanopartículas a través de la roca, y no solamente el tamaño de la partícula permite un paso fácil a través del medio poroso, se debe de tener en cuenta las repulsiones entre las partículas y las paredes de los poros, sin embargo, los métodos y condiciones utilizadas para preparar la suspensión de nanopartículas todavía puede influir fuertemente la movilidad de las partículas y las características del tamaño y de la carga de las partículas.

4.2.3 Migración de Finos.

El daño a la formación debido a la migración fina, es uno de los efectos secundarios destructivos de algunas técnicas de recuperación que puede tener una solución desde un punto de vista nanotecnológico, donde este efecto esta en equilibrio con los fluidos que están en los poros, estas partículas comienzan a fluir cuando el estado de equilibrio es alterado por agentes de algún método de EOR, donde pueden provocar la reducción de la permeabilidad en el medio poroso, ver Fig.4.9.



Bola de crista fresca

Tratamiento de microsfera de cristal con nanoparticulas.

Unidad fina tratada con crital

Fig. 4.9.-Imágenes con el SEM de bolas de cristales recubiertas con nanopartículas de MgO con finos absorbidos.^{4,9}

Diferentes soluciones han surgidos para prevenir el desprendimiento de finos desde la superficie, tales como arcilla, polímeros y resinas, con esta tecnología los nanofluidos que contiene nanopartículas de óxido de metal puede ser la solución de evitar una migración.

4.3 Procesos de EOR.

Los procesos para un método de EOR bien conocidos son; química, térmica, procesos microbianos, así como la inyección de gas, cualquier de estos proceso tienden a recuperar el aceite más atrapados en el depósito a través de diferente mecanismos, tales como la reducción de tensión interfacial (IFT), alteración en la mojabilidad, taponamiento selectivo, viscosidad y los cambios de densidad, así como mecanismos de incorporación de nuevas unidades en el yacimiento, tales como el drenaje por gravedad etc. La tabla 2 muestra los principales procesos de EOR, los mecanismos involucrados y los retos asociados con cada uno en una escala microscópica.⁴⁵

Tabla 2.-Principales procesos de EOR, algunos mecanismos involucrados y los retos que se tiene que hacer para una escala microscopica.

Método	Mecanismo	Reto
Térmica, inyección de vapor, estimulación con vapor, combustión en in-situ, SAGD (segregación gravitacional asistida por vapor).	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de viscosidad • Reducción de IFT • Destilación por vapor • Expansión por vapor 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos altos de energía. • Baja conductividad térmica de las rocas y los fluidos. • Fugas de calor hacia las capas no deseadas.

		<ul style="list-style-type: none"> • Menor degradación térmica. • Pozos dañados debido a las altas temperaturas iniciales. • Perdida de calor del generador térmico al depósito.
Química, surfactante alcalina, inundación de polímeros.	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de IFT • Alteración de la mojabilidad • Control de la movilidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos por cantidades en exceso • Su baja efectividad en los cambios TIF y de la viscosidad debido a las condiciones del depósito • Daños debido a la incompatibilidad • Una desfavorable relación de movilidad debido a la viscosidad • Difusión lenta en la estructura de los poros • Desconocidos mecanismos para la alteración de la mojabilidad.
Inyección de gas, Inyección de gas de HC, Inyección de CO ₂ , Inyección de aire.	<ul style="list-style-type: none"> • Manteniendo presión • Reducción de viscosidad • Expansión del aceite • Miscibilidad 	<ul style="list-style-type: none"> • En caso de CO₂, los materiales de resistencia a la corrosión son necesario • Efectos secundarios tales como la depositación de asfáltenos. • Tener alta MMP para inundaciones miscibles para tener una recuperación eficiente
MEOR; Bioproductos (Biosurfactante, inundación de Biopolímeros).	<ul style="list-style-type: none"> • Taponamiento selectivo • Biodegradación del aceite • Reducción de IFT • modificar la mojabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Mecanismos muy lento • Taponamiento no deseados • Reacciones indeseadas de bio (SRB) • Mecanismos desconocidos (la alteración de la mojabilidad) • Procesos de biodegradación lenta • Químicamente asistida de MEOR

Estos mecanismos implicados a tales procesos se clasifican en general en la masa, el calor y transferencia de energía cinética, termodinámico y los cambios de energía superficial, se realizan a escala molecular dentro de la estructura de los poros de micro-escala. Por lo que, la nanotecnología puede tener una solución a la mayoría de estos desafíos como:

4.3.1 Movimiento de la nano-escala en los medios porosos

Los retos más importantes en los procesos de recuperación es la transferencia de componentes inyectados en un medio poroso, como la garganta de los poros tapados pueden causar una baja permeabilidad y esto provoca un incremento en los costos de inyección, cómo se sabe los componentes de las nanopartículas son del orden de 100-500 nm, esto puede influir fácilmente en las estructuras porosas de la roca que es generalmente mayor que 10 micras. Inyecciones de polvos es la forma para poder inyectar nanopartículas en la formación de aceites saturados, con esto se podrá realizar varios cambios de las propiedades de los fluidos a los cambios interfaciales ya sea interface liquido-liquido o liquido – solido.⁴⁵

4.3.2 Áreas Superficiales Específica de la Nanopartícula.

La característica más notable, es la transferencia de materia, mejorada entre las fases y cambiando las propiedades de los fluidos con más facilidad y a un menor costo, tener una mejor homogeneidad en la distribución del medio poroso, mejorando la adsorción en la superficie de la roca para modificar la mojabilidad y cambiar la conductividad térmica de los fluidos en la roca.⁴⁵

4.3.3 Suministro de Agentes Inteligentes para EOR

La utilización de productos químicos en una mega-escala en los depósitos ha sido siempre la preocupación como la inyección con los aumentos de costos. En muchos casos, cantidades excesivas de soluciones químicas se utilizan para localizar las manchas de aceite que permanecen aislados de los depósitos para una EOR. Además, se puede taponar las capas en los depósitos para evitar que los líquidos no deseados sean producidos, se tendría una mejor eficiencia en la recuperación y se tendría un mejor rendimiento en las instalaciones de producción.

4.3.4 Nanofiltración en los Procesos de EOR

Además del uso de tecnología de filtración para la separación de fases eficientes en la superficie, esto sería más eficiente si se hace subterráneo en los límites del pozo para su separación en in-situ. Los ingenieros petroleros se esfuerzan en las últimas décadas para cortar el flujo de la fase deseada en el pozo, mejorando las condiciones de las

instalaciones de superficie y manteniendo las presiones de gas y agua en los depósitos como fuente de energía⁴⁵

4.3.5 Nanosensores

El tipo de fluido y la estructura de la roca han persuadido a los científicos en ofrecerles a los ingenieros de yacimientos a instalar sensores en los pozos para monitorear los regímenes de fluidos, la composición del fluido y las propiedades de los yacimientos, además hay varios tipos de herramienta que se utilizan en los pozos para la exploración, registros, prueba de roca y fluidos, así como escenarios para la explotación del yacimiento de una manera óptima para tener un mayor índice de producción y tener una mejor eficiencia de recuperación.⁴⁵ Todos los sensores de pozo y herramientas de control son demasiados grandes que requieren espacio extra para la preparación de ellos en la boca de pozo, por lo que difícilmente se puede monitorear, mas allá de la ubicación del pozo que es pequeño en comparación con el volumen del yacimiento. Utilizando nano sensores permitiría a los ingenieros la oportunidad de:

- Rastrear el aceite atrapado, la saturación, la ubicación con respecto a los espacios porosos y el tipo de fuerzas necesaria para su recuperación de EOR.
- Controlar las aperturas de la roca en una escala micro para tener los mapas digitales de la red de la garganta de los poros, para el modelado de inyección y el tipo de fluido.
- Evaluación de la heterogeneidad en el fondo, especial para depósitos vugular y fracturados.
- Verificación de las fronteras, contacto de los fluidos, la conectividad con yacimientos vecinos para esto sísmica 3D/4D de la formación, lo que mejorara la compresión para las actividades de EOR.
- Verificación del éxito de la técnica de recuperación si los hubiera, los recursos que han sido utilizados durante el proceso de EOR.
- La nanotecnología a través de sensores a nanoescala podrán ser utilizados para comprobar si lo que se ha empleado ha tenido éxito o no.

4.3.6 Nanoanálisis

Equipos de análisis disponibles en el campo de la nanotecnología para analizar los cambios en la superficie como, el Microscopio de fuerza Atómica (AFT), Rayos X foto espectroscopia (XRP), espectroscopia raman, herramientas de análisis como la

Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), micro y nano escáneres CT son herramientas útiles en la evaluación de la estructura del medio poroso, alteraciones de mojabilidad y muchas otras propiedades en este campo que lo que se necesita es una medición exacta nano escala que se hacen adentro del medio poroso y en la interface de líquido-líquido o líquido – sólido.⁴⁵

4.3.7 Asfáltenos.

Investigadores afirman que el petróleo es básicamente un nano-líquido, donde los asfáltenos son el elemento dominante, donde esto fluye en un entorno micro y con una frecuencia nanoscópica (medio poroso), de acuerdo con esto se puede decir que el aceite, las tecnologías de producción de gas, tratamiento de los yacimientos y los simuladores se pueden resolver con la nanotecnología, resultados de laboratorios han demostrado que la precipitación de asfáltenos como un efecto secundario de los procesos de EOR, sobre todo la inyección de gases miscibles, impiden la producción de aceite en los pozos.

Los asfáltenos afectan los procesos de EOR, mediante la alteración de la mojabilidad, los cambios de viscosidad o la reducción de la permeabilidad, la precipitación de estos factores y algunas propiedades de los fluidos como presión, temperatura, relación de dilución y al inyectar fluidos con pesos moleculares, lo que puede ocasionar daños a la formación y taponamiento in situ, de pozos y equipos, tanto accesorios de superficie, bloqueo de línea de transporte y taponamientos de columnas de separación y desactivación de catalizadores.

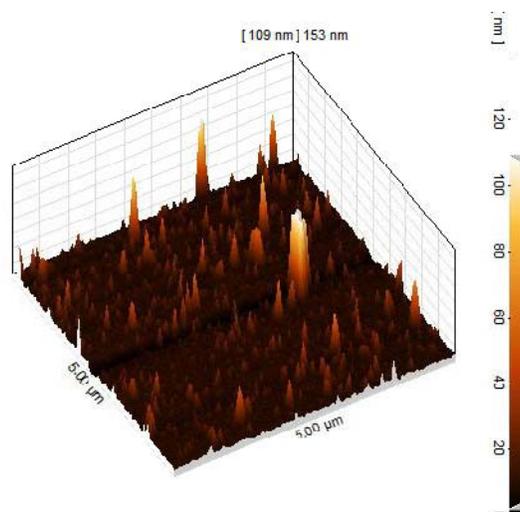


Fig.4.10.-Con estudios de AFM se puede observar cómo está el comportamiento de un depósito con asfáltenos en la superficie.^{4.10}

Los estudios visuales con el Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) y Microscopía de Barrido Electrónico (SEM) con la descripción de múltiples fractales de asfáltenos en la superficie del depósito, ver Fig. 4.10, que se realizó para investigar el efecto de la estructura de los asfáltenos alterando la mojabilidad. Algunos estudios se centra en la existencia de diversas nanoestructura de asfáltenos en el aceite y los fundamentos de la mecánica cuántica y termodinámica, para poder predecir la energía potencial y sus fuerzas intermoleculares, todo esto para poder establecer la relación entre las propiedades y el comportamiento del aceite.

4.4 Complejidad de la EOR.

Como sabemos los procesos de EOR son considerablemente más complejas como se observado en la teoría y los programas de simulaciones que se emplean para describir el comportamiento, estos procesos son dependiente de la escala de nanoescala a través de la micro.

4.4.1 Como Impacta la Nanoescala en una Escala Macro.

Como se sabe la mojabilidad en la roca del yacimiento juega un papel importante para tener una buena eficiencia en los procesos de recuperación, la mojabilidad afecta tanto la distribución del hidrocarburo y las fases acuosas dentro de la matriz de la roca y el desplazamiento dinámico, así cuando los parámetros petrofísicos macroscópicos tales como la permeabilidad relativa y la presión capilar, son obtenidos por el aceite crudo, salmueras y sistema de roca, las formas de estos son muy distintos para diferentes condiciones de mojabilidad.⁴⁵

La mojabilidad es fundamental para el concepto de nanotecnología geométrica, el papel se puede llevar a cabo en las superficies de las fuerzas intermoleculares, que actúan sobre un intervalo corto. A diferencia de las fuerzas de fluidos a granel mantenidas por las fuerzas capilares, estas películas no son menores que 100nm de espesor y muchas veces son más pequeños de 10-100nm. La estabilidad de la película de agua depende del ph, la composición de la salmuera y presión capilar.⁴⁴ Los componentes solubles en agua tales como jabones y asfáltenos, pueden alterar la carga química en las interfaces de líquido/líquido o solido/liquido, este puede desestabilizar las películas delgadas de agua, las películas estables del agua son el 1% o menor del volumen del poro. Sin embargo, la importancia de las moléculas exteriores, del agua absorbida o los componentes del aceite crudo, las propiedades de mojabilidad en la superficie son críticos. La estabilidad depende

del balance de las fuerzas atractivas de Van der Waals y las fuerzas repulsivas eléctricas, las fuerzas de hidratación también pueden jugar un papel.

Los ángulos de contacto del aceite crudo en la superficie de los minerales depende mucho de la estabilidad y propiedades de la película del agua entre el aceite y el sólidos, la humectación en la superficie de la roca del yacimiento, depende de la adsorción de los componentes del aceite crudo. En la nano escala, la forma de los poros, la mineralogía, la rugosidad, la distribución del agua y el comportamiento de la película en la superficie dominan la recuperación del aceite. Debido a que las superficies son pequeñas, las mediciones pueden verse seriamente afectada por procedimientos de equilibrio y los contaminantes que afectan el comportamiento de adsorción. Estos problemas afectan el efecto de desplazamiento de la mojabilidad, lo que hace que el modelo afecte el comportamiento de la recuperación.⁴⁴

La mojabilidad mixta y mojabilidad del aceite del sistema nunca estarán perdidos, el aceite produce el desplazamiento, la eficiencia de una función continua de volumen inyectado en los poros, la gravedad juega un papel importante en los movimientos de los fluidos del yacimientos tanto mojado y la fase no mojante. Los procesos que se hacen en los laboratorios, el valor de la saturación del aceite residual calculado a partir de balance de materia era a menudo una cuestión.

Los procesos de EOR depende de una nano escala, tomando en cuenta una escala micro y macro, a pesar de la recuperación de aceite, se necesita superar las fuerzas capilares a condiciones de frontera (geometría de los poros y mojabilidad) y los efectos de la inestabilidad de la interfaces asociadas que dominan el desplazamiento del aceite en una escala micro. El atrapamiento del aceite en los sistemas húmedos de agua, sucede porque la viscosidad/ fuerzas de empuje actúan a un nivel local y esto no pueden superar las fuerzas capilares en pequeñas gargantas de poros de la roca que hay cunado la tensión interfacial es alta. Se debe tener claro que el desplazamiento del aceite puede ser crítico, la EOR mediante métodos química y la mojabilidad son más complejos que tradicionalmente se dan a entender y modelar. El rol de las fuerzas de Marangoni (fuerzas de tensión y viscosas), en los métodos de EOR químicos puede ser la clave de esos problemas.⁴⁴

4.4.2 Visualización de Procesos.

La visualización del fluido es un valioso panorama para comprender y modelar el comportamiento complejo a nivel de poro, para poder evitar las múltiples causas que

dan a una gran variedad de efectos. La complejidad de las interacciones en los medios poroso considerando un modelo micro se puede ilustrar en la Tabla 3.⁴⁴

Tabla 3.- Interacciones y fuerzas en la recuperación del aceite en un EOR.

Condiciones externas	Interacción	Fuerza
Condiciones iniciales <ul style="list-style-type: none"> Distribución y saturación gas-aceite-agua 	Estructura del poro <ul style="list-style-type: none"> Porosidad Permeabilidad Geometría Heterogeneidad Anisotropía Mineralogía 	Coulombic Disociado
Condición de aplicación <ul style="list-style-type: none"> Gradiente de presión y tasa de flujo Inyección de agua fría Variación de salinidad 	Interacción de liquido-solido <ul style="list-style-type: none"> Mojabilidad Adsorción Configuraciones de fluidos Películas delgadas Propagación y despliegues 	Marangoni Capilaridad
Historia del yacimiento <ul style="list-style-type: none"> Secuencia de desplazamiento del fluido, presión y variaciones de temperatura 	Interaccione liquido-liquido <ul style="list-style-type: none"> Relación de viscosidad Tensión interfacial Transferencia de masas Interfacial y la concentración del gradiente coalescencia 	Viscosidad Gravedad

La aplicación exitosa de una proceso EOR químico en el campo depende de la comprensión de cómo el proceso de EOR a una escala pueda resolver los problemas que se tienen. Las herramientas claves para la determinación de una escala nano y micro, para los mecanismo de desplazamiento del aceite, son la absorción, el potencial químico, microscópico de fuerza atómica (AFM), resonancia magnética nuclear (RMN), micro modelos para poder saber cómo se comportara la escala.⁴⁴

Las observaciones indican que muchas hipótesis, descripciones y supuestos mecanismos previamente aceptados son demasiados simplistas, los procesos físicos deben ser entendidos en una escala menor a la que es requerida. Esto ocurre para ciertos procesos de EOR donde los efectos interfaciales dinámicos y no equilibrados afectan para la

movilización del aceite residual. Las funciones de mojabilidad y la propagación del fluido son características fundamentales para el flujo multifásico en el medio poroso y frecuentemente es olvidado con los principios del proceso.⁴⁴

Los micro modelos pueden emplear sistemas binarios, ver Fig.4.11, con temperaturas bajas, una solubilidad crítica para estudios múltiples, en el contacto de procesos miscibles, donde la sustancia química se disuelve en las interfaces aceite/agua al primer contacto o después de un periodo de transferencia de masa que implica la difusión inicial y la inestabilidad interfacial (efecto Marangoni), seguidos por efectos de solubilidad, coalescencia y otros, incluyendo una espontánea emulsificación de los reactivos de EOR.

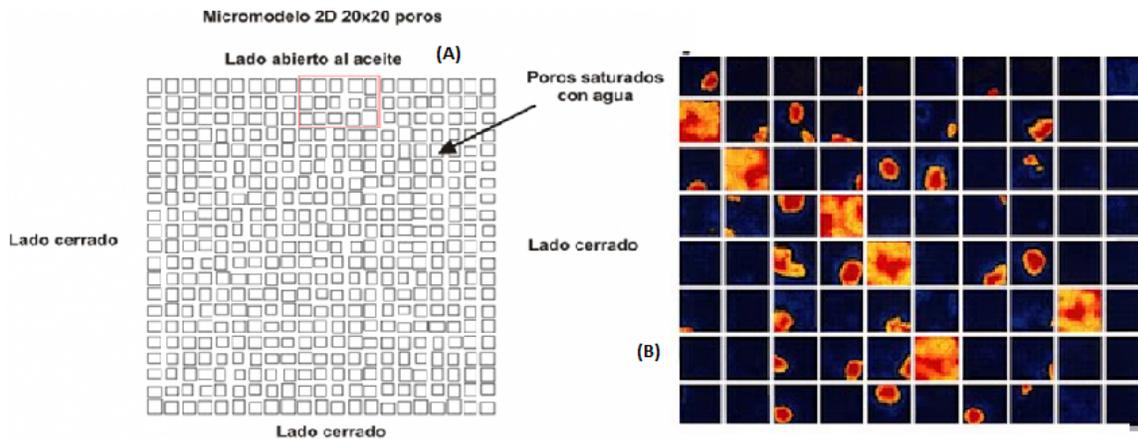


Fig. 4.11.-Se puede ver como se manejaría un sistema binario para poder hacer un micro modelo, (A) nos dice cómo puede fluir el flujo,^{4,11} y en (B) se puede ver en un modelo sísmico.

Preguntas claves que se pueden abordar a través de un micro modelo son:

- Como se distribuye los fluidos en el espacio poroso (función de la mojabilidad, propagación de fluido etc.).
- Como se mueve el aceite dentro de la estructura de los poros en el pozo (movilización).
- Por qué y cuándo detener los fluidos en movimiento (saturación residual, el atrapamiento en la fase, etc.).
- Puede ser la fase atrapada removida (ocupando la recuperación de aceite mejorado).

Para poder tener una buena caracterización de los mecanismos de desplazamiento del aceite es visualizar que proceso es mejor, los estudios que involucra la microscopía de

fuerza atómica (AFM), y los micro modelos son importante en la investigación de los siguientes mecanismos: la transferencia de masa, el roll-up, coalescencia, la emulsificación, la inestabilidad interfacial, el adelgazamiento de película y los procesos de transporte.⁴⁵

4.5 Aplicación de Nanofiltración en Yacimientos.

El procesos de separación de nanofiltración pueden ser útil en la EOR desde dos puntos de vista; en primer lugar, la purificación y desalinización del agua de inyección utilizado para la recuperación de aceite secundario o terciaria, la inyección de agua es principalmente el agua de producción de los pozos, tanto por razones económicas y también como una forma para la eliminación de agua, lo cual se debe cumplir con ciertos requisitos. Con reservorios de permeabilidad muy baja, los enfoques convencionales de las inundaciones de agua no pueden proporcionar suficiente factores de recuperación, debido a las fuertes fuerzas capilares sobre los estrechos canales de poros. Por lo tanto el nivel de impurezas del agua inyectada es una de las preocupaciones más importantes para la recuperación de aceite, significativo en bajos depósitos permeables, además la inyección de agua debe tener una concentración iónica similar a la del agua del depósito de aceite. Además la inyección de agua que contiene oxígeno y las bacterias pueden ser una fuente importante en la acidificación del depósito, reduciendo el valor de los hidrocarburos producidos y requiere un equipo de producción caro para soportar la naturaleza corrosiva de los fluidos producidos. Los contaminantes típicos que necesitan ser eliminados del agua de inyección son hidrocarburos, sólidos y compuestos tales como el sulfato.⁴⁵

En ambientes marinos, el agua de mar es a menudo la fuente preferida de agua de inyección, que típicamente contiene 2.712mg de iones de sulfato y la formación de gUA contiene cantidades variables de bario que puede reaccionar con los iones de sulfato inyectados del agua de mar resultando en la escala de sulfato de bario, esta incompatibilidad típica, provoca problemas severos inusual en la formación de calcio, estroncio o bario.⁴⁵

Una solución puede ser la eliminación de los iones de sulfato del agua de mar antes de la inyección, lo que nos ayudaría a prevenir la acidificación y teniendo un buen control de las bacterias reductoras de sulfato, que pueden ser alcanzadas por la filtración de las partículas de hasta el rango nanométrico. Las membranas de los nanofiltros pueden tener diámetros de poros inferiores a 2 nm, lo que puede ser de gran ayuda en este sentido. Las membranas de los nanofiltros son capaces de rechazar altamente anones divalentes (por

ejemplo sulfato) mientras que conservan una gran parte de los aniones monovalentes (cloruro), del agua de mar. Los nanofiltros es por lo tanto una tecnología potencial para proporcionar agua de mar casi libre de sulfato para las operaciones de los campos petrolíferos de inyección de agua.

La segunda sección de interés puede ser en el campo del tratamiento del agua producida, ver Fig. 4.12, los contaminantes deben ser eliminados para permitir la reutilización del agua de producción o disposición para el que hay varias opciones disponibles; eliminar de la superficie de mar en los estanques de evaporización o limitar las reglas del medio ambiente locales, la inyección en pozos de disposición, reinyección de mantenimiento de presión o la reutilización para el riesgo o como aguas de proceso industriales.

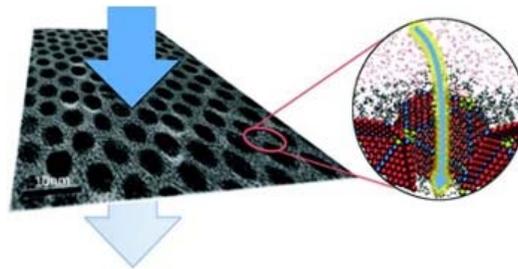


Fig.4.12.-Una membrana de separación es un componente clave en los sistemas de filtrado para poder reutilizada y no haya presencia de algún químico que pueda formar otra casa.^{4.12}

El agua producida se trata convencionalmente a través de diferentes métodos físicos, químicos y biológicos, sin embargo, las tecnologías actuales no pueden eliminar pequeñas partículas de aceite en suspensión y elementos disueltos, además muchos tratamientos químicos son costosos y puede producir lodos peligrosos. Con altos concentrados de sal y una gran variaciones de afluencia, donde es conveniente incorporar un tratamiento físico, por ejemplo, membranas para filtrar la afluencia final, donde todo dependerá de la calidad de agua producida y los requisitos de calidad del agua para los usos y los beneficios considerados, donde este proceso puede ser un proceso viable para el tratamiento de agua producida,⁴⁵ ver Fig.4.13.

El nanofiltrado permeado es ideal en este caso, ya que está cerca de la composición mineral, misma del fondo de agua producida pero eliminando toda la dureza que se encuentre en ella, lo que reduce en gran medida el riesgo de precipitación y taponamientos de la formación. La principal obstaculización es el despliegue de la tecnología de desalinización para la purificación del agua producida, lo que ha provocado un alto costo operativo asociado, el pre tratamiento y la sustitución de la membrana son

los principales factores de incremento en el costo de la operación, limitando la eficiencia económica de la tecnología de membrana para la desalinización de agua producida. ⁴⁵

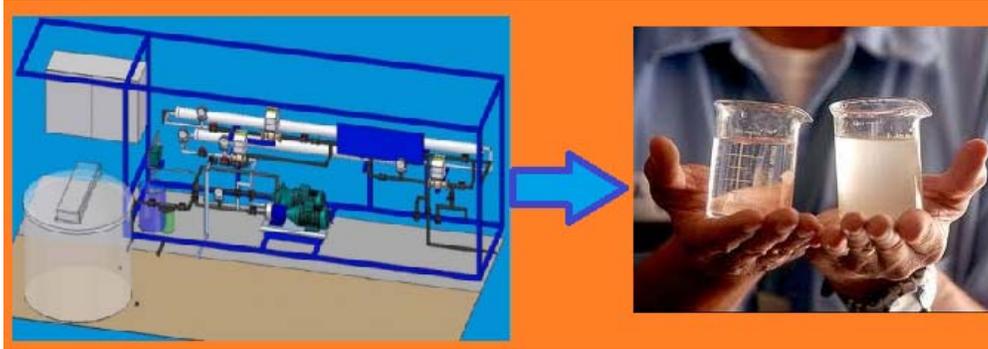


Fig.4.13.-Al instalar un sistema de membrana al sistema de inyección recolección de agua se podrá purificar el agua obtenida del pozo y eliminando todo los concentrados de sal y algún otra sustancia.^{4.13}

La tecnología de nanofiltrado también puede ayudar al aceite producido a ser separados de agentes de EOR en la superficie, donde este proceso es económicamente importante para:

- Aumenta la eficiencia de los agentes de aceite en la EOR, una buena separación como en la mayoría de los casos, el líquido producido en las instalaciones de superficie es un micro/nano fase de emulsión.
- En muchos casos los materiales utilizados en los campos se tiene que separar debido a la posibilidad de su reinyección y reducir el riesgo de los problemas ambientales por la eliminación.

4.5.1 Nanorobots.

Nanorobots microscópicos pueden sonar tan futurista como platillos voladores y teletransportación, pero la investigación ya está en marcha en Arabia Saudita en la empresa EXPEC SaudiAramco para poner la nanotecnología en los yacimientos de petróleo. Como se sabe el aceite se en cuenta atrapada en los poros diminutos de la roca y viajan entre los poros a través de pasadizos pequeños llamados “garganta de poro”, ver Fig.4.14, que incluso son más pequeños que los poros. Así que cualquier cosa que se

mueve a través del depósito tiene que ser más pequeño aún, tiene que ser en la nanoescala.⁴⁹

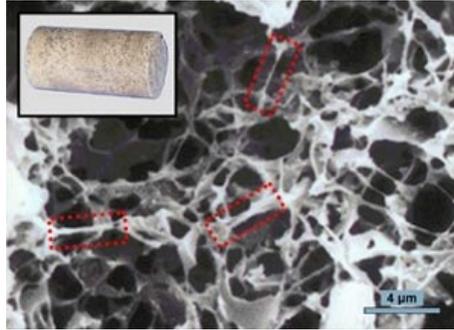


Fig.4.14.-La roca tiene aceite en los poros diminutos conectados por gargantas de poros, delineados en rojo, que son incluso más pequeño que los poros. Nanorobots deben ser suficientemente pequeñas para pasar a través de las gargantas de poros y liberar el aceite.^{4.14}

Los nanorobots son dispositivos que serán utilizados para el propósito de poder recuperara el aceite remanente del yacimiento y tener un EOR exitoso, Ellos tiene un diámetro de aproximadamente 0,5 a 3 micras y se construye a partir de piezas con dimensiones en el intervalo de 1 a 100 nanómetros, ver Fig.4.15. El elemento principal utilizado será de carbono en forma de diamante / fullerenos nanocompuestos a causa de la inercia y la resistencia química de estas formas. Otros elementos ligeros tales como el oxígeno y el nitrógeno se puede utilizar para fines especiales.

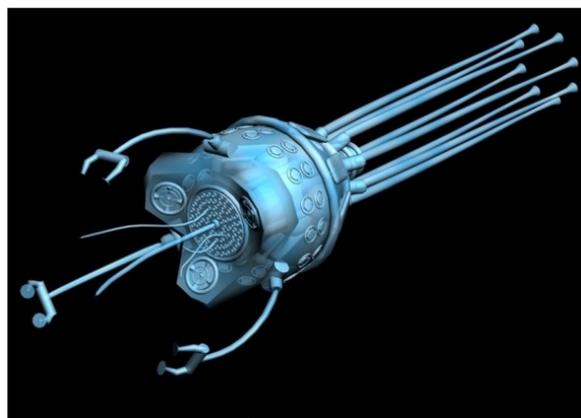


Fig.4.15.-Nano robots, aun se encuentra en fase de prueba para condiciones de un yacimiento.^{4.15}

Empresa como EXPEC SaudiAramcoAdvancedResearch Center (ARC EXPEC), con su concepto de Resbotspequeños nanorobots menor a una centésima de metro, ver Fig.4.16, el ancho de un cabello humano, donde algún día podrá ser desplegado como un ejército en embalses mediante la inyección de agua. Durante su viaje, se analizará la presión del yacimiento, la temperatura y el tipo de fluido, y almacenar esa información en la memoria a bordo.⁴⁹



Fig.4.16.- Nanorobots menor de 1/100 th el ancho de un cabello humano podrán algún día ser desplegado como un ejército en los embalses a través del agua inyectada.^{4.16}

Donde un numero de ellos se podrán recuperar en los pozos de producción para poder descargar toda la información recolectada. Lo que nos ayudara a tener una mejor información del depósito, y poder extraer más del 90% del aceite que se queda en los poros atrapado. Estos nanorobots serán dependientes de la distribución del tamaño de la garganta del poro.⁴⁹

4.6 Aplicación de la Nanotecnología en un caso de EOR.

Este caso está construido a partir de una serie de historias sobre un terreno con el fin de ilustrar los siguientes puntos; En primer lugar, se ilustra el concepto de desviación del flujo en profundidad como un enfoque de recuperación asistida por el mismo aceite, este enfoque esta basa en la química, la geomecánica, el fluido y la interrelación de la nanotecnología. En segundo lugar, demostrar el análisis del campo Q en la aplicación creativa e innovadora de la nanotecnología en la EOR.⁴⁴

4.6.1 El problema

Para poder seleccionar un proceso de EOR resulta particularmente difícil seleccionar el proceso apropiado, porque las propiedades del yacimiento no se prestan para aplicar cualquier técnica, en la siguiente Tabla. 4 se muestra las propiedades de un campo Z, donde se puede ver que la aplicación de un proceso químico, térmico o técnicas de EOR miscibles, presentan mayores problemas según la evaluación de diversos criterios de selección tradicional.

Tabla 4.- Propiedades del campo Z y los posibles procesos de EOR.

Propiedades	No	Surfactante s A	CO ₂ B	Baja salinidad C	Polímeros D	Nuevo EOR E	Térmica F
Impacto ambiental	1	0	1	0	0	0	0
Baja viscosidad de aceite	2	1	0	1	0	0	0
Baja permeabilidad	3	0	0	0	0	1	0
Media-alta temperatura	4	1	0	0	0	0	0
Alta salinidad /dureza	5	0	0	0	0	1	0
Mayor cementación carb.	6	0	1	0	0	0	1
Gravedad de aceite alta	7	1	0	0	0	0	0
Espacios grandes	8	0	0	0	0	1	0
Mala definición geológica	9	0	0	1	1	0	1
Disponibilidad de CO2	10	0	1	0	0	0	0
Alto contenido de arcilla	11	0	0	0	0	1	0
Capas del deposito	12	0	0	0	1	0	0
Extensas fracturas térmicas	13	0	0	0	0	1	0
baja sal en salmuera	14	1	0	1	0	0	0
Alta heterogeneidad	15	0	0	0	1	0	0
Presión moderada	16	0	0	0	0	0	1

En esta tabla se evalúa el campo Z en términos de los cuales se determinan la mejor técnica apropiada de un método EOR.⁴⁴ Se puede representar las técnicas y las

características del campo como columnas y filas en forma de una matriz, donde se ve como cada elemento característico del campo está relacionada con los diferentes enfoques de EOR, esta característica del campo está definido con la finalidad de especificar qué proceso se puede ocupar, donde podemos representar a cada técnica de EOR como una figura geométrica llamada simplex, donde se va a representar un método de EOR aplicando surfactantes, con las características de la tabla 3, tomando las columnas 2,4,7 y 14, con los resultados del método F se tomaría un método simplex unidimensional que representa una EOR térmica, ver Fig.4.17. Pero antes el análisis Q es una estructura desarrollada por el matemático Ron Atkins en la década de 1970,⁴⁴ donde es un lenguaje descriptivo donde nos representa altos problemas estructurales en términos de complejos simpliciales. Matemáticamente un complejo simplicial es un espacio topológico de un tipo particular, construido por puntos, segmentos de líneas, triángulos y sus homólogos, n-dimensiones.

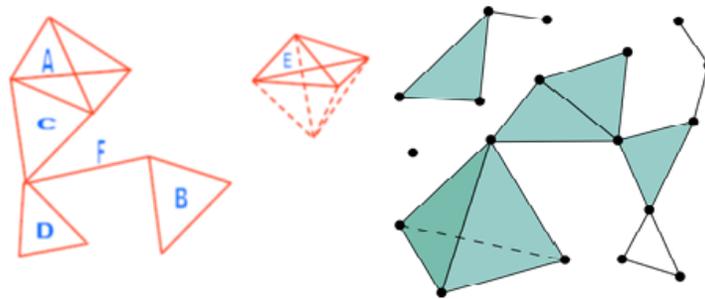


Fig. 4.17.-En la fig. Se puede analizar el complejo simplicial para poder hacer un proceso de EOR para el campo z.^{4.17}

Lo que el análisis Q hace es definir y aclarar ciertas definiciones y observaciones antes de que se comience al análisis del proyecto. El complejo simplicial puede ser interpretado, en primer lugar los simples son de baja dimensión, una técnica de EOR fácilmente aplicable sería de esperar que exhiben una alta dimensionalidad de al menos +14, así se llegara a la conclusión, de que el campo Z no es fácilmente susceptible de aplicar una técnica de recuperación mejorada, el método simple tiene características de campo que no encajan fácilmente en cualquier enfoque de EOR convencional, por ejemplo; la baja permeabilidad, la alta salinidad, el alto contenido de arcilla, fracturas térmica, donde nos dice que el campo es poco profundo para una EOR miscible y es un aceite muy ligero para un método térmico.⁴⁴

Con toda esta información el problema que se puede definir de la siguiente manera; ¿Podemos construir un enfoque de EOR tomando todas las características negativas como, baja permeabilidad, alta salinidad, alto contenido de arcilla y teniendo un depósito fracturado, y hacer positivo todas estas características para la aplicación de una EOR?

4.6.2 Solución

En este caso se abordado el problema que se puede presentar para tomar un método de EOR para el campo Z, en la tabla 5, se enumera los diferentes métodos o enfoques que se puede utilizar en este campo, donde se tomara un enfoque constructivo (nivel 4 de la tabla), en la construcción de polímeros para una EOR, tomando ciertos criterios de control de movilidad haciendo una yuxtapuesta con los parámetros conocidos y los problemas del yacimiento. Parte de este enfoque obliga a identificar los parámetros o cuestiones que dejan de lado a la jerarquía primaria, parte del enfoque de construcción obliga a identificar los parámetros o cuestiones que se dejan de lado o se tiene una jerarquía primaria marginada, donde se cree que el análisis Q y la deconstrucción tienen muchas similitudes en los métodos.

Tabla 5.-Los niveles creativa y pensamientos críticos.

	Enfoque creativo	Equivalentes matemáticos de trabajo publican en este trabajo
Nivel 1	Debate – unidialectica	Enfoques tradicionales
Nivel 2	Pensamiento sistemático	Intervalo de probabilidad
Nivel 3	Dialéctica	Intervalo de probabilidad
Nivel 4	Deconstrucción	Análisis Q
Nivel 5	Nietzschean	No aplicado en este trabajo
Nivel 6	Integración cualitativa y cuantitativa	No aplicable en este trabajo

Varios elementos hasta ahora las ideas de investigación no tiene una vinculación cercana por ejemplo:

1.-La interrelación entre la adsorción y las propiedades mecánicas ha sido conocida durante algún tiempo, por ejemplo Benedicts señala que las soluciones de surfactantes puede alterar la tensión superficial del vidrio, en cambio Dunning demuestra que la tensión superficial es directamente equivalente a la energía libre superficial, pero la

tensión superficial no es igual a la tensión de superficie.⁴⁴ En pequeños cristales la tensión superficial se libera por la dislocación cercana a la superficie, la adsorción del surfactante se altera al estrés esfuerzo superficial y por lo tanto, también las propiedades mecánicas del medio. Las fuerzas de tensión de los sólidos disminuyen con el aumento de la tensión superficial de los líquidos de humectación. Lo que lleva a que la dislocación se genera más fácilmente en la superficie que en otras partes, lo que con lleva que la facilidad de creación depende de la energía en la superficie.

2.-Las interrelaciones de la química de los fluidos, la tensión y la micro símica fueron investigado en la década de 1990 por Elphick en el "The Effects of Combined Changes in Pore Fluid Chemistry and Stress State on Reservoir Permeability". Donde se reconoció que la tensión en un yacimiento impacta en la geología y sus propiedades de flujo de fluido como se puede ilustrar en la, ver Fig. 4.18, donde se está representado como un esquema para poder ilustrar los impactos sobre el rendimiento de la geología en el yacimiento. Donde se interpreta esto como la integración de la nanociencia en la ciencia de la tierra en la ingeniería de yacimientos, en la parte superior izquierda del triángulo se centra en el flujo de fluidos y la química en un medio poroso, incluyendo la nanociencia.⁴⁴

En la parte inferior izquierda del triángulo se centra en la ciencia en la tierra, la interacción entre la parte superior e inferior puede ser dialectico como se ha tratado de explicar anteriormente, a medida que se avanza de izquierda a derecha, se pasara de la ciencia y la ingeniería al yacimientos de aceite. El manejo adecuado de la incertidumbre es la clave para el éxito de la aplicación de un método de EOR químico en el campo.

3.- La importancia de las fracturas y la inyección de polímeros se tiene conocimiento desde 1990, tanto experimentalmente y mediante simulación de yacimientos.⁴⁴ Donde estudios recientes han confirmado la importancia de fracturas naturales o provocadas y es necesaria la intervención de polímeros para poder evitar el bloqueo en las formaciones.

4.- El uso de geles de polímeros para la modificación en las profundidades también fueron investigada en la década de 1990, donde el trabajo no relaciona con el trabajo de las fracturas térmicas superiores de Fletchet. Fue posible utilizar gradientes térmicos para la iniciar la gelificación, pero el control y la propagación de bajas concentraciones de polímeros reticulantes demostraron ser problemáticos, la efectividad de la modificación del perfil en profundidad fue demostrado pro simulación de yacimientos en el año 2002. ⁴⁴

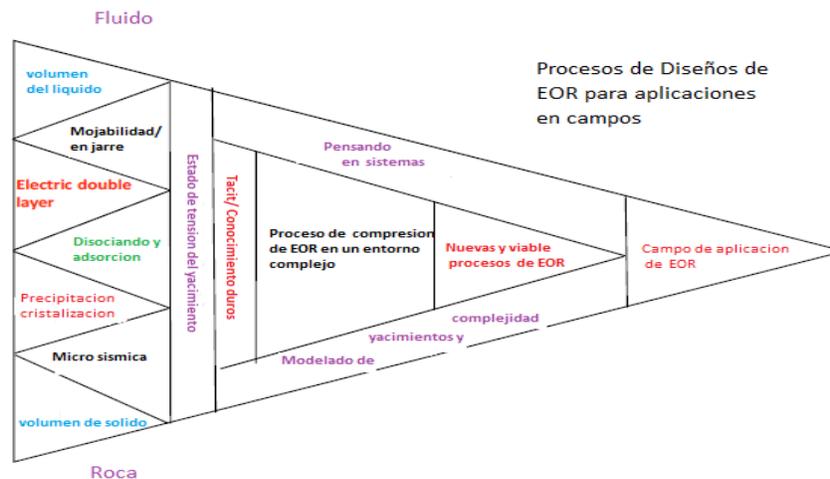


Fig. 4.18.- Esquema para la investigación de cómo la tensión impacta el flujo de fluidos y la geología en el yacimiento.^{4.18}

Desmontando el problema destaco la importancia de la red de fracturas, la inundación de agua fue reconstruido con la red de fracturas asigna la importancia central en el modelo conceptual, donde con nuevos conceptos se pueden retomar los criterios seccionados para una método de EOR.

Con la importancia de las fracturas, se descubrió que muchos de los parámetros del yacimiento que inicialmente presentaban problemas para polímeros en un método de EOR, en realidad eran ideales para un enfoque nuevo y novedoso, de hecho los cinco parámetros que se tomaron desde un principio para poder elaborar el método (baja permeabilidad, alta salinidad, dureza, alto contenido de arcilla y fracturas térmicas) que constituían nuestro modelo para una método de EOR eran ahora hacer una estrategia para poder que no nos afecte la profundidad. Con este enfoque se utiliza el hecho de que la mayor parte de la salmuera que entra en el depósito a través de la red de fracturas, entran en la matriz de la roca a cierta distancia de los inyectores, si pudiéramos controlar este control de fugas, la reorientación de la inundación de agua en la zona previamente sin barrer, podríamos diseñar un proyecto eficaz de EOR.

En resumen cuando las fracturas inducidas se tiene en cuenta en la configuración de la heterogeneidad y la inundación de agua, hemos sido capaces de construir un caso sólido conceptual para la aplicación del polímero en un EOR, para modificar el perfil en

profundidad, los factores de resistencia alta (FR), los factores de resistencia residual (RRF) y la adsorción resultante de la matriz de baja permeabilidad de la roca y otros parámetros geológicos, pueden interactuar positivamente con las fracturas en la inundación de agua y la heterogeneidad resultante en zonas de depósitos no barridos profundas que son significativamente dentro del depósito. Se podrá tener contemplado la nanotecnología donde se ha visto que puede modificar estas características y otras, lo cual nos lleva que puede tener éxitos en esta área y en muchas.

Conclusiones

Esta tesis es el resultado de una investigación bibliográfica a lo largo de un año y proporciona solo una descripción general con respecto a los avances y desarrollos en la nanotecnología específicamente en la Industria Petrolera.

La nanotecnología es un área que tiene perspectivas muy prometedoras para convertir la investigación fundamental en innovaciones de éxito. No sólo para impulsar la competitividad de nuestra industria, sino también para la creación de nuevos productos que aportarán cambios positivos en la vida de los ciudadanos, ya sea en la medicina, medio ambiente, electrónica o cualquier otro campo. La nanociencia y la nanotecnología abrirán nuevos caminos en la investigación y darán lugar a aplicaciones nuevas y útiles. La nanotecnología tiene el potencial para hacer contribuciones significativas en la detección de enfermedades, diagnósticos, tratamientos y prevención. Las computadoras serán construidas con componentes a nanoescala y la mejora de su rendimiento dependerá de la disminución en las dimensiones.

La nanotecnología en la Industria Petrolera brindará mejores posibilidades como:

Mejores materiales que nos proporcionarán fuerza y resistencia para aumentar el rendimiento y la fiabilidad de perforación, mejores elastómeros que son críticos para la perforación profunda y para mejorar la perforación con una alta temperatura / alta presión.

Mejorar las características de diseño para mejorar el comportamiento hidrófobo o hidrófilo, para la mejora de los materiales de inyección de agua.

Materiales ligeros y resistentes que reducen los requisitos de peso en plataformas marinas y más confiables y mejores buques de transporte, como:

Nanosensores para poder saber cómo se comporta la temperatura y presión en los pozos profundos y con ambiente hostiles. Permitiendo conocer el tipo de estructura y monitorear los varios tipos de fluidos que se puedan presentar en el yacimiento.

Nanofluidos que nos permiten tener una mejor perforación y poder saber cuándo hay una zona que nos pueda perjudicar en la perforación.

El tamaño de la oportunidad de negocio para la industria petrolera es grande el riesgo puede ser mitigado invirtiendo en I&D y materializando alianzas estratégicas. El portafolio de oportunidades tecnológicas en el área de nanotecnología para la industria Petrolera encuentra aplicaciones en campo de yacimientos y producción, operación y

mantenimiento de instalaciones y en la automatización de procesos y operaciones, en las oportunidades tecnológicas en el área de nanotecnología la industria puede apalancarse para generar mayor rentabilidad y sólidas ventajas competitivas.

Los beneficios que la nanotecnología puede ofrecer a la industria petrolera son potencialmente enormes. Algunas aplicaciones de la nanotecnología ya están disponibles en el mercado, mientras que otra podría venir de la transposición de las soluciones desarrolladas por la biomédica, aeroespacial, químico y textil, este gran avance se produjo gracias a la revolución de la nanotecnología.

La perforación de pozos y las fracturación, así como las nuevas membranas de nueva generación para la separación de gas ya se puede confiar en la nanotecnológicas. Mientras que otras tecnologías requerirán una mayor elaboración antes de su uso directo como los nanofluidos, nanosensores y otros materiales.

En la actualidad, los esfuerzos se están realizando importantes para el diseño de nanosensores para la caracterización de yacimientos y el seguimiento y para producir nanofluidos para mejorar los procesos EOR. Resultados muy prometedores se han obtenido a partir de experimentos de laboratorio, pero las pruebas de campo están todavía muy limitadas.

Un portafolio de oportunidades tecnológicas en el área de nanotecnología o en cualquier otra área, determinado a través de la metodología empleada en esta investigación, puede ser incluido en el plan de negocios de la industria o empresas para la cual represente interés con el objeto de acelerar el desarrollo de oportunidades y materializar las promesas de creación de valor.

Referencias

- [1].- Portal de nanotecnología para euroresidentes: <http://ec.europa.eu/health/opinions2/es/nanotecnologias/index.htm>
- [2].-Nanosistemas de Eric Drexler Breve resumen de su libroNanosistemas: Maquinaria, Fabricación y Computación Molecular (Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation).
- [3].- Nanotubes and buckyballs <http://www.nanotech-now.com/nanotube-buckyballsites>.
- [4].- Uses of Nanotechnology in Environmental Technology in Hessen Innovation potentials forcompanies, Volume 1 of the occasional Paper Series of the Aktionsliniehessen-nanotech.
- [5].- Application of Nanotechnologies in the Energy Sector, Volume 9 of the series Aktionslinie Hessen- Nanotech of the Hessian Ministry of Economy, Transport, Urban and Regional Development
- [6].- Las nanotecnologías: un paradigma tecnologico emergente. Dinámica y especializacion de la innovacion en las nanotecnologías, autores: alenka guzmán Chávez y alejandrotolodopatiño.
- [7].- Ken P. Chong and Jorn Larsen-Basse. Challenges in Mechanics and Materials Research in the Twenty-First Century.Journal of Materials in Civil Engineering.Vol 17, N° 13, June 1, 2005. ASCE.
- [8].- The second article detailed the discovery of the endohedral fullerenes in "Lanthanum Complexes of Spheroidal Carbon Shells" in the Journal of the American Chemical Society v. 107 p 7779 (1985)
- [9].-Engines Of Creation, The Coming Era of Nanotechnology, FOREWORD by Marvin Minsky
- [10].-Nanovip. The international nanotechnology business directory. <http://www.nanovip.com/directory/Detailed/917.php>
- [11].- Portal de nanotecnología para euroresidentes: <http://www.euroresidentes.com/futuro/nanotecnologia/nanotecnologia.htm>
- [12].- <http://www.nanotubosdecarbono.com/>

[13].- SPE 126101, Priority Assessment of Investment in Development of Nanotechnology in Upstream Petroleum Industry

[14].- Current and Future Nanotech Applications in the Oil Industry, American Journal of Applied Sciences 9 (6): 784-793, 2012, ISSN 1546-9239, 2012 Science Publications.

[15].- Micro and Nano Scale Sensors for Oil Exploration & Production, Sea Murphy Advanced Energy Consortium

[16].- Extracting the Benefits of Nanotechnology for the Oil Industry, Ramanan Krishnamoorti, U. of Houston

[17].- <http://www.iprofesional.com/notas/83813-Chile-empezo-a-reemplazar-el-gas-argentino.html&cookie>

[18].- Nanotechnology for sale: The once-Theoretical Becomes Practical, stephenrassenfoss, jpt/jpt online staff writer

[19].- SPE 138241 "Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry Overview of the Recent Progress" by Xiangling Kong, China University of Petroleum (Beijing), et al.

[20].- Applications of Nanotechnology in Oil and Gas E&P, Saeid Mokhatab, U. of Wyoming; Mariela Araujo Fresky, Imperial College, London; and M. Rafiqul Islam, Dalhousie U.

[21].- Applications of Nanotechnology in Oil and Gas Industry, Petrotech – 2009 11 - 15 January 2009, New Delhi, India

[22].- SPE 126161, "Nanofluid Core Flood Experiments in the ARAB-D," presentado en el Simposio y la Exhibición Técnica de la Sección de Arabia Saudita de la SPE, Al-Khobar, Arabia Saudita.

[23].- "Nanobot Trial a Winner," <http://www.aramcoexpats.com/Articles/Pipeline/Saudi-Aramco-News/Dhahran-Media/6346.aspx>.

[24].- <http://www.aramcoexpats.com/articles/2008/06/saudi-aramcos-mega-projects/>

[25].- Objetos grandes en paquetes pequeños, Andrew R. Barron James M. Tour, Universidad de Rice Houston, Texas, EUA. Art. de Schlumberger.

[26].- SPE 138241, Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry- An Overview of the Recent Progress, Xiangling Kong, SPE, China University of Petroleum (Beijing),

- [27].- SPE 126102, Nano-Technology- Its Significance in Smart Fluid Development for Oil and Gas Field Application, Md. Amanullah, SPE, and Ashraf M. Al-Tahini, SPE, Saudi Aramco.
- [28].- Shallow water flow prediction using prestack waveform inversión of conventional 3D seismic data and rock modeling, SUBHASHIS MALLICK and NADER C. DUTTA, WesternGeco, Houston, Texas, U.S.
- [29].-Sistemas de Ruptor de Revoque N-FLOW, Halliburton
- [30].- AADE-10-DF-HO-41, Future Challenges of Drilling Fluids and Their Rheological Measurements, Subhash N. Shah, Ph.D., P.E., Narayan H. Shanker, and Chinenye C. Ogugbue Well Construction Technology Center, University of Oklahoma
- [31].-Stabilizing the Wellbore to Prevent Lost Circulation, John Cook Cambridge, England, Oilfield Review Winter 2011/2012: 23, no. 4. Copyright © 2012 Schlumberger.
- [32].- Nanotechnology: Coming of Age or Heralding a New Age?, Derek Mathieson, President, Products and Technology, Baker Hughes
- [33].-Introducción a los Fluidos Magnetoreológicos con Aplicaciones en Ingeniería, César d. Mesquida, Jorge I. Lässig
- [34].- Using Nanoparticles to Decrease Differential Pipe Sticking and its Feasibility in Iranian oil Fields, AbouzarMirzaeiPaiaman
- [35].- Gas hydrate a source of shallow water flow?, BOB A. HARDAGE and RANDY REMINGTON, Bureau of Economic Geology, University of Texas at Austin, USA, HARRY H. ROBERTS, Louisiana State University, Baton Rouge, USA
- [36].- Fluidos electroreológicos, Leonardo Rejón G., Francisco López G., Gerardo Montoya T. y Octavio Manero B.
- [37].-Fluidos Inteligentes para Empaquetamientos con Grava, Mario Serrano, Halliburton EnergyServices/SPE.
- [38].- FLUIDOS Magnetoreológicos, Bravo E. – Chacón P. – Rivas F.
- [39].- SPE 149555, Drilling Fluid: State of The Art and Future Trend, AdeleyeSanmiApaleke, SPE, Abdulaziz Al-Majed,
- [40].- Nanoparticles: Promising Solution to Overcome Stern Drilling Problems, Dr. JamilAbdo, M. Danish Haneef, College of Engineering Mechanical

- [41].- <http://www.ngoilgasmena.com/article/Small-but-mighty/>
- [42].- SPE 156976, An Experimental Investigation of Polysilicon Nanoparticles' Recovery Efficiencies through Changes in Interfacial Tension and Wettability Alteration, Abbas Roustaei, Jamshid Moghadasi, Abadan Institute of Technology (AIT),
- [43].- Microbiología y biotecnología aplicadas a la exploración y producción petroleras, Revista CENIC Ciencias Biológicas, Vol. 42, No. 1, pp. 35-41, enero-abril, 2011.
- [44].- SPE 129531, How EOR Can be Transformed by Nanotechnology, A.J.P. Fletcher, SPE, Parr Systems Pty. Ltd., and J.P. Davis, University of Bristol
- [45].- SPE 157094, Nanotechnology-Assisted EOR Techniques: New Solutions to Old Challenges, Shahab Ayatollahi, SPE, EOR Research Center, School of Chemical and Petroleum Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran (now with Sharif University of Technology, Tehran, Iran), Mohammad M. Zerafat, SPE, EOR Research Center, School of Chemical and Petroleum Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran
- [46].- The appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies, Adopted by the SCENIHR during the 10th plenary meeting of 10 March 2006 after public consultation
- [47].- SPE 154827, Application of Nanofluid Technology to Improve Recovery in Oil and Gas Wells, Paul McElfresh, SPE, David Holcomb, SPE, and Daniel Ector, SPE, Frac Tech Services International, Inc.
- [48].- http://www.sitiosargentina.com.ar/notas/notas_viejas/511.htm
- [49].- <http://www.aramcoexpats.com/articles/2008/03/nanorobots-getting-small-in-a-big-way/>
- [50].- Recuperación Mejorada del Petróleo, Jean-Louis SALAGER

Referencias de imagenes

[1.1].- <http://www.espaciosocultos.com/2009/09/la-nanotecnologia-la-ciencia-de-la.html>

[1.2].- http://www.nanotecnologia.com.pe/n_info_01.html

[1.3].- Uses of Nanotechnology in Environmental Technology in Hessen Innovation potentials for companies, Volume 1 of the occasional Paper Series of the Aktionslinie hessen-nanotech

[1.4].- <http://m.sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-microscopia/microscopio-de-fuerza-atmica-y-efecto-tunel-afm-stm.html>

[1.5].- <http://nanotecnologia1fbg.scoom.com/informacion/>

[1.6].- <http://www.neoteo.com/electricidad-con-nanotubos-de-carbono-mit>

[1.7].- <http://www.nanotubosdecarbono.com/>

[1.8].- http://www.bbc.co.uk/mundo/ciencia_tecnologia/2010/01/100119_nanoparticulas_arterias_men.shtml

[1.9].- <http://www.nanotecnologica.com/una-nueva-forma-de-construir-nanoestructuras/>

[1.10].- <http://www.costarica2050.cr/la-nanotecnologia-podria-ser-el-nuevo-motor-de-desarrollo-de-costa-rica.html#more-169>

[2.1—2.5].- <http://lasmateriasprimas.com/category/petroleo>

[2.2].- http://en.wikipedia.org/wiki/Gas_to_liquids

[2.3].- <http://www.ocel.com/home/solutions/oe-wave-platform/?lang=es>

[2.4].- <http://notaculturaldeldia.blogspot.mx/2011/08/las-zeolitas-compuestas-de-silicio-y.html>

[2.6]. <http://www.searchanddiscovery.com/documents/2009/70062tinker/images/fig03.h>

[2.7—3.3].- SPE 126101, Priority Assessment of Investment in Development of Nanotechnology in Upstream Petroleum Industry

[2.8]. - http://ww.4shared.com/file/114431709/e365615c/Manual_de_Yacimiento.html

[2.10--2.11—3.1—3.15].-Micro and Nano Scale Sensors for Oil Exploration & Production, Advanced Energy Consortium Bureau of Economic Geology, Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin

[2.13].- <http://www.nanotecnologica.com/>

[2.14].- <http://www.aramcoexpats.com/articles/2008/06/saudi-aramcos-mega-projects/>

[2.15—3.4—3.5.- Nanotechnology for sale: The once-Theoretical Becomes Practical, stephenrassenfoss, jpt/jpt online staff writer

[2.12--2.16 -- 2.17—2.9].- Objetos grandes en paquetes pequeños, Andrew R. Barron James M. Tour, Universidad de Rice Houston, Texas, EUA. Art. de Schlumberger.

[3.2].-http://www.netl.doe.gov/newsroom/netlog/oct2010/netlog_Oct10.html

[3.6].- Nanomateriales para aplicaciones avanzadas, www.ua.es/grupo/nanolab

[3.9--3.10].- Fluidos electroreológicos, Leonardo Rejón G., Francisco López G., Gerardo Montoya T. y Octavio Manero B.

[3.11].- Shallow water flow prediction using prestack waveform inversión of conventional 3D seismic data and rock modeling, SUBHASHIS MALLICK and NADER C. DUTTA, WesternGeco, Houston, Texas, U.S

[3.12].- Gas hydrate a source of shallow water flow?, BOB A. HARDAGE and RANDY REMINGTON, Bureau of Economic Geology, University of Texas at Austin, USA, HARRY H. ROBERTS, Louisiana State University, Baton Rouge, USA

[3.13].- Stabilizing the Wellbore to Prevent Lost Circulation, John Cook Cambridge, England, Oilfield Review Winter 2011/2012: 23, no. 4. Copyright © 2012 Schlumberger.

[3.14].- Nanoparticles: Promising Solution to Overcome Stern Drilling Problems, Dr. JamilAbdo, M. Danish Haneef, College of Engineering Mechanical

[3.16].http://www.google.com.mx/search?hl=es&cp=62&gs_id=4&xhr=t&q=The+control+and+prevention+of+lost+circulation+of+drilling+mud&bav=on.2,or.r_gc.r_pw.,cf.osb&biw=1366&bih=628&wrapid=tljp133956118476000&um=1&ie=UTF8&tbn=isch&source=og&sa=N&tab=wi&ei=4RTYT-bRB-KC2AWsuc2FDw

[3.17].-<http://biqfr.blogspot.mx/2011/01/hidrato-de-metano-la-energia-que-sale.html>

[3.18--3.19—3.20].- FLUIDOS INTELIGENTES PARA EMPAQUETAMIENTOS CON GRAVA, Mario Serrano, Halliburton EnergyServices/SPE.

- [3.21].- Sistemas de Ruptor de Revoque N-FLOW, Halliburton
- [4.1].-<http://www.cienciaeingenieria.com/2011/11/porosidad.html>
- [4.2].-<http://www.monografias.com/trabajos31/recuperacion-petroleo/recuperacion-petroleo.shtml>
- [4.3].-http://www.smalltimes.com/display_article/301732/109/ONART/none/RD/Quantum-effect-found-in-silicon-nanocrystals/
- [4.4--4.5—4.9—4.10].- SPE 157094, Nanotechnology-Assisted EOR Techniques: New Solutions to Old Challenges, ShahabAyatollahi, SPE, EOR Research Center, School of Chemical and Petroleum Engineering,
- [4.6].-<http://www.anestesiaenmexico.org/RAM9/RAM2009-21-3/012.html>
- [4.7].- SPE 154827, Application of Nanofluid Technology to Improve Recovery in Oil and Gas Wells, Paul McElfresh, SPE, David Holcomb, SPE, and Daniel Ector, SPE, Frac Tech Services International, Inc.
- [4.8].-<http://www.eucerin-la.com/pe/la-piel/acerca-de-la-piel/higiene-y-cuidado/jabones-syndets-y-tensioactivos/>
- [4.14—4.16].-<http://www.aramcoexpats.com/articles/2008/03/nanorobots-getting-small-in-a-big-way/>
- [4.15].-http://www.sitiosargentina.com.ar/notas/notas_viejas/511.htm
- [4.17--4.18].- SPE 129531, How EOR Can be Transformed by Nanotechnology, A.J.P. Fletcher, SPE, Parr Systems Pty. Ltd., and J.P. Davis, University of Bristol
-