



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Revisión del estado del arte
de la ciencia de materiales
en la ingeniería petrolera**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Petrolero

P R E S E N T A

Juan Raúl Zavala Sillas

DIRECTOR DE TESIS

Dra. María del Pilar Carreón Castro



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

El presente trabajo se desarrolló en el Laboratorio de Nanopelículas del Departamento de Química de Radiaciones y Radioquímica del Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Dedicatoria:

A Dios todopoderoso que todo lo puede y todo lo que se quiere debajo del cielo lo da a su tiempo y a su hora. Gracias por darme la oportunidad y la vida para estar en este momento.

Josué 1:7 “Solamente esfuérzate y sé muy valiente.”

A mis padres que con todo el esfuerzo, el corazón y la entrega trataron de hacer de mí un hombre que sea de bien para la sociedad. A mi madre Elena Sillas González por darme todo el amor que una madre puede brindar, y ser una de mis mas grandes inspiraciones y motivos para salir adelante. A mi padre Víctor Raúl Zavala Rodríguez que ha sido un gran ejemplo para mí, por todos sus enseñanzas y guías en mi vida, por ser uno de los hombres que más admiro y sobre todo ser mi gran amigo.

Agradecimientos:

Gracias infinitas a la Universidad Nacional Autónoma de México por acogerme en sus aulas a las que pude llamar mi segundo hogar. A la Facultad de Ingeniería, por ser el lugar que me formó académicamente y profesionalmente; a todos mis profesores por transmitirme sus conocimientos y tratar de forjar a los ingenieros del mañana; al Instituto de Ciencias Nucleares por brindarme el gran privilegio de desarrollar este trabajo y abrirme sus puertas brindándome nuevas oportunidades.

Quiero extender mi más sincero agradecimiento al Doctor Rafael Omar Arcos Ramos, por ser mi guía y asesor técnico en el desarrollo de este trabajo. Durante la realización del proyecto, usted ha sido uno de los pilares más importantes y quien me ha guiado en el complicado proceso. No ha sido nada fácil, ni mucho menos, sin embargo gracias a su ayuda, esto ha parecido un tanto menos complicado. Nunca hallaré la forma de agradecerle y retribuirle lo que usted ha hecho por mí, ya que sin su participación esto no hubiera sido posible.

A la Doctora María del Pilar Carreón Castro por brindarme la confianza y todo el apoyo en el desarrollo de este trabajo. Por nunca dejarme solo y ser la base de este trabajo de tesis. Gracias por esta gran oportunidad que usted me brindó, por creer en mí e impulsar el desarrollo de una formación profesional y personal, y por darme el privilegio de ser su alumno.

A la Ingeniera Miriam Arenas Sáenz que me brindó una de las más grandes oportunidades que he tenido en mi vida, que fue su invitación al Instituto de Ciencias Nucleares. Por todos sus sabios consejos y enseñanzas para el desarrollo de mi vida profesional. Es un gran modelo a seguir y tuve el privilegio de poder ser su alumno y trabajar con ella en el desarrollo de este trabajo.

A mis sinodales la Química Esther Flores Cruz, al Ingeniero José Agustín Velasco Esquivel y al Ingeniero Martín Carlos Velázquez Franco, por sus comentarios, observaciones y su apoyo, que sirvió en el enriquecimiento de esta tesis.

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	III
GLOSARIO	V
STATE OF THE ART REVIEW: MATERIALS SCIENCE IN PETROLEUM ENGINEERING	1
REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LA CIENCIA DE MATERIALES EN LA INGENIERÍA PETROLERA	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS.....	7
3. CIENCIA DE MATERIALES.....	8
3.1. ÁREAS INVOLUCRADAS EN LA CIENCIA DE MATERIALES.....	11
3.1.1. <i>Química orgánica.</i>	12
3.1.2. <i>Química de polímeros.</i>	12
3.1.3. <i>Química supramolecular.</i>	13
3.1.4. <i>Ingeniería de cristales.</i>	14
3.2. DISEÑO Y DESARROLLO DE MATERIALES.....	15
3.2.1. <i>Metalurgia física y aleaciones.</i>	16
3.2.2. <i>Compuestos de matriz metálica.</i>	16
3.2.3. <i>Polímeros semiconductores.</i>	17
3.2.4. <i>Polímeros supramoleculares.</i>	18
3.2.5. <i>Redes metal-orgánicas (MOF's) para la adsorción de moléculas.</i>	19
3.2.6. <i>Redes orgánicas covalentes (COF's) para la adsorción de moléculas.</i>	21
3.2.7. <i>Nanotubos de carbono (CNT).</i>	22
3.3. TÉCNICAS PARA LA CARACTERIZACIÓN Y DESARROLLO DE MATERIALES.....	23
3.4. MECANISMOS DE DETERIORO DE MATERIALES.....	26
4. APLICACIONES DE LA CIENCIA DE MATERIALES.....	28
4.1. PANORAMA INTERNACIONAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.....	28
4.2. LA CIENCIA DE MATERIALES COMO ALTERNATIVA PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES.....	29
4.3. DESARROLLO DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE DISPOSITIVOS OPTO-ELECTRÓNICOS.....	30
4.4. CELDAS SOLARES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS.....	32
5. LA CIENCIA DE MATERIALES EN LA INGENIERÍA PETROLERA.....	34
5.1. INDUSTRIA DEL GAS Y DEL ACEITE.....	34
5.1.1. <i>Retos en la industria del petróleo y gas.</i>	36
5.1.2. <i>La ciencia de materiales y la nanotecnología en la industria del petróleo y gas.</i> 37	
5.2. INGENIERÍA DE PERFORACIÓN.....	41
5.2.1. <i>Áreas de oportunidad de la ciencia de materiales en la ingeniería de perforación.</i>	42
5.2.2. <i>Materiales avanzados en el desarrollo de barrenas.</i>	43

5.2.3. Nanotecnología en la cementación de pozos.....	44
5.2.4. Materiales para apuntalar fracturas.....	46
5.2.5. Fluidos inteligentes.....	50
5.2.6. Formación de hidratos de gas.....	52
5.3. RECUPERACIÓN SECUNDARIA Y MEJORADA.....	54
5.3.1. Áreas de oportunidad de la ciencia de materiales en la recuperación de aceites.....	56
5.3.2. Materiales para la recuperación mejorada de aceites.....	58
5.3.3. Energía Solar en la recuperación mejorada (Solar EOR).....	63
5.4. MONITOREO DE YACIMIENTOS A PARTIR DEL USO DE MATERIALES.....	64
5.4.1. Tecnología de pozos inteligentes.....	67
5.5. NANOCATALIZADORES.....	68
5.6. NANOTECNOLOGÍA EN LA REMEDIACIÓN AMBIENTAL.....	69
6. CONCLUSIONES.....	72
7. PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA DE MATERIALES EN LA INGENIERÍA PETROLERA.....	74
REFERENCIAS.....	77

Índice de figuras y tablas

Figura 1. Conocimiento de los materiales.	8
Figura 2. Clasificación de los materiales.	9
Figura 3. Clasificación de los materiales cerámicos	10
Figura 4. Propiedades y aplicaciones tecnológicas de los materiales nanométricos y supramoleculares.....	14
Figura 5. Geometrías en estructuras cristalinas.	15
Figura 6. Tipos de MMC's. Continuas, discontinuas y partículas (izquierda a derecha)	17
Figura 7. a) componente plástico hecho de polímeros supramoleculares, b) la estructura molecular es una red de monómeros interconectados, c) los monómeros se auto-ensamblan para formar la red polimérica.....	18
Figura 8. Estructura de un MOF.	19
Figura 9. Aplicaciones de los MOF's	20
Figura 10. Estructura de diversos COF's.	21
Figura 11. Nanotubos de carbono de pared múltiple y pared sencilla.....	22
Figura 12. Componentes de un microscopio de fuerza atómica	24
Figura 14. Esquema de un microscopio electrónico de transmisión.....	25
Figura 15. Tuberías de perforación destruidas por la corrosión.	27
Figura 16. Distribución del consumo mundial de energías renovables, 2015.....	29
Figura 17. Clasificación de los dispositivos optoelectrónicos.	30
Figura 18. Funcionamiento de un panel solar.	32
Figura 19. Materiales inorgánicos en la tecnología de celdas solares.	32
Figura 20. Celda solar orgánica.	33
Figura 21. Cadena de valor de la industria petrolera.	36
Figura 22. Esquema de la nanofiltración.....	39
Figura 23. Cable aislado, y la estructura esquemática de un cable molecular aislado (nanocable).	40
Figura 24. Esquema de la estrategia del desarrollo tecnológico en la exploración y producción.....	43
Figura 25. Barrena PDC Schlumberguer.	44
Figura 26. Cementación de la sarta de revestimiento.....	45
Figura 27. Proceso de fracturamiento hidráulico.....	46
Figura 28. Transporte del apuntalante y diseño óptimo de la fractura.	47
Figura 29. Materiales apuntalantes.....	48
Figura 30. Clasificación de los apuntalantes por su redondez y esfericidad (Carta de Krumbein).	48
Figura 31. Apuntalante In-Tallic.	49
Figura 32. Apuntalante Frac Ball.....	50
Figura 33. Principio de funcionamiento de un fluido magnetoreológico.....	51
Figura 34. Estructura de los hidratos de gas tipo I,II y H.	53

Figura 35. Esquema de inyección en un método de recuperación secundaria y mejorada.	55
Figura 36. Etapas de recuperación de aceite y gas en un yacimiento.	56
Figura 37 Volumen remanente de aceite en México, CNH (2011)	57
Figura 38. Aceite remanente en el medio poroso y aceite no barrido.....	58
Figura 39. Funcionamiento de un surfactante.....	60
Figura 40. La adición de polímeros en tres capas, aumentando la eficiencia de barrido.	61
Figura 41. La adición de nanopartículas en el agua de inyección, ayuda a remover el aceite que queda remanente en el espacio poroso	62
Figura 42. Esquema de un sistema de recuperación secundaria por medio de energía solar.	64
Figura 43. Empleo de nanoagentes (resbots) en el proceso de producción de un pozo petrolero.	66
Figura 44. Ventajas de los nanocatalizadores.	69
Figura 45. Inyección de nanopartículas de hierro para la descontaminación de un acuífero subterráneo.....	71
Tabla 1. Características de los materiales a nivel nanométrico.	37
Tabla 2. Clasificación de los equipos de perforación.....	42
Tabla 3. Clasificación de los métodos de recuperación mejorada.....	59

GLOSARIO

Aceite residual: Es la saturación alcanzada después de que un número infinito de volúmenes de poro del fluido de desplazamiento fluyó a través de una porción particular de la roca yacimiento.

Adsorción: Proceso por el cual átomos o moléculas de una sustancia que se encuentra en determinada fase, son retenidas en la superficie de otra sustancia, que se encuentra en otra fase.

Anfifílico: Moléculas que poseen un extremo hidrofílico, es decir, que es soluble en agua y otro hidrófobo, es decir, que no interactúa con el agua.

Anfótero: Sustancia que actúa como ácido o como base dependiendo la sustancia con la que reacciona.

Anión: Molécula iónica con carga negativa.

Anisotropía: Variación predecible de una propiedad de un material según la dirección en la que se determina.

Catálisis: Proceso por el cual se aumenta la velocidad de una reacción química, debido a la participación de una sustancia llamada catalizador.

Catión: Molécula iónica con carga positiva.

Coloide: Sistema formado por dos o más fases, normalmente una fluida (líquido) y otra dispersa en forma de partículas generalmente sólidas. La fase dispersa es la que se halla en menor proporción. Normalmente la fase continua es líquida.

Dipolo: Conjunto de dos polos magnéticos o eléctricos de signos opuestos y cercanos entre sí.

Electroaceptor: Especie electroactiva capaz de recibir un par electrónico.

Electrodonador: Especie electroactiva capaz de donar un par electrónico.

Electrodeposición: Proceso electroquímico, para el tratamiento de superficies, que permite depositar capas metálicas y no-metálicas.

Enlace covalente: Unión que se produce cuando dos átomos comparten dos o más electrones de su capa externa con objeto de formar una especie más estable.

Enlace de hidrogeno: Interacción electrostática dipolo-dipolo que se da entre un átomo de hidrógeno que forma parte de un enlace covalente polarizado, y un átomo con un carácter fuertemente electronegativo.

Epitaxia: Método de deposición en el que se consigue crecer finas capas de material un cristalino sobre un sustrato.

Ferroelectricidad: Capacidad de ciertos materiales para retener información en su estructura cristalina, sin necesidad de estar conectados a una fuente de energía.

Ferromagnetismo: Propiedad de algunos materiales que hace que resulten imantados cuando se sitúan bajo un campo magnético, conservando parte de su imantación cuando desaparece dicho campo.

Floculación: Condición en la que las arcillas, los polímeros u otras partículas cargadas pequeñas se adhieren y forman una estructura frágil.

Fotoacoplador: Dispositivo optoelectrónico diseñado para la transferencia de señales eléctricas mediante una radiación óptica.

Fotofísica: Estudio de la interacción de la radiación electromagnética con la materia que da lugar a efectos físicos tales como la absorción, emisión de fluorescencia o fosforescencia.

Fotodetector: Sensor que genera una señal eléctrica dependiente de la luz u otra radiación electromagnética que recibe.

Fotodiodo: Diodo semiconductor en el cual los rayos luminosos a los que se encuentran sometidos provoca variaciones de la corriente eléctrica.

Fotoquímica: Estudio de las transformaciones químicas provocadas o catalizadas por la emisión o absorción de luz visible o radiación ultravioleta.

Fotorresistencia: Resistencia que varía su comportamiento en función de la luz que incide sobre su superficie. Cuanto mayor sea la intensidad de la luz que incide en su superficie menor será su resistencia, y cuanto menos luz incida mayor será su resistencia.

Fototransistor: Transistor activado por la incidencia de luz en la región de base generando portadores en el.

Fuerzas capilares: Son el resultado del efecto combinado de las tensiones superficial e interfacial de la roca y fluidos, el tamaño y geometría del poro, y la mojabilidad característica del sistema.

Hidrofílico: Toda aquella molécula que presenta afinidad por el agua, lo cual depende de su estructura molecular.

Hidrofóbico: Toda aquella molécula que no presenta afinidad por el agua, lo cual depende de su estructura molecular.

Interacción ión-dipolo: Fuerzas de atracción entre moléculas polares. Son atracciones entre un ión y el polo de carga opuesta de una molécula polar.

Ión: Es un átomo, conjunto de átomos o moléculas que adquiere carga positiva o carga negativa, debido a la transferencia de electrones.

Microelectrónica: Ingeniería electrónica desarrollada con componentes y circuitos de dimensiones muy pequeñas, microscópicas y hasta de nivel molecular para producir dispositivos y equipos electrónicos de dimensiones.

Mojabilidad: La preferencia de un sólido por el contacto con un líquido o un gas, conocido como la fase mojante.

Reconocimiento molecular: Interacción específica que se da entre dos o más moléculas a través de interacciones no-covalentes en cualquier tipo de fase de materia (enlace de hidrógeno, coordinación a metales, fuerzas hidrofóbicas, fuerzas de van de Waals, interacciones π - π , enlace de halógeno, efectos electrostáticos o electromagnéticos).

Shale gas: Hidrocarburo en estado gaseoso que se encuentra en las formaciones rocosas sedimentarias de grano muy fino.

Shale oil: Hidrocarburo en estado líquido que se encuentra en las formaciones rocosas sedimentarias de grano muy fino.

Tenacidad: Energía de deformación total que puede absorber o acumular un material antes de alcanzar la ruptura en condiciones de impacto, por acumulación de dislocaciones.

Tensión interfacial: Fenómeno en el que un líquido en contacto con otra sustancia (sólido, líquido o gas) posee una energía que es el resultado de la diferencia del grado de atracción de las moléculas de la superficie entre ellas con la del grado de atracción de otra sustancia.

Tensión superficial: Medida de la fuerza elástica por unidad de longitud que actúa en la superficie de un líquido.

STATE OF THE ART REVIEW: MATERIALS SCIENCE IN PETROLEUM ENGINEERING

Since the nineteenth century, petroleum has been refined into various types of fuels for many purposes. Petroleum, as a fossil fuel, is formed during different biological processes under intense heat and pressure; for this reason, petroleum industries have the need to invest on new technologies, as this resource it's getting harder to obtain.

Materials science is a field involved on the discovery and design of functional materials, with an emphasis on solid compounds. Due to its intrinsic multidisciplinary nature, materials science encompasses different point of views (organic chemistry, polymer chemistry, supramolecular chemistry, nanotechnology, physics, and engineering, among others), which are useful to develop raw materials for well-defined applications. Materials science correlates molecular structure of a functional material to its macromolecular physicochemical properties. By understanding and tailoring the molecular structure, material scientists modulate the behavior of a designed material with well-defined properties for specific applications. Some examples of developed materials include: ceramics, metallic alloys, rubbers, coatings and polymers. In this context, materials science has been applied to develop novel technologies for petroleum engineering purposes, which range from discovery, exploitation, and petroleum processing catalysts to safety reservoir abandonment.

Science and technologies of new materials for petroleum engineering could be developed to four main objectives: (a) a total multistage control of the processes to increase selectivity and productivity (tailoring of materials with controlled structures); (b) designed materials to develop novel equipment based on scientific principles, operation modes, and methods of production; (c) product engineering: manufacturing end-use properties with a special emphasis on complex fluids and solid technologies; (d) and simulation to real-life situations by theoretical-experimental approaches: from the molecule to the overall complex production scale into the entire production site. For example, in the drilling engineering as petroleum is getting harder to obtain, unconventional resources need to be developed like low permeability reservoirs, accordingly materials science appears as promising initial point to develop new technologies for fracking or trying to solve problems with methane hydrates.

In the present contribution, we are going to illustrate how materials science is used to develop technology to solve some problems in the oil and gas industries. Particularly, in the improved oil recovery field, one of the biggest challenges to sort out consist into obtain better procedures for oil recovery at the molecular level, as well as the developing of new and efficient materials for reservoir monitoring.

As long as petroleum reserves are getting lower and pollution increases in the industrial countries, the necessity to develop and exploit alternative energy sources is a priority. Materials science has a very wide advantage working on solar energy; in the fabrication of better and more efficient solar cells that could be a great advance in clean energies. Material Science is a field with a lot of applications on a big number of industrial sectors; for example in biomedical industries, electronics and computer industries, by government and academia, so as mining and geothermal industries.

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LA CIENCIA DE MATERIALES EN LA INGENIERÍA PETROLERA

En el mundo moderno, el petróleo y gas natural han sido transformados en distintos combustibles para el impulso de diversas industrias. El petróleo como combustible fósil se forma por varios procesos biológicos en condiciones de elevada presión y temperatura; por esta razón la industria petrolera tiene como prioridad la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que permitan obtener este recurso de manera cada vez más eficiente.

La ciencia de materiales es un campo de investigación enfocado en el diseño de materiales funcionales, con énfasis en aquellos materiales en estado sólido. Dada la naturaleza multidisciplinaria de la ciencia de materiales, ésta se encuentra conformada por diferentes disciplinas científicas como lo son: la química orgánica, química de polímeros, química supramolecular, nanotecnología, física e ingeniería, entre otras, las cuales son de gran utilidad en el desarrollo de materiales para aplicaciones bien definidas. La ciencia de materiales correlaciona la estructura molecular de un material funcional con sus propiedades macromoleculares y fisicoquímicas. A partir del conocimiento estructural es posible diseñar materiales con propiedades definidas para funciones específicas. Algunos ejemplos de materiales desarrollados incluyen: cerámicas, aleaciones metálicas, recubrimientos y polímeros. En este contexto, la ciencia de materiales se aplica en el desarrollo de tecnologías novedosas para la ingeniería petrolera, desde las operaciones de exploración y producción, abandono de yacimientos y catalizadores para los procesos de transformación.

La ciencia y la tecnología en la implementación de nuevos materiales para la ingeniería petrolera se desarrolla para cumplir con cuatro objetivos principales: (a) control a multi-escala de los procesos para incrementar la selección y productividad de los materiales (creando materiales con estructuras persistentes); (b) diseño de materiales para desarrollar equipos de vanguardia basándose en principios científicos, modos de operación y métodos de producción; (c) ingeniería de productos: la manufactura de productos con propiedades en su uso final haciendo énfasis en los fluidos complejos y tecnologías de materiales sólidos; (d) y simulación en situaciones reales por medio de aproximaciones teóricas y experimentales: que van desde un nivel molecular hasta un complejo de producción. Por ejemplo, en la ingeniería de producción los recursos no convencionales son una prioridad, por lo que la ciencia de materiales representa un punto de partida prometedor para el desarrollo de nuevas tecnologías, como lo

son: apuntalantes en el fracturamiento hidráulico, o la resolución de problemas con los hidratos de gas.

En este trabajo, se describirá como la ciencia de materiales ha sido aplicada en el desarrollo de nueva tecnología para resolver problemas en la industria del petróleo y gas. Particularmente, en el campo de la recuperación mejorada y avanzada. Uno de los grandes retos a enfrentar es la obtención de mejores procedimientos para la recuperación de hidrocarburos a un nivel molecular. Así mismo, el desarrollo de materiales nuevos y eficientes para el monitoreo de yacimientos.

Las reservas de petróleo a nivel mundial van en declive y la contaminación es un problema creciente en países industrializados, por lo que surge la necesidad de implementar y explotar fuentes de energías alternas a los hidrocarburos. La ciencia de materiales tiene una amplia ventaja trabajando en el aprovechamiento de la energía solar, mediante la fabricación de celdas solares más eficientes, lo que ha representado un gran avance en la explotación de energías limpias. La ciencia de materiales es un campo con numerosas aplicaciones en distintos sectores industriales; por ejemplo, en la industria biomédica, electrónica y de la computación, además en la industria minera y geotérmica.

1. INTRODUCCIÓN.

En el presente trabajo se analizará la aplicabilidad de la ciencia de materiales en la solución de problemas de la ingeniería petrolera; las cuales van desde las operaciones de exploración y producción, hasta la comercialización de productos derivados de los hidrocarburos. La ciencia de materiales se basa en la manipulación de la estructura molecular de algún material para que este pueda ser aplicado en la resolución de un problema en específico, ya sea creando nuevos materiales o modificando la estructura de un material existente para que cumpla de manera eficiente con un fin específico.

La ingeniería petrolera se ha desarrollado desde finales del siglo XIX, y a medida que la extracción de este recurso se ha vuelto más compleja; esta ha tenido que recurrir a varios campos de la ciencia aplicada para poder dar solución a los diversos problemas técnicos, mediante la aplicación de principios científicos para transformar la química y la física en ingeniería, a través del desarrollo de materiales por medio de metodologías teórico-experimentales.

En este sentido, la ciencia de materiales ha encontrado aplicabilidad en el sector de la industria del petróleo y gas, desarrollando nuevos materiales con las propiedades adecuadas para cumplir con los requerimientos necesarios para su uso. Con el surgimiento de nuevos retos tecnológicos que se presentan a los ingenieros petroleros, como la explotación de recursos no convencionales, o la explotación de hidrocarburos en aguas profundas; es imprescindible el diseño de materiales más resistentes que puedan ser sometidos a gradientes de presión y temperatura más altos, a la corrosión; y en ciertos casos, como en los pozos desviados, favorecer la flexibilidad del acero conservando sus propiedades; así como para brindar un mayor control en la perforación de un pozo mediante el uso de fluidos inteligentes. De igual manera en el desarrollo de herramientas para el monitoreo de pozos; como son los nanosensores. Así mismo, la ciencia de materiales ha encontrado áreas de oportunidad en los procesos de recuperación secundaria y mejorada.

La ciencia de materiales no solo se ha enfocado en desarrollar nuevos materiales para operaciones de exploración o producción, también ha mostrado una amplia versatilidad reflejada en los demás ramos de la cadena de valor de los trabajos de la ingeniería petrolera.

Con la creciente demanda de los hidrocarburos, aunado a la disminución de las reservas a nivel mundial, la humanidad se ha visto en la necesidad de poder obtener energía de una manera limpia y eficaz; por lo que la ciencia de materiales es una gran herramienta en el desarrollo y aplicación de las energías alternas a los hidrocarburos.

2. OBJETIVOS.

Revisión del estado del arte de la ciencia de materiales y las áreas involucradas en su desarrollo, esto para demostrar que la implementación de nuevos materiales ha logrado dar respuesta a problemáticas actuales en la industria del petróleo y gas.

- ❖ Demostrar como la ciencia de materiales ha mostrado amplia aplicabilidad en el campo de las energías renovables, y como esta, da respuesta a las limitaciones que este tipo de energías presentan.

- ❖ Mostrar la versatilidad de la ciencia de materiales en las operaciones de ingeniería petrolera en combinación con los retos que esta presenta; esto mediante la implementación de nuevas tecnologías que puedan representar una solución eficiente y económica a las áreas de oportunidad en el sector de la industria del petróleo y gas. Principalmente en los procesos de monitoreo de pozos, ingeniería de perforación y procesos de recuperación mejorada.

3. CIENCIA DE MATERIALES

A lo largo de su existencia, la humanidad se ha visto en la necesidad de poder manipular su entorno para su subsistencia, aprendiendo a manejar los materiales que se encuentran en la naturaleza para así simplificar sus labores cotidianas. El progreso de la humanidad se puede clasificar en diferentes períodos dependiendo del tipo de materiales con los que se ha trabajado, iniciando con la edad de piedra, seguida por la edad de bronce (aleación cobre-estaño) y la edad de hierro, hasta llegar al uso de polímeros a mediados del siglo XX.

La ciencia de materiales se basa en el estudio de las correlaciones entre las propiedades de los materiales (constitución y estructura molecular), el procesado o tratamiento que reciben, factores que alteran su estructura y por lo tanto, sus propiedades para que estos puedan cumplir un fin en específico.¹ Al tratarse de una ciencia experimental, se requiere de pruebas y técnicas que ayuden a corroborar la obtención y el buen funcionamiento de los materiales desarrollados. Es por ello, que se requiere de la comprensión de la estructura interna y de las propiedades de los materiales, dependiendo de la funcionalidad deseada para elegir de forma adecuada los métodos más eficientes para su obtención y procesamiento; esto ha permitido su aplicación en la industria metalúrgica y otros sectores, permitiendo un progreso continuo que no se había visto con anterioridad.²

Dentro del área de ciencia de materiales, es posible desarrollar nuevos materiales, o bien, modificar las propiedades de los ya existentes para que estos puedan realizar de manera más eficiente la tarea para la cual fueron destinados (Figura 1).

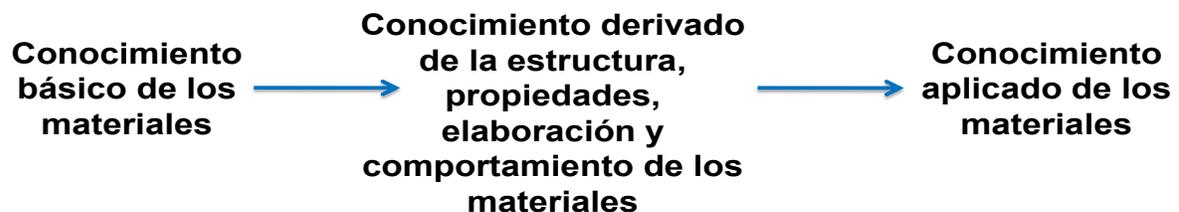


Figura 1. Conocimiento de los materiales.

¹ Cembrero Cil, J., Ferrer Gimenez, C., Pascual Guillamón, M., & Pérez Puig, M. Á. (2005). Ciencia y tecnología de materiales: problemas y cuestiones. Madrid: Pearson, 2005.

² Newell, J. (2016). Ciencia de materiales: aplicaciones en ingeniería. México, D.F.: Alfaomega

² Newell, J. (2016). Ciencia de materiales: aplicaciones en ingeniería. México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor, 2011.

Las propiedades de un material dependen de su composición química, de la interacción entre los componentes moleculares que lo conforman, y de la organización de estos en cualquier tipo de fase de materia condensada;³ estos se pueden clasificar en dos ramas principales: materiales tradicionales y avanzados (Figura 2). Los materiales tradicionales son aquellos que se ocupan en la construcción e industrias, mientras que los avanzados son aquellos diseñados para favorecer un desarrollo tecnológico específico.⁴



Figura 2. Clasificación de los materiales.

En el contexto de la ciencia de materiales, es posible definir un material metálico como aquel donde existe un traslape electrónico entre la banda de valencia y conducción. Dentro de estos se pueden encontrar elementos puros, así como aleaciones con características metálicas, entre las que podemos encontrar: conductividad eléctrica y térmica, maleabilidad, alta densidad, ductilidad y tenacidad.⁵ Estos se pueden clasificar en dos grandes grupos:

³ Smith, W. F., Hashemi, J., Nagore Cázares, G., González Caver, P. A., & Smith, W. F. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. México: McGraw-Hill Interamericana, 2006.

⁴ Saja Sáez, J., Rodríguez Pérez, M. Á., & Rodríguez Méndez, M. L. Materiales: estructura, propiedades y aplicaciones. Madrid, España: Thompson, c 2005.

⁵ Parodi, G. A. (2016). Metals. Salem Press Encyclopedia of Science.

- ❖ Ferrosos: Contiene al hierro y a sus derivados.
- ❖ No ferrosos: Contienen a todos los metales diferentes al hierro.

Los materiales cerámicos incluyen a las arcillas, vidrios, silicatos, grafito y cemento Portland. Este tipo de materiales se encuentran unidos por enlaces iónicos y covalentes, por lo que estos materiales poseen una mayor resistencia al calor, corrosión y compresión. Usualmente se consideran buenos aislantes eléctricos y térmicos.⁶ Estos se clasifican en: (Figura 3)



Figura 3. Clasificación de los materiales cerámicos

Los materiales poliméricos son compuestos macromoleculares de origen natural o sintético; estos están conformados por la repetición de unidades monoméricas iguales o diferentes mediante enlaces covalentes, formando cadenas flexibles de gran longitud, lo que les brinda una alta resistencia mecánica.⁷ Estos se clasifican en dos grandes grupos principalmente:

- ❖ Polímeros orgánicos naturales: polisacáridos, proteínas y nucleótidos.
- ❖ Polímeros orgánicos sintéticos: acrílicos, polivinílicos, poliestirenos y poliamidas alifáticas o semi-aromáticas (nylon).

Los materiales semiconductores son aquellos que presentan una conductividad eléctrica intermedia (entre un aislante y un conductor). Una característica importante de estos materiales es que su conductividad eléctrica aumenta conforme se incrementa la temperatura.⁸

⁶ Parodi, G. A. (2016). Ceramics. Salem Press Encyclopedia of Science.

⁷ Hollar Jr., D. W. (2016). Polymers. Salem Press Encyclopedia of Science.

⁸ Patanè, A., & Balkan, N. Semiconductor research: experimental techniques. Berlín: Springer, 2012.

Los materiales compuestos son aquellos que aprovechan las propiedades de dos o más materiales, al ser combinados en proporciones adecuadas forman un material que tiene propiedades diferentes a sus constituyentes aislados.

Un tipo particular de material avanzado son los nanomateriales, los cuales se desarrollan a una escala nanométrica que va desde 1 a 100 nanómetros. Estos tienen gran importancia en sectores de la salud, textil, comunicación, información y energético.

Los biomateriales son aquellos capaces de estar en contacto directo con tejidos vivos durante un cierto período de tiempo, ya sea como complemento del tejido o para mejorar el funcionamiento de éste.⁹

Los materiales inteligentes son aquellos que tienen la capacidad de cambiar sus propiedades mecánicas o físicas en presencia de un estímulo, tales como la corriente eléctrica, campo magnético, calor, presión, entre otros.¹⁰ Los materiales inteligentes se pueden clasificar en:

- ❖ Materiales con memoria de forma: que consisten en una relación entre la deformación y un estímulo externo.
- ❖ Materiales electro- y magneto-activos: son aquellos que cambian sus propiedades físicas cuando se someten a un campo eléctrico y/o magnético.

3.1. Áreas involucradas en la ciencia de materiales

La ciencia de materiales es una área multidisciplinaria que involucra la química, física, biología y diferentes ingenierías. Desde la perspectiva de la química, la ciencia de materiales aprovecha los procesos sintéticos para la fabricación de materiales funcionales y estructurales, también establece la relación entre la estructura y sus propiedades, además de evaluar las aplicaciones de los materiales generados.¹¹

⁹ Campa Molina, J. (2007). Biomateriales: fundamentos, técnicas y aplicaciones. Ocotlán, Jalisco: Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Ciénaga, 2007.

¹⁰ Schwartz, M. M. (2008). Smart materials. Boca Raton: CRC Press, 2008.

¹¹ Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable. "Química de materiales". http://www.cciqs.uaemex.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=102&Itemid=60

3.1.1. Química orgánica.

La química orgánica funciona como una herramienta muy útil para la ciencia de materiales al correlacionar la estructura de algún componente molecular con las propiedades de los compuestos orgánicos. De manera general, los compuestos orgánicos resultan versátiles al poder ser modificados estructuralmente con el objetivo de modular alguna de sus propiedades. En comparación con sus contrapartes inorgánicas, los compuestos orgánicos presentan ventajas como la disminución de precios en su fabricación, así como en un menor impacto ambiental.

Ésta rama de la química ha mostrado un gran auge en varios sectores industriales, como: la industria petroquímica, de plásticos, tensoactivos, farmacéutica, agroquímica, dispositivos optoelectrónicos, y en la generación de energía eléctrica en el campo de las energías renovables.

3.1.2. Química de polímeros.

El desarrollo de polímeros para ciencia de materiales se ha dado desde mediados del siglo pasado, ya que materiales poliméricos han sido capaces de sustituir algunos materiales tradicionales y/o avanzados. Los polímeros¹² ofrecen algunas ventajas sobre otros materiales por las siguientes razones:

1. Son de fácil obtención a bajas temperaturas y presiones, por lo que hace que la fabricación de objetos por moldeo de plásticos sea más económica.
2. Permite la obtención de estructuras con formas complejas (geometrías diversas) con un mínimo de operaciones de fabricación.
3. Su baja densidad da como resultado productos ligeros, lo que es ideal para la industria de los transportes, como la aeronáutica y automotriz.
4. Alta estabilidad frente a agentes químicos, y elevado grado de resistencia a la corrosión, lo que los hace muy adecuados para revestimientos en varios sectores industriales (petróleo y gas).
5. Conductividad térmica y eléctrica baja, por lo que se emplean como aislantes.
6. Durabilidad y tenacidad.
7. Bajo costo y precio.

¹² Cowie, J.G., & Arrighi, V. (2008). *Polymers: chemistry and physics of modern materials*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2008.

Los materiales inteligentes, debido a su diferente naturaleza química, tienen un comportamiento sensible a una amplia variedad de fenómenos físicos y químicos. Su importancia radica en la posibilidad de desarrollar nuevas tecnologías, como en la microelectrónica, donde es posible diseñar y sintetizar estructuras poliméricas con propiedades activas predefinidas. Un ejemplo de ello fueron las pantallas de cristal líquido (LCD: *Liquid Crystal Definition*) que se encontraban en pantallas planas, computadoras, celulares, etc. Las cuales en la actualidad se encuentran en desuso, debido a la aparición de la tecnología OLED (*Organic Light-Emitting Diodes*), la cual utiliza multicapas de polímeros que emiten luz ante pequeños estímulos eléctricos, permitiendo de esta manera diseños más ligeros y flexibles.

3.1.3. *Química supramolecular.*

La química supramolecular se define como “*la química más allá de la molécula*”. Con esta rama de la química es posible diseñar moléculas capaces de producir agregados y conjuntos moleculares con las cualidades deseadas para cumplir con un fin específico.¹³ La química supramolecular tiene un gran impacto en la nanotecnología y en el desarrollo de materiales a escala nanométrica.

Entre las numerosas aplicaciones de este ramo podemos encontrar:

- ❖ Desarrollo de nuevos materiales y catalizadores.
- ❖ Almacenaje de hidrógeno y dióxido de carbono (CO₂).
- ❖ Adsorción reversible de ácido sulfhídrico (H₂S) o compuestos sulfurados.
- ❖ Adsorción de metales pesados en aguas residuales.
- ❖ Sensores químicos.

Los materiales a escala supramolecular y nanométrica presentan una amplia diversidad de propiedades electrónicas y químicas, entre las que podemos encontrar: conductividad, reconocimiento molecular, ferroelectricidad, ferromagnetismo, actividad fotoquímica, foto-física, catalítica y electro-catalítica.¹⁴ En este contexto, estos materiales se pueden emplear en numerosas aplicaciones tecnológicas y electrónicas (Figura 4).

¹³ Seiffert, S. *Supramolecular polymer networks and gels*. Cham: Springer, 2015.

¹⁴ Steed, J. W., & Gale, P. A. *Supramolecular chemistry : from molecules to nanomaterials*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2012.

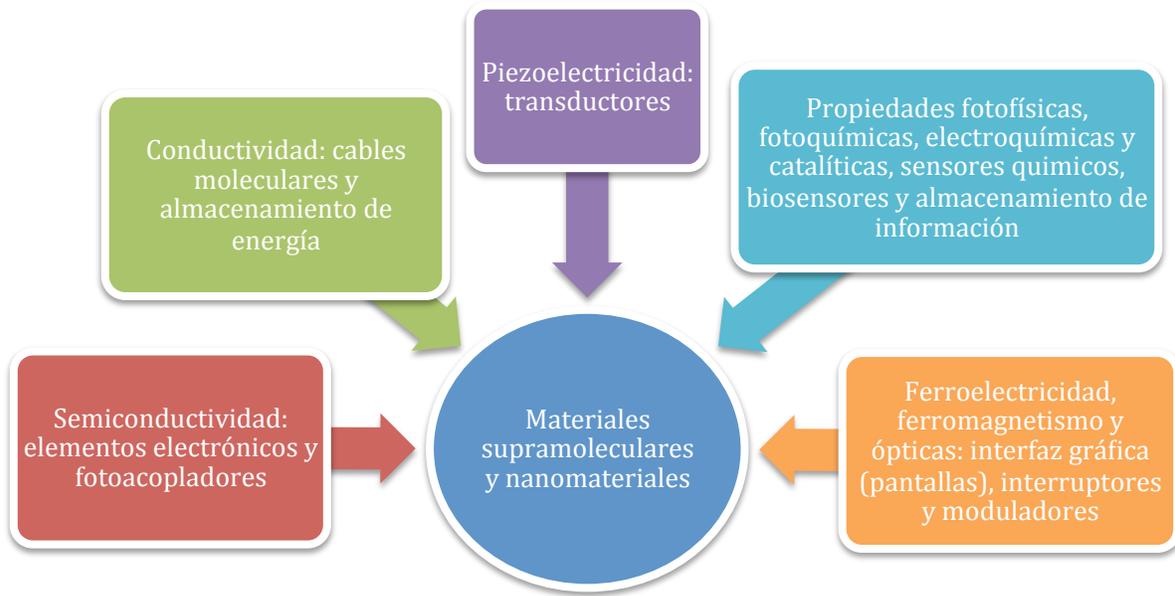


Figura 4. Propiedades y aplicaciones tecnológicas de los materiales nanométricos y supramoleculares.

3.1.4. Ingeniería de cristales.

Un cristal es un arreglo tridimensional ordenado, cuyas propiedades físicas y químicas dependen del arreglo geométrico de sus componentes moleculares (Figura 5). Es por ello, que la ingeniería de cristales se basa en la comprensión de las interacciones intra- e intermoleculares en el contexto de la organización jerárquica de arreglos cristalinos, y en la aplicación de este conocimiento para el diseño de nuevos sólidos con propiedades anisotrópicas definidas.

La ingeniería de cristales tiene como objetivo el control y predicción de la organización supramolecular de bloques de construcción previamente diseñados, con el objetivo de modular las propiedades físicas y químicas de los materiales.¹⁵

¹⁵ Dorazco González, A., & Valdés Martínez, J. (2006). Cu(II) un reto en ingeniería de cristales : construcción de cadenas 1D y macrociclos.

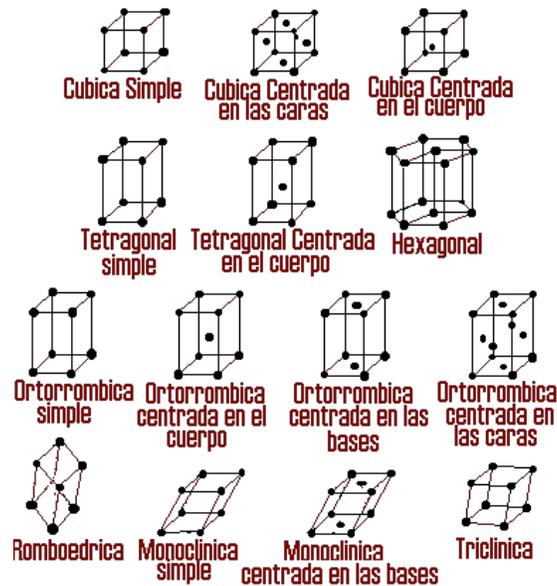


Figura 5. Geometrías en estructuras cristalinas.

Su desarrollo ha permitido obtener materiales con propiedades estructurales, térmicas, magnéticas, de conductividad, ópticas y eléctricas de gran interés.¹⁶ Las cuales a su vez se han aplicado en nanotecnología, crecimiento de cristales, diseño de fármacos, máquinas moleculares, reacciones en estado sólido, y sólidos porosos para adsorción de moléculas pequeñas.

3.2. Diseño y desarrollo de materiales

Para el diseño y desarrollo de materiales se requiere el uso de diversas áreas científicas dependiendo del tipo de función a realizar, esto con el objetivo de controlar y explotar propiedades intrínsecas de los componentes moleculares, como: electrónicas, magnéticas, ópticas, térmicas, catalíticas y adsorbentes, entre otras. La posibilidad de desarrollar nuevos materiales, o modificar los ya existentes, ha permitido la producción de materiales con aplicación en la industria de petróleo y gas, como aleaciones basadas en acero y tungsteno para actividades de exploración y producción (tuberías de perforación, revestimientos, etc.).

¹⁶ Desiraju, G. R., Vittal, J. J., & Ramanan, A. Crystal engineering: a textbook. New Jersey, New Jersey: World Scientific; IISc Press, c 2011.

Actualmente materiales como los polímeros supramoleculares, las redes metal-orgánicas y las redes orgánicas covalentes están aplicándose en la industria petrolera, unas de manera experimental y otras como una alternativa a los materiales y herramientas convencionales. Se plantea el diseño a la resolución de un problema o reto técnico que se tenga dentro de la industria, tanto en las operaciones de exploración y explotación, como en las operaciones de comercialización y transformación en productos derivados del petróleo.

3.2.1. Metalurgia física y aleaciones.

La metalurgia física involucra el procesamiento de materiales metálicos con base en el conocimiento de su estructura cristalina, y de sus propiedades físicas, químicas, eléctricas, magnéticas y mecánicas. Los metales se mezclan para crear aleaciones, donde el calor permite el endurecimiento de los metales y su superficie pueda ser protegida por revestimientos.¹⁷ Las aleaciones son mezclas entre metales, como el hierro, cobre, etc., con otros metales o con elementos no metálicos para desarrollar propiedades como: dureza, resistencia a la corrosión, alta estabilidad térmica y durabilidad. Las propiedades de las aleaciones no dependen solamente de su composición química, sino también de la manera en la que han sido preparados.¹⁸

Un tipo de aleaciones que han surgido en los últimos años; son las súper-aleaciones, materiales basados en tungsteno, níquel, cobalto, o una mezcla níquel-cobalto; que contienen una cantidad controlada de elementos trazadores que les permite tener una gran resistencia a altas temperaturas (por encima de los 1000 °C). Este tipo de materiales se utiliza en los motores tipo jet, intercambiadores de calor, en plantas petroquímicas y en las operaciones de exploración y producción, así mismo en la industria de la energía geotérmica.¹⁹

3.2.2. Compuestos de matriz metálica.

Una nueva clase de materiales disponibles comercialmente, son aquellos compuestos con una matriz metálica (MMC's: *Metal Matrix Composites*). Los MMC's presentan dos fases: una continua (constituida por la matriz) y una discontinua (denominada refuerzo). Las matrices metálicas incluyen materiales como el aluminio, magnesio, níquel, titanio, cobre y otros metales.

¹⁷ Tran, A. P. (2016). Metallurgy. Salem Press Encyclopedia of Science.

¹⁸ Franceschetti, D. R. (2016). Alloys. Salem Press Encyclopedia of Science.

¹⁹ Pfeiler, W. Alloy physics: a comprehensive reference. Weinheim: Wiley-VCH, c 2007.

La composición de las fibras regularmente se integra por carbono, sílice o algún tipo de cerámicas.²⁰ Existen tres tipos de MMC's (Figura 6), entre los que destacan: (i) reforzados con fibras continuas (proporcionan rigidez y resistencia); (ii) reforzados con fibras discontinuas; y (iii) reforzados con partículas (aumentan la estabilidad dimensional y la resistencia). Presentan propiedades como: bajo peso, alta resistencia mecánica, resistencia en ambientes corrosivos y operación en altas temperaturas (alrededor de los 800 °C); debido a estas características, los MMC's tienen diversas aplicaciones en el sector aeroespacial, automotriz, aeronáutico, energético y químico.

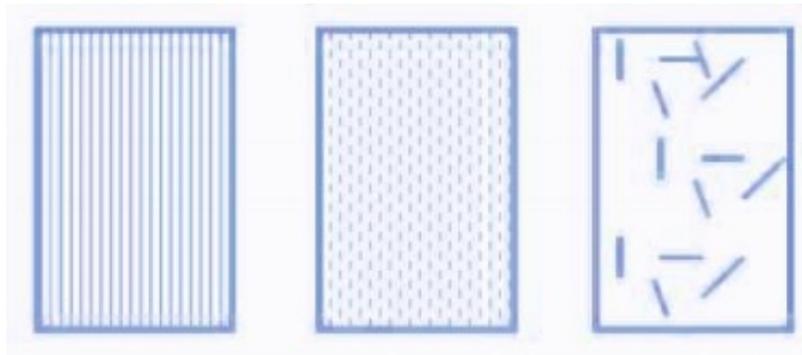


Figura 6. Tipos de MMC's. Continuas, discontinuas y partículas (izquierda a derecha).

3.2.3. Polímeros semiconductores.

Los polímeros pueden tener un carácter semiconductor por dos maneras diferentes: (i) mediante el mezclado de un polímero no conductor con un material que si es conductor; y (ii) mediante el dopado de polímeros con materiales conductores. Los polímeros semiconductores son solubles en disolventes orgánicos comunes, lo que permite que sean depositados en películas delgadas de gran superficie a bajo costo, mediante el proceso de impresión convencional o recubrimiento por centrifugación. Adicionalmente, los polímeros semiconductores presentan las características propias de los materiales poliméricos, como son flexibilidad y durabilidad. Estos se pueden clasificar en polímeros conductores/semiconductores extrínsecos e intrínsecos.²¹

²⁰ Wessel, J. K. Handbook of advanced materials: enabling new designs. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, c 2004.

²¹ Jain, S. C., Willander, M., & Kumar, V. Conducting organic materials and devices. Amsterdam: Elsevier/Academic, 2007.

Los semiconductores extrínsecos están conformados por un polímero, generalmente termoplástico, y una carga: negro de humo, polvo metálico e hilos metálicos.²² Estos polímeros se emplean actualmente en la industria petrolera como recubrimientos de las tuberías en las operaciones de perforación y producción de un pozo. Los semiconductores intrínsecos son materiales poliméricos capaces de conducir electricidad. La conductividad es una propiedad intrínseca del material, los polímeros semiconductores más comunes poseen una distribución de enlaces dobles (Csp^2-Csp^2) alternados con enlaces sencillos (Csp^3-Csp^3) a lo largo de su estructura.

3.2.4. Polímeros supramoleculares.

Los polímeros supramoleculares se definen como sistemas poliméricos que utilizan interacciones no covalentes para dirigir el auto-ensamble de sus componentes, para controlar su forma, y/o definir su comportamiento.²³ Un polímero supramolecular se encuentra constituido por unidades monoméricas, oligoméricas o poliméricas (Figura 7), a través de interacciones intermoleculares no covalentes.²⁴

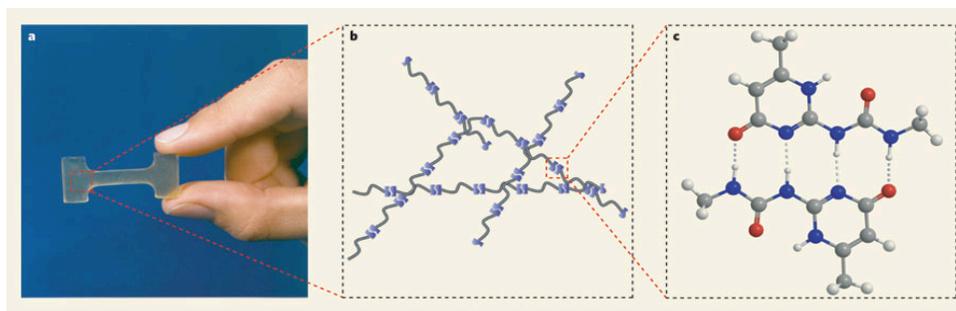


Figura 7. a) componente plástico hecho de polímeros supramoleculares; b) la estructura molecular es una red de monómeros interconectados; c) los monómeros se auto-ensamblan para formar la red polimérica.

La reversibilidad en el proceso de asociación de las unidades monoméricas es la responsable de la aparición de diversas propiedades características de los polímeros supramoleculares, permitiendo que estos materiales sean aptos para responder a variaciones externas del sistema, como: pH, fuerza mecánica, radiación, entre otros.²⁵ Debido a ello, los polímeros supramoleculares presentan

²² Rioja Guerrero, E., & Beltrán Sánchez, M. R. (1998). Polímeros semiconductores.

²³ Chem. Soc. Rev., 2012, 41, 5879–5880.

²⁴ Harada, A. Supramolecular polymer chemistry. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, c 2012.

²⁵ Chem. Soc. Rev., 2012, 41, 5922–5932.

ventajas muy importantes en comparación con sus contrapartes poliméricas unidas de forma covalente, como son: auto-reparación, respuesta a un estímulo, memoria de forma, facilidad de procesamiento, y reciclabilidad.²⁶ La capacidad de respuesta a estímulos externos provee un amplio intervalo de aplicaciones que van desde materiales inteligentes y adaptables, hasta energéticas, biomédicas, y de sustentabilidad ambiental. Es por ello, que cobra especial relevancia en su desarrollo factores como disponibilidad sintética, costo, estabilidad, y funcionalidad.

3.2.5. *Redes metal-orgánicas (MOF's) para la adsorción de moléculas.*

Las redes metal-orgánicas (*MOF's: Metal-Organic Frameworks*) son polímeros de coordinación porosos (*PCP: Porous Coordination Polymers*) que están conformados por centros metálicos unidos a través de ligantes orgánicos que fungen como unidades secundarias de construcción (*SBU's: Secondary Building Units*); los cuales han mostrado la capacidad de adsorber diversas moléculas orgánicas (Figura 8).

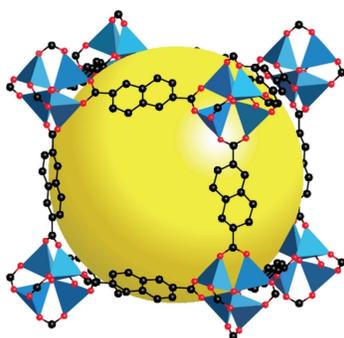


Figura 8. Estructura de un MOF.

Los MOF's poseen una riqueza química y estructural difícil de encontrar en otra clase de materiales. La amplia versatilidad que presentan se deriva al hacer variaciones en sus componentes,²⁷ lo cual da lugar a materiales que encuentran aplicaciones en diversos campos de la ciencia de materiales (Figura 9).

²⁶ Chen, Y., Zhao, Z., Karim, A., & Weiss, R. A. (2016). Shape Memory of Microscale and Nanoscale Imprinted Patterns on a Supramolecular Polymer Compound. *Macromolecular Rapid Communications*, 37(23), 1932-1938. doi:10.1002/marc.201600362

²⁷ Abdul Halim, R. (2016). *Metal Organic Frameworks: Explorations and Design Strategies for MOF Synthesis*.

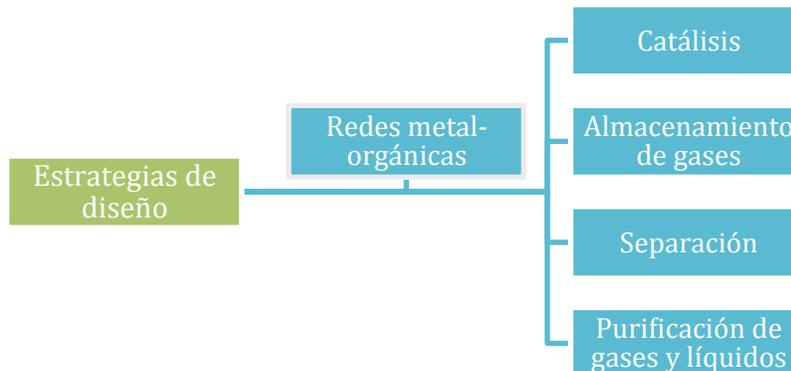


Figura 9. Aplicaciones de los MOF's.

Los MOF's han sido utilizados para la separación y almacenamiento de gases. Un proceso efectivo de separación de gases a través de materiales porosos, puede ser debido a una adsorción selectiva basada en las diferencias de tamaño o forma de las moléculas de gases. Además de esto, la separación puede ser altamente efectiva cuando el material adsorbente muestra diferencias en la interacción con los distintos componentes de una mezcla de gases.²⁸ Las propiedades fisicoquímicas (como el tamaño de poro, la pureza o la composición química) de los PCP pueden modularse fácilmente. En el campo del almacenamiento del hidrógeno, los PCP enfrentan un reto muy interesante: el aumento en la fuerza de interacción entre hidrógeno (H_2) y el material.

Puesto que los PCP están constituidos por centros metálicos y ligantes orgánicos, la interacción de hidrógeno con dichos componentes constituye un amplio campo de estudio. El interés en estos materiales se ha enfocado en posibles aplicaciones de producción y almacenamiento de hidrogeno como combustible. Así mismo, investigaciones teóricas sobre el enlace entre hidrogeno y diversos centros metálicos, ha contribuido considerablemente al diseño de nuevos materiales capaces de almacenar hidrogeno.²⁹ El metano (CH_4), principal componente del gas natural, es un combustible abundante y se considera también un acarreador energético prometedor. Actualmente, el metano se comprime y almacena en tanques a presiones de aproximadamente 250 bar a temperatura ambiente. Para resolver dichas dificultades técnicas, la investigación de materiales porosos como los PCP son una opción para el almacenamiento de CH_4 .

²⁸ C. Montoro, F. Linares, E. Q. Procopio, I. Senkovska, S. Kaskel, S. Galli, N. Masciocchi, E. Barea, J. A. R. Navarro, J. Am. Chem. Soc. 2011, 133, 11888–11891.

²⁹ Revista Materiales. (2014, Mayo 6). "Polímeros de coordinación porosos (PCP) como nuevas plataformas energéticas: La importancia de los centros metálicos insaturados". <https://materialesavanzados.wordpress.com/2014/05/06/polimeros-de-coordinacion-porosos-pcp-como-nuevas-plataformas-energeticas-la-importancia-de-los-centros-metalicos-insaturados/>

3.2.6. *Redes orgánicas covalentes (COF's) para la adsorción de moléculas.*

Las redes orgánicas covalentes (COF's: *Covalent Organic Frameworks*) son macromoléculas orgánicas conformadas por bloques moleculares compuestos de elementos ligeros (carbono, oxígeno y boro), los cuales pueden formar redes cristalinas mediante interacciones no covalentes. Este tipo de materiales presentan grandes ventajas por su alto volumen poroso, estructura regular, estabilidad hidrotérmica y la amplia variedad funcional. Los COF's constituyen las primeras redes orgánicas cristalinas porosas que tienen una alta estabilidad térmica, grandes áreas de superficie y densidades sumamente bajas. Los COF's tienen una estructura parecida al grafito con tamaños de poro en el intervalo de 15-30 Å.³⁰

Estos compuestos al igual que los MOF's presentan características adecuadas para el almacenamiento y adsorción de gases, como hidrógeno y metano, pero estos compuestos presentan mayor ventaja en la separación de moléculas de hidrógeno en comparación a las redes órgano-metálicas. También la separación selectiva, catálisis y aplicaciones en el campo de la nanotecnología (Figura. 10).³¹

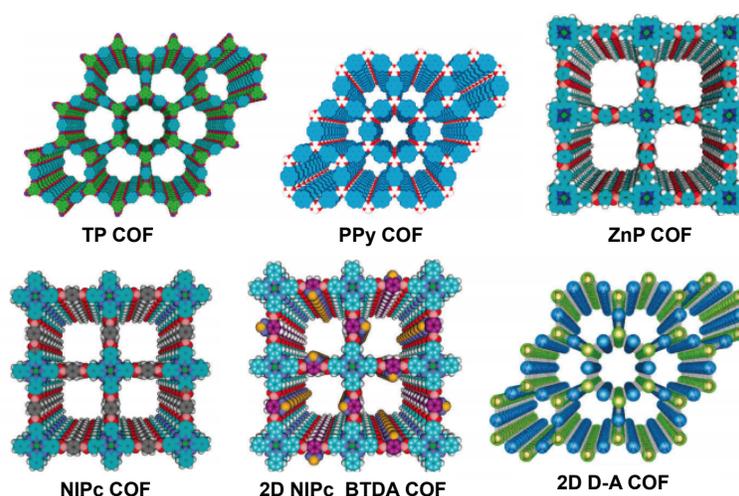


Figura 10. Estructura de diversos COF's.

³⁰ Maurisan Alves, L. (2007). Nanoestructuras formadas por redes orgánicas covalentes.

³¹ Liao, J., Yazaydin, A. O., Yang, S., Li, F., & Ding, L. (2016). Molecular simulation studies of hydrogen enriched methane (HEM) storage in Covalent Organic Frameworks. *Microporous & Mesoporous Materials*, 231138-146. doi:10.1016/j.micromeso.2016.05.030

Debido a su baja densidad, los COF's pueden utilizarse no sólo para almacenar hidrógeno y contribuir al desarrollo de una nueva fuente de energía, sino también para almacenar gases de efecto invernadero, como el CO₂, para así transformarlo a monóxido de carbono (CO).

3.2.7. Nanotubos de carbono (CNT).

Los nanotubos de carbono (CNT: *Carbon Nano-Tubes*) son alótropos del carbono, como el diamante, el grafito o los fullerenos. Su estructura puede proceder de una lámina de grafeno enrollada sobre sí misma. Debido al grado de enrollamiento, y la manera como se conforma la lámina original, muestran distinto diámetro y geometría interna.³² Existen diferentes tipos en función de las capas que los forman, estos pueden ser nanotubos de carbono de pared sencilla (SWCNT: *Single Wall Carbon Nano-Tubes*) y nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT: *Multi Wall Carbon Nano-Tubes*) que pueden considerarse como capas de láminas de grafito enrolladas concéntricamente, donde cada átomo de carbono está unido con otros tres mediante hibridación sp² (Figura 11). Son sistemas ligeros, huecos y porosos que tienen alta resistencia mecánica, y por tanto, son buenos candidatos para el reforzamiento estructural de materiales (conductividad eléctrica, alta resistencia a la tracción y enorme elasticidad), al almacenamiento de gases y formación de compuestos de bajo peso.³³

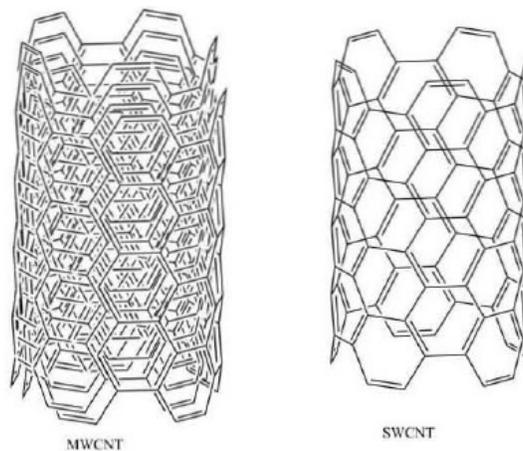


Figura 11. Nanotubos de carbono de pared múltiple y de pared sencilla.

³² Myers, J. E. (2016). Carbon fiber and carbon nanotubes. Salem Press Encyclopedia of Science.

³³ Balasubramanian, K., & Burghard, M. Carbon nanotubes: methods and protocols. New York : Humana Press, 2010.

Los CNT's presentan ventajas como: (i) habilidad para trabajar a escala molecular, átomo a átomo, lo que permite crear grandes estructuras con una nueva organización molecular; (ii) son materiales base, utilizados para la síntesis de nanoestructuras vía auto-ensamblado; y (iii) presentan propiedades y simetría únicas que determinan sus potenciales aplicaciones, en campos que van desde la electrónica, almacenamiento de energía, sensores o biomedicina.

3.3. Técnicas para la caracterización y desarrollo de materiales.

La caracterización de las propiedades físicas y químicas de un material permite determinar las condiciones bajo las cuales se podrá utilizar y su correspondiente control de calidad. Una caracterización ideal debe presentar las siguientes cualidades: no debe ser destructiva, ser precisa, ser repetible, rápida, además de maximizar y ampliar los datos requeridos. La caracterización de materiales se ha ideado de tal manera que se puede clasificar de acuerdo a los principios físicos que esta requiere.

La microscopía electrónica incluye un conjunto de técnicas de caracterización que permiten determinar morfología y composición de la superficie de un material, entre las que podemos encontrar:

1. Microscopía de fuerza atómica (AFM: *Atomic Force Microscopy*).
2. Microscopía electrónica de barrido (SEM: *Scanning Electron Microscopy*).
3. Microscopía de transmisión de electrones (TEM: *Transmission Electron Microscopy*).

La microscopía de fuerza atómica es una herramienta que permite obtener: a) imágenes topográficas en tercera dimensión de la superficie del material, b) análisis completo de imágenes de las irregularidades de la superficie, c) medidas de la elasticidad de la superficie del material o la compresibilidad, y d) medidas de la adhesión de superficie.³⁴ (Figura 12)

³⁴ Reza, D., Wei-Min, W., David, L. M., & En-Te, H. (2015). Sistema de microscopía de fuerza atómica basada en una unidad de lectura óptica digital y un escáner-zumbador. *Revista Mexicana De Física*, (4), 238.

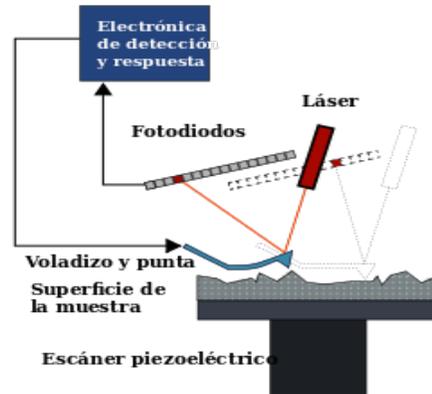


Figura 12. Componentes de un microscopio de fuerza atómica.

La microscopía electrónica de barrido o SEM utiliza un haz de electrones para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto (Figura 13). Es un instrumento que permite observar y caracterizar la superficie de sólidos inorgánicos y orgánicos.³⁵ Las aplicaciones del equipo van desde la industria petroquímica, la metalúrgica hasta la medicina forense.

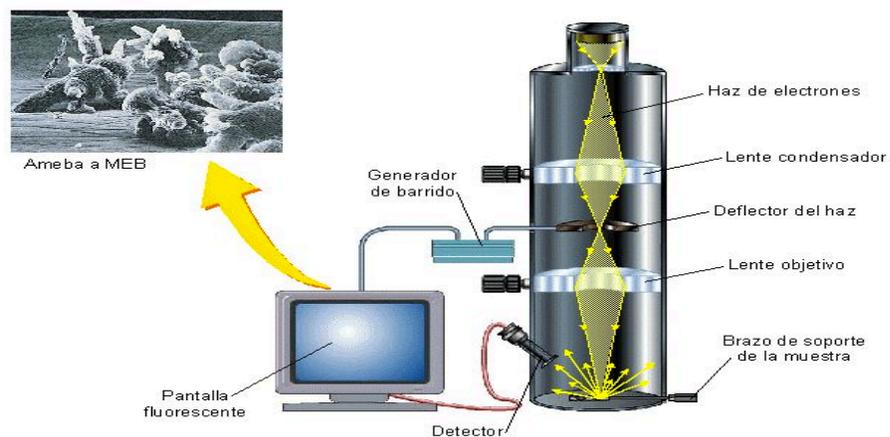


Figura 13. Esquema de un microscopio electrónico de barrido.

El microscopio electrónico de transmisión basa su funcionamiento en la transmisión de electrones con y sin dispersión (Figura 14), se utilizan para crear imágenes de transmisión convencionales, de campo oscuro y alta resolución, revelando la estructura interna de las muestras, tamaño y distribución de partículas, su red cristalina, interfaces y defectos puntuales de la red atómica.³⁶

³⁵ Kuo, J. (2007). Electron microscopy : methods and protocols. Totowa, New Jersey: Humana Press, 2007.

³⁶ Reimer, L., & Kohl, H. Transmission electron microscopy : physics of image formation. New York : Springer, c2008.

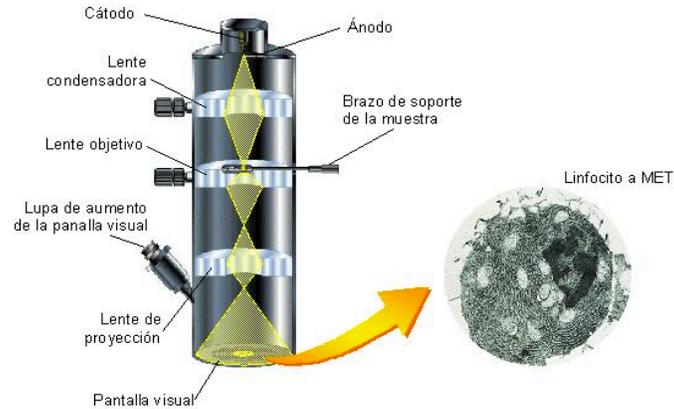


Figura 14. Esquema de un microscopio electrónico de transmisión.

Los microscopios de transmisión tienen una capacidad de resolución de hasta 0.23 nanómetros entre puntos, y 0.14 nanómetros entre líneas, lo que permite aplicarlo en múltiples campos de investigación como: biología, materiales avanzados, medicina, farmacología, arqueología, control de calidad, investigación forense, catálisis, combustibles fósiles, energía solar, y biodegradación de materiales.³⁷

Las películas son capas de materiales con espesores que van desde algunos cuantos nanómetros hasta algunos cientos de micrómetros, las cuales se forman al depositar capas de material sobre un sustrato. Se aplican como componentes moleculares de dispositivos electrónicos, recubrimientos ópticos, celdas solares o recubrimientos inteligentes para tuberías.

Los procedimientos para la formación de películas se clasifican de la siguiente manera:

- ❖ Métodos físicos: evaporación (al vacío, reactiva, por haces de electrones).
- ❖ Métodos físico-químicos: pulverización (de diodo, reactivo, de polarización y magnético), procesos de plasma, y procesos térmicos de formación (oxidación, nitruración y polimerización).

³⁷ Marc De Graef, "Introduction to Conventional Transmission Microscopy" Cambridge University Press, New York (2003).

- ❖ Métodos químicos en fase gaseosa: deposición química en fase vapor, epitaxia en fase vapor (VPE, *Vapour Phase Epitaxy*), e implantación iónica.
- ❖ Métodos químicos en fase líquida: electrodeposición, epitaxia en fase líquida (LPE, *Liquid Phase Epitaxy*), y técnicas mecánicas (inmersión, centrifugación y pulverización).

Las propiedades de las películas, tales como su composición, su fase cristalina, morfología, orientación, espesor y microestructura, se pueden controlar por el método de deposición empleado y las condiciones del depósito. Hay numerosas ventajas que presentan las películas delgadas entre las que se encuentran: (i) fabricación simple; (ii) la manufactura requiere pequeñas cantidades; (iii) proporcionan materiales flexibles y duraderos; y (iv) no se requiere de infraestructura adicional para albergar las películas.

3.4. Mecanismos de deterioro de materiales.

Dependiendo de las condiciones de uso, los materiales pueden sufrir diferentes mecanismos de deterioro estructural, lo que conlleva a que países industrializados gasten alrededor del 4 % de su producto interno bruto (PIB) para contrarrestar esta problemática. Tanto los polímeros como las cerámicas, presentan deterioro por ataques químicos directos (degradación), mientras que los materiales metálicos se deterioran debido a la corrosión.³⁸

La corrosión es un fenómeno de deterioro que sufre un material metálico a consecuencia de su interacción con el oxígeno presente en el medio ambiente; al poseer electrones libres pueden sufrir reacciones electroquímicas, la velocidad con las que ocurren estas reacciones depende de la temperatura, así como la concentración de reactivos y productos. De igual manera, factores como el esfuerzo mecánico y la erosión pueden contribuir a acelerar la corrosión (Figura 15).³⁹

³⁸ Pancorbo Floristán, F. J. Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación. México, D. F.: Alfaomega, [2013].

³⁹ Cramer, S. D., & Covino, B. S. Corrosion: materials. Materials Park, Ohio: ASM International, 2005.



Figura 15. Tuberías de perforación destruidas por la corrosión.

El desgaste es la pérdida o remoción progresiva de un material sobre una superficie como consecuencia del contacto y frotamiento de éste con otros materiales. El desgaste puede ser de carácter: adhesivo, erosivo, fatiga, por vibración de uniones e impacto.

El termino degradación se refiere a la destrucción de la estructura, ésta se presenta esencialmente en materiales poliméricos. La degradación se presenta bajo la influencia de factores ambientales, como: calor, incidencia directa de la luz, sustancias químicas (ácidos) y algunas sales. Estos cambios son indeseables, ya que provocan grietas y la desintegración química de los materiales.

4. APLICACIONES DE LA CIENCIA DE MATERIALES

A medida que las reservas petroleras disminuyen a nivel mundial, y que la demanda de energía incrementa; la necesidad de desarrollar otras fuentes de generación de energía se ha vuelto prioritaria. En años recientes, diversas tecnologías se han desarrollado para generar energía eléctrica a partir de geotermia, aprovechamiento del viento o energía mareomotriz. Particularmente, la explotación de la energía solar resulta prometedora debido a que cada vez es más eficiente su generación y distribución.

4.1. Panorama internacional de las energías renovables.

El desarrollo sustentable es un progreso que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades. Dentro de este contexto, Twidell y Weir (2006) definen como fuente de energía renovable a aquella obtenida de las continuas o repetitivas corrientes de energía que se producen en el medio ambiente natural. El diccionario de la energía considera que la energía renovable es cualquier fuente de energía que se regenera de forma natural durante una escala de tiempo corta, o bien, deriva directamente de la energía solar (energía solar térmica, fotoquímica y fotoeléctrica), indirectamente del sol (energía eólica, energía hidráulica, y la biomasa), o de otros flujos naturales de energía (geotérmica, mareomotriz).

En 2015, la capacidad mundial instalada de las fuentes de energía renovable se estimó en 1,360 gigawatts (GW), alrededor de 8 % más de lo registrado en 2012, lo que la llevó a representar aproximadamente un cuarto de la capacidad global instalada (estimada en alrededor de 5,360 GW en 2011) y alrededor del 17 % del suministro global de energía eléctrica (Figura 16).⁴⁰

⁴⁰ REN21. 2015. Renewables 2014 Global Status Report.

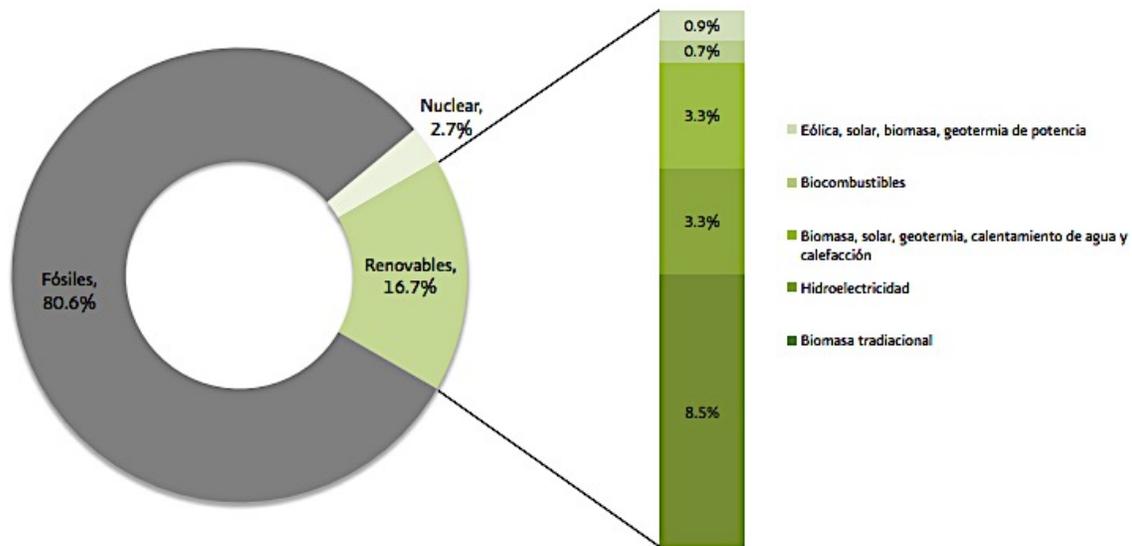


Figura 16. Distribución del consumo mundial de energías renovables, 2015.

4.2. La ciencia de materiales como alternativa para la producción de energías renovables.

Las energías renovables son precursoras del desarrollo y comercialización de nuevas tecnologías, de la creación de empleo, de la conservación de recursos energéticos no renovables, de la reducción de la dependencia de energéticos importados mediante el aprovechamiento de recursos locales, de la reducción de gases de efecto invernadero y de partículas que pueden dañar el ambiente o la salud pública.⁴¹ Entre sus desventajas se encuentran: cambios en la arquitectura y estética del ecosistema; impactos en la flora y faunas locales; contaminación acústica; y altos costos de instalación. Los enfoques en políticas para el desarrollo de tecnologías renovables son multifacéticos, van desde mecanismos de apoyo a la innovación a través del mercado, la inversión en investigación y conocimiento, cuotas, normas y mecanismos fiscales.⁴²

Una de las grandes problemáticas en la generación de energía renovable son los altos costos de fabricación y mantenimiento, ante este escenario la ciencia de materiales busca desarrollar nuevos materiales que puedan ser más eficientes, que requieran de menores gastos de operación y mantenimiento.

⁴¹ World Energy Outlook, IEA, 2011.

⁴² Halcón Arellano, B. I., Sánchez Aparicio, O., & Márquez Vázquez, M. (2015). Energías renovables: biogás, hidrógeno y metanol.

4.3. Desarrollo de materiales para la construcción de dispositivos opto-electrónicos.

Un dispositivo optoelectrónico convierte una señal óptica en una señal electrónica o viceversa. Se encuentran ampliamente distribuidos en circuitos de comunicaciones, sistemas de señalización, productos de consumo masivo, tecnología espacial, y física de partículas.⁴³ Estos se pueden clasificar de acuerdo al siguiente esquema (Figura 17):

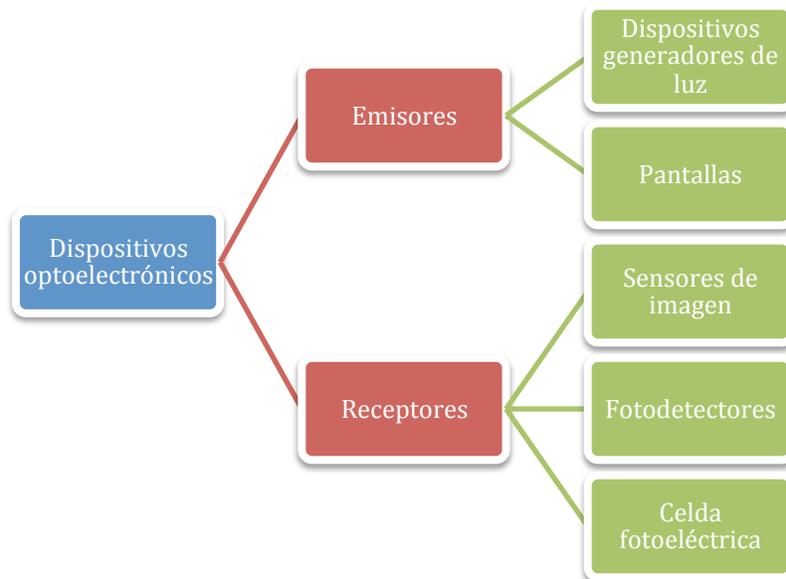


Figura 17. Clasificación de los dispositivos optoelectrónicos.

Los dispositivos receptores son aquellos que convierten una señal óptica en una señal electrónica, entre los que encontramos:

- ❖ Fotodetectores: fotodiodo PIN, fotodiodo de avalancha, fototransistor, fotoacoplador, y fotoresistencia (LDR: *Light Dependent Resistor*).
- ❖ Sensores de Imagen: CCD (*Charged Couple Device*), y CMOS (*Charged Metal-Oxide Semiconductor*).

⁴³ Piprek, J. (2005). Optoelectronic devices: advanced simulation and analysis. New York: Springer, 2005.

- ❖ Celda fotoeléctrica o fotovoltaica (Celdas solares).

Los dispositivos emisores son aquellos que convierten una señal eléctrica o electrónica en una señal óptica.

- ❖ Dispositivos generadores de luz: diodo emisor de luz (LED: *light emitting diode*) y diodo láser.
- ❖ Pantallas e interfaces (LCD: *Liquid Crystal Display*).

Una celda fotovoltaica es un dispositivo que permite transformar energía lumínica en energía eléctrica, a través del efecto fotoeléctrico, siendo el componente central de un panel solar. La eficiencia de conversión media obtenida por las celdas disponibles comercialmente (producidas a partir de silicio monocristalino) se encuentra entre el 11-12 %, pero según la tecnología utilizada varía desde el 6 % (celdas de silicio amorfo) hasta el 14-19 % (celdas de silicio policristalino). También existen celdas multicapa, conformadas normalmente por GaAs (arseniuro de galio) que alcanzan eficiencias del 30 %, a nivel laboratorio se ha superado el 42 % en paneles experimentales. Al conjunto de celdas fotoeléctricas se le conoce como panel fotovoltaico (Figura 18). Los paneles fotovoltaicos consisten en una red de celdas solares conectadas en serie para aumentar la tensión de salida hasta el valor deseado, a la vez que se conectan varias redes en paralelo para aumentar la corriente eléctrica que es capaz de proporcionar el dispositivo.⁴⁴

Los paneles solares pueden ser utilizados como un componente de un sistema fotovoltaico más grande, para generar y suministrar electricidad en aplicaciones comerciales y residenciales. Cada módulo tiene una clasificación por su potencia de salida de energía. Un solo módulo solar puede producir solamente una cantidad limitada de energía, la mayoría de las instalaciones contienen múltiples módulos interconectados que acumulan toda la energía en baterías que a su vez se encuentran conectadas a la red eléctrica. Este tipo de energía genera electricidad en más de 100 países; entre 2001 y 2011, la capacidad fotovoltaica creció a una tasa anual promedio de 44 %. Se estima que se instaló una capacidad de 17 GW conectada a la red durante 2010, totalizando de esta manera 40 GW.⁴⁵

⁴⁴ Quadri, N. P. Energía solar: agua caliente, energía fotovoltaica, calefacción, energía eólica, refrigeración, biomasa. Buenos Aires: Alsina, c 2003.

⁴⁵ World Energy Balances, Extended Energy Balances, IEA, 2012.

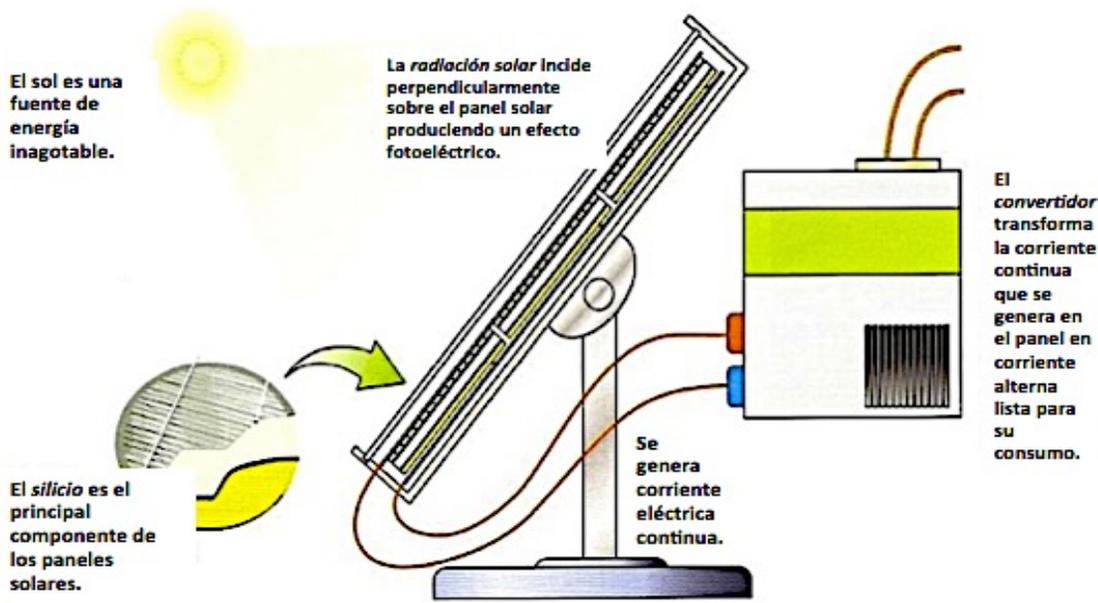


Figura 18. Funcionamiento de un panel solar.

4.4. Celdas solares orgánicas e inorgánicas.

La energía solar se puede aprovechar mediante celdas solares inorgánicas basadas en silicio (Figura 19). De manera general, una celda solar está conformada por una capa delgada de un material semiconductor, el cual es capaz de interactuar con los fotones provenientes de la luz solar, su funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico; que es la propiedad que tienen algunos materiales de producir una corriente eléctrica cuando incide una radiación lumínica sobre ellos.⁴⁶ La primera celda solar fue construida en 1883 por Charles Fritts, la cual tuvo una eficiencia del 1 %.

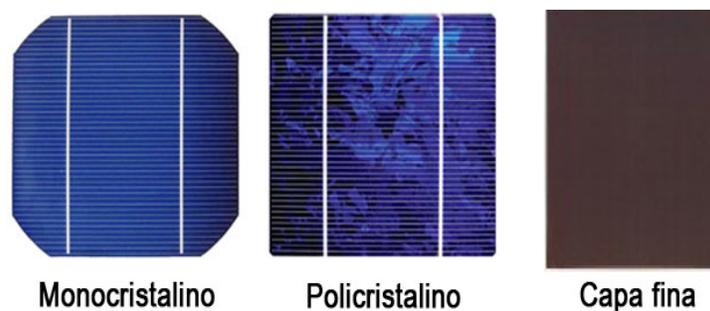


Figura 19. Materiales inorgánicos en la tecnología de celdas solares.

⁴⁶ McEvoy, A. J., Castaner, L., & Markvart, T. Solar cells: materials, manufacture and operation. Oxford : Academic Press, 2013.

También existen celdas solares basadas en materiales orgánicos como capas activas.⁴⁷ Estas ofrecen ventajas con respecto a sus análogos inorgánicas: (i) procesamiento sencillo; (ii) formación rápida de las capas; (iii) menor cantidad de material; (iii) la producción a gran escala representa una menor complejidad que con los compuestos inorgánicos; (v) mejor transporte de carga; (vi) solubilidad, (vii) elaboración de dispositivos más livianos y de baja dimensionalidad; y (viii) mayor flexibilidad (Figura 20).

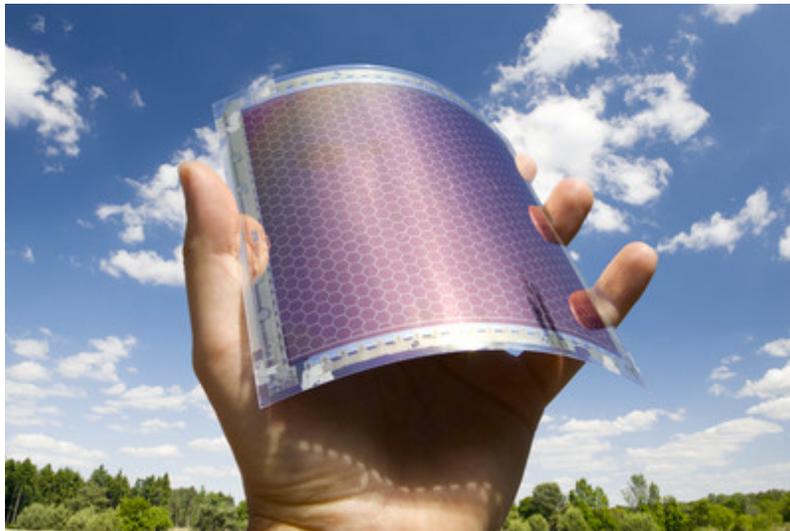


Figura 20. Celda solar orgánica.

Con respecto al medio ambiente, las celdas solares orgánicas generan menor impacto, dado a su bajo consumo energético en el proceso de fabricación. Entre sus desventajas podemos encontrar la baja eficiencia de conversión y su menor estabilidad referente a la vida útil en comparación con los paneles solares de silicio.⁴⁸ Los principales retos para las celdas orgánicas son el incremento de la eficiencia de conversión, la reducción en sus costos de fabricación y el incremento de sus tiempos de vida.

⁴⁷ Nunzi JM. Organic photovoltaic materials and devices. *Comptes Rendus Physique* 2002; 3(4): 523-542.

⁴⁸ Kumar, P. *Organic solar cells : device physics, processing, degradation, and prevention*. Boca Raton, Fla. : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.

5. LA CIENCIA DE MATERIALES EN LA INGENIERÍA PETROLERA.

La ciencia de materiales tiene como objeto de estudio la manipulación de elementos que existen en nuestro entorno con el fin de brindar una respuesta a una necesidad específica, esto mediante el diseño y síntesis de materiales con propiedades concretas que den respuesta al propósito particular por el cual han sido creados.

En la actualidad, la obtención de petróleo y gas natural se ha vuelto más complicada; es por ello, que las compañías petroleras han invertido en el desarrollo de nuevas tecnologías que les permitan explotar recursos que no son de fácil acceso. En este sentido, la industria petrolera tiene como reto la explotación de yacimientos a mayor profundidad del lecho marino, así como la explotación de recursos no convencionales, como son: yacimientos de *shale gas* y *shale oil* (los cuales se extraen por fracturamiento hidráulico), arenas bituminosas, hidratos de gas, yacimientos de baja porosidad y permeabilidad, entre otros. Además en otro contexto, se requiere de la implementación de procesos de recuperación secundaria y mejorada que sean más eficientes en términos técnicos y económicos. Debido a la volatilidad en los precios de los hidrocarburos, aunado a la reciente crisis económica que se ha presentado desde finales del año 2014, la industria petrolera tiene como prioridad la reducción de gastos, costos de operación y de mantenimiento. Por lo que, la ciencia de materiales surge como una herramienta adecuada para el desarrollo de nuevos y mejores materiales que sean más duraderos, fiables y seguros; los cuales no requieran de un mantenimiento frecuente y que tengan una amplia utilidad en todas las actividades de la cadena de valor en la industria petrolera.

5.1. Industria del gas y del aceite.

La palabra **petróleo** deriva del latín *petra* (piedra) y *óleum* (aceite) que conforma el término "*aceite de piedra*". Existen diversas teorías que explican el origen del petróleo, siendo la más aceptada la teoría orgánica; esta supone que el petróleo se origina por la descomposición de restos orgánicos acumulados en el fondo del subsuelo, esta materia orgánica se fue cubriendo con capas de sedimentos que al encontrarse en determinadas condiciones de presión y temperatura, se transformó lentamente en hidrocarburos con pequeñas cantidades de azufre, oxígeno,

nitrógeno, metales a nivel de trazas (fierro, cromo, níquel, vanadio), dando lugar a la mezcla que conocemos como petróleo crudo.⁴⁹

Por otro lado, el **gas natural** es una mezcla de hidrocarburos simples que se encuentra en estado gaseoso. El gas natural está compuesto aproximadamente en un 80 % de metano (CH₄), que es la molécula más simple de los hidrocarburos. Además puede contener pequeñas cantidades de etano, propano y otros hidrocarburos más pesados, también se pueden encontrar trazas de nitrógeno, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y agua.⁵⁰

Los hidrocarburos derivados del petróleo han resultado en un recurso muy valioso durante los últimos dos siglos, ya que su procesamiento a derivado en materiales que han sido utilizados para avances tecnológicos e industriales. Particularmente, derivados del petróleo (gasolinas, diesel, combustóleo, etc.) así como el gas natural, han proporcionado la energía que la humanidad requiere para llevar a cabo sus actividades cotidianas.

La cadena de valor del sector de los hidrocarburos (Figura 21),⁵¹ es el conjunto de todas las actividades económicas relacionadas con la exploración, producción, transporte, refinación, procesamiento, y comercialización de hidrocarburos. Estas actividades se clasifican en tres áreas:

1. *Upstream* (exploración y producción): Incluye la exploración de potenciales yacimientos de petróleo crudo y de gas natural (terrestre y marino). Así como la perforación de pozos exploratorios, y la posterior explotación de los pozos que llevan el petróleo crudo y/o el gas natural hasta la superficie.
2. *Midstream* (procesamiento): Incluye el transporte, almacenamiento y comercialización al por mayor de los productos crudos o refinados del petróleo a consumidores del *downstream*.
3. *Downstream* (comercialización y distribución): Involucra las tareas de refinamiento de petróleo crudo, procesamiento y purificación del gas natural, así como la comercialización y distribución de productos derivados de la refinación del petróleo y gas natural.

⁴⁹ Gore, P. W. (2016). Oil and gas origins. Salem Press Encyclopedia Of Science.

⁵⁰ Bahadori, A. Natural gas processing : technology and engineering design. Waltham, Massachusetts : Gulf Professional Publishing, [2014].

⁵¹ Rudolph, J. J. (2015). Petroleum and natural gas industry. Salem Press Encyclopedia.

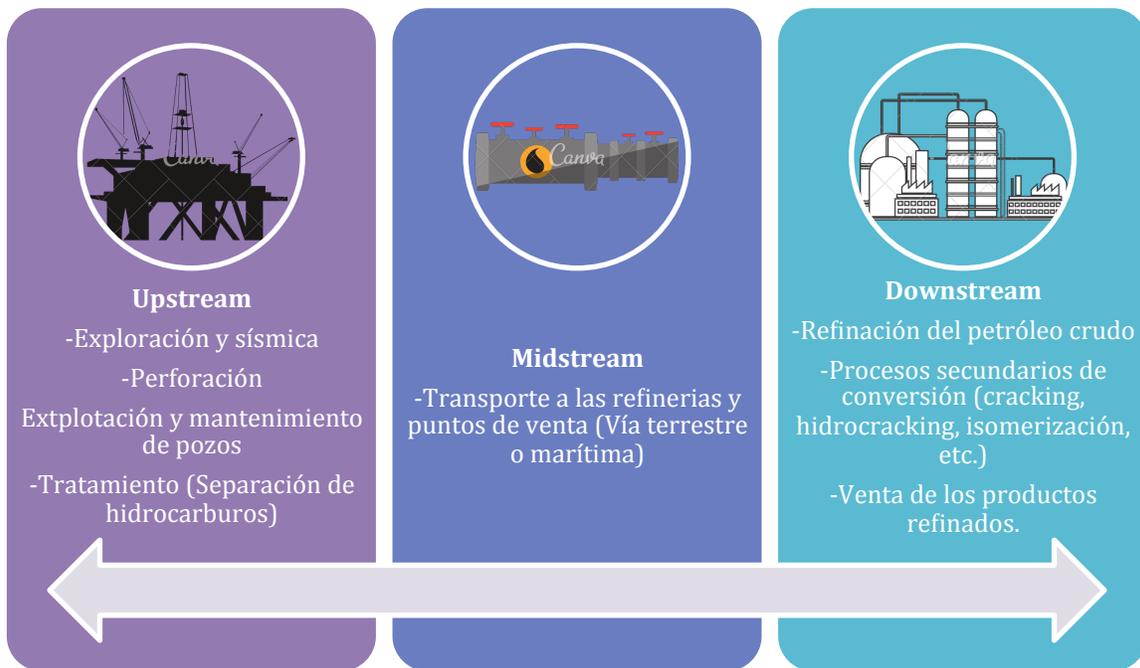


Figura 21. Cadena de valor de la industria petrolera.

5.1.1. Retos en la industria del petróleo y gas.

Dentro de la industria del petróleo y gas, existen diversos desafíos en el aspecto económico que están en función de diversos retos tecnológicos, como: avance en nuevos campos de investigación científica y tecnológica, los cuales a su vez dependen de los precios internacionales de los hidrocarburos.⁵² Entre los principales retos de la industria petrolera en el ramo de la exploración y producción se encuentran:

Exploración: obtención de imágenes de y por debajo de la sal; mejoramiento de la imagen del subsuelo; predicción de carga y propiedades de hidrocarburos; predicción de roca almacén y fluidos a partir de atributos sísmicos; mapeo estructural complejo y restauración; modelado petrofísico de saturación de hidrocarburos para caracterización; mapeo de secuencia de alta resolución y facies; predicción, caracterización, modelado estático y dinámico de yacimientos.

⁵² Hilyard, J. (2012). The oil & gas industry: a nontechnical guide. Tulsa, Oklahoma: PennWell, [2012].

Producción: explotación de aceite en campos de baja permeabilidad; explotación de yacimientos convencionales y no convencionales; explotación de yacimientos de aceite volátil, de gas, y condensado en condiciones críticas; explotación de yacimientos de crudos pesados y extra pesados; recuperación secundaria y mejorada; explotación de campos de aceite y gas, en aguas profundas y ultra-profundas; diseño de perforación, terminaciones o intervenciones en pozos no convencionales; control de agua y gas; manejo, proceso y transporte de crudos pesados y extra pesados; y explotación de yacimientos de alta presión, alta temperatura y mayores profundidades.

5.1.2. *La ciencia de materiales y la nanotecnología en la industria del petróleo y gas.*

La nanotecnología es un campo derivado de la ciencia de materiales que se encuentra enfocado al diseño, síntesis, caracterización, aplicación y construcción de dispositivos en una escala de tamaño nanométrico (dimensiones entre 1 y 100 nm),^{53,54} en una de sus dimensiones, en dos de sus dimensiones (nanotubos y nanofibras de carbono), o en sus tres dimensiones (fulerenos y nanopartículas) (Tabla 1).

	Dimensionalidad	Nanomateriales
Nanoestructurados	1D	Capas, multicapas, películas delgadas, recubrimientos de superficie (esencialmente aplicación electrónica)
	2D	Nanocables, nanofibras, nanotubos, esencialmente en estructuras de carbono y/o metales
Nanopartículas	3D	Nanopartículas en general; precipitados y coloides, puntos nanométricos (nanopartículas metálicas con propiedades semiconductoras)

Tabla 1. Características de los materiales a nivel nanométrico.

⁵³ Kulkarni, S. K. Nanotechnology: principles and practices. Cham: Springer, [2015].

⁵⁴ MIT; 10 Emerging Technologies, Technology Review; 2010.

Desde el año 2008, se constituyó en los Estados Unidos el Consorcio de Energía Avanzada (AEC: *Advanced Energy Consortium*) con el propósito de explotar el potencial de la nanotecnología. Éste engloba la cooperación de grandes compañías petroleras, de servicios y diferentes universidades del mundo, como: BP, Conoco-Phillips, Shell, Total, OXY, BR, Marathon, BH, Schlumberger, Universidad de Texas, Harvard, y la Universidad de Michigan. La principal misión del consorcio es impulsar la investigación competitiva en micro- y nanotecnología, con énfasis particular en materiales sensores en la industria del petróleo y gas.

En este contexto, la compañía Terves (Estados Unidos) se ha enfocado en el diseño de materiales compuestos de utilidad para la terminación de pozos de petróleo y de gas. Esta compañía ha desarrollado tecnologías que se aplican en el diseño y manufactura de metales, cerámicas y compuestos con alto valor añadido, los cuales han sido sometidos a procesos de alta ingeniería con el fin de responder a su entorno y/o a un estímulo predefinido. Esta respuesta incluye la desintegración del material con el objetivo de mantener la limpieza del pozo, así como la generación de calor y de presión

La nanotecnología ha sido aplicada en catálisis y técnicas de filtración; en esta última, es de esperarse una fuerte influencia en el tratamiento de agua, purificación de aire y dispositivos de almacenaje de energía. Las membranas con poros de tamaño nanométrico son excelentes para los procesos de filtración mecánica (Figura 22). La nanofiltración se utiliza principalmente para la separación de iones, o para la separación de diferentes fluidos, como es el caso de la separación de gases de una corriente de gas natural,⁵⁵ para la remoción del dióxido de carbono (CO₂) y de ácido sulfhídrico (H₂S), que al mezclarse producen ácido carbónico que resulta ser altamente corrosivo para las tuberías y tanques de almacenamiento, también a manera de obtener el CO₂ para un proceso de recuperación secundaria.

⁵⁵ Ismail, A. F., Chandra Khulbe, K., & Matsuura, T. Gas separation membranes : polymeric and inorganic. Cham : Springer, [2015].

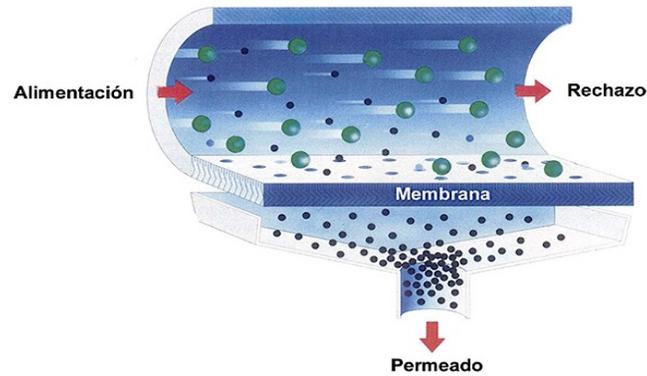


Figura 22. Esquema de la nanofiltración.

Las nanopartículas tienen características y aplicaciones en una amplia gama de áreas científicas, como: medicina, ingeniería, catálisis y remediación ambiental.⁵⁶ Estas representan una gran opción para métodos de recuperación secundaria y mejorada, debido a la complejidad del sistema (la alta salinidad), baja permeabilidad y propiedades heterogéneas de las rocas. De la misma forma son una opción viable como sensores, siendo útiles para un mejor modelado del yacimiento (imágenes de alta resolución). De manera general, las nanopartículas se emplean en el desarrollo de sensores y agentes de contraste de imagen, debido a las alteraciones significativas en sus propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas; así como a su capacidad de formar estructuras porosas, pueden ser usadas para la medición de la temperatura, presión y carga en condiciones extremas.

La última vanguardia en dispositivos de prospección son los nanorobots que proveen un mapeo detallado del yacimiento.⁵⁷ Dentro de este campo, los nanomateriales se han utilizado como recubrimientos funcionales e inteligentes, con la capacidad de responder a estímulos físicos, químicos y mecánicos, por medio del desarrollo de procesamiento de señales, como el uso de nanotubos de carbono como recubrimientos para tuberías sometidas a una alta temperatura y esfuerzos mecánicos.

⁵⁶ Dobson, P., Jarvie, H., & King, S. (2014). Nanoparticle. Encyclopædia Britannica.

⁵⁷ 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.

Los cables moleculares son estructuras capaces de transmitir una señal entre ambos extremos del sistema que los compone. Este término se usa para describir cualquier sistema molecular que conecte dos especies electroactivas,⁵⁸ electrodonador (ED) y electroceptor (EA), de modo que se produzca un transporte de carga o de energía entre ambos a través de la molécula que los conecta (Figura 23); presentan características como: i) moléculas conjugadas, ii) longitud definida, iii) poseen una constitución estructural precisa, iv) y tienen una o dos funcionalidades terminales, ya sean dos electrodos o dos subunidades moleculares capaces de dar o aceptar electrones.⁵⁹

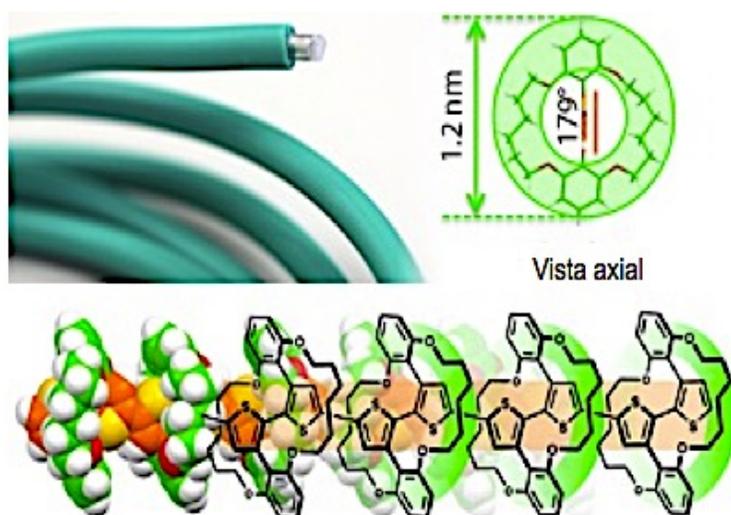


Figura 23. Cable aislado, y la estructura esquemática de un cable molecular aislado (nanocable).

Dentro de este contexto podemos encontrar a los nanotubos de carbono, los cuales están constituidos por átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal cilíndrica de forma que su estructura es la misma que se obtendría si se enrollara sobre sí misma una lámina de grafito, lo que les permite ser buenos conductores de electricidad.⁶⁰ Algunos materiales que se han utilizado para fabricar cables moleculares son los nanotubos de carbono y los fullerenos; en este sentido, la compañía estadounidense Baker Hughes ha elaborado cables de alimentación basados en nanotubos de carbono con eficiencias incluso mayores a los cables de alimentación tradicionales, siendo más ligeros, más fuertes y mejores conductores de electricidad.⁶¹

⁵⁸ D. K. James, J. M. Tour, *Top. Curr. Chem.* 2005, 257, 33–62.

⁵⁹ Cuevas, J. C.; Scheer, E. *Molecular electronics*; World Scientific series in nanoscience and nanotechnology; World Scientific Pub. Co.: Singapore; Hackensack, N.J., 2010; Vol. 1, pp 703.

⁶⁰ Red de Nanociencias y Nanotecnología. "Nanotubos de carbon". <http://www.nanored.org.mx/>

⁶¹ Nanotechnology for sale: The once-Theoretical Becomes Practical, stephenrassenfoss, jpt/jpt online staff

Este tipo de cables de alimentación ofrece diversas ventajas, tal es el caso de la aplicación en sistemas artificiales de producción como es en el caso del bombeo electro-centrífugo. Disminuyendo los costos en los cables de corriente. De igual manera en procesos de exploración geofísica en la aplicación de métodos de prospección eléctrica.

5.2. Ingeniería de perforación.

La ingeniería de perforación incluye todos los aspectos relacionados a la perforación de un pozo petrolero, ya sea exploratorio, delimitador o en desarrollo para la incorporación de reservas. La perforación de un pozo terrestre o marino consiste en la penetración de diversas capas litológicas para conectar el yacimiento con la superficie.⁶² Actualmente la perforación de pozos petroleros se realiza por medio de un sistema hidráulico de rotación, con circulación de lodo, aire, gas o un agente espumante, con el cual el movimiento de rotación de una barrena se transmite a través de una tubería y el arreglo de las tuberías entre sí; en su interior la circulación de un fluido, que posteriormente elevará los detritos por medio del espacio anular (espacio entre la tubería y la pared de la formación) a la superficie.⁶³

En la perforación de pozos existen dos grandes ramos: la perforación de pozos exploratorios, la cual tiene como objetivo fundamental adquirir el conocimiento de las estructuras geológicas y determinar la posibilidad de que en éstas haya hidrocarburos, entre los que destacan: evaluación del potencial petrolero, incorporación de reservas, y delimitación/caracterización de yacimientos. Mientras que la perforación de pozos de explotación de campos, tiene la finalidad de incrementar los volúmenes de producción de hidrocarburos. Esto mediante: desarrollo de campos petroleros, y la explotación. Los proyectos de exploración de campos establecen la infraestructura necesaria para iniciar la explotación de un campo petrolero reciente, y los proyectos de explotación tienen la finalidad de sostener las cuotas de producción de los campos petroleros que se encuentran en explotación. Para ello son necesarios equipos de perforación, ya que son el recurso más valioso e importante para esta actividad, los cuales se clasifican en (Tabla 2):

⁶² Glinz Pérez, I. C., & Flores de la Mota, I. (2003). Optimización de un programa de perforación de pozos petroleros.

⁶³ Aguilar Aguirre, M. A., Trujillo Vargas, J. L., & Hernández Álvarez, R. J. (2002). Aspectos a considerar en la planeación de la perforación de pozos petroleros para evitar problemas técnicos y legales.

Terrestres	Marinos
Convencionales	<p><i>Fijos</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Plataformas fijas ancladas ❖ Plataformas auto-elevables ❖ Plataformas de piernas tensadas ❖ Sumergibles
Móviles	<p><i>Flotantes</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Semisumergibles ❖ Barcos de perforación

Tabla 2. Clasificación de los equipos de perforación.

Dentro de un proceso de ingeniería de perforación, hay un requerimiento tecnológico para los procesos que se llevarán a cabo, así como la selección adecuada de los materiales que se emplearán para llevar el proceso de la perforación de un pozo de manera óptima. Entre los cuales podemos encontrar: (i) predicción de los gradientes de presión y de fractura (geomecánica); (ii) selección de la geometría y trayectoria del pozo; (iii) selección de los fluidos de perforación; (iv) selección de barrenas; (v) diseño y asentamiento de tuberías de revestimiento; (vi) cementaciones; (vii) diseño de sartas de perforación; e (viii) hidráulica y control de pozos.⁶⁴

5.2.1. Áreas de oportunidad de la ciencia de materiales en la ingeniería de perforación.

Dentro de la ingeniería de perforación, la ciencia de materiales tiene como principales áreas de oportunidad el suministrar herramientas y materiales necesarios para realizar de manera más eficiente, segura y económica las diversas operaciones involucradas, ya sea mediante el desarrollo de nuevas aleaciones para la fabricación de tuberías, el desarrollo e implementación de recubrimientos resistentes a la corrosión, o en el mejoramiento y aplicación de fluidos de perforación (fluidos inteligentes), y aumento en la resistencia mecánica de los materiales utilizados en las herramientas de perforación (barrenas).

⁶⁴ Pérez Castañeda, M. Á., & Velazco Esquivel, A. (2013). Apuntes y ejercicios de ingeniería de perforación.

El agotamiento de yacimientos terrestres y en aguas someras ha provocado que con el objetivo de restituir las reservas de hidrocarburos, las actividades de exploración y producción se extiendan a distancias más alejadas de la costa, a mayores profundidades, en ambientes geológicos más extremos y complejos bajo condiciones de alta temperatura y presión, así como la explotación de yacimientos con características petrofísicas y fluidos no convencionales. Algunos de los futuros desarrollos de exploración y producción, se encuentran en los límites o superan las fronteras alcanzadas por la industria petrolera internacional. Para ello es necesario establecer estrategias basadas en ciclos de vida que experimenta un nuevo desarrollo tecnológico (Figura 24).

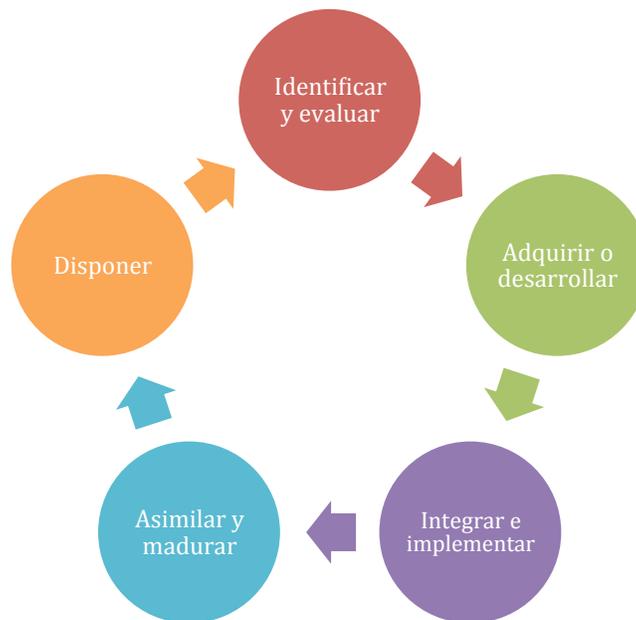


Figura 24. Esquema de la estrategia del desarrollo tecnológico en la exploración y producción.

5.2.2. Materiales avanzados en el desarrollo de barrenas.

Una barrena es una herramienta utilizada para triturar o cortar roca, todo el equipo de perforación asiste de manera directa o indirecta a la barrena, la cual se encuentra en la parte inferior de la sarta de perforación (esta debe cambiarse regularmente debido al desgaste que sufre en su operación). La mayoría de las barrenas funcionan raspando, triturando o ambas acciones a la vez, mediante un movimiento rotacional. Uno de los avances más importantes en esta área, se ha dado al utilizar materiales de diamante policristalino compacto (PDC: *Polycrystalline Diamond Compact*) (Figura 25). La inclusión de nanopartículas de

diamante en barrenas PDC, ha permitido operaciones de perforación en condiciones más complejas, ya que brindan una mayor resistencia mecánica en ambientes corrosivos, permitiendo aumentar sus tiempos de vida.⁶⁵ Otra variante para la mejora de barrenas ha sido el uso de recubrimiento de carburo de silicio (SiC_2), un cerámico resistente que ayuda a optimizar el funcionamiento de equipamiento de perforación y herramientas de corte.



Figura 25. Barrena PDC Schlumberguer.

5.2.3. Nanotecnología en la cementación de pozos.

Las operaciones de cementación pueden llevarse a cabo para sellar el espacio anular después de bajar una sarta de revestimiento (Figura 26), para sellar una zona de pérdida de circulación, para colocar un tapón en un pozo existente desde el cual poder efectuar desviaciones con herramientas direccionales, o taponar un pozo para que pueda ser abandonado.⁶⁶ Previo al inicio de las operaciones de cementación, los ingenieros determinan el volumen de cemento a emplazar en el pozo y las propiedades físicas tanto de la lechada como del cemento fraguado necesario (densidad y viscosidad). Las principales características del cemento se

⁶⁵ Chakraborty, S., Agrawal, G., Di Giovanni, A., & Scott, D. E. 2012. The Trick Is The Surface - Functionalized Nanodiamond PDC Technology. Society of Petroleum Engineers.

⁶⁶ Choudhary, S. Cementing technology and procedures. Valley Cottage, NY : Scitus Academics, [2016].

deben a la reacción de hidratación química entre el cemento y el agua. Entre los factores que afectan una lechada de cemento se encuentran: (i) densidad de la lechada; (ii) pérdida de circulación; (iii) permeabilidad de la lechada; (iv) tiempo de contacto; y (v) calor de reacción.⁶⁷

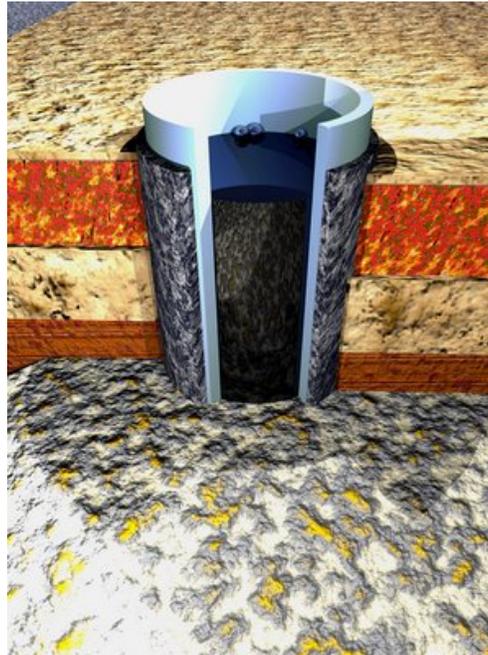


Figura 26. Cementación de la sarta de revestimiento.

Debido a la gran área superficial de los nanomateriales, éstos son una opción eficaz en la cementación de pozos. Mejorando las propiedades del cemento como: aceleración del proceso de hidratado, incremento ante esfuerzos compresivos, reducción de la pérdida de fluido, reducción de la probabilidad en el colapso de la sarta de revestimiento y la prevención de la migración de gas.⁶⁸ Recientemente se han investigado diversos nanomateriales que sean auxiliares en la cementación de pozos, entre los que destacan: (i) nanosílice y nanolauminatos como aceleradores potenciales; (ii) nanotubos de carbono que proporcionan una mejora en las propiedades mecánicas del cemento; y (iii) nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) que aporta una hidratación rápida del cemento.

⁶⁷ Huerta Rosales, M. Á., Legorreta Romero, R., & Velasco Esquivel, A. (2010). Cementación de pozos horizontales.

⁶⁸ Ashok Santra, SPE, Peter J. Boul, and Xueyu Pang; Influence of Nanomaterials in Oil well Cement Hydration and Mechanical Properties, SPE International Oilfield Nanotechnology Conference held in Noordwijk, The Netherlands, 12–14 June 2012, SPE 156937.

5.2.4. **Materiales para apuntalar fracturas.**

La explotación de recursos no convencionales, como el *shale oil* y el *shale gas*, se lleva a cabo mediante un proceso de fracturamiento hidráulico; el cual consiste en realizar una fractura en la formación mediante la aplicación de presión hidráulica con un fluido fracturante, el cual propaga la fractura y la mantiene abierta con un apuntalante (Figura 27);⁶⁹ permitiendo que la fractura se convierta en un camino conductivo entre la formación y el pozo.

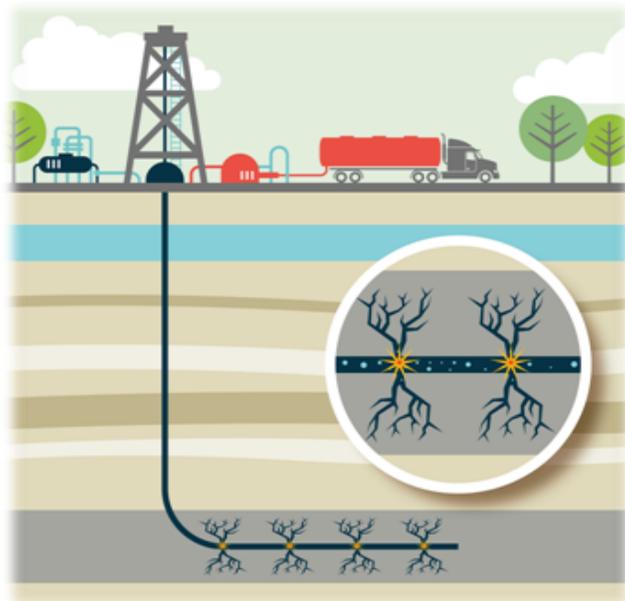


Figura 27. Proceso de fracturamiento hidráulico.

El fracturamiento hidráulico consta de tres etapas (Figura 28): colchón (se realiza sin apuntalante, tiene como propósito inicial y propagar la fractura); inyección del fluido fracturante (colocación del apuntalante en la fractura); y la etapa de lavado de fluidos fracturantes.⁷⁰ Los apuntalantes son partículas de tamaño determinado que al ser mezclados con el fluido de apuntalamiento mantienen las fracturas abiertas después del fracturamiento hidráulico, garantizando de esta manera una conductividad al canal recién creado. Estos materiales tienen propiedades físicas y mecánicas específicas, como una alta resistencia a los esfuerzos geomecánicos, y

⁶⁹ Wu, Ruiting. Some fundamental mechanisms of hydraulic fracturing. Work Degree. School of Civil and Environmental Engineering. 2006.

⁷⁰ Murguía Velázquez, G. A., & Cruz Espinoza, L. (2011). Evaluación del fracturamiento hidráulico.

resistencia a la corrosión.⁷¹ El tamaño de partícula del apuntalante es una consideración crítica en el diseño que depende de los esfuerzos y del transporte del mismo. En general los apuntalantes de mayor tamaño representan una mejor opción, debido al incremento de la conductividad a un menor costo de material.

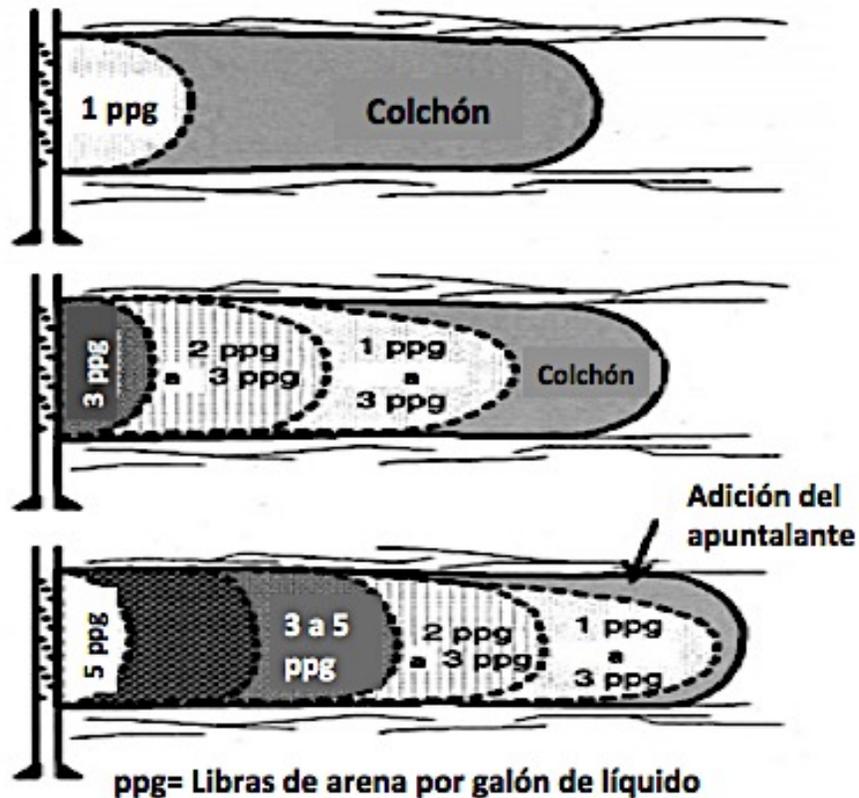


Figura 28. Transporte del apuntalante y diseño óptimo de la fractura.

En adición a los granos de arena que aparecen de forma natural, también es posible utilizar agentes de sostén, apuntalantes artificiales o de diseño especial, como: arena cubierta con resina, y materiales cerámicos de alta resistencia (bauxita sinterizada) (Figura 29). Siendo la arena la más utilizada debido a su disponibilidad y bajo costo.

⁷¹Hydraulic fracture complexity: diagnosis, remediation, and exploitation. 2008. SPE 115771.



Figura 29. Materiales apuntalantes.

Debido a la baja resistencia al aplastamiento de los materiales apuntalantes convencionales, se han desarrollado nuevas tecnologías para producir materiales de soporte con mayor resistencia al aplastamiento, con la capacidad de generar una menor cantidad de finos, evitando el daño de la permeabilidad y de la conductividad de la formación.⁷² Los materiales apuntalantes se clasifican por su tamaño, redondez y esfericidad (Figura 30), brindando un conducto eficiente para la producción de fluido desde el yacimiento hasta el pozo.

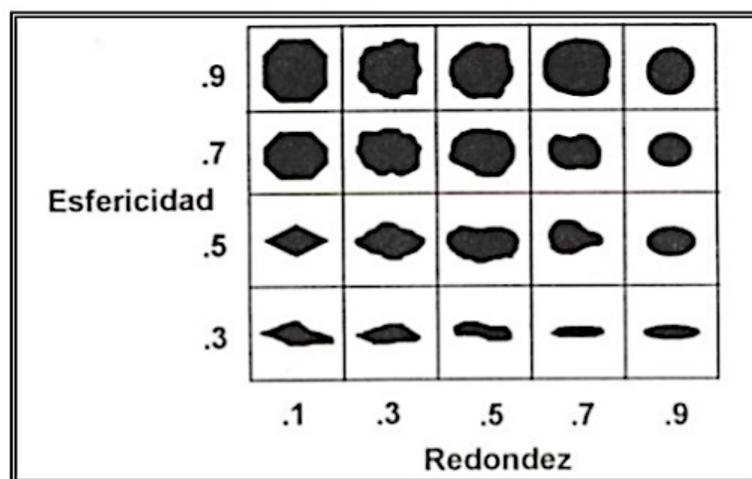


Figura 30. Clasificación de los apuntalantes por su redondez y esfericidad (Carta de Krumbein).

⁷² Álvarez López, B. I., & Pérez García, T. E. (2012). Fracturamiento hidráulico multi-etapas.

Regularmente, los apuntalantes se componen de fibras de vidrio o de resinas epóxicas y/o fenólicas, las cuales se pueden desintegrar fácilmente y no resisten altas temperatura.⁷³

En este contexto, Baker Hughes, ha desarrollado apuntalantes esféricos de plata (*In-Tallic*), utilizando compuestos lo suficientemente ligeros para fluir a través del pozo, que su vez poseen alta resistencia para soportar la presión de inyección y el impacto al momento de realizar la fractura. Los apuntalantes *In-Tallic* se componen de electrolitos metálicos en forma de materiales nanoestructurados, más ligeros que el aluminio y más fuertes que ciertas aleaciones de acero. Este tipo de apuntalantes ofrecen la ventaja de que se desintegran cuando se exponen a cierto tipo de fluidos. Su desintegración se lleva a cabo mediante reacciones electroquímicas que son controladas por los revestimientos del apuntalante. La nanomatriz del material posee propiedades químicas únicas, así como una alta resistencia que los materiales convencionales no presentan.⁷⁴ Su recubrimiento metálico es un material nanoestructurado a base de magnesio, aluminio y otras aleaciones (CEM: *Controlled Electrolytic Materials*), los cuales se degradan fácilmente hasta obtener un polvo color gris (Figura 31) en un tiempo de 1.5 días. Esta aleación se disuelve rápidamente cuando se expone a fluidos de salmuera y ácidos en función del tiempo y temperatura.

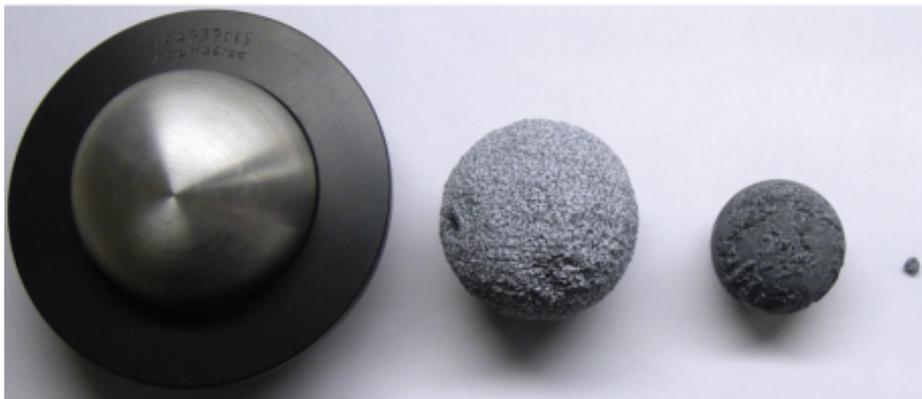


Figura 31. Apuntalante *In-Tallic* (Baker Hughes).

Entre sus propiedades y ventajas podemos encontrar: (1) desintegración antes o poco después de que el pozo se pone en producción; (2) aseguran que los apuntalantes no bloqueen la producción; (3) permiten la producción de todas las

⁷³ Alberro, J., & Hernández, R. Fuerzas de filtración y fracturamiento hidráulico. [México: UNAM, Instituto de Ingeniería, 1999].

⁷⁴ Baker Hughes (2017). "In-tallic propants". <https://www.bakerhughes.com/news-and-media/resources/brochures/in-tallic-disintegrating-frac-balls-overview>.

etapas del pozo; (4) evitan que los apuntalantes con los recortes se acumulen en los puntos bajos del pozo, evitando la obstrucción de residuos que disminuyan la producción del pozo; (5) desintegración en salmuera; (6) no requieren de un líquido especial para eliminar los apuntalantes; (7) son más ligeros que el aluminio pero tan fuertes como el acero; y (8) superan las calificaciones de tecnologías de fracturamiento existentes como las de bolas activas.

Terves ha estado desarrollando apuntalantes basados en aleaciones de magnesio con nanocompuestos de aluminio (*Frac balls*) (Figura 32). Estos son capaces de resistir presiones entre 15,000 y 20,000 psi; se desintegran al exponerse a un fluido electrolítico o a un estímulo externo. La ventaja de estos apuntalantes es que se desintegran en cuestión de horas, en comparación con la tecnología desarrollada por otras compañías.⁷⁵



Figura 32. Apuntalante *Frac Ball* (Terves).

5.2.5. Fluidos inteligentes.

La manipulación de elementos nanométricos capaces de responder a ciertos estímulos o transmisores de fuerza ha sido otro gran avance de la ciencia de materiales en la ingeniería petrolera. Particularmente, se han desarrollado fluidos inteligentes, los cuales se definen como fluidos diseñados para dispersar materiales de tamaño nanométrico (nanopartículas, nanotubos, nanocables) presentes en algún un fluido. Los fluidos inteligentes son sistemas bifásicos (sólido-líquido), que poseen propiedades termofísicas interesantes, como: conductividad térmica, difusión térmica y viscosidad. De igual manera, estos son capaces de modificar sus propiedades al recibir un estímulo externo (campo

⁷⁵ *Composites world*. "Proppants". <http://www.compositesworld.com/blog/post/composites-boon-from-hydraulic-fracturing>.

eléctrico o magnético). Los fluidos que responden a la electricidad se denominan electrorreológicos, mientras que los que responden a un campo magnético se conocen como magnetorreológicos (Figura 33), un fluido inteligente es capaz de modificar su viscosidad cuando se somete a este tipo de estímulos.⁷⁶

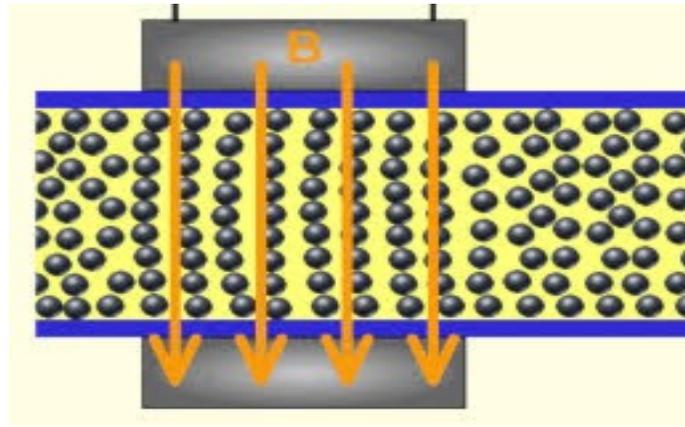


Figura 33. Principio de funcionamiento de un fluido magnetorreológico.

Diversos fluidos inteligentes han sido implementados en procesos de la industria del petróleo y gas, como: perforación, terminación, estimulación, exploración y explotación; los cuales contienen al menos un aditivo con tamaño de partícula en el intervalo de 1 a 100 nanómetros. En este sentido, un nanoaditivo multifuncional puede realizar modificaciones en los sistemas de fluidos para complementar las propiedades de estos, lo cual puede producir una reducción dramática en el total de sólidos, en el contenido químico del lodo, y en el costo del fluido en general. Debido a que los nanomateriales tienen una amplia superficie con enormes interacciones de área, requieren de bajas concentraciones para producir una mejora en las propiedades del fluido de perforación, así como auxiliares en los problemas de pérdidas de circulación.⁷⁷ Un ejemplo de ello, es la implementación de nanopartículas, las cuales tendrán una capacidad de carga suficiente para transportar, así como para dejar recortes de forma eficiente manteniendo su

⁷⁶ Wei Yu and Huaqing Xie, "A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2012, Article ID 435873, 17 pps, 2012.

⁷⁷ Abdul Razak Ismail, Norhana Mohamed Rashid, Mohd Zaidi Jaafar, Wan Rosli Wan Sulaiman, Nor Aziah Buang, 2014. Effect of Nanomaterial on the Rheology of Drilling Fluids. *J. Applied Sci.*, 14: 1192-1197.

densidad, y por lo mismo, soportando la presión en un amplio intervalo de condiciones operativas, reduciendo de esta manera la pérdida de circulación.⁷⁸

En el área de perforación de alcance extendido existe un aumento dramático de los problemas de torsión y arrastre, debido a la fricción entre la sarta de perforación y la pared del pozo. Los fluidos de perforación juegan un papel importante en la reducción del torque y arrastre; el uso de gránulos de carbón esféricos con tamaño de partícula entre 10 y 325 nm, han mejorado la lubricación en la perforación.⁷⁹ Dentro de las aplicaciones de los fluidos inteligentes, podemos encontrar las nanopartículas de óxido de titanio (TiO₂), las cuales presentan propiedades relevantes de transferencia de calor. Al adicionar nanopartículas de TiO₂ a un fluido de perforación, es posible aumentar el coeficiente térmico de conductividad hasta en un 150 %.⁸⁰

Los fluidos inteligentes tienen un amplio rango de aplicaciones dentro de la ingeniería de perforación, entre las que destacan: (a) habilidad de reducir problemas de pegaduras de tuberías; (b) mejoras en los fluidos de perforación (conductividad térmica, estabilidad y transferencia de calor); (c) remoción de metales tóxicos (mercurio y cadmio); (d) remoción de ácido sulfhídrico; y (e) habilidad para prevenir invasión del lodo (evitando la contaminación de cuerpos de agua cercanos a la formación).

5.2.6. Formación de hidratos de gas.

Un hidrato de gas es un sólido cristalino (clatrato) de agua, capaz de contener en su estructura molecular (dentro de cavidades que forman las moléculas de agua mediante interacciones de enlaces de hidrógeno) diferentes gases (metano, etano, propano, CO₂).⁸¹ Los enlaces de hidrógeno entre moléculas de agua producen estructuras tridimensionales capaces de contener moléculas de gas de bajo peso molecular, para su formación se tienen que cumplir con los siguientes requisitos:

1. Suficiente agua en el medio.
2. Gases de bajo peso molecular, refrigerantes y gases ácidos.

⁷⁸ Mostafavi, V. Ferdous, M.Z. Hareland, G.Husein, M. Design and Application of Novel Nano Drilling Fluids to Mitigate Circulation Loss Problems During Oil Well Drilling Operations, J clean Technology, ISBN: 978-1-4398- 8189-7, 2011.

⁷⁹ Abdo J., Danish M., (2010), Nanoparticles: Promising Solution to Overcome Stern Drilling Problems. Nanotech Conference and Exhibition, Anaheim, California, 6-8 August.

⁸⁰ Sabbaghi S, Saboori R and Barahoei M, Enhanced Heat Transfer of Drilling Fluid with Titania Nanofluid, Nano Chemical Engineering Department, Shiraz University, Shiraz, Iran.

⁸¹ Luis, G., & Alexis, B. (2013). Evaluación de modelos rigurosos para la predicción de hidratos de gas natural / Evaluation of rigorous models for natural gas hydrates predictions. Revista De La Facultad De Ingeniería Universidad Central De Venezuela, (1), 83.

3. Altas velocidades de flujo y turbulencia en la tubería.
4. Combinación adecuada de presión y temperatura (la formación se favorece en temperaturas bajas y altas presiones).

Los hidratos de gas se clasifican por el tipo de arreglo que producen las moléculas de agua en su estructura cristalina, hidratos tipo I, tipo II y tipo H (Figura 34). Estas estructuras difieren en el tamaño y en el número de cavidades que contienen. Cada una de las estructuras posee dos tipos de cavidades, una pequeña y una grande. Las moléculas de gas que ocupan las cavidades interactúan físicamente con las moléculas de agua que las rodean, lo que permite la estabilización de la estructura mediante fuerzas de Van der Waals.⁸²

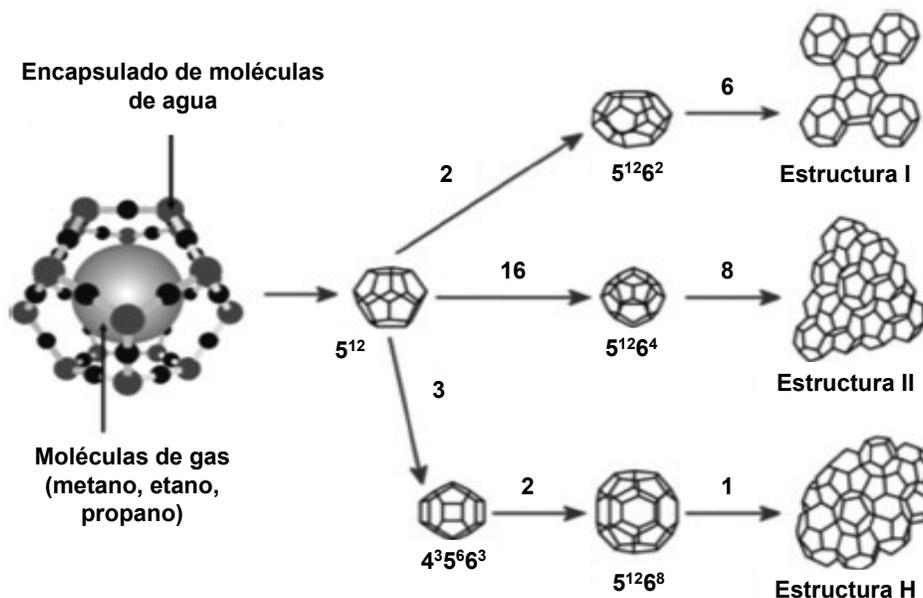


Figura 34. Estructura de los hidratos de gas tipo I,II y H.

En el área de perforación de pozos, la presencia de hidratos de gas es una de las grandes problemáticas causantes de derrumbes o inestabilidad en el fluido de perforación (debido a la disociación del hidrato).⁶² De igual manera, en la producción de un pozo, provocan problemas al causar obstrucciones en las tuberías, lo que se refleja en la disminución en la producción de aceite y gas. Una forma de inhibir la formación de hidratos, es la implementación de diversas sales, las cuales disminuyen la temperatura a la cual el hidrato es estable, evitando de esta manera su formación. Los hidratos de gas representan una fuente de energía que puede ser aprovechada de una manera económicamente rentable, por lo que

⁸² Giavarini, C., & Hester, K. (2011). Gas hydrates: immense energy potential and environmental challenges. London: Springer, 2011.

se han formulado varios métodos para su extracción.⁸³ Para su explotación existen cuatro métodos:

- ❖ **Excitación térmica:** Esta consiste en suministrar calor a los yacimientos de hidratos de gas, hasta el punto en que el gas se disocie del hidrato. Esto se logra mediante la inyección de fluidos calientes (agua o salmueras).
- ❖ **Despresurización:** Esta consiste en la reducción de la presión aplicada sobre la capa de hidrato promoviendo la disociación del gas-hidrato; lo que produce gas o agua debido a la caída de presión en el pozo, esto se logra extrayendo el fluido del depósito del hidrato de gas.
- ❖ **Reactivos químicos:** Esta consiste en añadir salmueras, etanol o glicerol para romper la fase de equilibrio del hidrato y disociar el gas.
- ❖ **Desplazamiento de gas:** Esta consiste en la inyección de dióxido de carbono (CO₂), donde el gas se disocia del hidrato por el calor liberado del CO₂.

Bhatia y Chacko (2011), investigaron la inyección de nanopartículas de níquel y hierro suspendidas en un agente espumante, en la formación del hidrato a través de un pozo horizontal. El objetivo es que éstas partículas penetren profundamente las cavidades en los hidratos tipo I, II y H. Las nanopartículas de níquel y hierro aumentarán gradualmente la temperatura del hidrato, causando un desequilibrio termodinámico, ocasionando la disociación liberando el gas que contienen. La principal ventaja de ésta técnica es la baja cantidad que se requiere por cada metro cúbico de hidratos. Además, las nanopartículas no son tóxicas y son amigables con el medio ambiente.

5.3. Recuperación secundaria y mejorada.

La recuperación secundaria es la segunda etapa de producción de hidrocarburos, durante la cual un fluido externo (agua o gas) se inyecta en el yacimiento a través de pozos de inyección ubicados en la roca que tengan comunicación de fluidos con los pozos productores.⁸⁴ El propósito de la recuperación secundaria es mantener la presión del yacimiento y desplazar los hidrocarburos hacia el pozo (Figura 35).

⁸³Ye, Y., & Liu, C. (2013). Natural gas hydrates: experimental techniques and their applications. Berlin: Springer, 2013.

⁸⁴King, G. E. (1992). EOR. Washington, D.C.: Society of Petroleum Engineers, 1992.

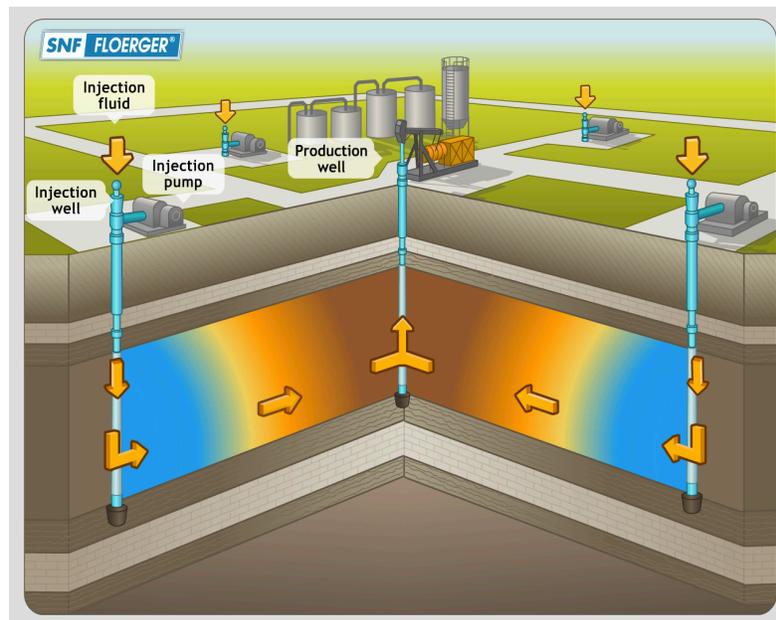


Figura 35. Esquema de inyección en un método de recuperación secundaria y mejorada.

Las técnicas de recuperación secundaria más comunes son la inyección de gas y la inyección de agua. Normalmente, el gas se inyecta en el casquete de gas y el agua se inyecta en la zona de producción o en el acuífero para barrer el petróleo del yacimiento. El uso sucesivo de la recuperación primaria y la recuperación secundaria en un yacimiento de petróleo aumenta la productividad alrededor del 15 % al 40 %.⁸⁵ La recuperación mejorada (EOR: *Enhanced Oil Recovery*) es una técnica que consiste en la inyección de sustancias que puedan o no estar presentes en el yacimiento con el fin de alterar las propiedades de los fluidos contenidos, o bien, modificar las interacciones de los fluidos con la roca que los almacena. Los métodos de recuperación mejorada tienen como objetivo modificar las propiedades de los fluidos, la roca o la interacción entre ellos, con el fin de obtener una mejor movilidad de los fluidos hacia los pozos productores, y así elevar el factor de recuperación, movilizandovolumenes de aceite que no se podrían extraer por métodos convencionales (recuperación primaria y/o secundaria).⁸⁶ (Figura 36)

⁸⁵ Alvarado, V., & Manrique, E. (2012). 2.2.1 IOR and EOR Definitions. In: *Enhanced Oil Recovery - Field Planning and Development Strategies*, Elsevier.

⁸⁶ Balderas Sánchez, E.A., & Osorio Peralta, O. (2013). Pre-selección de procesos de recuperación secundaria y mejorada de hidrocarburos en yacimientos petroleros.

La recuperación avanzada (IOR: *Improved Oil Recovery*) se define como la elevación del factor de recuperación por cualquier medio posible, abarca a la recuperación secundaria, mejorada y a cualquier técnica operacional o de administración de yacimientos que impacte en la recuperación de aceite.⁸⁷ La recuperación avanzada es el aceite adicional obtenido, eso incluye inyección de agua, procesos de recuperación secundaria o mejorada, y cualquier otra forma de complementar los procesos de recuperación natural en el yacimiento (SPE, AAPG, WPC, SPEE, 2009). (Figura 36)

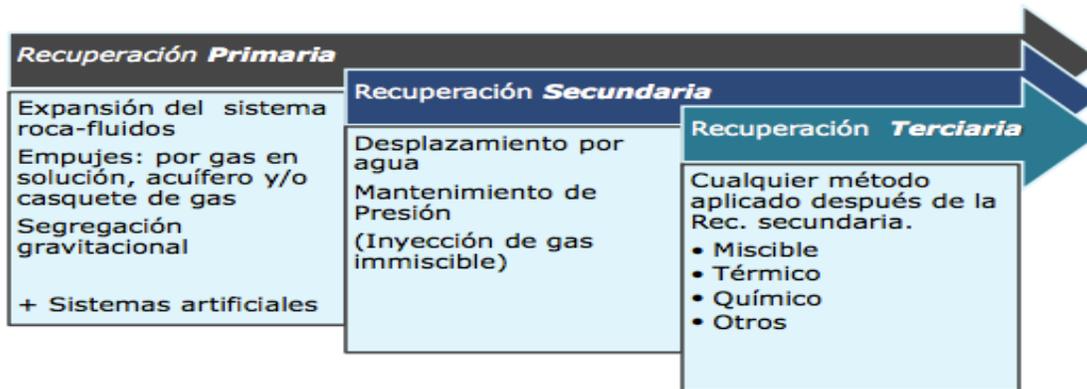


Figura 36. Etapas de recuperación de aceite y gas en un yacimiento.

5.3.1. Áreas de oportunidad de la ciencia de materiales en la recuperación de aceites.

De manera generalizada, en muchas regiones productoras de petróleo se ha llegado a una etapa en la que la producción se acerca a su fase de declive. Los campos más antiguos se enfrentan con el abandono de más del 50 % de petróleo original en sitio recuperado (OOIP: *Original Oil In Place*), lo cual se suma al impacto del costo del petróleo en la etapa de maduración (Figura 37). De igual manera, el agua que se produce está en constante aumento por el mecanismo de empuje debido a un acuífero y por la inyección de gas y/o agua. Al tener cortes de agua del 50 %, se tienen millones de barriles contaminados con agua.⁸⁸

⁸⁷ Rivera Chávez, L. E., & Steffani Vargas, O. (2015). Apuntes de recuperación secundaria y mejorada.

⁸⁸ Durán Ramos, J. F., Ruiz Torres, J., & Gómez Cabrera, J. Á. (2009). Explotación de campos maduros, aplicaciones de campo.

Volumen remanente de aceite en México.

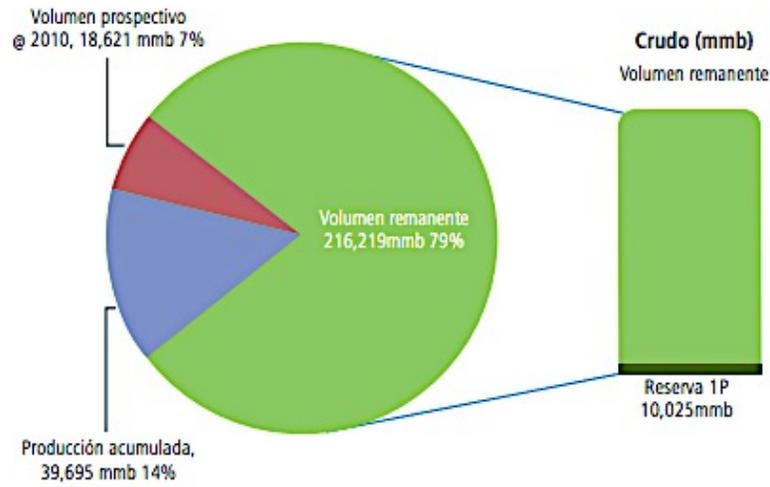


Figura 37 Volumen remanente de aceite en México, CNH (2011).

Posterior a los procesos de recuperación primaria y secundaria, el yacimiento contiene alrededor del 60 al 80 % de petróleo originalmente en el sitio; esto implica que el aceite se barre lentamente en los poros de tamaño microscópico (1-100 micras), y a la baja eficiencia de barrido y de desplazamiento del fluido inyectado en los procesos de recuperación secundaria o mejorada.⁸⁹ Esto se debe a dos factores principales (Figura 38).

- Escala de poros, el crudo alcanza una saturación residual suficientemente baja para encontrarse en forma de glóbulos discontinuos, atrapados por las fuerzas capilares.
- 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.

⁸⁹ Ayirala, S. C., & Yousef, A. A. (2015). A State-of-the-Art Review To Develop Injection-Water-Chemistry Requirement Guidelines for IOR/EOR Projects. SPE Production & Operations, 30(1), 26. doi:10.2118/169048-PA.

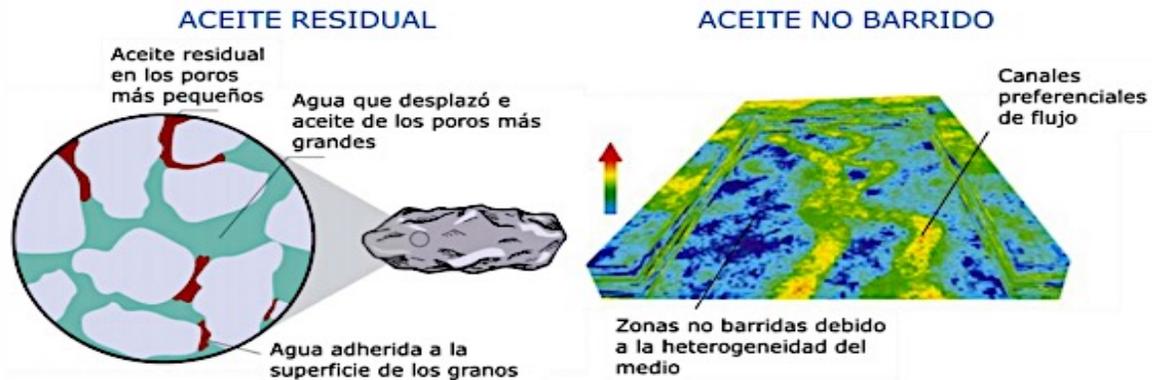


Figura 38. Aceite remanente en el medio poroso y aceite no barrido.

5.3.2. *Materiales para la recuperación mejorada de aceites.*

La EOR se considera parte de IOR e implica una reducción en la saturación de aceite residual. Dependiendo el método empleado, la elección de materiales, así como la recuperación esperada depende de diversos factores ya sea económicos o tecnológicos. Los procesos de EOR se clasifican de acuerdo al proceso de inyección, principalmente en térmicos y no térmicos (Tabla 3).⁹⁰

Métodos térmicos	<i>Inyección de agua caliente</i>	
	<i>Inyección de vapor</i>	Inyección de vapor continua Inyección cíclica de vapor (<i>huff & puff</i>) Inyección de vapor asistida por drene gravitacional SAGD (<i>Steam Assisted Gravity Drainage</i>) Conducción de calor Combinación con solventes VAPEX (<i>solvent gas vapor extraction</i>)
	<i>Combustión in situ</i>	Combustión frontal Combustión seca Con aditivos Combustión húmeda Combustión inversa Inyección de aire de alta presión

⁹⁰ RIFAAT Al-Mjeni et al, "Has the time come for EOR?" Oilfield Review, 2010.

Métodos no térmicos	<i>Métodos miscibles</i>	Proceso por baches Empuje por gas enriquecido Empuje por gas vaporizado Inyección de solventes Inyección de CO ₂ Inyección de N ₂
	<i>Métodos por empuje de gas</i>	Inyección de gas inerte Inyección de gases de combustión (<i>flue gas</i>) Inyección de hidrocarburos (gas natural) Inyección de CO ₂ inmisible
	<i>Métodos químicos</i>	Inyección de álcalis Inyección de surfactantes Inyección de polímeros Inyección de emulsiones Inyección de espumas y/o geles (micelar) Combinación álcali, surfactante, polímero (ASP: Álcali-Surfactante-Polímero)
	<i>Métodos microbiológicos</i>	

Tabla 3. Clasificación de los métodos de recuperación mejorada.

Los métodos químicos son mejores para la extracción de aceite ligero (<100 [cP]), son aplicables para aceites moderadamente viscosos (<2000[cP]). Las interacciones con los minerales de la roca son el mayor problema de los métodos químicos en la recuperación mejorada. Los objetivos principales de los métodos químicos son: disminuir la tensión interfacial, alterar la mojabilidad (ángulo de contacto o cambio total), y mejorar la relación de movilidad. Un surfactante es un agente tensoactivo que contiene un extremo polar/hidrofílico (soluble en agua) y un extremo no polar/hidrofóbico (Figura 39)⁹¹. Dentro de los métodos químicos, la inyección de surfactantes busca disminuir la tensión interfacial entre el aceite-agua, incrementando el número capilar para reducir la saturación de aceite residual. Esto se realiza al inyectar baches con alta y/o baja concentración de surfactantes, para posteriormente realizar un desplazamiento con polímeros para completar el proceso.⁹² Las principales características esperadas en un surfactante para ser aplicado son: compatibilidad con la salinidad y temperatura condiciones del yacimiento, así como tensión interfacial ultra baja entre el agua y

⁹¹ Suleimanov, B. A., Ismayilov, F. S., Dyshin, O. A., & Veliyev, E. F. (2016). Selection methodology for screening evaluation of EOR methods. *Petroleum Science & Technology*, 34(10), 961-970. doi:10.1080/10916466.2015.1107849

⁹² TABER, J.J. et al., "EOR Screening Criteria Revisited", SPE/DOE Tenth Symposium on Improve Oil Recovery, SPE/DOE 35385, E.E.U.U., PP. 21-24, 1996.

el aceite. La cadena hidrófoba interactúa con moléculas de agua en un medio acuoso, mientras que la cabeza hidrofílica interactúa con moléculas de agua a través de interacciones de dipolo o ión-dipolo. El equilibrio entre las partes hidrofílicas e hidrófobas da a estos sistemas sus propiedades. Los surfactantes se clasifican en cuatro grandes grupos de acuerdo a su tipo molecular: no-iónicos, aniónicos, catiónicos y anfóteros.

Los surfactantes son aplicables en arenas con fluidos ligeros a intermedios en densidad. La temperatura del yacimiento debe ser menor a 93°C. El surfactante inyectado debe disminuir la tensión interfacial hasta movilizar el aceite residual con lo cual se crea un banco de aceite donde el aceite y agua fluyan como fases continuas.⁹³

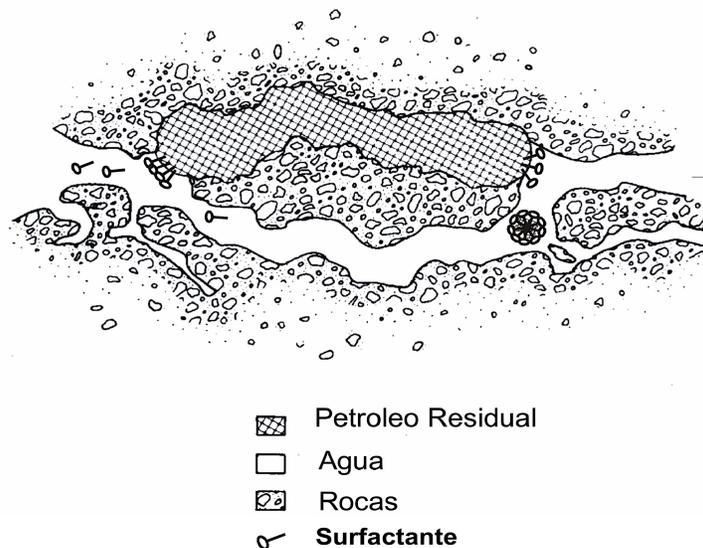


Figura 39. Funcionamiento de un surfactante.

La inyección de soluciones alcalinas permite formar surfactantes *in situ*, los cuales a su vez tienen propiedades como: solubilidad en agua, pH mayor a 7, y los álcalis disueltos pueden conducir electricidad (electrólitos). Los álcalis reaccionan con los ácidos orgánicos presentes de forma natural en el aceite, formando surfactantes en la interfase petróleo-agua; los cuales modifican la mojabilidad del sistema, elevando el factor de recuperación.

⁹³ Gómez Balanzar, F. J., & Castro Herrera, I. (2009). Determinar la factibilidad de implantar un proceso de recuperación secundaria o mejorada en el área de Abkatun-H (B.P.).

La inyección de polímeros es un proceso que requiere una cantidad muy pequeña (200 a 2000 ppm) de un componente de alto peso molecular como poliácridamidas o polisacáridos. Es importante destacar que los polímeros no disminuyen la saturación de aceite residual, sino que incrementan la recuperación debido a que incrementa la eficiencia de barrido (disminuyendo la movilidad del fluido desplazante) (Figura. 40).⁹⁴



Figura 40. La adición de polímeros en tres capas, aumentando la eficiencia de barrido.

Las características que poseen los polímeros para mejorar las eficiencias de desplazamiento, se da a través de los siguientes mecanismos.⁹⁵

- 1) Incremento de la viscosidad del agua inyectada, esto reduce la relación de movilidad agua-aceite, aumentando las eficiencias de desplazamiento.
- 2) Creación de resistencia adicional al flujo de agua subsecuente (adsorción del polímero en la roca), así el flujo de agua y polímero se restringe, obligando a desviarse a otras partes del yacimiento.

Este método se aplica principalmente en formaciones de arenas con fluidos ligeros a intermedios, con porosidades buenas o intermedias. Debido a la movilidad de los polímeros, la permeabilidad no debe ser muy baja ni la viscosidad muy alta. La profundidad es un factor crítico, ya que se puede relacionar con la temperatura del yacimiento, la cual influye en la estabilidad de los químicos. Se recomienda que la temperatura sea menor a 93 °C.

⁹⁴ Edgar R. et al., "Methodology to select, rank and program EOR projects to increase reserves rapidly", World, Heavy Oil Congress, Escocia, pp. 1-11, 2012.

⁹⁵ Maya Romero, A., & Barragán Aroche, J. F. (2013). Recuperación mejorada de crudo.

La ciencia de materiales ha encontrado una gran aplicabilidad en los procesos de recuperación mejorada a través de la manipulación de materiales a escala nanométrica. En este contexto, existen nanoagentes integrados a fluidos de inyección que pueden aumentar de manera drástica la recuperación de aceite mediante la mejora en la geomecánica del yacimiento; permitiendo liberar el aceite atrapado en los espacios porosos del orden de 1 a 100 micras presentes en la formación, esto a manera de mejorar los procesos de inyección de surfactantes y álcalis. Por lo que la adición de nanopartículas además tiene la cualidad de ajustar la viscosidad del fluido inyectado a un nivel óptimo en un proceso de inyección de polímeros, mejorando su movilidad y aumentando la recuperación de aceite del yacimiento. Las nanopartículas pueden penetrar pequeñas gargantas de poros sin ser retenidas, por lo que la cantidad de inyección puede representar un costo menor.⁹⁶ Ejemplo de ello son nanopartículas al 1 % de óxido de cobre (II) (CuO), las cuales presentan una viscosidad mayor en comparación con fluidos convencionales; al combinarlas con el dispersante en un fluido de conducción de CO₂, se mejora la movilidad y eficiencia de barrido en el yacimiento.⁹⁷

Un ejemplo de aplicación de este tipo de tecnologías es el que realizó la Universidad de Ciencia y Tecnología de Noruega, el cual consistió en la adición de nanopartículas en el agua de inyección para ayudar a liberar el aceite remanente que queda atrapado en el yacimiento. Las nanopartículas recubren a la roca, separando al aceite atrapado (Figura 41).⁹⁸

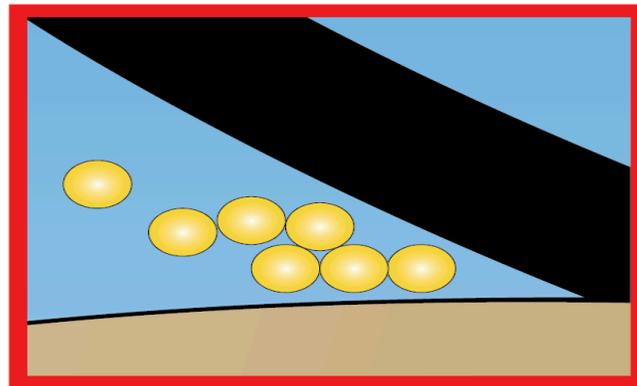


Figura 41. La adición de nanopartículas en el agua de inyección, ayuda a remover el aceite que queda remanente en el espacio poroso

⁹⁶ Application of Nanotechnology for Enhancing Oil Recovery: Nanofluids/ Smart Fluids Dr. Narendra Kumar Agnihotra TCE QSTP-LLC, Doha, Qatar.

⁹⁷ Cheraghian, G. & Hendraningrat, L. Int Nano Lett (2016) 6: 1. Doi:10.1007/s40089-015-0170-7.

⁹⁸ Ntnotechzone. "Nanofluids to enhance oil recovery. <http://www.ntnutechzone.no/en/2015/05/using-nanofluids-to-enhance-oil-recovery/>

5.3.3. **Energía Solar en la recuperación mejorada (Solar EOR)**

El término *Solar EOR*, hace referencia a un método térmico de recuperación mejorada, es una técnica aplicada por los productores de petróleo con la finalidad de extraer más aceite de los campos maduros. Éste método de recuperación utiliza la energía solar para calentar agua y así generar vapor. El vapor se inyecta en el yacimiento para reducir la viscosidad del aceite crudo pesado, facilitando su flujo hacia la superficie.⁹⁹(Figura 42)

Los métodos térmicos de recuperación mejorada, también conocidos como inyección de vapor, han quemado y consumido grandes cantidades de gas natural con el propósito de producir vapor. La energía solar es una alternativa viable para los procesos de recuperación mejorada, ya que puede generar vapor con la misma eficiencia que el gas natural, alcanzando temperaturas arriba de los 400 °C y presiones de 2500 psi.

La empresa Glass Point Solar en asociación con Berry Petroleum, desarrollaron el proyecto de energía solar en un proceso de EOR. El proyecto genera aproximadamente un millón de BTUs (*British Thermal Unit*) por hora de calentamiento solar. De la misma manera Chevron y Bright Source han instalado complejos solares de generación de vapor con la finalidad que se implemente en un proyecto de EOR. Se ha propuesto además la aplicación de sistemas híbridos, esto es la generación de vapor por medio de energía solar por el día y la generación de vapor por medio de gas natural por las noches o en días con poca radiación solar.¹⁰⁰

⁹⁹ Van Heel, A.P., Van Wunnik, J.N.M., Bentouati, S. et al. The Impact Of Daily And Seasonal Cycles In Solar-Generated Steam On Oil Recovery. Presented at the SPE EOR Conference at Oil & Gas West Asia, Muscat, Oman, 11-13 April. SPE-129225-MS.

¹⁰⁰ Agarwal, A. and Kavscek, A.R. 2013. Solar-Generated Steam for Heavy-Oil Recovery: A Coupled Geomechanical and Reservoir Modeling Analysis. Presented at the SPE Western Regional & AAPG Pacific Section Meeting 2013 Joint Technical Conference, Monterey, California, USA, 19-25 April. SPE-165329-MS.



Figura 42. Esquema de un sistema de recuperación secundaria por medio de energía solar.

5.4. Monitoreo de yacimientos a partir del uso de materiales.

Durante la caracterización de yacimientos se requiere de software de simulación que pronostique el comportamiento de fluidos en el yacimiento, así como la interacción de estos en el sistema durante la etapa de producción. Para ello, la disponibilidad de datos físicos es esencial para reducir la incertidumbre, y de esta manera tener un modelado más certero. Por lo mismo, se hace uso de herramientas como levantamientos geológicos, levantamientos sísmicos, registros, pruebas de pozo y datos de producción.

Las compañías petroleras tienen como propósito ideal materiales que permitan conocer las propiedades fisicoquímicas del yacimiento, las propiedades de sus fluidos, manteniendo niveles de resolución altos en los datos que proporcionan los registros. Por lo que las investigaciones han propuesto el uso de nanopartículas que puedan ser inyectadas en un yacimiento para mejorar el proceso de caracterización. En primera instancia, se ha buscado desarrollar nanopartículas con el tamaño adecuado para atravesar las estructuras del yacimiento, así como resistentes a la floculación para evitar el taponamiento y obstrucción en la zona productora o en las tuberías.

Las ventajas de los nanomateriales en los métodos de exploración y caracterización de yacimientos radican fundamentalmente en su tamaño y en la anisotropía del material del cual son elaborados. Las dimensiones de tales dispositivos les permiten penetrar la roca del yacimiento, cuyo tamaño promedio de poro oscila entre 1 y 100 micras. Por otra parte, la variación de las propiedades eléctricas y mecánicas con la orientación atómica de los nanomateriales permite que al combinarse con fluidos inteligentes, se puedan desarrollar medidores de alta resolución de la presión, la temperatura, la interacción roca/fluido y esfuerzos mecánicos en el yacimiento.¹⁰¹

Dentro de los materiales con potencial aplicación como nanosensores se encuentran: las nanopartículas de sílice híper-polarizadas, el alcohol polivinílico funcionalizado con carbón oxidado y nanopartículas de sílice tratadas superficialmente.¹⁰² Al inyectar nanosensores en un yacimiento, estos podrán explorar físicamente los fluidos y la roca a medida que son transportados por un flujo de fluidos. Los datos serán obtenidos por ejecución de un análisis directo de los nanosensores recuperados con los fluidos producidos o de una manera inalámbrica que establezca la comunicación de los sensores con la superficie. Se han propuesto además nanosensores de fibra óptica para medir la temperatura, la presión, el flujo de aceite y las ondas acústicas en pozos petroleros. De manera reciente, se ha propuesto el uso de *resbots* (nanoagentes de yacimientos), agentes moleculares empleados en las operaciones de exploración y producción de hidrocarburos, los cuales tienen un enorme potencial en el monitoreo de la estructura del yacimiento, como el mapeo del medio poroso, ubicación del hidrocarburo y como dispositivos de liberación controlada de químicos para un proceso de recuperación mejorada (Figura 43).¹⁰³

¹⁰¹ X Kong X. Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry- An Overview of the Recent Progress. SPE 138261 (2010).

¹⁰² S Ponmani, R Nagarajan, J Sangwai. Applications of Nanotechnology for Upstream Oil and Gas Industry. J. Nano Res., 24, 7-15 (2013).

¹⁰³ Micro and Nano Scale Sensors for Oil Exploration & Production, Sea Murphy Advanced.

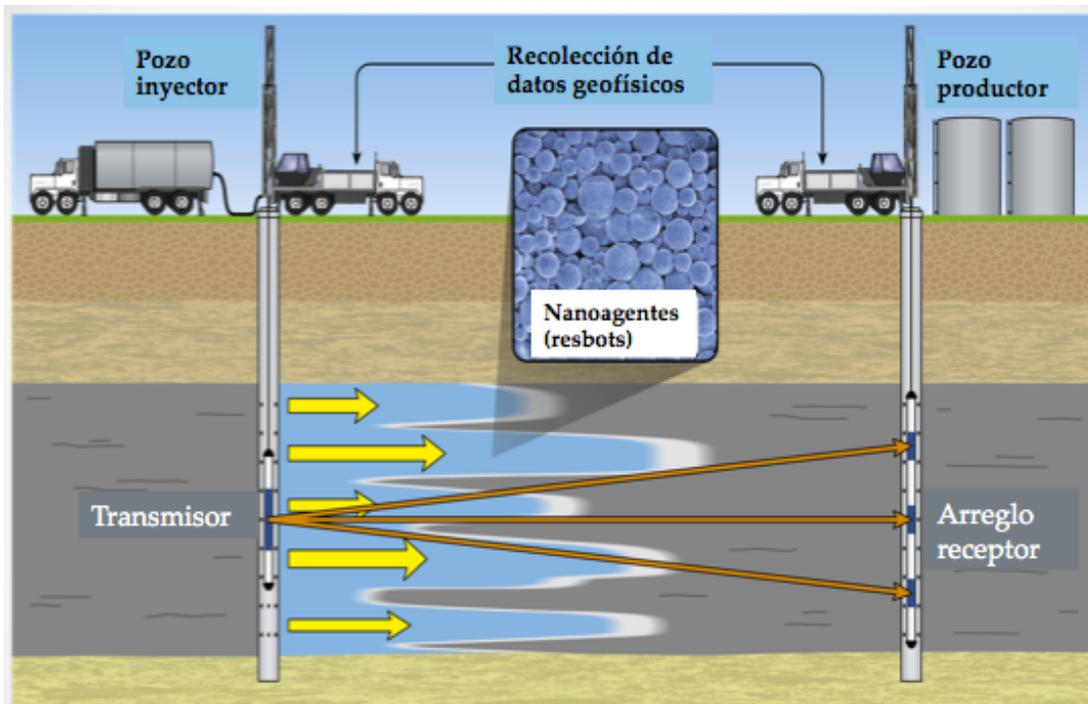


Figura 43. Empleo de nanoagentes (resbots) en el proceso de producción de un pozo petrolero.

Para los procesos de recuperación secundaria por desplazamiento con agua (*water flooding*) se considera el uso de nanoagentes hidrofílicos, con el objetivo de estimar la ubicación tridimensional del frente de agua, y las condiciones *in situ* del yacimiento. El monitoreo podrá efectuarse con agentes de contraste magnéticos, electromagnéticos, y acústicos/sísmicos. Los cambios químicos que sufre el sensor cuando entra en contacto con el fluido, sirven como indicadores de las condiciones del yacimiento, tales cambios pueden ser registrados a la salida del nanomaterial de los pozos productores o incluso de manera continua a medida que se desplaza a través del yacimiento.¹⁰⁴

El monitoreo eficiente de ambientes de trabajo, así como de las líneas de producción y transporte, permiten tomar acciones oportunas y reducir pérdidas humanas y económicas debidas a escapes de sustancias peligrosas. Por lo que se pretende que los dispositivos empleados para este fin tengan la capacidad de auto-limpiarse o auto-regenerarse, lo que implicaría un incremento sustancial en su vida útil y la disminución de los errores en el proceso de detección.

¹⁰⁴ J Berlin, J Yu, W Lu, E Walsh, L Zhang, P Zhang, W Chen, E Kan, M Wong, M Tomson, J Tour. Engineered Nanoparticles for Hydrocarbon Detection in Oil-Field Rocks. *Energy Environ. Sci.*,4,505-509 (2011).

Recientemente se han desarrollado sensores para hidrógeno, hechos de nanotubos de titanio recubiertos de una película de paladio, las propiedades foto-catalíticas de los nanotubos de titanio permiten remover de forma eficiente los contaminantes del sensor mediante exposición a luz ultravioleta, y en consecuencia, el dispositivo recupera su sensibilidad original al hidrógeno. Esto con la finalidad de obtener sensores para gases; que tienen el propósito de monitorear la presencia de gases que puedan ser tóxicos y peligrosos en las operaciones de perforación y producción de pozos.¹⁰⁵

5.4.1. Tecnología de pozos inteligentes.

El objetivo principal de los pozos inteligentes, es la automatización de tantas tareas como sea posible para mejorar el valor actual neto de un activo, a través del incremento de la producción y la reducción de los costos. El pozo inteligente por excelencia, es aquel en que la intervención física se elimina del proceso de producción en todas las actividades (aunque el factor humano e intervención física puede requerirse en determinadas situaciones).¹⁰⁶ Los sistemas recolectan y procesan grandes volúmenes de datos provenientes dentro de cada pozo e instalación de superficie. El sistema luego organiza toda la información en forma racional, toma decisiones lógicas para optimizar la producción de todo el campo y pone en práctica esas decisiones por control remoto.

Los nanosensores son herramientas que proporcionan datos en tiempo real para este tipo de tecnologías, dado que son materiales que se pueden colocar en el fondo del pozo y pueden suministrar los datos de presión, temperatura, flujo, e inclusive datos sísmicos, permitiendo el análisis de cada zona productora. Estos datos se pueden utilizar de manera reactiva, con válvulas que cierren el flujo del yacimiento o de manera activa, donde el uso de los datos obtenidos en conjunto con los datos de producción busquen aumentar la eficiencia y disminuir costos del pozo.¹⁰⁷ Entre los beneficios que conlleva el uso de terminaciones inteligentes en la producción conjunta, se encuentran: la disminución en el número de pozos, la necesidad de menos infraestructura, el desarrollo de pozos multilaterales, el aumento de la productividad por pozo y un costo operacional más bajo.

¹⁰⁵ P Deshmukh, S Katariya. Nanotechnology Applications In The Energy Sector. Int. J. Adv. Res. Technol., 2(3), 1-8 (2013).

¹⁰⁶ Bermudez Serrano, E., Cruz Espinoza, L., Viñas Rodriguez, R., & Castro Herrera, I. (2013). Terminación de pozos inteligentes.

¹⁰⁷ A. Carolina Alves. An approach to value flexibility considering uncertainty and future information: an application to smart wells.

Estudios previos demuestran la habilidad de los sistemas de pozos inteligentes para identificar y controlar la producción de agua indeseada sin intervención, optimizando los costos y tiempos de producción del pozo, incrementando la recuperación y con un costo de operación comparativamente más bajo.

Un caso de éxito en la implementación de pozos y terminaciones inteligentes es el pozo Lankahuasa 12 localizado en la región norte del estado de Veracruz, fue el primer pozo en México desarrollado con una terminación inteligente en el año 2005, este pozo fue diseñado con un aparejo selectivo inteligente con el objetivo de explotar intervalos gasíferos alojados en el Mioceno Superior, su instalación se llevo a cabo con el propósito de resolver problemas operativos y la reducción de costos asociados. A fin de realizar una explotación óptima, incrementando el potencial y energía del yacimiento. En este pozo se instaló el primer aparejo de producción en México integrado por; sensores de fondo, válvulas de fondo y la instalación de la interfaz superficial para el control y monitoreo del pozo de manera continua. Los sensores instalados de manera permanente, logran que el sistema maneje un cierre hermético a través de las válvulas de fondo ante cualquier eventualidad adversa en el pozo.

5.5. Nanocatalizadores.

Muchos procesos industriales emplean catalizadores para convertir una materia prima en un producto de consumo. La nanocatálisis se refiere a la aplicación de nanomateriales como catalizadores (Figura 43). Uno de sus objetivos claves es producir catalizadores con un 100 % de selectividad, alta actividad, bajo consumo de energía, y una vida útil larga, esto se puede lograr controlando con precisión el tamaño, forma, distribución espacial, composición de la superficie, estructura electrónica, estabilidad térmica y química de las nanopartículas individuales.¹⁰⁸ La utilización de nanocatalizadores en la industria proporciona una gran cantidad de utilidades, entre ellas: (i) aumento de la selectividad y actividad de los catalizadores, mediante el control del tamaño de poro y características de las partículas; (ii) sustitución de catalizadores de metales preciosos por nanocatalizadores a la medida, y (iii) el uso de los metales básicos, lo que mejora la reactividad química y reduce los costos del proceso.

¹⁰⁸ Gade, L. H., & Hofman, P. (2014). Molecular catalysts: structure and functional design. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, [2014].



Figura 44. Ventajas de los nanocatalizadores.

La nanocatálisis en el diseño de membranas puede ser útil en la eliminación de moléculas no deseadas de gases o líquidos, esto mediante el control del tamaño de los poros y las características de la membrana, en la remoción de sulfuros, componentes pesados y contaminantes del petróleo, celdas de combustible más eficientes y amigables con el medio ambiente.¹⁰⁹

Baker Hughes ha desarrollado un nanocatalizador llamado SULFIX™- H₂S, el cual funciona con una dispersión de nanopartículas de metales limpiadores para reducir la cantidad de sulfuros de hidrógeno en el aceite crudo, en productos intermedios y en los productos refinados. El uso de este tipo de catalizadores proporciona operaciones más seguras, con una reducción del daño ambiental y una eficiencia operacional en refinerías, tanques de almacenamiento, terminales y transportes.¹¹⁰

5.6. Nanotecnología en la remediación ambiental.

Diversos nanomateriales desarrollados han sido útiles en aspectos ambientales; particularmente en procesos de remediación, los cuales tratan de prevenir, tratar o limpiar sitios contaminados con desechos peligrosos. La remediación con nanomateriales ofrece ventajas como:

¹⁰⁹ Ying, J.Y, and Sun, T. 1997. Research Needs Assessment on Nano-structured Catalysts, Journal of Electroceramics, 1 (3): 219-238.

¹¹⁰ Kong, X., & Ohadi, M. 2010. Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry - Overview of the Recent Progress. Society of Petroleum Engineers.

(1) reducción de costos; (2) disminución de tiempos de limpieza de sitios contaminados; (3) se pueden utilizar a gran escala; (4) elimina la necesidad de tratamiento y disposición de suelos contaminados; y (5) reducen las concentraciones de los contaminantes.

Sin embargo, para prevenir algún impacto ambiental adverso se necesitan estudios profundos que evalúen el efecto de la remediación con nanomateriales a nivel ecosistema.¹¹¹ Los métodos de remediación utilizan materiales reactivos para la transformación y desintoxicación de contaminantes. Estos materiales tienen propiedades que favorecen la reducción química y la catálisis para mitigar los contaminantes. Las propiedades de los materiales permiten que puedan utilizarse *in situ*. La mayoría de las aplicaciones ambientales de la nanotecnología consideran tres categorías:

1. Productos sustentables ambientalmente benignos.
2. Remediación de materiales contaminados con sustancias peligrosas.
3. Sensores para agentes ambientales.

Para que la remediación sea efectiva, se requiere la adecuada caracterización de los sitios, obteniendo datos como: localización, condiciones geológicas (composición de la matriz del suelo, porosidad y profundidad del manto freático), propiedades geoquímicas (pH, fuerza iónica, oxígeno disuelto, potencial óxido reducción, concentración de nitratos, nitritos y sulfatos), así como concentración y tipo de contaminantes.¹¹² La remediación tiene varias aplicaciones como es: la remoción de contaminantes del agua por catálisis, oxidación, reducción o adsorción, para esto se ha propuesto la aplicación de nanopartículas de hierro (Fe), que son inyectadas en el subsuelo. (Figura 44).

¹¹¹ Gil-Díaz, M. Pinilla, P. Alonso, J. & Lobo, M. (2017). Viability of a nanoremediation process in single or multi-metal (loid) contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*.

¹¹² Nathanail, C. P., Gillett, A., McCaffrey, C., Nathanail, J., & Ogden, R. (2016). A Preliminary Risk Assessment Protocol for Renegade Nanoparticles Deployed During Nanoremediation. *Remediation Journal*, 26(3), 95-108. doi:101002/rem.21471.

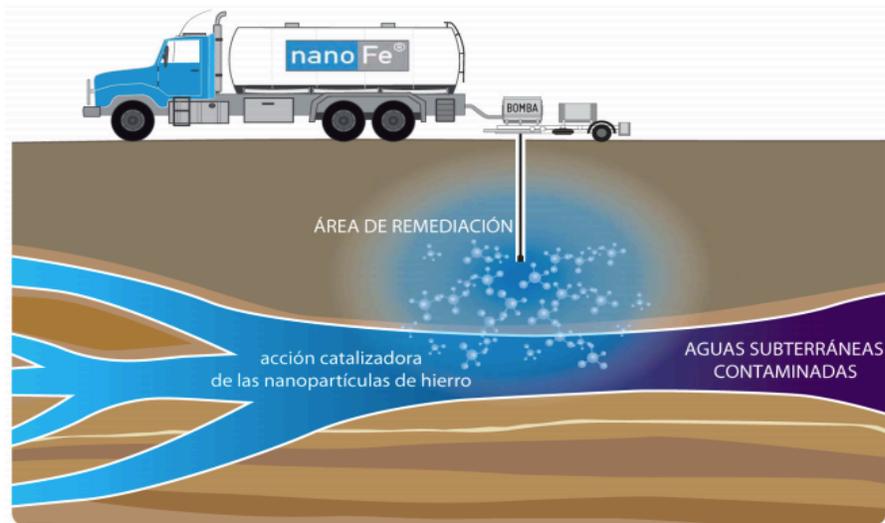


Figura 45. Inyección de nanopartículas de hierro para la descontaminación de un acuífero subterráneo.

Por ejemplo, durante el transporte y almacenamiento de sustancias como los hidrocarburos han ocurrido derrames accidentales, la migración de estas sustancias al subsuelo causa la contaminación de las aguas subterráneas. La remoción de estos contaminantes es difícil y costosa; una opción es su degradación química, para lo cual hay que introducir nanoagentes reductores a esa zona contaminada.

6. CONCLUSIONES.

La ciencia de materiales es un área que abarca diferentes áreas científicas como, física, química, biología e ingeniería. El presente trabajo representó una revisión del estado del arte, de cómo la ciencia de materiales da solución a los problemas que se enfrenta la industria del petróleo y gas.

A modo de conclusión podemos decir que la ciencia de materiales ofrece ventajas interesantes en diversos aspectos útiles para la ingeniería petrolera, como son:

- ❖ Ahorro de energía en los procesos de fabricación.
- ❖ Eliminación de residuos dañinos para el medio ambiente y la salud.
- ❖ Aumento de la competitividad industrial (mejores características y calidad del material).
- ❖ Economía en el empleo de los materiales, por aumento de la duración.
- ❖ Mejor aprovechamiento de los materiales durante los procesos de fabricación.
- ❖ Aumento de la seguridad en el trabajo.
- ❖ Reciclado de materiales.
- ❖ Aprovechamiento de residuos.
- ❖ Incremento del valor agregado de los productos.
- ❖ Creación y multiplicación de segmentos innovadores dentro de las industrias.

La nanotecnología, como área derivada de la ciencia de materiales, es un campo que actualmente influye de una manera rápida en la industria del petróleo y gas, siendo la clave a los retos que enfrenta la producción de hidrocarburos actualmente, mediante la reducción de gastos de operación a través de las tecnologías mencionadas en este trabajo.

Los materiales nanoestructurados han sido una apuesta interesante en el sector de petróleo y gas, ya que podrían revolucionar los procesos de extracción, transformación, transporte y venta de hidrocarburos. Las investigaciones hechas en la literatura actual no datan más allá del año 2005, lo que representa que es un tema nuevo en el que va incursionando la ingeniería petrolera.

El estudio de materiales y su aplicación en la industria, en particular en la del petróleo y gas cumple con funciones como:

- ❖ Desarrollar nuevos procesos en los materiales para ingeniería.
- ❖ Evalúa nuevos y mejorados métodos de pruebas, procedimientos y equipos.
- ❖ Resuelve dificultades y problemas únicos en la producción.
- ❖ Investiga causas de fallas de los materiales e inicia las acciones correctivas.
- ❖ Da servicio de pruebas y consultas técnicas.

Los grandes problemas a los que se enfrenta la ciencia de materiales en la industria petrolera es principalmente el precio internacional de los hidrocarburos, ya que en función de estos, la investigación y desarrollo de nuevos materiales se verá aumentada o disminuida. La ciencia de materiales en México enfrenta grandes retos en el desarrollo de materiales avanzados, que puedan ser una solución efectiva a diferentes problemáticas en el sector industrial entre los cuales están:

- ❖ Escaso presupuesto fiscal dedicado a la ciencia y tecnología.
- ❖ Dependencia tecnológica del exterior.

7. PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA DE MATERIALES EN LA INGENIERÍA PETROLERA.

La ciencia de materiales tiene una aplicabilidad en la ingeniería petrolera, ya sea en el desarrollo de nuevos materiales y tecnología, o simplemente poder hacer más eficientes los que ya se encuentran en uso. Por lo que la ciencia de materiales tiene como principal tarea en la ingeniería petrolera:

- ❖ Generar nuevas propuestas de valor.
- ❖ Optimización: fomentar la innovación (en proceso) buscando la optimización de la propuesta de valor. Un buen manejo en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, es el de los consorcios IDT (Investigación en Desarrollo Tecnológico). Los consorcios IDT son acuerdos celebrados entre una universidad o una empresa y un conjunto de compañías petroleras, liderados por un investigador reconocido quien dirige los esfuerzos del programa buscando a través de las fortalezas técnicas de la universidad o empresa, reducir las brechas tecnológicas. Consta de los siguientes elementos: se utiliza la infraestructura de la Universidad o empresa para el desarrollo de los proyectos, y las compañías patrocinadoras financian las actividades. Los resultados de los proyectos son compartidos por todos; además de las experiencias, retos, necesidades y soluciones que han aplicado y aplican compañías petroleras participantes.
- ❖ Se deben de establecer las bases para asociaciones estratégicas con operadores internacionales en el desarrollo de campos, que permitan a las áreas de exploración y producción acceder a tecnologías exclusivas de los operadores, acelerar su implementación y asimilación en tiempos menores a los requeridos para desarrollos tecnológicos propios o esperar la liberación o disponibilidad en el mercado.
- ❖ La fabricación e implementación de materiales que puedan resistir altas presiones, altas temperaturas y ambientes corrosivos, que brinden al personal de operaciones de perforación, seguridad en la realización de su trabajo.

Los materiales avanzados surgieron bajo la perspectiva del desarrollo de proyectos de aeronáutica espacial y de defensa militar; sin embargo, actualmente ocupan un sector importante en el mercado, y últimamente cobran mayor importancia al diversificar sus aplicaciones y ofrecer precios cada vez más competitivos frente a los materiales tradicionales.

Los nuevo tipos de aleaciones y los compuestos de matriz metálica son una opción prometedora en el desarrollo de las operaciones de exploración y producción, ya que pueden tener una amplia gama de aplicaciones que van desde: (i) mejoramiento de las tuberías de perforación, revestimiento y producción; (ii) intercambiadores de calor en las líneas de descarga y transporte; (iii) materiales innovadores en la fabricación de separadores; (iv) reforzamiento de estructuras; e (v) implementación de compresores y turbinas más eficientes y seguras en instalaciones de producción.

La materia ambiental es un punto enorme a considerar en el desarrollo de los materiales; en este contexto, las nanopartículas pueden representar una respuesta viable a esta problemática, ya que éstas añadidas a los fluidos de perforación o de fracturamiento hidráulico pueden evitar la contaminación de cuerpos de agua cercanos. Un tema que se abordó en este trabajo fueron como las redes metal-orgánicas y las redes orgánico-covalentes pueden ser útiles para la adsorción de gases, como puede ser el hidrógeno, metano, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico; lo cual puede representar una disminución en el impacto ambiental que tienen las operaciones petroleras. En los trenes de combustión, quemadores y separadores, se pueden implementar membranas, y con la adición de nanopartículas propiciar una separación selectiva de gases, que puedan ayudar a reducir las emisiones de contaminantes al medio ambiente. Una de las grandes aportaciones de trabajar con materiales porosos para adsorción de gases, representa el avance de poder utilizar otros medios de combustible aparte de los que son derivados del petróleo, como lo es el hidrógeno. Además con los procesos de adsorción de gases, como lo es el dióxido de carbono, éste podría utilizarse para un proceso de recuperación secundaria, y por lo mismo, poder optimizar los gastos de inyección.

Otro gran avance en el estudio y desarrollo de materiales para ingeniería petrolera son los nanotubos de carbono, estructuras que poseen una gran resistencia, incluso más que el acero. Además de poder ser buenos candidatos para la adsorción de gases, cables de corriente, ahora son una gran apuesta para el ensamblaje de plataformas petroleras para operaciones costa fuera, porque las tornaría más ligeras, más resistentes y sobre todo de bajo mantenimiento ante la corrosión.

La ciencia de materiales tiene grandes objetivos y metas dentro de la ingeniería petrolera, pero también en la ingeniería en general, fabricando las nuevas soluciones a los problemas modernos, como lo es la contaminación y dispositivos electrónicos que no requieran de un consumo energético alto. El desarrollo de materiales abarca ámbitos como:

- ❖ Nuevas fuentes de energía.
- ❖ Mejoramiento del ambiente.
- ❖ Reciclaje de materiales.
- ❖ Informática y comunicaciones.
- ❖ Purificación del agua.
- ❖ Sensores para gases.
- ❖ Robótica.

México tiene la capacidad de poder competir en el ámbito científico y tecnológico de los materiales, gracias a que tenemos una amplia riqueza de recursos naturales y minerales. Contamos con instituciones de investigación para el desarrollo de materiales avanzados en diversos sectores industriales y energéticos, y contamos con los recursos humanos. Se debe continuar y redoblar el esfuerzo para captar y capacitar talento técnico para asimilar, implementar y madurar las nuevas tecnologías. Con esta finalidad los requerimientos son:

- ❖ Acceder de forma oportuna a la tecnología.
- ❖ Cierre de brechas tecnológicas, de conocimiento, difusión y promoción del uso de las tecnologías.
- ❖ Transferencia, asimilación, aprendizaje y aplicación de nuevas tecnologías.
- ❖ Maduración de nuevas tecnologías Innovación.

Existe la capacidad de generar nuestra propia tecnología, que pueda brindar soluciones a los diversos problemas de ingeniería que enfrenta el país, a través del desarrollo de materiales avanzados, como lo son los nanomateriales y sobre todo, que estos sean una solución eficiente a los problemas que enfrenta el sector industrial y energético del país.

REFERENCIAS

1. A dictionary of science. Oxford: Oxford University Press, 2010.
2. A. Carolina Alves. An approach to value flexibility considering uncertainty and future information: an application to smart wells.
3. Abdo J., Danish M., (2010), Nanoparticles: Promising Solution to Overcome Stern Drilling Problems. Nanotech Conference and Exhibition, Anaheim, California, 6-8 August.
4. Abdul Halim, R. (2016). Metal Organic Frameworks: Explorations and Design Strategies for MOF Synthesis.
5. Abdul Razak Ismail, Norhana Mohamed Rashid, Mohd Zaidi Jaafar, Wan Rosli Wan Sulaiman, Nor Aziah Buang, 2014. Effect of Nanomaterial on the Rheology of Drilling Fluids. J. Applied Sci., 14: 1192-1197.
6. Agarwal, A. and Kovscek, A.R. 2013. Solar-Generated Steam for Heavy-Oil Recovery: A Coupled Geomechanical and Reservoir Modeling Analysis. Presented at the SPE Western Regional & AAPG Pacific Section Meeting 2013 Joint Technical Conference, Monterey, California, USA, 19-25 April. SPE-165329-MS.
7. Agarwal, A. and Kovscek, A.R. 2013. Solar-Generated Steam for Heavy-Oil Recovery: A Coupled Geomechanical and Reservoir Modeling Analysis. Presented at the SPE Western Regional & AAPG Pacific Section Meeting 2013 Joint Technical Conference, Monterey, California, USA, 19-25 April. SPE-165329-MS.
8. Aguilar Aguirre, M. A., Trujillo Vargas, J. L., & Hernández Álvarez, R. J. (2002). Aspectos a considerar en la planeación de la perforación de pozos petroleros para evitar problemas técnicos y legales.
9. Alberro, J., & Hernández, R. Fuerzas de filtración y fracturamiento hidráulico. [México : UNAM, Instituto de Ingeniería, 1999].
10. Alvarado, V., & Manrique, E. (2012). 2.2.1 IOR and EOR Definitions. In , Enhanced Oil Recovery - Field Planning and Development Strategies Elsevier.
11. Álvarez López, B. I., & Pérez García, T. E. (2012). Fracturamiento hidráulico multietapas.
12. Application of Nanotechnology for Enhancing Oil Recovery: Nanofluids/ Smart Fluids Dr. Narendra Kumar Agnihotra TCE QSTP-LLC, Doha, Qatar
13. Ashok Santra, SPE, Peter J. Boul, and Xueyu Pang; Influence of Nanomaterials in Oil well Cement Hydration and Mechanical Properties, SPE International Oilfield Nanotechnology Conference held in Noordwijk, The Netherlands, 12–14 Junio 2012, SPE 156937.

14. Ayirala, S. C., & Yousef, A. A. (2015). A State-of-the-Art Review To Develop Injection-Water-Chemistry Requirement Guidelines for IOR/EOR Projects. *SPE Production & Operations*, 30(1), 26. doi:10.2118/169048-PA
15. Bahadori, A. *Natural gas processing : technology and engineering design*. Waltham, Massachusetts : Gulf Professional Publishing, [2014].
16. Baker hughes(2017). “In-tallic propants”. <https://www.bakerhughes.com/news-and-media/resources/brochures/in-tallic-disintegrating-frac-balls-overview>
17. Balderas Sánchez, E.A., & Osorio Peralta, O. (2013). Pre-selección de procesos de recuperación secundaria y mejorada de hidrocarburos en yacimientos petroleros.
18. Bermudez Serrano, E., Cruz Espinoza, L., Viñas Rodriguez, R., & Castro Herrera, I. (2013). Terminación de pozos inteligentes.
19. C. Montoro, F. Linares, E. Q. Procopio, I. Senkovska, S. Kaskel, S. Galli, N. Masciocchi, E. Barea, J. A. R. Navarro, J. *Am. Chem. Soc.* 2011, 133, 11888–11891
20. Campa Molina, J. (2007). *Biomateriales : fundamentos, técnicas y aplicaciones*. Ocotlán, Jal. : Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Ciénega, 2007.
21. Cembrero Cil, J., Ferrer Gimenez, C., Pascual Guillamón, M., & Pérez Puig, M. Á. (2005). *Ciencia y tecnología de materiales : problemas y cuestiones*. Madrid: Pearson,2005.
22. Centro Conjunto de Investigacion en Quimica Sustentable. “Quimica de materiales”. http://www.cciqs.uaemex.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=102&Itemid=60
23. Chakraborty, S., Agrawal, G., DiGiovanni, A., & Scott, D. E. 2012. The Trick Is The Surface - Functionalized Nanodiamond PDC Technology. Society of Petroleum Engineers.
24. *Chem. Soc. Rev.*, 2012, 41, 5879–5880
25. *Chem. Soc. Rev.*, 2012, 41, 5922–5932
26. Chen, Y., Zhao, Z., Karim, A., & Weiss, R. A. (2016). Shape Memory of Microscale and Nanoscale Imprinted Patterns on a Supramolecular Polymer Compound. *Macromolecular Rapid Communications*, 37(23), 1932-1938. doi:10.1002/marc.201600362
27. Cheraghian, G. & Hendraningrat, L. *Int Nano Lett* (2016) 6: 1. doi:10.1007/s40089-015-0170-7
28. Chesworth, W. (2008). *Encyclopedia of soil science*. Dordrecht : Springer Verlag, 2008.
29. Choudhary, S. *Cementing technology and procedures*. Valley Cottage, NY : Scitus Academics, [2016].

30. *Composites world*. “Proppants”.
<http://www.compositesworld.com/blog/post/composites-boon-from-hydraulic-fracturing>
31. Cowie, J. G., & Arrighi, V. (2008). *Polymers: chemistry and physics of modern materials*. Boca Raton, Florida : CRC Press, c2008.
32. Cuevas, J. C.; Scheer, E. *Molecular electronics; World Scientific series in nanoscience and nanotechnology; World Scientific Pub. Co.: Singapore; Hackensack, N.J., 2010; Vol. 1, pp 703*
33. 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.
34. D. K. James, J. M. Tour, *Top. Curr. Chem.* 2005, 257, 33–62
35. Desiraju, G. R., Vittal, J. J., & Ramanan, A. *Crystal engineering: a textbook*. New Jersey, New Jersey : World Scientific ; IISc Press, c 2011.
36. Dobson, P., Jarvie, H., & King, S. (2014). Nanoparticle. *Encyclopædia Britannica*.
37. Dorazco Gonzalez, A., & Valdés Martínez, J. (2006). Cu(II) un reto en ingeniería de cristales : construcción de cadenas 1D y macrociclos.
38. Durán Ramos, J. F., Ruiz Torres, J., & Gómez Cabrera, J. Á. (2009). *Explotación de campos maduros, aplicaciones de campo*.
39. Edgar R. et al., “Methodology to select, rank and program EOR projects to increase reserves rapidly”, *World, Heavy Oil Congress, Escocia*, pp. 1-11, 2012.
40. Franceschetti, D. R. (2016). *Alloys*. Salem Press Encyclopedia Of Science.
41. Gade, L. H., & Hofman, P. (2014). *Molecular catalysts: structure and functional design*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, [2014].
42. Giavarini, C., & Hester, K. (2011). *Gas hydrates: immense energy potential and environmental challenges*. London: Springer, 2011.
43. Gil-Díaz, M., Pinilla, P. Alonso, J., & Lobo, M. (2017). Viability of a nanoremediation process in single or multi-metal (loid) contaminated soils. *Journal Of Hazardous Materials*.
44. Glinz Pérez, I. C., & Flores de la Mota, I. (2003). *Optimización de un programa de perforación de pozos petroleros*.
45. Gómez Balazar, F. J., & Castro Herrera, I. (2009). *Determinar la factibilidad de implantar un proceso de recuperación secundaria o mejorada en el área de Abkatun-H (B.P.)*.
46. Gore, P. W. (2016). *Oil and gas origins*. Salem Press Encyclopedia Of Science.
47. Gunstone, R. (2015). *Encyclopedia of science education*. Dordrecht : Springer, [2015].

48. Halcón Arellano, B. I., Sánchez Aparicio, O., & Márquez Vázquez, M. (2015). Energías renovables : biogás, hidrógeno y metanol.
49. Harada, A. Supramolecular polymer chemistry. Weinheim, Germany : Wiley-VCH, c 2012.
50. Hilyard, J. (2012). The oil & gas industry : a nontechnical guide. Tulsa, Okla. : PennWell, [2012].
51. Hollar Jr., D. W. (2016). Polymers. Salem Press Encyclopedia Of Science.
52. Huerta Rosales, M. Á., Legorreta Romero, R., & Velasco Esquivel, A. (2010). Cementación de pozos horizontales.
53. Hydraulic fracture complexity: diagnosis, remediation, and explottion. 2008. SPE 115771.
54. Ismail, A. F., Chandra Khulbe, K., & Matsuura, T. Gas separation membranes : polymeric and inorganic. Cham : Springer, [2015].
55. J Berlin, J Yu, W Lu, E Walsh, L Zhang, P Zhang, W Chen, E Kan, M Wong, M Tomson, J Tour. Engineered Nanoparticles for Hydrocarbon Detection in Oil-Field Rocks. Energy Environ. Sci.,4,505-509 (2011).
56. Jain, S. C., Willander, M., & Kumar, V. Conducting organic materials and devices. Amsterdam : Elsevier/Academic, 2007.
57. King, G. E. (1992). EOR. Washington, D.C. : Society of Petroleum Engineers, 1992.
58. Kong, X., & Ohadi, M. 2010. Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry - Overview of the Recent Progress. Society of Petroleum Engineers.
59. Kulkarni, S. K. Nanotechnology: principles and practices. Cham: Springer, [2015].
60. Kumar, P. Organic solar cells : device physics, processing, degradation, and prevention. Boca Raton, Fla. : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
61. Kuo, J. (2007). Electron microscopy : methods and protocols. Totowa, New Jersey: Humana Press, 2007
62. Kusky, T. M. (2005). Encyclopedia of earth science. New York : Facts on File, c 2005.
63. LaGoo, L. M. (2016). Surface and Interface Science. Salem Press Encyclopedia Of Science.
64. Liao, J., Yazaydin, A. O., Yang, S., Li, F., & Ding, L. (2016). Molecular simulation studies of hydrogen enriched methane (HEM) storage in Covalent Organic Frameworks. Microporous & Mesoporous Materials, 231138-146. doi:10.1016/j.micromeso.2016.05.030
65. Luis, G., & Alexis, B. (2013). Evaluación de modelos rigurosos para la predicción de hidratos de gas natural / Evaluation of rigorous models for

- natural gas hydrates predictions. Revista De La Facultad De Ingeniería Universidad Central De Venezuela, (1), 83.
66. Marc De Graef, *"Introduction to Conventional Transmission Microscopy"* Cambridge University Press, New York (2003).
 67. Maurisan Alves, L. (2007). Nanoestructuras formadas por redes orgánicas covalentes.
 68. Maya Romero, A., & Barragán Aroche, J. F. (2013). Recuperación mejorada de crudo.
 69. McEvoy, A. J., Castaner, L., & Markvart, T. Solar cells: materials, manufacture and operation. Oxford : Academic Press, 2013.
 70. Micro and Nano Scale Sensors for Oil Exploration & Production, Sea Murphy Advanced
 71. MIT; 10 Emerging Technologies, Technology Review; 2010.
 72. Mokhatab, Saeid, Fresky, M.A, and Rafiqul Islam, M. 2006 Applications of Nanotechnology in Oil and Gas E&P, Journal of Petroleum Technology 58.
 73. Mostafavi, V. Ferdous, M.Z. Hareland, G.Husein, M. Design and Application of Novel Nano Drilling Fluids to Mitigate Circulation Loss Problems During Oil Well Drilling Operations, J clean Technology, ISBN: 978-1-4398- 8189-7, 2011.
 74. Murguía Velázquez, G. A., & Cruz Espinoza, L. (2011). Evaluación del fracturamiento hidráulico.
 75. Nanotechnology for sale: The once-Theoretical Becomes Practical, stephenrassenfoss, jpt/jpt online staff
 76. Nathanail, C. P., Gillett, A., McCaffrey, C., Nathanail, J., & Ogden, R. (2016). A Preliminary Risk Assessment Protocol for Renegade Nanoparticles Deployed During Nanoremediation. Remediation Journal, 26(3), 95-108. doi:10.1002/rem.21471.
 77. Newell, J. (2016). Ciencia de materiales: aplicaciones en ingeniería. México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor, 2011.
 78. Nntotechzone. "Nanofluids to enhance oil recovery". <http://www.nntotechzone.no/en/2015/05/using-nanofluids-to-enhance-oil-recovery/>
 79. Nunzi JM. Organic photovoltaic materials and devices. Comptes Rendus Physique 2002; 3(4): 523-542
 80. P Deshmukh, S Katariya. Nanotechnology Applications In The Energy Sector. Int. J. Adv. Res. Technol., 2(3), 1-8 (2013).
 81. Pancorbo Floristán, F. J. Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación. México, D. F. : Alfaomega, [2013].
 82. Parodi, G. A. (2016). Ceramics. Salem Press Encyclopedia Of Science.
 83. Parodi, G. A. (2016). Metals. Salem Press Encyclopedia Of Science.

84. Patanè, A., & Balkan, N. Semiconductor research : experimental techniques. Berlin: Springer, 2012.
85. Pérez Castañeda, M. Á., & Velazco Esquivel, A. (2013). Apuntes y ejercicios de ingeniería de perforación.
86. Pfeiler, W. Alloy physics: a comprehensive reference. Weinheim: Wiley-VCH, c 2007.
87. Piprek, J. (2005). Optoelectronic devices: advanced simulation and analysis. New York : Springer, 2005.
88. Quadri, N. P. Energía solar : agua caliente, energía fotovoltaica, calefacción, energía eólica, refrigeración, biomasa. Buenos Aires : Alsina, c 2003.
89. Red de Nanociencias y Nanotecnología. "Nanotubos de carbon". <http://www.nanored.org.mx/>
90. Reimer, L., & Kohl, H. Transmission electron microscopy : physics of image formation. New York : Springer, c2008.
91. REN21. 2015. Renewables 2015 Global Status Report.
92. Renneboog, R. M. (2016). Chemical Bonding. Salem Press Encyclopedia Of Science.
93. Revista Materiales. (2014, May 6). "Polímeros de coordinación porosos (PCP) como nuevas plataformas energéticas: La importancia de los centros metálicos insaturados". <https://materialesavanzados.wordpress.com/2014/05/06/polimeros-de-coordinacion-porosos-pcp-como-nuevas-plataformas-energeticas-la-importancia-de-los-centros-metalicos-insaturados/>
94. Reza, D., Wei-Min, W., David, L. M., & En-Te, H. (2015). Sistema de microscopía de fuerza atómica basada en una unidad de lectura óptica digital y un escáner-zumbador. Revista Mexicana De Física, (4), 238.
95. RIFAAT Al-Mjeni et al, "Has the time come for EOR?" . Oilfield Review, 2010.
96. Rioja Guerrero, E., & Beltrán Sánchez, M. R. (1998). Polimeros semiconductores.
97. Rivera Chávez, L. E., & Steffani Vargas, O. (2015). Apuntes de recuperación secundaria y mejorada.
98. Rudolph, J. J. (2015). Petroleum and natural gas industry. Salem Press Encyclopedia.
99. S Ponmani, R Nagarajan, J Sangwai. Applications of Nanotechnology for Upstream Oil and Gas Industry. J. Nano Res., 24, 7-15 (2013).
100. Sabbaghi S, Saboori R and Barahoei M, Enhanced Heat Transfer of Drilling Fluid with Titania Nanofluid, Nano Chemical Engineering Department, Shiraz University, Shiraz, Iran.

101. Saja Saez, J., Rodríguez Pérez, M. Á., & Rodríguez Méndez, M. L. *Materiales: estructura, propiedades y aplicaciones*. Madrid, España : Thomson, c 2005.
102. Seiffert, S. *Supramolecular polymer networks and gels*. Cham : Springer, 2015.
103. Smith, W. F., Hashemi, J., Nagore Cázares, G., González Caver, P. A., & Smith, W. F. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México: McGraw-Hill Interamericana, 2006.
104. Steed, J. W., & Gale, P. A. *Supramolecular chemistry : from molecules to nanomaterials*. Hoboken, New Jersey : Wiley, 2012.
105. Suleimanov, B. A., Ismayilov, F. S., Dyshin, O. A., & Veliyev, E. F. (2016). Selection methodology for screening evaluation of EOR methods. *Petroleum Science & Technology*, 34(10), 961-970. doi:10.1080/10916466.2015.1107849
106. TABER, J.J. et al., "EOR Screening Criteria Revisited", SPE/DOE Tenth Symposium on Improve Oil Recovery, SPE/DOE 35385, E.E.U.U., PP. 21-24, 1996.
107. Tran, A. P. (2016). *Metallurgy*. Salem Press Encyclopedia Of Science.
108. Van Heel, A.P., Van Wunnik, J.N.M., Bentouati, S. et al. The Impact Of Daily And Seasonal Cycles In Solar-Generated Steam On Oil Recovery. Presented at the SPE EOR Conference at Oil & Gas West Asia, Muscat, Oman, 11-13 April. SPE-129225-MS.
109. Wei Yu and Huaqing Xie, "A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2012, Article ID 435873, 17 páginas, 2012.
110. *World Energy Balances, Extended Energy Balances*, IEA, 2012.
111. *World Energy Outlook*, IEA, 2011.
112. Wu, Ruiting. *Some fundamental mechanisms of hydraulic fracturing*. Work Degree. School of Civil and Environmental Engineering. 2006.
113. X Kong X. *Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry- An Overview of the Recent Progress*. SPE 138261 (2010).
114. Ye, Y., & Liu, C. (2013). *Natural gas hydrates: experimental techniques and their applications*. Berlin: Springer, 2013.
115. Ying, J.Y, and Sun, T. 1997. Research Needs Assessment on Nano-structured Catalysts, *Journal of Electroceramics*, 1 (3): 219-238.