

**APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LA
INDUSTRIA DE PETRÓLEO Y GAS - ESTADO DEL ARTE**

LEIDY YULIANA VIVAS RIAÑO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2016

**APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LA
INDUSTRIA DE PETRÓLEO Y GAS - ESTADO DEL ARTE**

LEIDY YULIANA VIVAS RIAÑO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero de Petróleos

Director

Nelson Enrique Quintero Valero

Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2016

*Dedicado a la memoria de mi tío **Jaime**.*

Desde que te fuiste todo cambió.

No sabes cómo te echamos de menos y,

lo que me gustaría que estuvieses aquí

para poder celebrarlo todos juntos.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
1 LA NANOTECNOLOGÍA	22
1.1 ALGUNAS DEFINICIONES	22
1.1.1 ¿Qué es un nanómetro?.	22
1.1.2 Desarrollo histórico del término.	24
1.1.3 Definición de Nanotecnología.	26
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA NANOTECNOLOGÍA	28
1.2.1 Nanomateriales.	28
1.2.2 Clasificación de los nanomateriales.	29
1.2.3 Efecto del área superficial.	32
1.2.4 Síntesis de nanomateriales y fabricación de nanoestructuras.	34
1.3 IMPORTANCIA ECÓNOMICA	35

2 APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO Y GAS	43
3 NANOSENSORES	49
3.1 CONCEPTOS	49
3.1.1 ¿Qué es un sensor?.	49
3.1.2 ¿Qué hace posible a los nanosensores?.	51
3.1.3 Características de los nanosensores.	52
3.1.4 Arquitectura del dispositivo.	53
3.1.5 Consorcio Avanzado de Energía.	58
3.2 APLICACIÓN	62
3.2.1 Aplicación en el área de Producción.	62
4 NANOFLUIDOS	71
4.1 CONCEPTOS	71
4.1.1 Características de los nanofluidos.	71
4.1.2 Síntesis de los nanofluidos.	71
4.1.3 Ventajas de los nanofluidos.	72
4.2 APLICACIÓN	74
4.2.1 Aplicación en el área de Perforación.	74

4.2.2	Aplicación en el área de Producción.	82
5	NANOMATERIALES	84
5.1	CONCEPTOS	84
5.1.1	Características de los materiales nanoestructurados.	84
5.1.2	Clasificación de los materiales nanoestructurados.	85
5.1.3	Síntesis de los materiales nanoestructurados.	85
5.1.4	Nanocompuestos.	86
5.2	APLICACIÓN	88
5.2.1	Aplicación en el área de Perforación y Producción.	88
6	NANOREVESTIMIENTOS	89
6.1	CONCEPTOS	89
6.1.1	¿Qué es un revestimiento?.	89
6.1.2	Características de los nanorevestimientos.	89
6.1.3	Síntesis de los nanorevestimientos.	90
6.1.4	Propiedades de los nanorevestimientos.	91
6.2	APLICACIÓN	92
6.2.1	Aplicación en el área de Perforación y Producción.	92
7	NANOMEMBRANAS	93

7.1	CONCEPTOS	93
7.1.1	Materiales nanoporosos.	93
7.1.2	Características de las membranas.	94
7.1.3	Características de las nanomembranas.	94
7.2	APLICACIÓN	95
7.2.1	Aplicación en el área de Producción.	96
8	NANOCATALIZADORES	98
8.1	CONCEPTOS	98
8.1.1	¿Qué es un catalizador?.	98
8.1.2	Características de los nanocatalizadores.	99
8.1.3	Preparación del nanocatalizador.	100
8.1.4	Pretratamiento del nanocatalizador.	100
8.1.5	Parámetros que afectan las propiedades catalíticas.	101
8.2	APLICACIÓN	102
8.2.1	Aplicación en el área de Producción.	102
8.2.2	Aplicación en el área de Refinación y Procesamiento.	104
9	NANOTECNOLOGÍA EN COLOMBIA	106

9.1 CONTEXTO DE DESARROLLO DE LA NANOTECNOLOGÍA EN COLOMBIA	110
9.2 DIVULGACIÓN DE LA NANOCIENCIA Y LA NANOTECNOLOGÍA EN COLOMBIA	116
10 AVANCES ACADÉMICO – TÉCNICOS EN NANOTECNOLOGÍA APLICADOS A LA INDUSTRIA EN COLOMBIA	118
CONCLUSIONES	124
RECOMENDACIONES	127
BLIBLIOGRAFÍA	128
ANEXOS	140

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Escala de longitud que muestra el nanómetro en contexto	23
Figura 2 Clasificación de los nanomateriales según su dimensionalidad	31
Figura 3 Representación esquemática del efecto del área superficial respecto al volumen	32
Figura 4 Diversidad estructural del nanomunudo	33
Figura 5 Enfoques <i>Top-Down</i> y <i>Bottom-Up</i>	35
Figura 6 Áreas de aplicación de la Nanotecnología	39
Figura 7 Esquema general de la cadena propuesto por Lux Research	41
Figura 8 Esquema general de un dispositivo sensorial	51
Figura 9 Ejemplo de un nanosensor (zoom sucesivo)	52
Figura 10 Arquitectura del dispositivo	53

Figura 11 Principio de operación del nanosensor físico basado en CNTs . . .	55
Figura 12 Principio de operación del nanosensor químico basado en CNTs . .	55
Figura 13 Efecto piezoeléctrico en nanohilos de óxido de zinc	57
Figura 14 Miembros del AEC	60
Figura 15 Metas de investigación del AEC	61
Figura 16 Rutas de investigación del AEC	61
Figura 17 Clasificación de los nanocompuestos	87
Figura 18 Síntesis de los nanorevestimientos	91
Figura 19 Antecedentes históricos de apropiación y desarrollo de la Nanotec- nología en Colombia.	110

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1	Definiciones de la Nanotecnología encontradas en la literatura . . . 26
Tabla 2	Predicción del tamaño del mercado global de productos basados en Nanotecnología 40
Tabla 3	Retos de la industria y su solución basada en Nanotecnología . . . 45
Tabla 4	Clasificación de los procesos de la nanomembrana de acuerdo a la estructura y fuerzas impulsoras 95

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A Artículo Publicable	140

TÍTULO : APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LA INDUSTRIA DE PETRÓLEO Y GAS - ESTADO DEL ARTE*.

AUTOR : VIVAS RIAÑO, Leidy Yuliana†.

PALABRAS CLAVES : Nanotecnología, Aplicaciones, Industria del Petróleo y Gas, Nanotecnología en Colombia.

DESCRIPCIÓN : Quizás se puede decir que la primera actividad de divulgación de la Nanotecnología fue llevada a cabo por el propio Richard Feynman cuando anticipó su llegada, en su famoso discurso “*There’s Plenty of Room at the Bottom*” pronunciado en 1959. Desde entonces la Nanotecnología ha ido cobrando forma, hasta constituirse en una de las temáticas claves para el desarrollo actual, que, debido a sus especiales características ha tenido un gran impacto en casi todas las industrias, desde la electrónica, al cuidado de la salud y las telecomunicaciones. Por esto, la Nanotecnología se percibe entonces como una herramienta imprescindible que permite solucionar los innumerables problemas técnicos a los que la industria del Petróleo y Gas se enfrenta cada día con miras de cumplir con la creciente demanda global de energía.

Éste proyecto presenta una investigación realizada sobre la Nanotecnología y sus aplicaciones en la industria del Petróleo y Gas a nivel mundial y en Colombia, en la cual se desarrolló una revisión sistemática con el fin de establecer un marco teórico de referencia que plasme el estado actual de la literatura de la temática y contribuya a su conceptualización y comprensión, e, ilustre los potenciales impactos positivos en la industria, debido a su desarrollo e implementación.

La investigación desarrollada permitió el análisis de la temática de Nanotecnología, su historia y antecedentes, la definición y comprensión de sus conceptos básicos, la identificación y clasificación de sus aplicaciones en áreas específicas de la industria del Petróleo y Gas, y la contextualización de su desarrollo en Colombia, a través del análisis de contenido realizado a artículos científicos, tesis de grado, publicaciones seriadas, patentes y material editorial seleccionados.

* Trabajo de Grado

† Facultad de Ingenierías Físico - Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Nelson Enrique Quintero Valero (Director).

TITLE : NANOTECHNOLOGY APPLICATIONS IN OIL AND GAS INDUSTRY - STATE OF ART*.

AUTHOR : VIVAS RIAÑO, Leidy Yuliana†.

KEY WORDS : Nanotechnology, Applications, Oil and Gas Industry, Nanotechnology in Colombia.

DESCRIPTION : Perhaps we can say that the first activity of disclosure of Nanotechnology was carried out by the own Richard Feynman when he anticipated his arrival in his famous speech "*There's Plenty of Room at the Bottom*" in 1959. Since then Nanotechnology has been taking shape to become one of the key themes for the current development, which, due to their special characteristics has had a great impact in almost all industries, from electronics, health care and telecommunications. For this reason, Nanotechnology is then perceived as an essential tool that allows to solve the innumerable technical problems to which the Oil and Gas industry faces every day with the aim to fulfill the growing global demand of energy.

This project presents a research about the main applications of Nanotechnology in Oil and Gas industry worldwide and in Colombia, using a systematic review methodology to establish a theoretical framework that reflects the current state of the literature and contribute to its conceptualization and understanding, and, illustrates the potential positive impacts on the industry, caused by his development and implementation.

The research developed allowed the analysis of Nanotechnology, his history and background, the definition of the basic concepts and the identification of his application in specific areas of the Oil and Gas industry and the contextualization of his development in Colombia, through the analysis of the selected scientific articles, dissertations, patents, serial publications and reference documents.

* Degree Project

† Faculty of Physical - Chemical Engineering, School of Petroleum Engineering, Nelson Enrique Quintero Valero (Director).

INTRODUCCIÓN

El mundo de la Nanotecnología o *nanomunudo*, como muchos empiezan a llamarle, es muy fascinante. La misma forma de denominarle genera de entrada grandes discusiones; para algunas corrientes es necesario diferenciar la Nanociencia de la Nanotecnología; es el caso de la Real Sociedad Británica que define “*la Nanociencia como el estudio y manipulación de partículas nanométricas, mientras que la Nanotecnología compete el diseño, caracterización y producción de estructuras, dispositivos y sistemas en escala nanométrica*”¹.

Otros autores, por el contrario, conscientes de la gran dificultad práctica para hacer la distinción, optan por el término *nanotecnociencia*, aunque hay quienes han planteado el concepto de *nanología*. Sin embargo, la gran mayoría opta simplemente por hablar de Nanotecnología, y nosotros nos sumaremos a ellos, pues es el término que más se ha utilizado en la literatura científica, aunque una corriente de esta línea hace la sugerencia de hablar de *Nanotecnologías* en plural, pues se trata de un campo con disciplinas convergentes y con diversas aplicaciones, cuyo punto de encuentro es sencillamente la escala *nano*².

¹ CAMPILLO, Beatriz y ZULETA, Guillermo. *Bioética y Nanotecnología*. En: Revista Lasallista de Investigación. Vol. 11, No. 1 (Enero, 2014); p. 64.

² *Ibíd.*, p. 64.

Así pues, pareciera que respecto al nombre, lo único realmente claro y sin discusión es que el prefijo *nano* alude al nanómetro como unidad de medida, el cual, a su vez, hace referencia a la milmillonésima parte de un metro, o expresado por notación científica 10^{-9} , lo que permite en escala de longitudes de 1 a 100 nanómetros la manipulación de átomos y moléculas, con la característica importante de que la materia a esa escala tiene un comportamiento distinto al que normalmente presenta en lo macro, debido a la manifestación de nuevos efectos, denominados como efectos cuánticos, los cuales cambian las propiedades físicas, químicas y biológicas de los materiales, abriendo por tanto múltiples posibilidades que desafían los límites de la imaginación ³.

Se trata entonces de un conocimiento interdisciplinario que ha sacudido fuertemente al mundo científico, generando nuevas preguntas y cuestionando las leyes de la física clásica que parecían darse por sentadas. La Nanotecnología se ha convertido, entonces, en un *boom* más de la tecnociencia, teniendo como resultado que, múltiples publicaciones, estudios y posibles aplicaciones aparezcan a diario ⁴.

Aunque se dice que la creación de la Nanotecnología es muy reciente (incluso está en fase de investigación), ya muchas aplicaciones se encuentran disponibles en el mercado, en sectores tan diversos como las telecomunicaciones, la electrónica, la medicina, las energías renovables, la construcción, la alimentación, la industria textil, la agricultura, la cosmética, el deporte, entre otros, y ya reportan grandes ganancias tanto a la empresa pública como la privada, quienes han invertido presupuestos multimillonarios en dichos desarrollos ⁵.

³ *Ibid.*, p. 64.

⁴ *Ibid.*, p. 65.

⁵ *Ibid.*, p. 65.

En un mundo donde el acceso fácil al petróleo ya no es la norma y, la exploración y producción en escenarios extremos domina, ha hecho que la industria petrolera se enfrente a nuevos y difíciles retos técnicos para cumplir con la creciente demanda global de energía ⁶.

Problemas críticos relacionados con ubicaciones remotas (aguas ultra profundas y ambientes árticos), condiciones hostiles (formaciones a alta temperatura y alta presión), yacimientos no convencionales (crudos pesados, arenas bituminosas, *tight gas*, *tight oil*, *shale gas*, *shale oil*, etc.) pueden ser enfrentados y resueltos a partir de *avances tecnológicos*. En los últimos años, la Nanotecnología se ha establecido como candidato potencial para ofrecer soluciones a estos retos ⁷.

En este trabajo de grado se presenta un estudio analítico del conocimiento acumulado que hace parte de la investigación documental basada en el análisis de documentos escritos y que tiene como objetivo inventariar y sistematizar la producción en el área del conocimiento ⁸ sobre la Nanotecnología y sus aplicaciones en la industria del Petróleo y Gas a nivel mundial y en Colombia.

En primer lugar, se realizó una búsqueda, recolección y depuración de textos concernientes al tema y analizando los documentos se realizó un marco de la situación actual, del contexto en el que se encuentra esta temática y se establecieron las principales aplicaciones de la Nanotecnología en la industria del Petróleo y Gas desarrolladas a nivel mundial y en Colombia.

⁶ COCUZZA, M.; PIRRI, F., ROCCA, V., y VERGA, F. *Is The Oil Industry Ready for Nanotechnologies?* Offshore Mediterranean Conference. 2011. OMC-2011-070. p. 1.

⁷ *Ibíd.*, p. 1.

⁸ VARGAS, German. *Seis Modelos Alternativos de Investigación Documental para el Desarrollo de la Práctica Universitaria en Educación, el Caso del Proyecto de Extensión REDUC – Colombia en la Universidad Pedagógica Nacional.* En: Revista Educación Superior y Desarrollo. Vol. 5, No. 3 (Mayo, 1987); p. 9.

Para el desarrollo de la investigación se escogió la revisión sistemática porque es una metodología de investigación que permite identificar, evaluar y sintetizar grandes volúmenes de información como la relacionada con la literatura científica de la Nanotecnología para la comprensión de forma estructurada, explícita y sistemática ⁹ obteniendo la mejor evidencia posible y presentándola en forma accesible ¹⁰.

Posterior a la introducción, en el documento se presentan diez capítulos, numerados del 1 al 10, a partir de los cuales se estructura la revisión sistemática de la literatura existente sobre la Nanotecnología y sus aplicaciones en la industria del Petróleo y Gas a nivel mundial y en Colombia.

El Capítulo 1 presenta los conceptos con los cuales esta nueva tecnología es descrita, tanto por sus promotores como por aquellos que claman por un mayor análisis sobre sus implicaciones y algunos aspectos relacionados a la evolución teórica del concepto.

El Capítulo 2 presenta una perspectiva general de los retos técnicos a los que se enfrenta la industria del Petróleo y Gas y las aplicaciones de la Nanotecnología que se presentan como una solución.

Los Capítulos 3 - 8 presenta los conceptos básicos relacionados a cada una de las aplicaciones y destaca los potenciales beneficios que conlleva su desarrollo e implementación en las áreas principales de la industria.

⁹ TRANFIELD, David.; DENYER, David y SMART, Palminder. *Towards a Methodology for Developing Evidence Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review*. En: British Journal of Management. Vol. 14 (Septiembre, 2003); p. 209.

¹⁰ CENTRO COCHRANE IBEROAMERICANO, TRADUCTORES. *Manual Cochrane de Revisiones Sistemáticas de Intervenciones*. Versión 5.1.0 (Actualizada en Marzo de 2011). Barcelona, España: Centro Cochrane Iberoamericano. 2012. p. 16.

El Capítulo 9 explora la experiencia del desarrollo de la Nanotecnología en Colombia y el Capítulo 10 presenta en forma general, los avances de la Nanotecnología a nivel académico y técnico que se han desarrollado en Colombia con miras a su implementación y/o aplicación en la industria del Petróleo y Gas en Colombia.

Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación desarrollada, la lista de referencias bibliográficas que fueron utilizadas para la construcción del presente documento y se finaliza con los anexos que contiene el artículo elaborado, el cual se presenta como una opción de publicación en una revista o publicación seriada.

LA NANOTECNOLOGÍA

El término Nanotecnología se ha expandido velozmente por los distintos sistemas de ciencia, tecnología e innovación a nivel mundial, y se dice que muchas puertas han sido abiertas al mundo de lo pequeño gracias a los avances en esta área ¹¹.

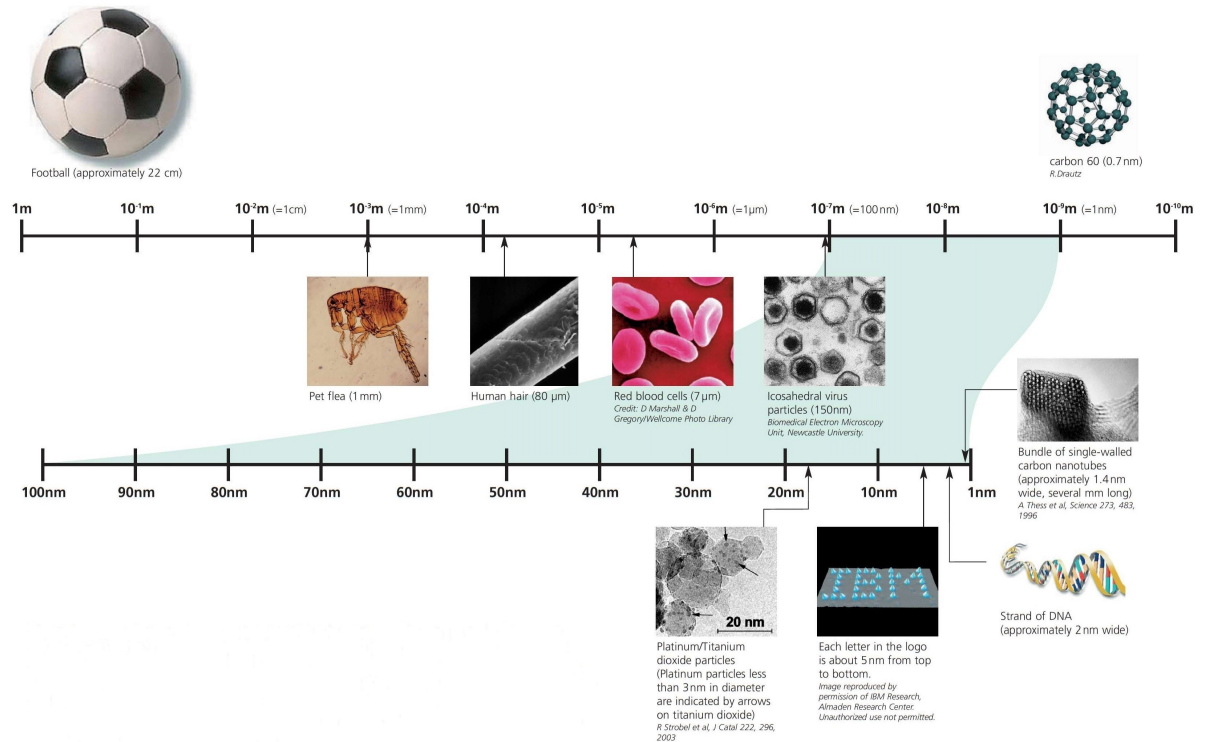
1.1 ALGUNAS DEFINICIONES

1.1.1. ¿Qué es un nanómetro?. Etimológicamente, la raíz *nano* proviene de la unidad de medida “*nanómetro*”, que significa 10^{-9} , es decir la mil millonésima parte de un metro. Esta no es una magnitud fácil de imaginarse, pero para tener una estimación de las escalas en la Figura 1 se muestran los tamaños de distintos objetos que uno puede encontrar y observar en la vida, junto con otros a menores escalas que se escapan de nuestras posibilidades visuales, salvo que utilicemos instrumentos electrónicos para su observación ¹².

¹¹ VILA SEOANE, Maximiliano Facundo. *Nanotecnología: Su Desarrollo en Argentina, Sus Características y Tendencias a Nivel Mundial*. Tesis, Magíster en Gestión de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. Los Polvorines, Argentina: Universidad Nacional de General Sarmiento. Instituto de Industria. 2011. p 18.

¹² *Ibíd.*, p. 18.

Figura 1. Escala de longitud que muestra el nanómetro en contexto



Fuente: THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING. *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties*. Reino Unido: The Royal Society, 2004. ISBN: 0-85403-604-0. p. 4.

En la Figura 1 se muestran dos escalas. Cada una muestra el tamaño de diferentes objetos. En la escala superior, que abarca desde 1 metro a 0.1 nanómetros, se muestran una pelota de fútbol con un diámetro aproximado de 22 centímetros, un piojo de 1 milímetro, un cabello humano de 80 micrómetros, las células rojas en nuestro organismo con 7 micrómetros, un virus icosaedral de 150 nanómetros y una molécula de carbono 60, también conocida como fullereno, de diámetro 0,7 nanómetros¹³.

¹³ *Ibíd.*, p. 19.

La escala inferior se concentra en los 100 a 1 nanómetros, que es aproximadamente las dimensiones que suelen utilizarse para clasificar los desarrollos en Nanotecnología. En particular, se muestran partículas de dióxido de platino, con un diámetro inferior a los 3 nanómetros, junto con el logo de IBM de 5 nanómetros de tamaño, una hebra de ADN de 2 nanómetros de ancho y, por último, nanotubos de carbono de 1.4 nanómetros de ancho ¹⁴.

Al realizar un simple cálculo se puede hallar que la pelota de fútbol tiene un diámetro de 220 millones de nanómetros, lo cual da una imagen de lo pequeño que es este mundo de la Nanotecnología en comparación con las dimensiones con las que uno está acostumbrado a lidiar diariamente, y en parte, esta escala pequeña, que tiene aún muchas fronteras por explorarse, explica la fascinación que ha suscitado a nivel mundial ya que en la misma los materiales presentan nuevas propiedades que no tenían a mayor escala, y que permiten aplicarlos de nuevas formas ¹⁵.

1.1.2. Desarrollo histórico del término. La literatura señala que el origen de la Nanotecnología parte de la conferencia titulada como *“There’s Plenty of Room at the Bottom”** ofrecida por el físico norteamericano Richard Feynman, galardonado con el premio Nobel de Física en 1965, en la reunión anual de la Asociación de Física Norteamericana de 1959. En la conferencia, Feynman se explayó sobre las posibilidades físicas de controlar la materia a escalas muy inferiores de las que se manejaban en la época, afirmando que teóricamente era posible guardar los 24 volúmenes que en su momento tenía la enciclopedia británica en la punta de un alfiler. Y yendo aún más lejos, afirmó que la información contenida en todas las bibliotecas del mundo podría guardarse en un cubo de algunos centímetros de lado ¹⁶.

¹⁴ *Ibíd.*, p. 19.

¹⁵ *Ibíd.*, p. 19.

* Transcripción de la conferencia se encuentra disponible en <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>

¹⁶ *Ibíd.*, p. 20.

La conferencia es reconocida como el puntapié inicial para el desarrollo de la Nanotecnología. No obstante, Feynman nunca mencionó el término Nanotecnología en sí. Esto recién ocurrió en 1974, cuando el científico japonés Norio Taniguchi afirmó en un trabajo que la Nanotecnología consistía en “*el procesamiento, separación, consolidación y deformación de materiales manipulando átomos o moléculas*”¹⁷.

Una mayor difusión del concepto ocurrió gracias a las contribuciones sobre sus grandes potencialidades que ha realizado el Dr. Eric Drexler en su libro “*The Engines of Creation*”. En este promovió tanto visiones realistas, como utópicas y distópicas de los posibles futuros de la humanidad al utilizar estas nuevas tecnologías. Introdujo el concepto de Nanotecnología Molecular, la cual designa la capacidad de la Nanotecnología para la invención de *nanorobots*. En el libro argumenta que estos pequeños autómatas estarían habilitados para reproducir cualquier objeto, tanto material como animal, esbozando la hipótesis de que cualquier cosa podría ser creada a partir de estos robots. El libro se encuentra repleto de otros ingeniosos inventos, que aún hoy en día parecen más de un libro de ciencia ficción, que teorías científicas o desarrollos tecnológicos factibles que los sostengan empíricamente¹⁸.

A la vez, en el mismo año de publicación del libro (1987), Drexler creó el instituto Foresight, que ha ayudado a difundir en la sociedad los posibles beneficios y riesgos derivados de los avances en Nanotecnología. De todas formas, además de promover y difundir el uso del término “Nanotecnología”, la importancia del aporte de las descripciones y visiones de Drexler radica en que han sido capaces de iniciar a otros investigadores en la temática, lo que ha encendido con mayor fuerza la llama de la Nanotecnología a nivel mundial¹⁹.

¹⁷ *Ibíd.*, p. 20.

¹⁸ *Ibíd.*, p. 20.

¹⁹ *Ibíd.*, p. 20.

1.1.3. Definición de Nanotecnología. La definición etimológica en función de la escala y el origen del término Nanotecnología es precisa, pero no ocurre lo mismo con lo que se entiende o lo que abarca el concepto de Nanotecnología. Esto se debe a que no hay aún una definición consensuada a nivel internacional, sino que sólo existen varios intentos de definirla, dispersos en documentos de organismos y países que tienen sus propias definiciones sobre el tema, que, si bien son similares en muchos aspectos, en otros difieren. En la Tabla 1 se expone una selección de las mismas encontradas en la literatura ²⁰.

Tabla 1. Definiciones de la Nanotecnología encontradas en la literatura

<i>Fuente</i>	<i>Definición</i>
<i>Estados Unidos: National Nanotechnology Initiative.</i>	Entendimiento y control de la materia en dimensiones aproximadamente entre 1 y 100 nanómetros, donde fenómenos únicos permiten nuevas aplicaciones. Incluye la ciencia, tecnología e ingeniería en la nanoescala, incluyendo imágenes, mediciones, creación de modelos y manipulación de la materia.
<i>Séptimo Programa Marco de la Unión Europea (2007-2013).</i>	Generación de nuevos conocimientos en fenómenos dependientes del tamaño; control en la nanoescala de las propiedades de los materiales para nuevas aplicaciones; integración de tecnologías en la nanoescala; propiedades de auto-ensamblado; nanomotores; máquinas y sistemas; métodos y herramientas para caracterización y manipulación en la nanoescala; tecnologías de nanoprecisión para la producción de materiales básicos y componentes; metrología, monitoreo y uso de sensores; nomenclatura y estándares; exploración de nuevos conceptos y enfoques para aplicaciones sectoriales, incluyendo la integración y convergencia de tecnologías emergentes.
<i>Japón: Segundo Plan Básico de Ciencia y Tecnología (2001-2005).</i>	Ciencia y tecnología interdisciplinaria que abarca tecnologías de la información, ciencias medioambientales, ciencias de la vida, ciencias de materiales, etc. Permite controlar y manipular los átomos y moléculas en el orden de los nanómetros, posibilitando el descubrimiento de nuevas funciones que utilicen las características únicas de los materiales en la nanoescala, para promover la innovación tecnológica en diversos campos.

Fuente: VILA SEOANE, Maximiliano Facundo. *Nanotecnología: Su Desarrollo en Argentina, sus Características y Tendencias a Nivel Mundial*. Tesis, Magíster en Gestión de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. Los Polvorines, Argentina: Universidad Nacional de General Sarmiento. Instituto de Industria. 2011. p 21.

²⁰ *Ibíd.*, p. 21.

Tabla 1. (Continuación)

<i>Fuente</i>	<i>Definición</i>
<i>ISO TCC 229 en 2007.</i>	Entendimiento y control de la materia y procesos en la nanoescala, típicamente, pero no exclusivamente, por debajo de los 100 nanómetros en una o más de las dimensiones en donde los fenómenos dependientes del tamaño usualmente permiten nuevas aplicaciones. Utilizando las propiedades de los materiales en la nanoescala que difieren de las propiedades de los átomos y moléculas para crear materiales mejorados, dispositivos y sistemas que explotan esas propiedades.
<i>Oficina Europea de Patentes.</i>	Abarca entidades con un tamaño con al menos uno de sus componentes funcionales por debajo de los 100 nanómetros, susceptible de tener efectos físicos, químicos o biológicos intrínsecos a dicho tamaño. También cubre equipos y métodos para el análisis, manipulación, procesamiento o medición con precisión por debajo de los 100 nanómetros.
<i>Alemania</i>	Investigación, aplicación y producción de estructuras, materiales moleculares, y sistemas con una dimensión y/o tolerancia en la producción de menos de 100 nanómetros. En esta escala los componentes del sistema permiten la realización de nuevas funcionalidades y propiedades para mejorar los productos y aplicaciones existentes, o desarrollar nuevas.
<i>Reino Unido: Real Sociedad.</i>	Dividen en, Nanociencias: El estudio de los fenómenos y la manipulación de los materiales a escalas atómicas, moleculares y macromoleculares, en donde las propiedades difieren significativamente de aquellas existentes a escalas mayores. Nanotecnología: El diseño, caracterización, producción y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas obtenidos a partir del control del tamaño y forma a escala nanométrica.

Fuente: VILA SEOANE, Maximiliano Facundo. *Nanotecnología: Su Desarrollo en Argentina, sus Características y Tendencias a Nivel Mundial*. Tesis, Magister en Gestión de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. Los Polvorines, Argentina: Universidad Nacional de General Sarmiento. Instituto de Industria. 2011. p 21.

Es evidente que no existe consenso aún sobre lo que se entiende por Nanotecnología, ya que, si bien todas las definiciones hablan de la nanoescala, no hay un límite preciso en donde situar su inicio y/o final. Para algunas definiciones, la Nanotecnología ocurre estrictamente por debajo de los 100 nanómetros, mientras que otras definiciones permiten incluir dimensiones superiores, siempre remarcando la existencia de nuevas propiedades derivadas del pequeño tamaño ²¹.

²¹ *Ibíd.*, p. 22.

Por último, la definición de la Real Sociedad del Reino Unido separa el concepto de Nanociencia, enfocada a investigación básica en el área, y Nanotecnología, enfocada en las investigaciones y desarrollos aplicados en la nanoescala; esto es algo que no realizan las otras fuentes que consideran todo aglomerado dentro del término Nanotecnología ²².

1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA NANOTECNOLOGÍA

1.2.1. Nanomateriales. La Nanociencia y la Nanotecnología tratan principalmente con la síntesis, caracterización, exploración y explotación de materiales con dimensiones generalmente en el rango de unos pocos nanómetros. El confinamiento de las partículas en una estructura de baja dimensión acciona un cambio en su comportamiento y la manifestación de nuevos efectos dependientes del tamaño (*efectos cuánticos*) modifican las propiedades eléctricas, térmicas, magnéticas y ópticas, ofreciendo una rica paleta de fenómenos tecnológicos a explotarse ²³.

Los fabricantes combinan las ventajas de los materiales tradicionales con los nanomateriales para crear nuevas generaciones de productos mejorados que pueden integrarse en sistemas complejos, esto se traduce como una prodigiosa oportunidad para las industrias que, a partir de esta serie de nuevos productos puede resolver importantes problemas técnicos y dinamizar su economía, además permiten, revitalizar industrias existentes y la creación de empresas totalmente nuevas ²⁴.

²² *Ibíd.*, p. 22.

²³ THOMAS, Sabu.; RAFIEI, Saeedeh., MAGHSOODLOU, Shima y AFZALI, Arezo. *Foundations of Nanotechnology: Nanoelements Formation and Interaction*. Oakland, Canada: Apple Academic Press, Inc., 2015. 411 p. ISBN: 978-1-4822-5239-2. p. 11.

²⁴ *Ibíd.*, p. 9.

1.2.2. Clasificación de los nanomateriales. Para entender y apreciar la diversidad de los nanomateriales, una forma de clasificación es necesaria. Actualmente, la forma más típica de clasificar los nanomateriales es según sus dimensiones ²⁵, si el nanomaterial posee una o más dimensiones externas en la nanoescala, se le denomina *nano-objeto*, mientras que, si posee una estructura interna o superficial en la nanoescala, se le denomina como *material nanoestructurado* ²⁶.

Estos sistemas a su vez, se clasifican de acuerdo al número de dimensiones a la nanoescala. Más precisamente, la dimensionalidad se refiere al número de grados de libertad en el *momentum*. Por consiguiente, dependiendo del dimensionado del sistema, se pueden distinguir diferentes casos:

I. *Cero-Dimensional (0-D)*

II. *Uni-Dimensional (1-D)*

III. *Bi-Dimensional (2-D)*

IV. *Tri-Dimensional (3-D)* ²⁷.

Cero-Dimensional (0-D). Comenzando con la categoría más claramente definida, los nanomateriales cero-dimensionales son materiales en los que todas sus dimensiones se miden en la nanoescala y éstas no son mayores a los 100 nanómetros. En este tipo de nanomateriales encontramos las *nanopartículas*, *nanoclusters* y *puntos cuánticos*. Estos pueden ser amorfos, cristalinos y policristalinos, están compuestos por elementos químicos simples o químicos compuestos, exhiben varias formas, pueden existir de forma individual o ser incorporados en una matriz, además, pueden ser metálicos, cerámicos o poliméricos ²⁸.

²⁵ *Ibíd.*, p. 10.

²⁶ RAMSDEN, Jeremy. *Nanotechnology: An Introduction*. Oxford, Inglaterra: Elsevier, Inc., 2011. 306 p. ISBN: 978-0-08-096447-8. p. 101.

²⁷ THOMAS, Sabu.; RAFIEI, Saeedeh., MAGHSOODLOU, Shima y AFZALI, Arezo. *Op. cit.*, p. 12.

²⁸ *Ibíd.*, p. 13.

Uni-Dimensional (1-D). Por otro lado, estos nanomateriales difieren de los nanomateriales cero-dimensionales debido a que tienen una dimensión que está fuera de la nanoescala. Esta diferencia en las dimensiones del material conduce a que estos exhiban forma de hilos o tubos. Estos incluyen *nanorods*, *nanohilos* y *nanotubos*. Estos pueden ser amorfos, cristalinos y policristalinos, químicamente puros o impuros, pueden ser independientes o estar integrados en otro medio y pueden ser metálicos, cerámicos o poliméricos ²⁹.

Bi-Dimensional (2-D). Son materiales en que dos de sus dimensiones no se limitan a la nanoescala. Como resultado, exhiben formas de placas. Incluyen *nanofilms*, *nanocapas* y *nanorevestimientos*. Estos pueden ser amorfos o cristalinos, estar formados por varias composiciones químicas, pueden presentarse como estructuras de una sola capa o con multicapas, son depositados sobre un sustrato e integrados en un material circundante; pueden ser metálicos, cerámicos o poliméricos ³⁰.

Tri-Dimensional (3-D). En consonancia con los parámetros dimensionales que hemos establecido hasta ahora, estos nanomateriales son materiales que no se limitan a la nanoescala en cualquier dimensión. Se caracterizan por tener de forma arbitraria tres dimensiones por encima de los 100 nanómetros. Por lo tanto, son materiales macroscópicos. La razón de la clasificación de estos materiales como nanomateriales es que, a pesar de sus dimensiones, estos materiales poseen una estructura nanocristalina, la cual se relaciona con la ciencia y tecnología de la nanoescala ³¹.

²⁹ *Ibíd.*, p. 14.

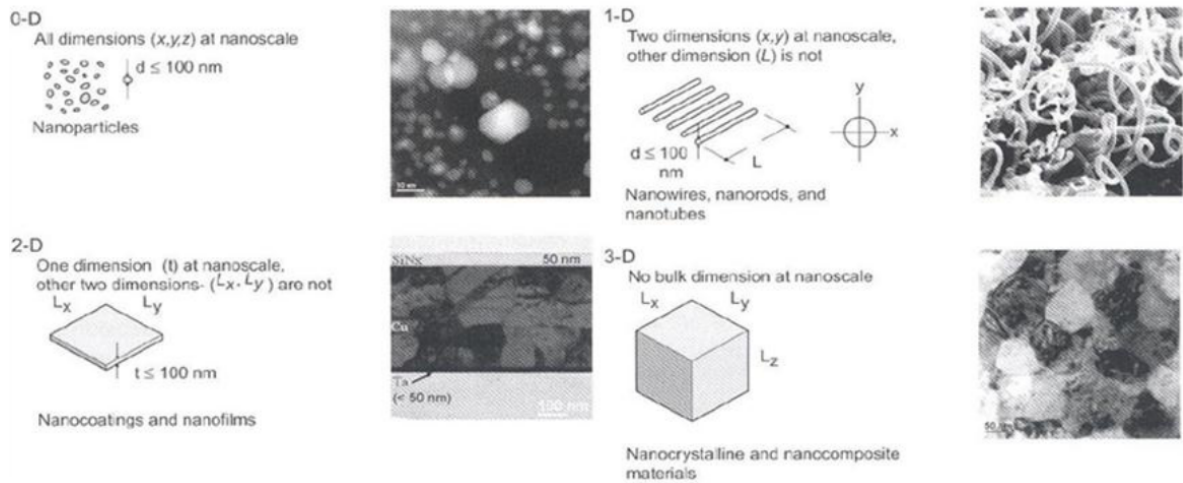
³⁰ *Ibíd.*, p. 14.

³¹ *Ibíd.*, p. 15.

La estructura nanocrystalina puede estar compuesta por arreglos múltiples de cristales de tamaño nanométrico o por dispersiones de nanopartículas, paquetes de nanohilos y nanotubos, así como múltiples nanocapas. Estos pueden ser amorfos o cristalinos y químicamente puros o impuros, pueden estar formados por diferentes materiales y ser metálicos, cerámicos o poliméricos ³².

En la Figura 2 se muestra la clasificación de los nanomateriales de acuerdo a su dimensionalidad, además, imágenes de alta resolución obtenidas a través de un microscopio electrónico de barrido, ilustran la estructura de los nanomateriales o nano-objetos incluidos de acuerdo a la dimensionalidad.

Figura 2. Clasificación de los nanomateriales según su dimensionalidad



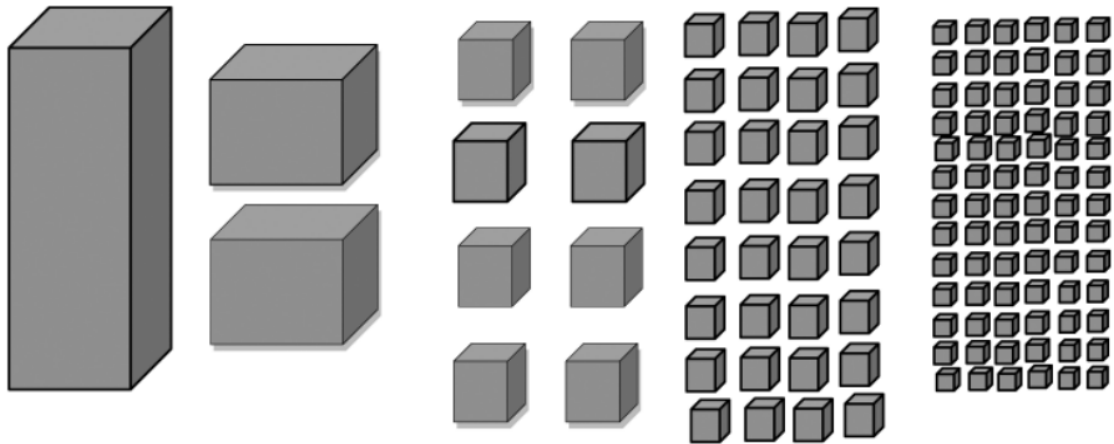
Fuente: THOMAS, Sabu.; RAFIEI, Saeedeh., MAGHSOODLOU, Shima y AFZALI, Arezo. *Foundations of Nanotechnology: Nanoelements Formation and Interaction*. Oakland, Canada: Apple Academic Press, Inc., 2015. 411 p. ISBN: 978-1-4822-5239-2. p. 13.

³² *Ibíd.*, p. 15.

1.2.3. Efecto del área superficial. Los nanomateriales tienen una mayor relación de área superficial respecto al volumen comparada a los materiales a escala macro. Para un volumen total determinado de material, la superficie externa es mayor si se compone por un conjunto de subunidades de nanomateriales en vez del material macro ³³.

El aumento del área superficial de los nanomateriales afecta las propiedades físicas del material, por ejemplo, sus puntos de fusión y ebullición, así como su reactividad química, por ejemplo, en las reacciones que ocurren en la superficie del material, tales como reacciones de catálisis, reacciones de detección y reacciones que requieren de la adsorción física de ciertas especies en la superficie de material. Por último, el aumento en el área superficial nos permite utilizar menos material, lo cual tiene beneficios ambientales y económicos, así como la fabricación de dispositivos altamente miniaturizados, que pueden ser portables y pueden utilizar menos energía para operar (Figura 3) ³⁴.

Figura 3. Representación esquemática del efecto del área superficial respecto al volumen



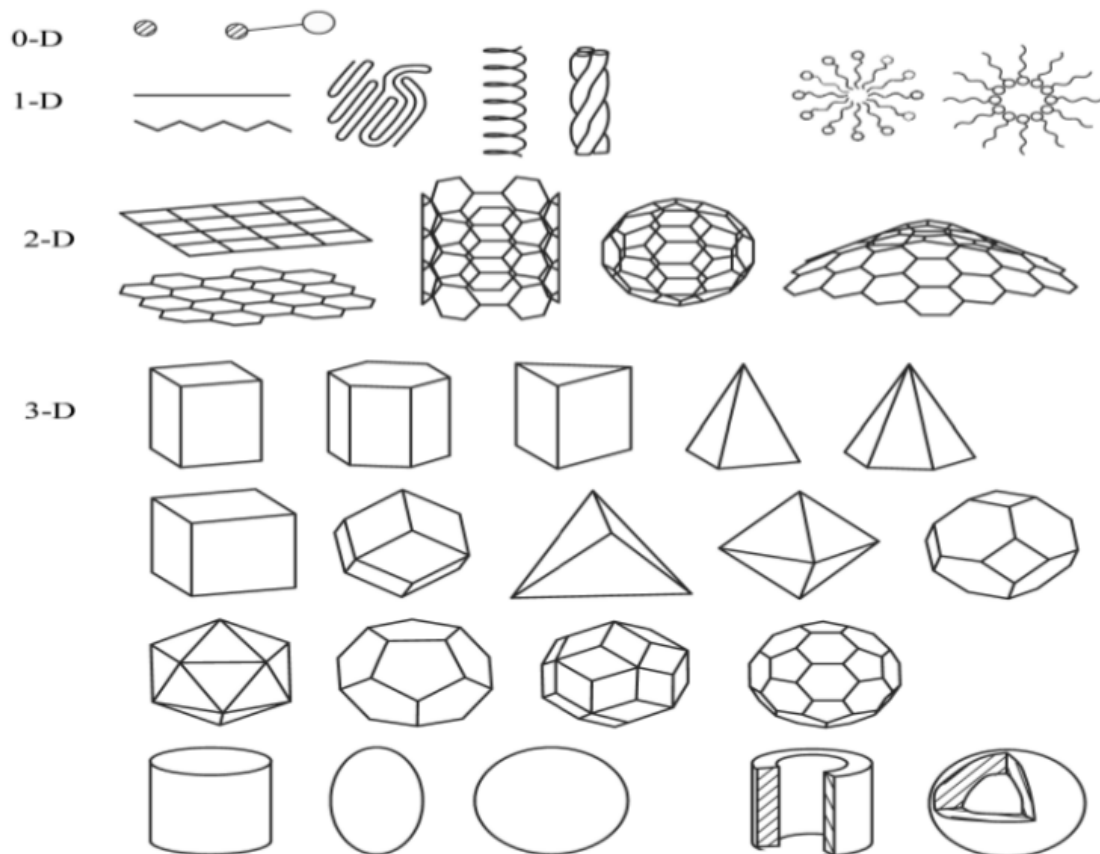
Fuente: THOMAS, Sabu.; RAFIEI, Saeedeh., MAGHSOODLOU, Shima y AFZALI, Arezo. *Foundations of Nanotechnology: Nanoelements Formation and Interaction*. Oakland, Canada: Apple Academic Press, Inc., 2015. 411 p. ISBN: 978-1-4822-5239-2. p. 16.

³³ *Ibíd.*, p. 16.

³⁴ *Ibíd.*, p. 16.

Por lo tanto, estos nanosistemas poseen propiedades únicas en comparación con las macromoléculas individuales y sólidos macro. Esto puede explicarse a través de las características específicas de su estructura, las cuales presentan varios tipos de geometrías de curvatura constante, es decir, geometrías Euclidiana, Lobachevski y Riemann y ciertas construcciones de geometría proyectiva (Figura 4) ³⁵.

Figura 4. Diversidad estructural del nanomunudo



Fuente: THOMAS, Sabu.; RAFIEI, Saeedeh., MAGHSOODLOU, Shima y AFZALI, Arezo. *Foundations of Nanotechnology: Nanoelements Formation and Interaction*. Oakland, Canada: Apple Academic Press, Inc., 2015. 411 p. ISBN: 978-1-4822-5239-2. p. 17.

³⁵ *Ibíd.*, p. 16.

1.2.4. Síntesis de nanomateriales y fabricación de nanoestructuras. Existen dos enfoques para la síntesis de nanomateriales y la fabricación de nanoestructuras: el *Top Down* y el *Bottom-Up* ³⁶.

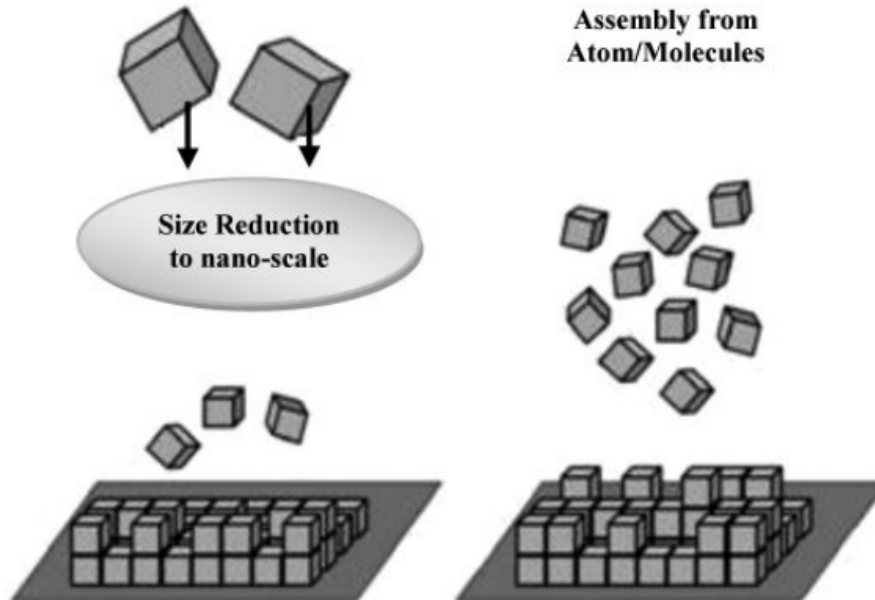
El enfoque denominado *Top-Down* o “de arriba hacia abajo”, es aquel que utiliza estructuras de mayores tamaños que los nanómetros, para llegar a partir de ellas a estructuras nanométricas. Esto se logra tras la realización de distintos procesos. Por ejemplo, la construcción de microchips utilizados en electrónica, en donde por técnicas de litografía se dibujan patrones en materiales semiconductores para obtener circuitos integrados de 32 nanómetros de tamaño (Figura 5, izquierda) ³⁷.

El enfoque *Bottom-Up* o “de abajo hacia arriba”, en el que, a partir de procesos físicos y químicos, tales como la síntesis, se controlan y manipulan los átomos y moléculas para formar y hacer crecer las nanoestructuras (Figura 5, derecha) ³⁸.

³⁶ VILA SEOANE, Maximiliano Facundo. Op. cit., p. 29.

³⁷ *Ibíd.*, p. 29.

³⁸ *Ibíd.*, p. 29.

Figura 5. Enfoques *Top-Down* y *Bottom-Up*

Fuente: THOMAS, Sabu.; RAFIEI, Saeedeh., MAGHSOODLOU, Shima y AFZALI, Arezo. *Foundations of Nanotechnology: Nanoelements Formation and Interaction*. Oakland, Canada: Apple Academic Press, Inc., 2015. 411 p. ISBN: 978-1-4822-5239-2. p. 19.

1.3 IMPORTANCIA ECÓNOMICA

La literatura afirma que es importante realizar investigaciones y desarrollos con el fin de alcanzar conocimientos y aplicaciones prácticas de la Nanotecnología. A continuación, se menciona una selección de argumentos del porqué de esta afirmación, algunos tienen una orientación más teórica mientras que otros se basan en observaciones más directas del fenómeno de la Nanotecnología ³⁹.

³⁹ *Ibíd.*, p. 22.

Ondas de Kondratiév. Uno de los argumentos utilizados para fundamentar las inversiones necesarias en Nanotecnología tiene su base en la teoría de las ondas o ciclos económicos de Kondratiév ^{*}.

Wonglimpiyarat ⁴⁰ reactualizó la teoría de Kondratiév, sosteniendo la hipótesis de la existencia en el pasado de 5 grandes ciclos [†] de desarrollo económico, que han sido motivados por revoluciones tecnológicas; y estableció que la Nanotecnología es una tecnología revolucionaria que producirá un cambio de paradigma industrial convirtiéndose en la sexta onda de Kondratiév, por ende, justifica el potencial que tiene de generar impactos y otorgar ventajas económicas a los países líderes, tal como ocurrió en los ciclos previos ⁴¹.

Este argumento, sin embargo, adolece de una prueba que lo valide empíricamente. Ya que tan sólo demuestra una expresión de deseo, pues las ondas son más fáciles de identificar una vez que han ocurrido y no cuando todavía son sólo especulaciones sobre lo que podría pasar en un futuro ⁴².

^{*} Deben su nombre al economista soviético Nikolái Kondrátiev. Son descritas como fluctuaciones cíclicas de la moderna economía mundial capitalista. La duración de cada onda o ciclo varía entre 47 y 60 años, durante los cuales se alternan un período de alto crecimiento, en el cual las coyunturas de prosperidad son más marcadas y duraderas, y un período de crecimiento relativamente lento, en el cual las crisis son más fuertes y las depresiones más prolongadas.

⁴⁰ WONGLIMPIYARAT, Jarunee. *The Nanorevolution of Schumpeter's Kondratieff Cycle*. En: *Technovation*. Vol. 25, No. 11 (Noviembre, 2005); p. 1349 – 1354. Citado por: *Ibíd.*, p 22.

[†] En el primero ciclo, se afirma que el factor clave para el desarrollo de las revoluciones textiles entre 1780 y 1840 fue el algodón. En el segundo ciclo, el factor principal identificado fue el carbón que permitió el auge de las industrias basadas en las máquinas de vapor y en los ferrocarriles. En el tercer ciclo, entre 1890 y 1940, el rol primordial lo jugó el acero para las industrias basadas en energía eléctrica y manufacturas químicas. Entre 1940 y 1990 se sitúa el cuarto ciclo, en el cual los avances en cuestiones de energía, motivados por la mayor producción petrolera, fueron clave para las industrias de electrónica, materiales sintéticos y farmacéutica. Por último, el quinto ciclo estuvo basado en los avances en circuitos integrados que han permitido el auge de las aplicaciones en tecnologías de la información y comunicación.

⁴¹ *Ibíd.*, p. 22.

⁴² *Ibíd.*, p. 22.

Campos de aplicación. Las posibles múltiples aplicaciones de los avances y descubrimientos en Nanotecnología son la principal base, sobre la cual se sustenta la importancia del campo. La literatura muestra un amplio abanico de posibilidades, tanto a corto, mediano y largo plazo ⁴³.

Por ejemplo, Salamanca-Buentello et al., 2005 ⁴⁴ realizó un estudio con 63 expertos en Nanotecnología y seleccionaron un conjunto de áreas de aplicación según su: impacto, apropiabilidad, posibilidad práctica de aplicación, conocimientos necesarios y beneficios indirectos. A continuación, se las ordena según el puntaje obtenido:

I. Producción, conversión y almacenamiento de energía

II. Producción agrícola

III. Tratamiento y saneamiento de aguas

IV. Diagnóstico de enfermedades

V. Sistemas de entregas de drogas

VI. Procesamiento y almacenamiento de alimentos

VII. Purificación del aire contaminado

VIII. Construcción

IX. Control de la salud

X. Control y detección de pestes ⁴⁵.

Asimismo, en la literatura se presenta la tendencia de asignación del prefijo “*nano*” por parte de disciplinas ya conocidas, para identificar las líneas que estudian los fenómenos y aplicaciones en la nanoescala ⁴⁶.

⁴³ *Ibíd.*, p. 23.

⁴⁴ SALAMANCA-BUENTELLO, Fabio.; PERSAD, Deepa., COURT, Erin., MARTIN, Douglas., DAAR, Abdallah y SINGER, Peter. *Nanotechnology and the Developing World*. En: Plos Med. Vol. 2, No. 5 (Mayo, 2005); p. 383 – 386. Citado por: *Ibíd.*, p. 23.

⁴⁵ *Ibíd.*, p. 23.

⁴⁶ *Ibíd.*, p. 24.

Tal es el caso de la nanoelectrónica, la cual se enfoca en la miniaturización de las distintas partes de los instrumentos electrónicos. Otro caso es el de la nanobiotecnología, la cual considera las intersecciones y convergencias entre la biotecnología y la Nanotecnología. En este caso, se estudian las propiedades de sistemas vivos a escala nanométrica con el fin de replicar sus comportamientos y, utilizan nuevos instrumentos y técnicas para estudiar los sistemas vivos en esa pequeña escala ⁴⁷.

Además, se encuentra el caso de la nanomedicina, que abarca todas las aplicaciones de la Nanotecnología en medicina. Hoy en día se encarga de estudiar materiales y dispositivos para beneficiar sustancialmente la investigación y práctica en medicina. Otro caso es el de nanomateriales, que alude al campo de las ciencias de los materiales que se aboca al estudio de sus propiedades en la nanoescala ⁴⁸.

La fundación Phantoms ⁴⁹ reconoció la dificultad de poder categorizar todos los posibles campos de aplicación de la Nanotecnología, debido a que se acrecientan a medida que se realizan más avances en el campo, por tal motivo, optaron por exponer visualmente algunas de las áreas económicas o industriales junto con áreas de investigación y desarrollo de Nanotecnología a fin de concebir este dinámico campo (Figura 6) ⁵⁰.

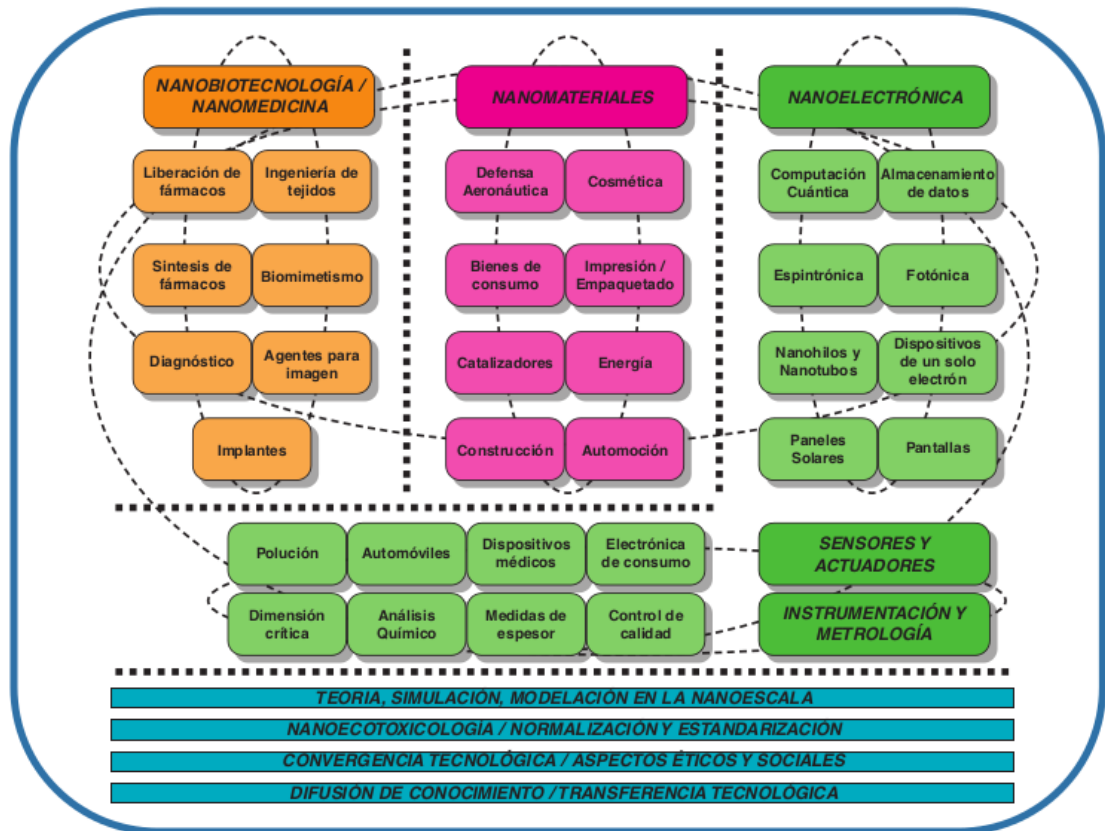
⁴⁷ *Ibíd.*, p. 24.

⁴⁸ *Ibíd.*, p. 24.

⁴⁹ PHANTOMS FOUNDATION. *Nanociencia y Nanotecnología en España: Un Análisis de la Situación Presente y de las Perspectivas del Futuro*. 2008. 229 p. Citado por: *Ibíd.*, p. 25.

⁵⁰ *Ibíd.*, p. 25.

Figura 6. Áreas de aplicación de la Nanotecnología



Fuente: PHANTOMS FOUNDATION. *Nanociencia y Nanotecnología en España: Un Análisis de la Situación Presente y de las Perspectivas del Futuro*. 2008. p. 12.

Estudios de mercado y cadenas de valor. Otra forma de argumentar la importancia económica de la Nanotecnología se basa en estudios de mercado existentes que intentan estimar su magnitud en distintas industrias. Estimaciones encontradas en la literatura, que se pueden observar en la Tabla 2, coinciden en que la Nanotecnología tendrá un brillante futuro en cuanto a su potencial comercial ⁵¹.

⁵¹ *Ibíd.*, p. 26.

Tabla 2. Predicción del tamaño del mercado global de productos basados en Nanotecnología

<i>Estudio</i>	<i>2005</i>	<i>2006</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>	<i>2014</i>	<i>2015</i>
<i>Lux Research (2006)</i>	\$30		\$147							\$2.600	\$3.100
<i>BCC (2008)</i>			\$12	\$13			\$27				
<i>Científica (2008)</i>				\$167							
<i>RNCOS (2006)</i>						\$1.000					
<i>Wintergreen (2004)</i>											\$750
<i>MRI (2008)</i>	\$66					\$148					
<i>Evolution (2001)</i>	\$105					\$700					
<i>NSF (2001)</i>	\$54										\$1000

*Los valores mostrados están en términos de billones de dólares americanos.

Fuente: VILA SEOANE, Maximiliano Facundo. *Nanotecnología: Su Desarrollo en Argentina, sus Características y Tendencias a Nivel Mundial*. Tesis, Magíster en Gestión de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. Los Polvorines, Argentina: Universidad Nacional de General Sarmiento. Instituto de Industria. 2011. p 26.

La consultora Lux Research ⁵² además de proveer el estudio de mercado, separó los posibles desarrollos en cuatro grandes cadenas, que se pueden aplicar sin importar el sector industrial en el que se esté utilizando la Nanotecnología ⁵³.

⁵² LUX RESEARCH. *The Nanotech Report*. 4 ed. Key Findings, 2006. Citado por: *Ibíd.*, p. 26.

⁵³ *Ibíd.*, p. 26.

Figura 7. Esquema general de la cadena propuesto por Lux Research



Fuente: VILA SEOANE, Maximiliano Facundo. *Nanotecnología: Su Desarrollo en Argentina, sus Características y Tendencias a Nivel Mundial*. Tesis, Magíster en Gestión de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. Los Polvorines, Argentina: Universidad Nacional de General Sarmiento. Instituto de Industria. 2011. p. 27.

Según el esquema presentado por Lux Research, ilustrado en la Figura 7, la primera parte de la cadena está compuesta por las nanomaterias primas, que son estructuras a escala nanométrica sin procesar, como nanopartículas, nanotubos, puntos cuánticos, dendrímeros o materiales nano porosos ⁵⁴.

Luego, el segundo eslabón de la cadena está compuesto por nanointermediarios, que ya son productos intermedios basado en elementos en escala nanométrica. Por ejemplo, revestimientos, tejidos, memorias y chips lógicos, componentes ópticos, materiales ortopédicos, cables superconductores, entre otros ⁵⁵.

El tercer eslabón de la cadena corresponde a los productos finales o terminados que incorporan Nanotecnología en su diseño, como autos, vestimenta, aviones, laptops u otros dispositivos electrónicos, alimentos procesados, productos farmacéuticos o contenedores de plástico ⁵⁶.

⁵⁴ *Ibíd.*, p. 26.

⁵⁵ *Ibíd.*, p. 26.

⁵⁶ *Ibíd.*, p. 27.

Por último, el esquema considera que las nanoherramientas son un elemento común a los tres eslabones, pues en el desarrollo de cada una de ellos es necesario el uso de equipos y software especializado para manipular, modelar y visualizar la materia a escala nanométrica, como los microscopios de fuerza atómica o de barrido electrónico, nano manipuladores o equipamiento de nanolitografía. Este esquema teórico no ha sido solamente útil para los estudios de mercado, sino también para los estudios sobre la aplicación de las patentes en Nanotecnología ⁵⁷.

⁵⁷ *Ibíd.*, p. 27.

APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO Y GAS

Se prevé que la demanda mundial de energía continuará incrementando durante las próximas décadas, con la expectativa de que en el consumo de energía en el mundo incrementará hasta en un 50 % en los próximos 20 años ⁵⁸. Aunque el uso de fuentes de energía alternativas, como la energía nuclear y renovables aumentará en los próximos años, el aumento será relativamente pequeño y la principal función de estas fuentes, por lo menos para las próximas dos décadas, será complementar y completar, en lugar de reemplazar, el uso de hidrocarburos ⁵⁹.

Por otra parte, debido a que cuencas de hidrocarburos fácilmente accesibles y reservas de crudo y gas fácilmente recuperables están disminuyendo rápidamente, satisfacer la demanda creciente de energía en el mundo será un reto importante para la industria en las próximas décadas y sólo será posible con revolucionarios avances en la ciencia básica e ingeniería de la industria del Petróleo y Gas ⁶⁰.

⁵⁸ U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *International Energy Outlook 2016 With Projections to 2014*. 2016. 276 p. DOE/EIA-0484(2016). p. 1.

⁵⁹ KONG, Xiangling y OHADI, Michael. Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry - Overview of the Recent Progress. Society of Petroleum Engineers. 2010. SPE-138241-MS. p. 1.

⁶⁰ *Ibíd.*, p. 1.

Retos de la industria del Petróleo y Gas y soluciones de Nanotecnología.

La industria del Petróleo y Gas se enfrenta a grandes retos técnicos en cada área de los sectores *upstream*, *midstream* y *downstream* en términos de materiales, técnicas y operaciones ambientales seguras, debido a que con los años la producción de reservas de petróleo y gas en condiciones cada vez más difíciles ha incrementado ⁶¹.

Estos retos actuales y futuros (que se resumen en la Tabla 3) han forzado a la industria y a entidades académicas a buscar soluciones revolucionarias. En los últimos años, la Nanotecnología se ha establecido como candidato potencial para ofrecer soluciones a estos retos ⁶².

⁶¹ *Ibíd.*, p. 2.

⁶² *Ibíd.*, p. 2.

Tabla 3. Retos de la industria y su solución basada en Nanotecnología

<i>Área</i>	<i>Retos de la Industria</i>	<i>Solución N&N</i>
<i>Exploración</i>	<p>Métodos menos invasivos para la exploración.</p> <p>Métodos para la búsqueda de nuevos yacimientos.</p> <p>Mejoramiento en la resolución de imágenes del subsuelo.</p> <p>Mejoramiento en las mediciones de presión y temperatura en pozos profundos y ambientes hostiles.</p> <p>Mejoramiento en la resolución de la sísmica 1, 2, 3 y 4-D.</p> <p>Mejoramiento de los agentes de contraste.</p>	<i>Nanosensores y agentes de contraste</i>
<i>Administración, operación y mantenimiento del Yacimiento</i>	<p>Registros de pozos en forma remota.</p> <p>Monitoreo continuo y en tiempo real de la tasa de flujo, presión y otros parámetros durante la producción.</p> <p>Telemetría de forma inalámbrica.</p> <p>Detección in-situ de químicos.</p> <p>Detección, predicción y locación precisa de fugas.</p> <p>Mejoramiento en la caracterización de yacimientos y en la predicción de las características anisotrópicas.</p>	<i>Nanosensores</i>
	<p>Mejoramiento en la estabilidad del pozo.</p> <p>Mejoramiento en la integridad de la presión y eficiencia de transferencia de calor.</p> <p>Capacidad de minimización del daño a la formación, en especial en plataformas Off-shore.</p> <p>Incremento en la resistencia y estabilidad de plataformas y materiales.</p>	<i>Materiales nanoestructurados, nanorevestimientos</i>
<i>Perforación</i>	<p>Manufactura de componentes de perforación (tuberías y brocas) más económicos, ligeros y resistentes.</p> <p>Extensión de la vida de los equipos de perforación a través de mejores revestimientos.</p> <p>Mejoramiento de la relación resistencia – peso con el fin de expandir la perforación a un rango de estratos geológicos.</p> <p>Tubulares expandibles para pozos profundos sin la necesidad de desplegar casing en él.</p> <p>Mejoramiento de la integridad del cemento con el fin de mejorar la calidad del pozo y ofrecer un sello hermético.</p> <p>Mejoramiento de los elastómeros.</p> <p>Capacidad para prevenir la bio-corrosión.</p>	<i>Materiales nanoestructurados, nanorevestimientos</i>
	<p>Optimización de los fluidos de perforación.</p> <p>Remoción de metales tóxicos (mercurio, cadmio, plomo).</p> <p>Capacidad para prevenir la invasión del lodo de perforación en la formación y separación del filtrado de lodo.</p>	<i>Nanofluidos, nanomembranas</i>

Fuente: KONG, Xiangling y OHADI, Michael. *Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry - Overview of the Recent Progress*. Society of Petroleum Engineers. 2010. SPE-138241-MS. p. 5 – 6 (Traducida por la autora).

Tabla 3. (Continuación)

<i>Área</i>	<i>Retos de la Industria</i>	<i>Solución N&N</i>
<i>Producción</i>	<p>Monitoreo y control in-situ del pozo. Monitoreo de los esfuerzos en tiempo real. Detección de químicos de forma remota en fondo de pozo. Mejoramiento en las mediciones en fondo de pozo (temperatura, presión, composición y conductividad). Detección y locación precisa de fugas (tuberías, fondo de pozo). Mejoramiento en la comprensión de las propiedades de la matriz, fractura y fluidos y cambios en la producción.</p>	<i>Nanosensores</i>
	<p>Incremento en la resistencia al desgaste. Materiales con auto-recuperación. Materiales con comportamiento hidrofóbico o hidrofílico para aplicaciones de inyección de agua.</p>	<i>Materiales nanoestructurados, nanorevestimientos</i>
	<p>Optimización para la filtración del agua (uso en la industria, agricultura y como agua potable). Filtración de impurezas en crudos pesados y gases apretados. Desulfurización e inhibición de H₂S producido por bacterias. Secuestro rentable y efectivo del CO₂. Fácil separación de la emulsión crudo/agua en superficie.</p>	<i>Nanomembranas</i>
<i>Refinación y Procesamiento</i>	<p>Apuntalantes con mayor eficiencia y resistencia. Fluidos ecológicos. Mejoramiento en la viscosidad de los fluidos de inyección. Modificación molecular. Mejoramiento en las tasas de producción. Mejoramiento en la disposición del agua producida. Prevención del hinchamiento de formaciones. Capacidad para manipular las características interfaciales de las rocas y de los fluidos. Prevención mejorada de la formación de corrosión.</p>	<i>Nanofluidos</i>
	<p>Incremento en la capacidad y velocidad de refinamiento. Mejor aislamiento y materiales para la separación. Conversión eficiente de hidrocarburos (incluyendo crudos pesados y crudos ácidos) en combustibles limpios. Mejoramiento en la eficiencia de refinamiento.</p>	<i>Materiales nanoestructurados, nanorevestimientos</i>
	<p>Mejoramiento en el monitoreo durante los procesos de refinación.</p>	<i>Nanosensores</i>

Fuente: KONG, Xiangling y OHADI, Michael. *Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry - Overview of the Recent Progress*. Society of Petroleum Engineers. 2010. SPE-138241-MS. p. 5 – 6 (Traducida por la autora).

Es evidente que hay numerosas áreas de la industria del Petróleo y Gas en las que la Nanotecnología puede contribuir a tecnologías más eficientes, menos costosas, y más ecológicas que las que están disponibles actualmente ⁶³.

Su aplicación permite un incremento en la exploración exitosa de hidrocarburos, el desarrollo de materiales mejorados que permitirán operar de una forma más eficiente y segura, la perforación en ambientes de alta temperatura/alta presión/alta profundidad, control de la producción a partir del diagnóstico, vigilancia, monitoreo y estrategias de gestión en tiempo real, control de la corrosión en equipos de fondo y superficie, desarrollo de materiales más ligeros y resistentes que reducen el peso en plataformas, buques de transporte más eficientes y confiables, control de los residuos y agua de producción, mejoramiento en los métodos de recuperación de petróleo y gas, modernización de instalaciones y, tecnologías de refinación y petroquímica más eficientes ⁶⁴.

Parreiras y Antunes, 2015 ⁶⁵ reportaron que de 2001 a 2011, aproximadamente 1.162 patentes y más de 3.347 artículos científicos fueron presentados en temas concernientes a la aplicación de la Nanotecnología en la industria del Petróleo y Gas. Esto evidencia que el desarrollo de la Nanotecnología en la industria es un tema reciente, por lo que la mayoría de aplicaciones aquí mencionadas aún están en etapas de investigación y desarrollo (escala de laboratorio) ⁶⁶.

⁶³ *Ibíd.*, p. 8.

⁶⁴ *Ibíd.*, p. 8.

⁶⁵ PARREIRAS, V. M. A. y ANTUNES, A. M. S. *Technological Prospection on Nanotechnology Applied to the Petroleum Industry: Recent Patents on Nanotechnology*. 2015. p. 106.

⁶⁶ KONG, Xiangling y OHADI, Michael. *Op. cit.*, p. 8.

Antes de que puedan aplicarse en forma práctica, numerosos problemas necesitan ser resueltos, tales como, la producción de nanomateriales a bajo costo y fácilmente industrializados. Una vez estos problemas se resuelvan a partir de las correspondientes tecnologías desarrolladas, la Nanotecnología se aplicará extensivamente en casi cada área de la industria del Petróleo y Gas ⁶⁷.

Algunas de las barreras que pueden retardar la implementación en el futuro incluyen, falta de apoyo a la innovación en el sector de Exploración y Producción (E&P, por sus siglas en inglés), problemas para la adopción, costos y riesgos y, en especial la falta de conocimiento ⁶⁸.

A partir del estudio realizado por Kong y Ohadi, 2010 ⁶⁹ se identificaron las principales aplicaciones de la Nanotecnología en la industria del Petróleo y Gas: *nanosensores, nanofluidos, materiales nanoestructurados, nanorevestimientos, nanomembranas y nanocatalizadores*. Estas serán tratados en los capítulos siguientes con sus respectivas aplicaciones en cada área de la industria.

⁶⁷ *Ibíd.*, p. 8.

⁶⁸ *Ibíd.*, p. 8.

⁶⁹ KONG, Xiangling y OHADI, Michael. *Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry - Overview of the Recent Progress*. Society of Petroleum Engineers. 2010. SPE-138241-MS.

NANOSENSORES

3.1 CONCEPTOS

El desarrollo de dispositivos sensoriales ha sido vital para el desarrollo de varios avances tecnológicos que han revolucionado las civilizaciones. Todo experimento, implica una medición, la cual trae consigo el sentir o detectar algo ⁷⁰.

3.1.1. ¿Qué es un sensor?. Un sensor, puede ser definido como cualquier dispositivo que usa especies químicas o componentes activos que generan una señal en presencia de un analito ^{*}. La señal, a su vez, es usada directamente o después de una adecuada amplificación para activar un detector ⁷¹.

⁷⁰ PRADEPP, T. *NANO: The Essentials, Understanding Nanoscience and Nanotechnology*. New Delhi, India: McGraw-Hill. 2007. 432 p. ISBN: 0-07-154830-0. p. 284.

* El analito se refiere a cualquier sustancia química o biológica que es analizada.

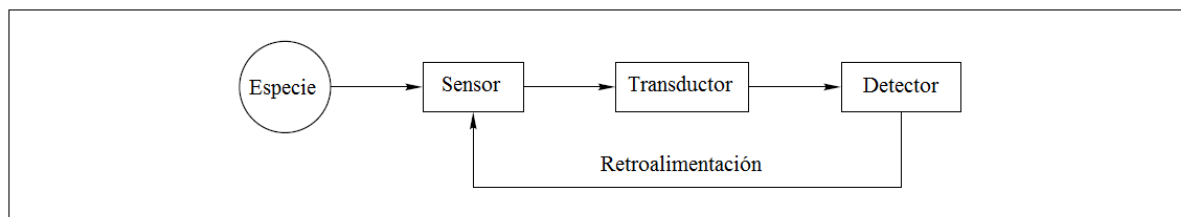
⁷¹ *Ibíd.*, p. 284.

Por lo tanto, los tres componentes esenciales de un dispositivo sensorial son:

1. El *elemento de respuesta*, el cual reconoce la presencia del analito y genera una señal. Éste es el principal componente el cual “ve” el analito (el cual puede ser una molécula, sustancia, ion o proceso). En general, este elemento debe satisfacer ciertos requerimientos, tales como:
 - a. Ser capaz de detallar el analito en una forma cualitativa y cuantitativa.
 - b. Ser capaz de detectar incluso la más pequeña cantidad de analito.
 - c. La señal generada debe ser reproducible. Esto implica que el sensor no debe tener una fuerte afinidad con el analito. En casos en que el sensor presenta una ligera afinidad, después de cierto tiempo se genera una respuesta que no es reproducible. La afinidad debe ser óptima para que así el analito se separe o libere del sensor después de un corto período de interacción, durante el cual el sensor transfiere su respuesta al detector.
 - d. El sensor debe ser muy selectivo y específico en su respuesta.
2. Un *amplificador*, el cual recibe la señal del sensor como una entrada (*input*) y la amplifica a un nivel que sea aceptado para que sea procesado por el detector y,
3. Un *detector*, el cual recibe la salida (*output*) del amplificador como una entrada y la convierte, en una forma programada, a un parámetro que representa o bien el analito o su concentración, o ambos. En la mayoría de los casos, el detector está equipado con un control de retroalimentación a través del cual las señales del sensor que ingresan son recibidas y procesadas ⁷².

⁷² *Ibíd.*, p. 284.

Figura 8. Esquema general de un dispositivo sensorial



Fuente: PRADEPP, T. *NANO: The Essentials, Understanding Nanoscience and Nanotechnology*. New Delhi, India: McGraw-Hill. 2007. ISBN: 0-07-154830-0. p. 285 (Traducida y modificada por la autora).

3.1.2. ¿Qué hace posible a los nanosensores?. Una interpretación de las propiedades de una fase líquida por parte de una fase sólida es el principio que rige el desarrollo y funcionamiento de los nanosensores, por lo tanto, es de vital importancia que durante la interpretación no se alteren las propiedades de la fase líquida ⁷³.

Un nanosensor es un protocolo isotrópico de detección generado por un ensamblaje de una solución de nanopartículas o nanomateriales (*fase líquida*) en superficies o substratos conductivos o metálicos (*fase sólida*). Por lo tanto, las propiedades ópticas, eléctricas, electroquímicas y físicas de las nanopartículas y nanomateriales son vitales para el diseño y desarrollo de un nanosensor viable ⁷⁴.

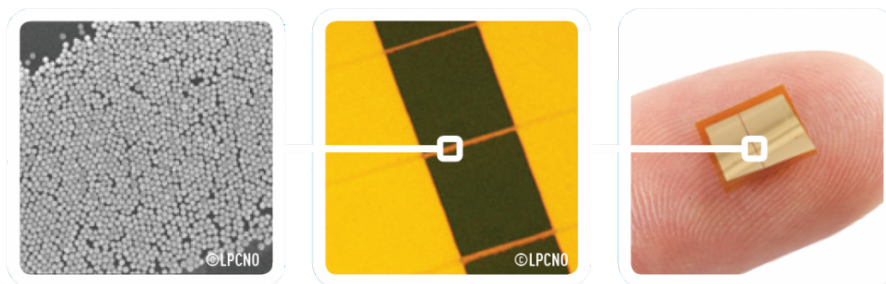
El ensamblaje se genera debido a que el substrato o superficie consiste de una plantilla (template), la cual está integrada por regiones en las que se posibilita la adsorción artificial de las nanopartículas (Figura 9) ⁷⁵.

⁷³ *Ibíd.*, p. 285.

⁷⁴ *Ibíd.*, p. 286.

⁷⁵ *Ibíd.*, p. 287.

Figura 9. Ejemplo de un nanosensor (zoom sucesivo)



Fuente: NanoLike Engineering.

3.1.3. Características de los nanosensores. Los nanosensores no son necesariamente dispositivos de tamaño reducido simplemente a unos pocos nanómetros, pero son dispositivos que hacen uso de las propiedades únicas de los nanomateriales y nanopartículas para detectar y medir nuevos tipos de eventos en la escala nanométrica. Por ejemplo, pueden detectar compuestos químicos en concentraciones tan bajas como una parte por billón (ppb) o la presencia de diferentes agentes infecciosos, tales como, virus o bacterias dañinas ⁷⁶.

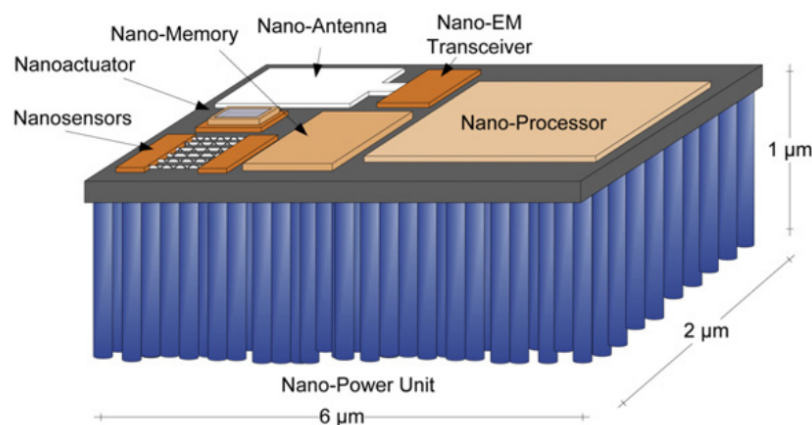
Los rangos de detección de los nanosensores existentes les obliga a estar dentro del fenómeno que se está midiendo, y el área cubierta por un solo nanosensor se limita a su ambiente. Por esto, la aplicación de redes de nanosensores permite cubrir áreas más grandes y realizar procesamiento adicional dentro de la red ⁷⁷.

⁷⁶ AKYILDIZ, Ian y MIQUEL JORNET, Josep. *Electromagnetic Wireless Nanosensor Networks*. En: *Nano Communications Networks*. Vol. 1, No. 1 (Marzo, 2010); p. 3.

⁷⁷ *Ibíd.*, p. 3.

3.1.4. Arquitectura del dispositivo. La arquitectura interna del dispositivo del nanosensor se muestra en la Figura 10. A pesar de que el nanosensor es similar a los sensores a micro y macroescala, se debe tener en cuenta que 1) las soluciones en la nanoescala se limitan no sólo en términos de tecnologías de fabricación existentes, sino también por las leyes de la física, es decir, que no se puede pensar en un nanosensor como un sensor pequeño y simplificado y, 2) existe una relación directa entre el tamaño del nanosensor, su capacidad, y el tipo de aplicaciones en las que se puede utilizar. A continuación, se presentan las características de cada sub-bloque que compone el nanosensor ⁷⁸.

Figura 10. Arquitectura del dispositivo



Fuente: AKYILDIZ, Ian y MIQUEL JORNET, Josep. *Electromagnetic Wireless Nanosensor Networks*. En: *Nano Communications Networks*. Vol. 1, No. 1 (Marzo, 2010); p. 4.

Unidad sensorial. Nanomateriales novedosos como el grafeno y sus derivados, denominados como, nanohilos de grafeno (GRNs, por sus siglas en inglés) y nanotubos de carbono (CNTs, por sus siglas en inglés), ofrecen capacidades de detección excepcionales y son la base de muchos tipos de nanosensores ⁷⁹.

⁷⁸ *Ibíd.*, p. 4.

⁷⁹ *Ibíd.*, p. 4.

Basados en la naturaleza de la magnitud medida, los nanosensores se pueden clasificar de la siguiente manera ⁸⁰ :

I. Nanosensores físicos. Se utilizan para medir magnitudes tales como la masa, presión, fuerza o desplazamiento. Su principio de funcionamiento se basa generalmente en el hecho de que las propiedades electrónicas de los nanotubos y nanohilos cambian cuando éstos son deformados (Figura 11). A partir de este sencillo principio, diferentes tipos de sistemas nano-electromecánicos (NEMS, por sus siglas en inglés) se han propuesto en la literatura con diferentes aplicaciones, tales como nanosensores de presión, nanosensores de fuerza o nanosensores de desplazamiento ⁸¹.

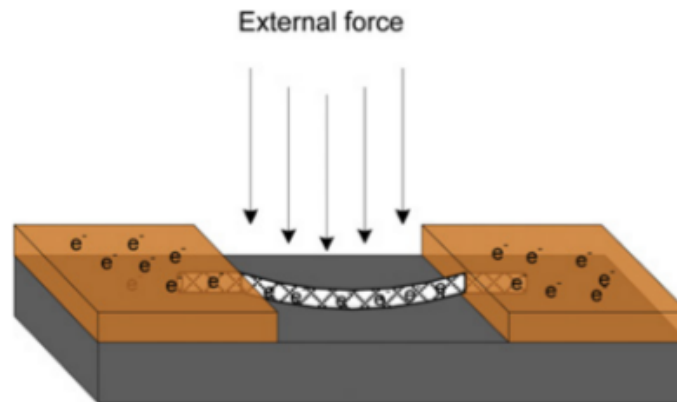
II. Nanosensores químicos. Se utilizan para medir magnitudes tales como la concentración de un gas dado, la presencia de un tipo específico de moléculas, o la composición molecular de una sustancia. El funcionamiento de los nanosensores químicos se basa en el hecho de que las propiedades electrónicas de los nanotubos y nanohilos cambian cuando los diferentes tipos de moléculas se adsorben en su superficie, lo que, a nivel local, aumenta o disminuye el número de electrones capaces de moverse a través de la red de carbono (Figura 12). Actualmente, cientos de nanosensores químicos basados en este sencillo principio, han sido fabricados con diferentes objetivos de detección específicos ⁸².

⁸⁰ *Ibíd.*, p. 4.

⁸¹ *Ibíd.*, p. 4.

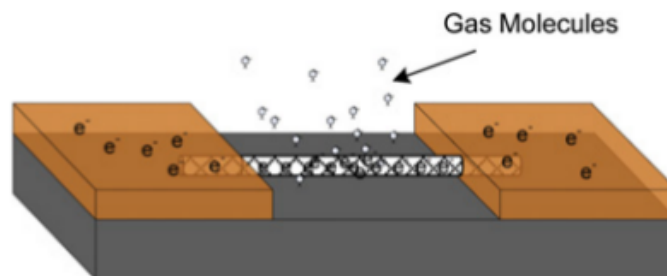
⁸² *Ibíd.*, p. 5.

Figura 11. Principio de operación del nanosensor físico basado en CNTs



Fuente: AKYILDIZ, Ian y MIQUEL JORNET, Josep. *Electromagnetic Wireless Nanosensor Networks*. En: *Nano Communications Networks*. Vol. 1, No. 1 (Marzo, 2010); p. 5.

Figura 12. Principio de operación del nanosensor químico basado en CNTs



Fuente: AKYILDIZ, Ian y MIQUEL JORNET, Josep. *Electromagnetic Wireless Nanosensor Networks*. En: *Nano Communications Networks*. Vol. 1, No. 1 (Marzo, 2010); p. 5.

Unidad de activación. La unidad de activación permite que los nanosensores interactúen con su entorno cercano. Varios de ellos se componen por nanoactivadores. También se han diseñado y puesto en práctica hasta la fecha. Se clasifican en ⁸³:

⁸³ *Ibíd.*, p. 6.

I. Nanoactivadores físicos. Se basan normalmente en NEMS. De la misma manera que la deformación física de un nanotubo crea un cambio en las propiedades eléctricas del nanomaterial, una corriente eléctrica o una onda electromagnética puede hacerlo también. A partir de este principio, nanopinzas formadas por dos nanotubos de carbono de paredes múltiples se utilizan. Las nanopinzas se cierran por la aplicación de un voltaje específico y se abren por medio de macroactivadores externos lo cual permite su activación ⁸⁴.

II. Nanoactivadores químicos. Se basan principalmente en la interacción entre los nanomateriales y nanopartículas debido a campos electromagnéticos y calor ⁸⁵.

El área de nanoactivadores está en una etapa muy temprana, en comparación con los nanosensores. El reto principal de la investigación, además del diseño y la fabricación de la unidad de activación está en la forma de controlar y conducir el nanoactivador con precisión ⁸⁶.

Unidad de alimentación. Hasta la fecha, se ha realizado un gran esfuerzo para minimizar fuentes de energía a microescala y nanoescala. Nanomateriales se han utilizado para la fabricación de nanobaterías con alta densidad de potencia, tiempo de funcionamiento razonable y altas tasas de carga/descarga. Sin embargo, tienen que ser periódicamente recargadas lo que limita su utilidad ⁸⁷.

Como alternativa, nanodispositivos autoalimentados se han diseñado recientemente, y su principio de operación se basa en la conversión de energía de los siguientes tipos de energía en energía eléctrica: 1) *energía mecánica*, producida por algún movimiento o fuerza, 2) *energía vibracional*, generada por ondas acústicas o vibraciones estructurales

⁸⁴ *Ibíd.*, p. 6.

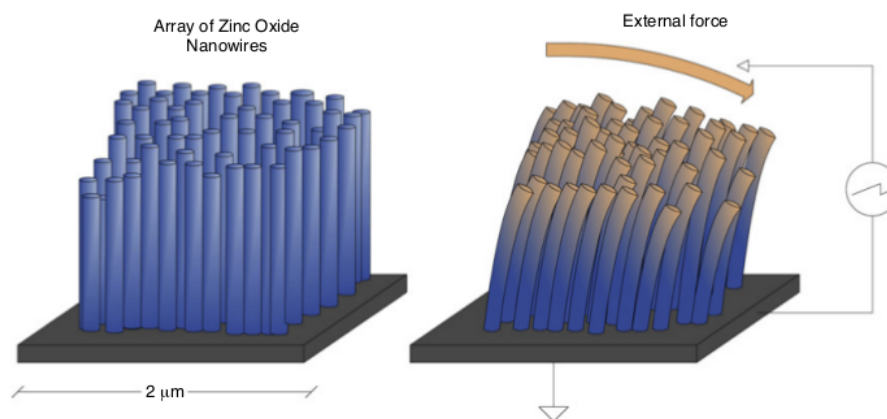
⁸⁵ *Ibíd.*, p. 6.

⁸⁶ *Ibíd.*, p. 6.

⁸⁷ *Ibíd.*, p. 6.

y, 3) *energía hidráulica*, producida por el flujo de los fluidos. La conversión se realiza a partir del efecto piezoeléctrico * en nanohilos de óxido de zinc. Por lo tanto, cuando ellos entran en contacto con estas fuentes de energía, se produce una cantidad de voltaje en el nanohilo (Figura 13) ⁸⁸.

Figura 13. Efecto piezoeléctrico en nanohilos de óxido de zinc



Fuente: AKYILDIZ, Ian y MIQUEL JORNET, Josep. *Electromagnetic Wireless Nanosensor Networks*. En: *Nano Communications Networks*. Vol. 1, No. 1 (Marzo, 2010); p. 7.

Unidad de procesamiento. Procesadores a nanoescala están siendo habilitados por el desarrollo de transistores cada vez más diminutos en diferentes formas. Nanomateriales, tales como nanotubos de carbono y especialmente nanohilos de grafeno, se han utilizado para construir transistores a escala nanométrica. El grafeno posee canales por los cuales es posible transportar electrones de forma rápida y por grandes distancias sin ser difundidos, esto permite el desarrollo de dispositivos de conmutación más rápidos, además, la reducción de la longitud del canal también contribuye a una respuesta más rápida respuesta del transistor ⁸⁹.

* Los materiales al ser sometidos a tensiones mecánicas en su masa, adquieren una polarización eléctrica, lo que genera una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie.

⁸⁸ *Ibíd.*, p. 6.

⁸⁹ *Ibíd.*, p. 7.

Unidad de almacenamiento. Nanomemorias que utilizan un solo átomo para almacenar un solo bit se está desarrollando. IBM ha demostrado el concepto de memorias magnéticas atómicas. En una memoria magnética, átomos magnéticos individuales se colocan sobre una superficie por medio de fuerzas magnéticas, cada uno de ellos almacena un bit de información ⁹⁰.

Unidad de comunicación. La comunicación electromagnética entre nanosensores en red es habilitado a través de nanoantenas y el transceptor electromagnético correspondiente. Las nanoantenas son antenas de dispositivos sensoriales convencionales, las cuales se minimizaron a la escala nanométrica. Estos permiten la propagación de ondas a velocidades menores a la de la luz dependiendo de la estructura, geometría y energía de Fermi del nanomaterial base, lo cual permite que posean una frecuencia de resonancia mayor a sus contrapartes ⁹¹.

El transceptor está integrado por un circuito electrónico el cual permite el procesamiento y conversión de la frecuencia de resonancia generada por la nanoantena de otro nanosensor de la red, filtrando y ampliando su poder, después estas señales son transmitidas en el espacio a través de la nanoantena del nanosensor que recibe la frecuencia ⁹².

3.1.5. Consorcio Avanzado de Energía. El Consorcio Avanzado de Energía (AEC, por sus siglas en inglés) fue formado en 2008 por Scott Tinker, Director de la Oficina de Geología Económica de la Universidad de Texas en Austin. Este grupo unió a académicos de 30 universidades del mundo como también ingenieros y geo-científicos de 7 de las mayores compañías en la industria del Petróleo y Gas (Figura 14). Estos investigadores multidisciplinarios tienen numerosas metas (Figura 15), pero la

⁹⁰ *Ibíd.*, p. 8.

⁹¹ *Ibíd.*, p. 8.

⁹² *Ibíd.*, p. 8.

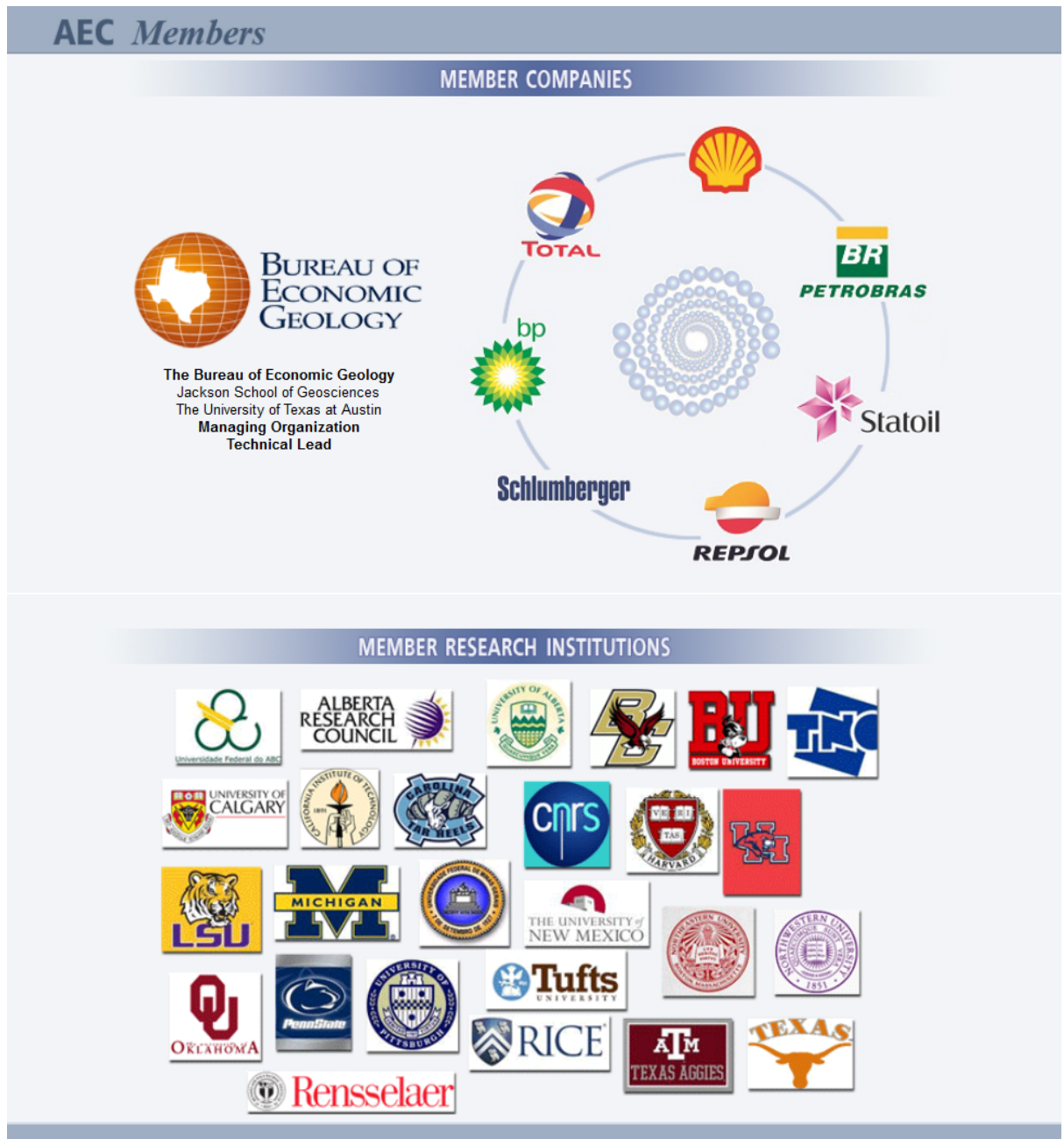
gran parte de su trabajo se ha enfocado en la aplicación de la Nanotecnología para el desarrollo de un conocimiento más detallado sobre el yacimiento, para que así los operadores puedan tomar mejores decisiones ⁹³.

Tres tipos de sensores han sido desarrollados por el AEC con dicho fin. El primero, sensores electrónicos con un equivalente químico, de un tamaño nanométrico, los cuales son inyectados en la formación y exhiben un cambio de estado detectable e irreversible cuando son expuestos a las condiciones de interés. El segundo, microsensores electrónicos, los cuales son dispositivos que fluyen a través del fondo del pozo obteniendo información acerca de este. El tercero, agentes de contraste conformados por nanomateriales que mejoran el retorno de la señal de las técnicas geofísicas convencionales (registros estándar e imágenes de sísmica) ⁹⁴.

⁹³ COOKSON, Colter. *Nanotech Sensors to Reveal Reservoir*. En: The American Oil & Gas Reporter. Reporte Especial (Julio, 2014). p. 1.

⁹⁴ *Ibíd.*, p. 1.

Figura 14. Miembros del AEC



Fuente: Sitio web de la Oficina de Geología Económica de la Universidad de Texas en Austin. <http://www.beg.utexas.edu/aec/members.php>

Figura 15. Metas de investigación del AEC

AEC's Nanotechnology Applications and Goals	
Application	Goals
Hydraulic Fracturing	Determine fracture location, direction, height and length. Investigate timing of frac flow, fracture closure and fluid cleanup.
Waterflood and Interwell Reservoir Characterization	Image fluid flow in real time. Identify high-permeability zones, fractures and compartments. Determine rock properties such as permeability, porosity and wettability; as well as rock layers and depositional environment effects.
Wellbore Measurements and Extended Well Logging	Develop micro- and nanosensors that can gather resistivity, sonic, and other well log data as far as 3-10 meters from the borehole.
Enhanced Oil Recovery	Apply nanotechnology to enhance EOR chemicals such as surfactants, polymers, foaming agents, diverting gels and alkaline agents.

Fuente: COOKSON, Colter. *Nanotech Sensors to Reveal Reservoir*. En: The American Oil & Gas Reporter. Reporte Especial (julio, 2014). p. 1.

Una de las primeras acciones realizadas por el AEC fue identificar las metas medibles en el tiempo y aplicaciones de la Nanotecnología a desarrollar . Cuatro aplicaciones se identificaron: caracterización de la fractura en procesos de fracturamiento hidráulico, mapeo del frente de inyección en procesos de inyección de agua, además caracterización del yacimiento y de los pozos, mediciones del pozo y extensión de los registros de pozo y, por último, el recobro mejorado de hidrocarburos (Figura 16) .

Figura 16. Rutas de investigación del AEC

AEC's Research Thrusts	
Thrust	Idea
Mobility	Get nanoparticles to move through the reservoir.
Contrast Agents	Use nanoparticles to "light" the front edge of waterfloods, as well as completions and the extent of hydraulic fracture networks.
Nanomaterial Sensors	Create tiny nanosensors that change in response to environmental conditions.
Microfabricated Sensors	Develop small electronic sensors that function down hole.

Fuente: COOKSON, Colter. *Nanotech Sensors to Reveal Reservoir*. En: The American Oil & Gas Reporter. Reporte Especial (julio, 2014). p. 1.

3.2 APLICACIÓN

3.2.1. Aplicación en el área de Producción. Como resultado de la cada vez mayor demanda de energía, las reservas mundiales de petróleo fácilmente accesible se están agotando rápidamente. La industria de petróleo y gas tiene hoy una recuperación típica de hidrocarburos con valor de 30 - 40 %, que indica que la mayoría del crudo existente está atrapado en los poros del medio poroso. Un aumento en la eficiencia de recuperación (hasta un 60-80 %), será un factor clave para satisfacer la creciente demanda de energía. Para ello, hay una necesidad de nuevas y más sofisticadas técnicas de registro ⁹⁵.

Cualquier información adicional de las propiedades físicas y químicas del yacimiento y sus fluidos puede agregar una contribución significativa para mejorar el proceso de producción, por lo que hay una búsqueda de un sistema de sensores mejorados. Las características clave para las funcionalidades de estos sensores son la temperatura, la cantidad y naturaleza de los iones disueltos, y la química del yacimiento ⁹⁶.

Trazadores. En la recuperación secundaria, la caracterización del flujo en el yacimiento regularmente es realizada usando trazadores reactivos, los cuales son inyectados con el agua para obtener la dinámica de flujo en el yacimiento. Esto después se extiende con técnicas complementarias tales como pruebas de presión y registros sísmicos para determinar parámetros adicionales del yacimiento. La limitación que presentan estos trazadores está en que principalmente proveen información de las características de flujo, y no poseen funcionalidades sensoriales, químicas o físicas. Además, sus componentes reactivos, limitan su uso, debido a

⁹⁵ NEDERLANDSE ORGANISATIE VOOR. *Fluorescent Nano-Sensors for Oil and Gas Reservoir Characterization*. Inventores: TURKENBURG, Daniel.; CHIN, Patrick y FISCHER, Rudolf. PCT/IB2013/00116.1. Fecha de Solicitud: 15 de Abril, 2013. Estados Unidos. Aplicación. Patente No. US20150090456A1. Fecha de Publicación: 2 de Abril, 2015. p. 1.

⁹⁶ *Ibíd.*, p. 1.

problemas de salud, seguridad y ambientales ⁹⁷.

Una clase de nanomateriales, llamados puntos cuánticos (QD, por sus siglas en inglés), los cuales son nanocristales semiconductores que brillan y emiten una emisión de color fluorescente de tamaño ajustable y, un nuevo tipo de nanopartículas, llamados *clusters* de metales nobles, los cuales poseen un comportamiento óptico luminoso de tamaño ajustable, que en cierta medida es comparable a la de QDs. Turkenburg *et al.*, 2013 ⁹⁸ combinaron los puntos cuánticos y los *clusters* descritos anteriormente y crearon un nanosensor que permite obtener imágenes del yacimiento. Los diferentes colores emitidos son claramente fáciles de discriminar el uno del otro, lo cual es beneficioso para la multiplexación * del sensor ⁹⁹.

Este nanosensor puede ser inyectado a la formación con el agua de inyección, allí los QDs y nanoclusters experimentan diferentes reacciones dependiendo de las condiciones locales específicas, lo que genera diferencias en la química de su superficie. Después son recuperados desde el pozo de producción, se analizan y las propiedades ópticas y químicas se comparan con la situación inicial antes de la inyección. Las diferencias entre ambas mediciones permiten obtener información acerca de parámetros físicos y químicos específicos del yacimiento tales como, pH, temperatura, ambiente químico, y sólidos presentes ¹⁰⁰.

⁹⁷ *Ibíd.*, p. 1.

⁹⁸ NEDERLANDSE ORGANISATIE VOOR. *Fluorescent Nano-Sensors for Oil and Gas Reservoir Characterization*. Inventores: TURKENBURG, Daniel.; CHIN, Patrick y FISCHER, Rudolf. PCT/IB2013/00116.1. Fecha de Solicitud: 15 de Abril, 2013. Estados Unidos. Aplicación. Patente No. US20150090456A1. Fecha de Publicación: 2 de Abril, 2015.

* Combinación de dos o más canales de información en un solo medio de transmisión (permite varias comunicaciones de forma simultanea).

⁹⁹ NEDERLANDSE ORGANISATIE VOOR. *Op. cit.*, p. 2.

¹⁰⁰*Ibíd.*, p. 4

Caracterización del Yacimiento. Recientemente ha crecido el interés por los elastómeros hinchables para uso en aplicaciones de yacimientos. Elastómeros hinchables por petróleo ahora están en el mercado, así como los elastómeros hinchables por agua, los cuales se utilizan como barreras expandibles para el aislamiento de zonas y prevención de *blow-out* ¹⁰¹.

Rashmi, 2008 ¹⁰² diseñó un dispositivo conformado por un elastómero hinchable con uno o más nanosensores dispersos (de forma uniforme o no uniforme). El sistema es inyectado a la formación y se deja que fluye. Tras la exposición a un vapor, líquido o gas, la matriz (elastómero) se hincha y por lo tanto mueve los nanosensores separándolos uno respecto al otro. Esto provoca un aumento de la resistencia medida por el detector, de la vida útil del nanosensor y una respuesta más uniforme ya que se evita intoxicación por sustancias orgánicas o daños por impacto, ya que esta afecta las características de respuesta del dispositivo. Además, la mezcla íntima de los nanosensores dentro de la matriz hinchable proporciona un dispositivo más robusto que puede ser fabricado en tamaños y formas extrañas para la colocación en entornos difíciles y/o reducidos ¹⁰³.

El nanosensor entonces detecta, monitorea, transmite, mide, compara, recoge, almacena, calcula información que puede ser utilizada en operaciones de campo, la cual incluye, composición química, reactividad química, restos químicos, propiedades físicas (temperatura, presión), propiedades del fluido (por ejemplo, viscosidad), relación gas-líquido, propiedades eléctricas, coeficientes de transmisión (tales como coeficiente de fricción, coeficiente de transferencia de masa, coeficiente de difusión, permeabilidad, etc.) o más ¹⁰⁴.

¹⁰¹SCHLUMBERGER CA LTD. *Oilfield Apparatus Comprising Swellable Elastomers Having Nanosensors Therein and Methods of Using Same in Oilfield Applications*. Inventores: RASHMI B, Bhavsar. C08L101/14. Fecha de Solicitud: 24 Marzo, 2008. Canadá. Aplicación. Patente No. CN 101545371 A. Fecha de Publicación: 29 Mayo, 2008. p. 1.

¹⁰²SCHLUMBERGER CA LTD. *Oilfield Apparatus Comprising Swellable Elastomers Having Nanosensors Therein and Methods of Using Same in Oilfield Applications*. Inventores: RASHMI B, Bhavsar. C08L101/14. Fecha de Solicitud: 24 Marzo, 2008. Canadá. Aplicación. Patente No. CN 101545371 A. Fecha de Publicación: 29 Mayo, 2008.

¹⁰³SCHLUMBERGER CA LTD. Op. cit., p. 9.

¹⁰⁴Ibíd., p. 8.

Registros de pozos en forma remota. Los pozos demandan una gran variedad de información sobre los parámetros y condiciones encontrados en el pozo. Dicha información incluye típicamente las características de las formaciones atravesadas por el pozo y datos relacionados con el tamaño y la configuración del pozo mismo ¹⁰⁵.

La colección de información relativa a las condiciones de fondo de pozo, que comúnmente se conoce como registro”, se realiza generalmente por *wireline logging*, tuberías de registro o *logging while drilling, LWD*. En cualquiera de estos métodos, las herramientas pueden obtener muestras de la roca y fluidos y transmitirlos a la superficie para el análisis. Alternativamente, las herramientas pueden llevar a cabo mediciones cerca del pozo mediante señales electromagnéticas, radiación nuclear, energía acústica, etc. ¹⁰⁶

Cada una de estas técnicas sufren de varias limitaciones. Por ejemplo, las muestras tomadas en superficie pueden sufrir cambios debido a diferentes condiciones, por ejemplo, cambios en la presión y temperatura o contacto con la herramienta o fluido de perforación, lo cual causa degradación química de la muestra ¹⁰⁷.

JONES *et al.*, 2011 ¹⁰⁸ diseñaron e integraron nanosensores a los sistemas de registro para obtener mediciones espectrales en tiempo real en el fondo de pozo. Estos nanosensores se dispersan en fluidos portadores, que incluyen, fluidos de perforación, estimulación, inyección o líquidos para pruebas de bombeo. Estos permiten que circulen y sean expuestos a la formación, a los fluidos de la formación u otros

¹⁰⁵HALLIBURTON ENERGY SERVICES, INC. *Spectroscopic Nanosensor Logging Systems and Methods*. Inventores: JONES, Christopher.; SHEN, Jing., PELLETIER, Michael y MORYS, Marian. E21B 47/00. Fecha de Solicitud: 1 de Junio, 2011. Estados Unidos. Aplicación. Patente No. WO2011153190A1. Fecha de Publicación: 8 de Diciembre, 2015. p. 1.

¹⁰⁶Ibíd., p. 1.

¹⁰⁷Ibíd., p. 1.

¹⁰⁸HALLIBURTON ENERGY SERVICES, INC. *Spectroscopic Nanosensor Logging Systems and Methods*. Inventores: JONES, Christopher.; SHEN, Jing., PELLETIER, Michael y MORYS, Marian. E21B 47/00. Fecha de Solicitud: 1 de Junio, 2011. Estados Unidos. Aplicación. Patente No. WO2011153190A1. Fecha de Publicación: 8 de Diciembre, 2015.

materiales de interés. Debido a que los nanosensores tienen diámetros del orden de 10 nanómetros a 1000 nanómetros, penetran en las fracturas, poros y otros vacíos que los fluidos portadores pueden alcanzar ¹⁰⁹.

Las medidas espectrales obtenidas por el nanosensor pueden revelar la presencia de ciertos elementos y moléculas en la formación y los fluidos, lo que permite determinar la composición y las fases de los fluidos de la formación y la propia formación, permitiendo así una mejor caracterización de los yacimientos ¹¹⁰.

Monitoreo continuo y en tiempo real de la tasa de flujo, presión y otros parámetros durante la producción. En gran parte, el futuro de la industria del petróleo y gas depende en la habilidad para comprender el volumen y las dinámicas de un yacimiento para optimizar la producción y evitar daños en el yacimiento o interrupción del flujo a través de la sobre-producción u otros métodos de mejoramiento de la producción tales como la inyección de vapor ¹¹¹.

Las actuales tecnologías de sensores mecánicos, electromagnéticos u ópticos son relativamente bajos en tecnología y pasivos, y no adquieren datos a distancias suficientes para comprender completamente la composición química, el volumen y la dinámica de los fluidos en un yacimiento dado. La herramienta más avanzada para el control de los pozos es un medidor de flujo multifásico, el cual monitorea la velocidad de flujo del crudo, agua y gas. No hay ninguna herramienta o metodología que puede proporcionar la información sobre la calidad del crudo, el contenido de hidrocarburos y la relación de crudo-agua ¹¹².

¹⁰⁹HALLIBURTON ENERGY SERVICES, INC. Op. cit., p. 2.

¹¹⁰Ibíd., p. 2.

¹¹¹NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). *Real Time Oil Reservoir Evaluation Using Nanotechnology*. Inventores: LI, Jing y MEYYAPPAN, Meyya. G01N 33/24. Fecha de Solicitud: 12 Julio, 2006. Estados Unidos. Concesión. Patente No. US 7875455 B1. Fecha de Publicación: 25 junio, 2011. p. 19.

¹¹²Ibíd., p. 19.

La NASA, 2006 ¹¹³ creó una red de nanosensores químicos combinados con microsensores físicos, los cuales obtienen mediciones de presión y temperatura, ondas acústicas y electromagnéticas, lo que forma un sistema de monitoreo que provee mediciones de flujo bidimensionales para el monitoreo de la composición química de la fase gas o líquida y de las propiedades físicas del nivel de crudo en los pozos en tiempo real, con una extensión horizontal de alrededor de 1 – 10 millas y 2 – 2000 pies en profundidad ¹¹⁴.

Esta data del yacimiento permite que la compañía petrolera/gas y sus clientes monitoreen y analicen proyectos de perforación sin la necesidad de viajar al sitio del pozo. De igual forma, reduce riesgos, acorta la cantidad de tiempo necesaria para llevar a cabo las operaciones de exploración y reduce el tamaño del equipo de medición ubicado en el fondo del pozo ¹¹⁵.

Detección, localización precisa de fugas. Las tuberías son el medio más significativo para el transporte del petróleo y gas; por lo tanto, es importante su vigilancia y protección de diversos problemas, tales como fugas y fallas, ya que éstos representan una gran amenaza para el medio ambiente, que afecta negativamente a los seres que viven en los alrededores y en toda el área de fuga. La industria del petróleo y el gas busca hacer frente a las enormes pérdidas financieras y degradación del medio ambiente que está relacionados a estos problemas. Además, se enfrenta constantemente contra las crecientes presiones regulatorias ¹¹⁶.

¹¹³NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). *Real Time Oil Reservoir Evaluation Using Nanotechnology*. Inventores: LI, Jing y MEYYAPPAN, Meyya. G01N 33/24. Fecha de Solicitud: 12 Julio, 2006. Estados Unidos. Concesión. Patente No. US 7875455 B1. Fecha de Publicación: 25 Junio, 2011.

¹¹⁴NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). Op. cit., p. 19.

¹¹⁵Ibid., p. 19.

¹¹⁶WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION. *Pipeline Leakage Protection Vault and System Therof*. Inventor: ZULFIQUAR, Mohammed. IPC: F17D 5/02. Fecha de Solicitud: 18 de Noviembre, 2014. Estados Unidos. Aplicación. Patente No. WO2015071633A2. Fecha de Publicación: 21 de Mayo, 2015. p. 1.

Por esto, varios esfuerzos en los últimos 50 años se han hecho con el fin de superar este tipo de problemas, los cuales incluyen métodos o herramientas, tales como, análisis estadísticos, reconocimiento aéreo, control de la presión normal de la tubería, software computacional de supervisión, entre otros. Éstos presentan limitantes respecto a qué factor requiere ser monitoreado, en qué región de la tubería, etc. Por otra parte, estos métodos o herramientas recopilan y envían datos de la tubería a un centro de datos específicos para su procesamiento, lo que aumenta la carga en el centro de datos y retrasa la información relevante a la tubería ¹¹⁷.

Independientemente de la complejidad de dichas herramientas o métodos, estos no permiten controlar fugas generadas al instante. El tiempo que se requiere para detener la fuga de fluidos influye directamente en la cantidad de fluido desperdiciado y en la contaminación para el medio ambiente. Por consiguiente, existe una necesidad de innovación en relación con la integridad de la tubería, donde se evite o se controle regularmente toda la tubería y también se reduzca los retrasos en la generación de datos y envío a servidores centrales; y al mismo tiempo pueda ser capaz de evitar tales fugas al medio ambiente ¹¹⁸.

Por ello, Zulfiquar, 2014 ¹¹⁹ creó un sistema de bóveda para la protección de fugas en tuberías, el cual ofrece supervisión y protección en tiempo real de la tubería respecto a fugas y robos, además predice fugas futuras, lo cual permite tomar medidas preventivas para evitarlas; y, en caso de fugas el sistema es capaz de retener el fluido en su interior. Este sistema puede instalarse a lo largo de toda la tubería lo que permite su protección en totalidad, comparado con las tecnologías anteriormente mencionadas, las cuales permiten la protección de regiones específicas de la tubería ¹²⁰.

¹¹⁷Ibíd., p. 1.

¹¹⁸Ibíd., p. 2.

¹¹⁹WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION. *Pipeline Leakage Protection Vault and System Therof*. Inventor: ZULFIQUAR, Mohammed. IPC: F17D 5/02. Fecha de Solicitud: 18 de Noviembre, 2014. Estados Unidos. Aplicación. Patente No. WO2015071633A2. Fecha de Publicación: 21 de Mayo, 2015.

¹²⁰WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION. Op. cit., p. 3.

El sistema está conformado por módulos (también referidos como "módulos de bóveda"), los cuales dependiendo la capacidad a la que se diseñen, pueden contener el fluido dentro de la bóveda previniendo así catástrofes ambientales. Estos están configurados a una unidad de control central, la cual recibe los datos de la tubería y genera una pluralidad de información relacionada a la tubería ¹²¹.

Un sistema global de posicionamiento (GPS, por sus siglas en inglés) y un nanosensor están dispuestos en anillos espaciadores que permiten la comunicación entre los módulos y la unidad de control central. El nanosensor controla y detecta los parámetros relacionados a fugas o violación de la seguridad en la tubería y posteriormente los comunica en tiempo real a la unidad de control central ¹²².

A su vez, el nanosensor está ensamblado con un jet de alarma, el cual está configurado para liberar señales de alarma (humo, audio y luces visuales) en caso de fugas o violación a la seguridad. También tiene en los anillos espaciadores un dispositivo de registro visual para grabar en vídeo la información relacionada la tubería y comunicarla en tiempo real a la unidad de control central ¹²³.

Detección de gases tóxicos. Los dispositivos sensoriales actuales para la detección de H_2S son sensores electroquímicos de bajo consumo de energía, tamaño relativamente pequeño, y satisfactorios en selectividad. Sin embargo, las células electroquímicas suelen tener tiempos de respuesta bastante lentos y son propensos a la degradación o errores a temperaturas y humedad extremas. Sensores semiconductores de óxido de metal (SMO, por sus siglas en inglés) tienen tiempos de respuesta rápida y una interfaz electrónica simple y puede operar en condiciones muy hostiles, sin embargo, la potencia necesaria para operar como un sensor convencional SMO es típicamente de cientos de milivatios. Por lo tanto, su funcionamiento como un display de mano como los sensores SMO

¹²¹Ibíd., p. 4.

¹²²Ibíd., p. 4.

¹²³Ibíd., p. 5.

convencionales no es factible a largo plazo ¹²⁴.

Para superar este problema, Piantanida *et al.*, 2013 ¹²⁵ fabricaron microcalefactores de muy baja potencia y los funcionalizaron con nanopartículas de óxido de tungsteno para crear un nanosensor H_2S que opera con baterías de alta duración ¹²⁶. Este nanosensor permite la detección de H_2S con una alta precisión, de forma portable, visualiza la información a través de un monitor integrado y a su vez, transmite la data en tiempo real de forma *wireless* a un usuario cercano y a la central de análisis ubicada en otra locación, a una fracción del costo de los sensores SMO convencionales. Además, puede comunicarse a través de Wifi a dispositivos externos tales como los *smartphones* ¹²⁷.

¹²⁴WILSON, A *Wireless H₂S Sensor Uses Nanotechnology to Improve Safety in Oil and Gas Facilities*. Society of Petroleum Engineers. 2014. SPE-0814-0101-JPT. p. 101.

¹²⁵PIANTANIDA, Marco.; VENEZIANI, Maurizio., FANTONI, Roberto Fresca., MICKELSON, William., MILGROME, Oren., SUSSMAN, Allen., ZHOU, Quin., ACKERMAN, Ian y ZETTL, Alex. *An Innovative Wireless H₂S Based on Nanotechnology to Improve Safety in Oil and Gas Facilities*. Society of Petroleum Engineers. 2013. SPE-166544.

¹²⁶WILSON, A. Op. cit., p. 101.

¹²⁷Ibíd., p. 103 – 104.

NANOFLUIDOS

4.1 CONCEPTOS

4.1.1. Características de los nanofluidos. Los nanofluidos, también llamados como *smart fluids*, se generan a partir de la dispersión de partículas sólidas, hilos o tubos de tamaño nanométrico (típicamente menor a los 100 nanómetros) en fluidos convencionales, lo cual permite intensificar y mejorar las propiedades térmicas, ópticas, de deformación, eléctricas, reológicas y magnéticas de los fluidos base a muy bajas concentraciones del nanomaterial, por lo que, dependen grandemente de las dimensiones de las nanopartículas que lo conforman ¹²⁸.

4.1.2. Síntesis de los nanofluidos. Los nanofluidos son sintetizados principalmente por dos técnicas: proceso de dos etapas y técnicas de evaporación directa, también denominado como proceso de una sola etapa ¹²⁹.

¹²⁸SULEIMANOV, B. A.; ISMAILOV, F. S. y VELIYEV, E. F. *Nanofluid for Enhanced Oil Recovery*. En: Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol. 78, No. 2 (Agosto, 2011); p. 431.

¹²⁹SOHEL MURSHED, S. M.; CHOONG LEONG, Kai y YANG, Chun. *Thermophysical Properties of Nanofluids*. En: SATTTLER, Klauss. Handbook of Nanophysics. New York, EEUU: Taylor and Francis Group, LLC, 2011. ISBN: 978-1-4200-7545-1. p. 2

En el proceso de dos etapas, las nanopartículas secas son producidas en primera instancia, por un método de condensación de gas inerte, y son entonces dispersadas en el fluido. Una ventaja de este proceso en términos de la eventual comercialización de nanofluidos es que la técnica de condensación de gas inerte permite producir grandes cantidades de nanopartículas. Pequeñas cantidades de nanopartículas también pueden ser sintetizadas por otras técnicas tales como el proceso sol-gel, deposición eléctrica de metales, pirolisis, y secado de microgotas ¹³⁰.

La técnica de evaporación directa sintetiza nanopartículas y se dispersan en el fluido en un solo paso. Al igual que con la técnica de condensación de gas inerte, esta técnica implica la vaporización de un material de origen en condiciones de vacío. Una ventaja de este proceso es que la aglomeración de nanopartículas es minimizada. Los inconvenientes son que el líquido debe tener una presión de vapor muy baja y produce únicamente cantidades muy limitadas de nanofluidos ¹³¹.

La mayoría de investigadores utilizan el proceso de dos etapas para producir nanofluidos con fin comercial o con fin propio ¹³².

4.1.3. Ventajas de los nanofluidos. Las propiedades de las nanopartículas tales como su gran área superficial, bajo momentum, y gran movilidad permite que los nanofluidos presenten propiedades superiores a sus fluidos base, lo que resulta en las siguientes ventajas ¹³³ :

¹³⁰Ibíd., p. 2.

¹³¹Ibíd., p. 2.

¹³²Ibíd., p. 2.

¹³³SHANBEDI, Mehdi.; AMIRI, Ahmad., ZEINALI HERIS, Saeed., NEWAZ KAZI, Salim y BEE TENG, Chew. *Nanofluids: Basic Principles and Modern Aspects*. En: ILDUSOVICH KHARISOV, Boris.; VASILIEVNA KHARISSOVA, Oxana y ORTIZ-MENDEZ, Ubaldo. CRC Concise Encyclopedia of Nanotechnology. Taylor & Francis Group, LLC. 2016. p. 724.

Alta conductividad térmica. La gran área superficial de las nanopartículas hace que la conductividad térmica del nanofluido mejore, por otro lado, el movimiento de las partículas atribuido a sus pequeños tamaños, aumenta la transferencia de calor por micro-convección en el fluido ¹³⁴.

Estabilidad. Debido a que las pequeñas partículas tienen un peso muy bajo, la posibilidad de ser sedimentadas es muy baja, lo que permite que la suspensión del nanofluido permanezca estable ¹³⁵.

Microcanales sin bloqueo. No sólo los nanofluidos son un ambiente interesante para la transferencia de calor, sino que también son ideales para las aplicaciones en microcanales que presentan una carga térmica alta. La combinación de los microcanales y nanofluidos conduce a una mayor conducción y transferencia de calor entre la superficie y el fluido. Debido a su tamaño nanométrico las nanopartículas en el nanofluido fluyen libremente sin generar bloqueos en los microcanales ¹³⁶.

Disminución de la erosión. Las nanopartículas son muy pequeñas y su movimiento es menos probable que influya en la pared sólida. Esta reducción incluso puede reducir la erosión de las piezas incluidas en el intercambiador de calor, tuberías, y las bombas ¹³⁷.

Disminución del poder de bombeo. La adición de nanopartículas al fluido de base genera un incremento en el coeficiente de conductividad térmico por parte de una muy pequeña fracción de partículas, lo que induce a un comportamiento Newtoniano, por lo que las propiedades reológicas del fluido cambian, en especial su viscosidad, permitiendo que mantenga un régimen lineal de flujo, además, se presenta un incremento en la caída

¹³⁴Ibíd., p. 725.

¹³⁵Ibíd., p. 725.

¹³⁶Ibíd., p. 725.

¹³⁷Ibíd., p. 725.

de presión en forma limitada, esto se ve directamente relacionado con un incremento en la velocidad de flujo, por lo que los requerimientos de bombeo son menores ¹³⁸.

4.2 APLICACIÓN

4.2.1. Aplicación en el área de Perforación. *Optimización de los fluidos de Perforación y Completamiento.* En la perforación rotativa hay una gran variedad de funciones y características que se espera los fluidos de perforación, también conocidos como lodos de perforación, o simplemente "lodosrealicen, tales como, 1) sostener los recortes de perforación, transportarlos hasta el espacio anular, y permitir su separación en la superficie y, al mismo tiempo enfriar y limpiar la broca, 2) reducir la fricción entre la columna de perforación y las paredes del pozo manteniendo la estabilidad de las secciones sin casing del pozo, 3) evitar flujos no deseados de fluidos de la formación y también formar una retorta delgada de baja permeabilidad que selle temporalmente los poros, otras aberturas y formaciones penetradas por la broca, 4) estabilizar la pared del pozo para evitar el hinchamiento, por ejemplo en el caso de la perforación de *shale*, 5) obtener recortes y núcleos, los cuales permiten recopilar e interpretar información acerca del yacimiento, 6) no deben agravar la tendencia de brocas, tubulares y otros equipos de fondo a corroerse, por el contrario, deben ayudar a prevenir dicha corrosión ¹³⁹.

También es importante que las propiedades del fluido sean estables, por ejemplo, las propiedades reológicas (viscosidad, yield point, etc.) a lo largo de los rangos de presión y temperatura que experimenta el fluido. Debido a que los fluidos de perforación están

¹³⁸Ibíd., p. 725.

¹³⁹BAKER HUGHES INCORPORATED. *Nanofluids and Methods of Use for Drilling and Completion Fluids*. Inventores: QUINTERO, Lirio.; CARDENÁS, Antonio Enrique y CLARK, David E. C09K 8/92. Fecha de Solicitud: 22 de Junio, 2011. Estados Unidos. Concesión. Patente No. US8822386 B2. Fecha de Publicación: 2 de septiembre, 2014. p. 4.

llamados a realizar esta serie de tareas a la vez, este equilibrio deseable no siempre es fácil de conseguir ¹⁴⁰.

El daño de la formación implica la alteración no deseada de las características iniciales de una formación productora, típicamente por exposición a fluidos de perforación, fluidos de completamiento o en la fase de producción del pozo, por lo que la producción se ve reducida. Se debe a que las partículas de agua o sólidos en estos fluidos tienden a disminuir el volumen poroso y la permeabilidad efectiva de la formación productora en la región cercana al pozo ¹⁴¹.

Por lo tanto, se requiere que la composición del fluido de perforación y operaciones se diseñen con el fin de evitar el daño a la formación, como también, permitan evaluar la ubicación y existencia de estos daños con el fin de eliminarlos y/o resolverlos de la forma más completa y fácil, sin causar daños adicionales a la formación, pozo y/o equipo ¹⁴².

Por ello, Quintero *et al.*, 2011 ¹⁴³ explicaron basados en estudios de investigación que la adición de nanopartículas orgánicas e inorgánicas, tales como, nanotubos de carbono, óxido de magnesio, óxido de níquel, óxido de hierro, nanopartículas metálicas, nanopartículas a base de polímeros, nanopartículas mesoporosas ^{*}, entre otras, a fluidos de perforación y fluidos de completamiento mejora sus propiedades termodinámicas, físicas y reológicas en comparación con un fluido idéntico sin la adición de las nanopartículas ¹⁴⁴.

¹⁴⁰Ibíd., p. 4.

¹⁴¹Ibíd., p. 4.

¹⁴²Ibíd., p. 4.

¹⁴³BAKER HUGHES INCORPORATED. *Nanofluids and Methods of Use for Drilling and Completion Fluids*. Inventores: QUINTERO, Lirio.; CARDENÁS, Antonio Enrique y CLARK, David E. C09K 8/92. Fecha de Solicitud: 22 de Junio, 2011. Estados Unidos. Concesión. Patente No. US8822386 B2. Fecha de Publicación: 2 de Septiembre, 2014.

^{*} El término mesoporoso se refiere a un material que contiene poros con diámetros de aproximadamente 2 - 50 nanómetros.

¹⁴⁴BAKER HUGHES INCORPORATED. *Op. cit.*, p. 7.

Esto se debe a la gran área superficial de las nanopartículas. Este fenómeno aumenta dramáticamente la interacción de las nanopartículas con la matriz o fluido circundante e influye en la cristalización y morfología, por lo tanto, puede generar una variedad de propiedades en el fluido. Además, se requiere menos proporción de nanopartículas comparado con la proporción de aditivos que se utiliza convencionalmente para alcanzar o lograr un efecto similar ¹⁴⁵.

Debido al tamaño nanométrico de las nanopartículas, las fuerzas de superficie (como las de van der Waals y fuerzas electrostáticas) asociadas permiten floccular las partículas finas en grandes aglomeraciones de manera diferente a sus homólogos de tamaño micrométrico. Tales cargas y fuerzas pueden ayudar a asegurar tales partículas a una superficie más grande o sustrato, por ejemplo, para ayudar a estabilizar la pared del pozo ¹⁴⁶.

En un sentido, los fluidos de perforación han hecho uso de nanopartículas por muchos años, ya que las arcillas utilizadas comúnmente en los lodos de perforación son de origen natural. Tales nanopartículas exhiben propiedades reológicas extraordinarias en los lodos. Sin embargo, en contraste con las nanopartículas, en estas el tamaño, forma y composición química se forman y controlan sintéticamente ¹⁴⁷.

Esto permite que las nanopartículas puedan ser diseñados en un nivel atómico, tener grupos funcionales muy específicos, y por lo tanto reaccionar a un cambio en un entorno o condiciones de una manera que es beneficiosa. Debido a que las nanopartículas poseen más de un tipo de grupo funcional, permite que estas sean multifuncionales, esto es útil en aplicaciones simultáneas, por ejemplo, el caso del fluido de perforación, el cual realiza múltiples funciones simultáneamente ¹⁴⁸.

¹⁴⁵Ibíd., p. 7.

¹⁴⁶Ibíd., p. 8.

¹⁴⁷Ibíd., p. 8.

¹⁴⁸Ibíd., p. 8.

La optimización del fluido de perforación conlleva a un incremento de la velocidad de perforación debido a que las propiedades reológicas en especial, se mantienen estables y bajo un régimen lineal a nivel de la nanoescala, como también a la disminución del desgaste de las piezas de perforación de manera significativa, ya que disminuyen las fuerzas de fricción ¹⁴⁹.

También a una estabilización del pozo durante la perforación, en particular en formaciones *shale*, la cual está formada por áreas que tienden a desprenderse en el pozo o tienen arcillas que se hinchan indeseablemente cuando entra en contacto con el agua introducida como parte del fluido de perforación, debido a que el pequeño tamaño de las nanopartículas permite un excelente acceso a la matriz del *shale*, inhibiendo las superficies internas y externas de las arcillas para minimizar el daño de la estructura del *shale* ¹⁵⁰.

Al igual que el mejoramiento de la conductividad eléctrica permitiendo que formen una retorta conductora de la electricidad que mejora altamente los registros de alta resolución en tiempo real ¹⁵¹.

También permite que permanezcan estables en un amplio intervalo de condiciones de presión y temperatura, incluyendo los entornos de alta temperatura/alta presión (HTHP, por sus siglas en inglés) de pozos muy profundos, en proporciones mucho menores de los aditivos de estabilidad actuales. Por estabilización se quiere decir mantenimiento de la reología del fluido, por ejemplo, de la viscosidad, a lo largo de estos intervalos ¹⁵².

¹⁴⁹Ibíd., p. 8.

¹⁵⁰Ibíd., p. 9.

¹⁵¹Ibíd., p. 9.

¹⁵²Ibíd., p. 9.

Del mismo modo una reducción del arrastre (fricción) en las superficies, el cual permite que fluya dentro de las zonas de contacto cambiantes en configuraciones lineales en la nanoescala debido a la adherencia de una lámina reforzada entre las superficies de deslizamiento evitando el contacto directo ¹⁵³.

En el caso de fluidos de perforación de emulsión, tales como emulsiones O/W o W/O, permite que permanezcan estables, debido a que la nanopartícula debido a su tamaño nanométrico ingresa a la interfase de la emulsión fortaleciéndola y estabilizándola ¹⁵⁴.

También, una modificación de la humectabilidad de las superficies en fondo de pozo, tales como las retortas, los recortes de perforación, superficies del pozo, depósitos que causan pega de la tubería. Tales cambios de humectabilidad, por ejemplo, permite eliminar el daño en zonas cercanas del pozo y liberar el atascamiento de la tubería ¹⁵⁵.

Las nanopartículas pueden encapsular inhibidores de la corrosión, los cuales, pueden incluir, materiales eliminadores de oxígeno, sulfuro de hidrógeno (H_2S), dióxido de carbono, sulfuro de carbonilo (COS), cianuro de hidrógeno (HCN), disulfuro de carbono (CS_2), y sus mezclas . El inhibidor se libera cuando la nanopartícula se somete a un mecanismo específico que proporciona una protección contra la corrosión y auto-sanación. Los mecanismos de activación incluyen, cambios de pH, temperatura, tipo de electrolito o de la concentración, o la aplicación de un campo magnético o electromagnético ¹⁵⁶. Esto permite un incremento de la resistencia a la corrosión en herramientas, productos tubulares y equipos de fondo ¹⁵⁷.

¹⁵³Ibíd., p. 10.

¹⁵⁴Ibíd., p. 10.

¹⁵⁵Ibíd., p. 10.

¹⁵⁶Ibíd., p. 11.

¹⁵⁷Ibíd., p. 10.

De igual forma pueden encapsular inhibidores de escamas, de asfaltenos o de hidratos, estabilizadores de *shale*, biocidas, lubricantes, aditivos para tratamientos de acidez, agentes reticulantes, trazadores y geles poliméricos. El control en fondo de la liberación de estos aditivos incrementa la eficiencia de estos aditivos ¹⁵⁸.

Quintero *et al.*, 2011 ¹⁵⁹ explicaron de igual forma, que los fluidos de completamiento también se benefician por la presencia de las nanopartículas dentro de ellos. Los fluidos de completamiento generalmente no contienen sólidos, sin embargo, debido al tamaño extremadamente pequeño de las nanopartículas, su presencia puede ser tolerada en proporciones bajas impartiendo una mejora en sus propiedades, lo que permite un mejoramiento en la pérdida de fluido y viscosidad en salmueras claras ¹⁶⁰.

También, la formación de una estructura interna en la región cercana al pozo, es decir, una retorta”, a partir de los sólidos de perforación y las nanopartículas, lo que mejora la permeabilidad. Esto se debe a que las nanopartículas entran en contacto con los sólidos a nivel nanométrico y, debido a fuerzas eléctricas se mantienen unidos, lo que permite la formación de la estructura. Del mismo modo, una vez que esas fuerzas se destruyen y el control de la permeabilidad ya no es necesario, las nanopartículas pueden volver fácilmente a la región cercana al pozo debido a su pequeño tamaño¹⁶¹.

Las asociaciones mencionadas también pueden utilizarse como tapones, para eliminar o reducir los daños en la formación, lo que permite mejorar la productividad del pozo. Estas estructuras pueden ser utilizadas antes de completar un pozo ya que permite evitar la pérdida de circulación del fluido. Dicho de otra manera, las nanopartículas adecuadamente diseñadas y fabricadas tienen el potencial para construir barreras estructurales de acuerdo con el tamaño y la forma de las

¹⁵⁸Ibíd., p. 11.

¹⁵⁹text

¹⁶⁰Ibíd., p. 11.

¹⁶¹Ibíd., p. 11.

trayectorias de pérdida de fluido y proporcionar un sellado efectivo de las zonas porosas y permeables, y formaciones naturalmente fracturadas ¹⁶².

Este mismo efecto, permite también consolidar formaciones no consolidadas a partir de la formación de redes de partículas dentro de la formación por lo que la región cercana al pozo puede tolerar mayores esfuerzos *in-situ*, lo que evita el colapso, así como fracturas indeseables en la formación ¹⁶³.

Al igual que con los fluidos de perforación, las nanopartículas pueden encapsular o incorporar un aditivo de formación de gel, tal como la poliacrilamida, el cual se libera mediante la aplicación de un mecanismo que incluye, cambios de pH, temperatura, tipo de electrolito o de la concentración, o la aplicación de un campo magnético o electromagnético. Una vez activado, el gel encapsulado se libera y permite su función, por ejemplo, formar un gel debido al contacto con agua de formación, de este modo bloquear y desviar su movimiento, lo que se le denomina, como wáter shut-off o "desviación de agua" ¹⁶⁴.

Optimización del cemento. En general, el tratamiento de un pozo incluye una amplia variedad de métodos tales como perforación, completamiento y *workover*. Estos incluyen, perforación, cementación, espaciadores, y métodos para el control de la pérdida de circulación. Y están diseñados para mejorar y/o facilitar la recuperación de fluidos del yacimiento ¹⁶⁵.

¹⁶²Ibíd., p. 11.

¹⁶³Ibíd., p. 11.

¹⁶⁴Ibíd., p. 11.

¹⁶⁵HALLIBURTON ENERGY SERV INC; RODDY CRAIG WAYNE; COVINGTON RICKY L; CHATTERJI JITEN; BRENNEIS DARRELL CHAD; CURTIS PHILIP ANTHONY. *Cement Compositions and Methods Utilizing Nano-Clay*. Inventores: WAYNE RODDY, Craig.; COVINGTON, Ricky L, CHATTERJI, Jiten, CHAD BRENNEIS, Darrell. C04B14/ 10. Fecha de Solicitud: 24 Septiembre, 2010. Estados Unidos. Aplicación. Patente No. WO 2011036463 A1. Fecha de Publicación: 31 Marzo, 2011. p. 1.

En los métodos de cementación, tales como, como la construcción del pozo y la cementación correctiva, cementos se utilizan comúnmente. Por ejemplo, para la construcción del pozo, una sarta de tuberías (*casing*) se ubican en fondo y se cementan. Este proceso se conoce comúnmente como ‘cementación primaria’. El cemento es bombeado y se deja que fragüe, formando de esta manera una capa de cemento endurecido, sustancialmente impermeable que evita la migración de fluidos al espacio anular, soporta y posiciona el *casing*, une la superficie exterior con la formación y protege de la corrosión ¹⁶⁶.

El cemento puede sufrir fallas estructurales debido a los movimientos de la tubería que provocan esfuerzos de corte que se ejercen en este. Estos esfuerzos son comúnmente el resultado de presiones relativamente altas, fluidos y/o temperaturas en fondo. La alta presión y/o temperatura puede dar lugar a la expansión del *casing*, tanto radial como longitudinalmente, lo que tensiona el cemento haciendo que la adherencia entre las superficies exteriores del *casing* o de las paredes del pozo, o ambos, puedan fallar y permitir así la fuga de fluidos de la formación ¹⁶⁷.

En consecuencia, la composición del cemento debe ser diseñado con el fin de proveerle alta resistencia y también suficiente elasticidad (por ejemplo, elasticidad y ductilidad) para resistir el agrietamiento y/o rotura que puede resultar por fuerzas asociadas con el cambio de formación, presión de sobrecarga, el hundimiento, la fluencia tectónica, los movimientos de tubería, impactos y choques generados posteriormente por otras operaciones de pozos de perforación ¹⁶⁸.

Otro problema es la migración de gases no deseados de la formación a través del cemento. Los gases modifican la composición de cemento, ya que es un fluido que se caracteriza por ser una transición entre un fluido hidráulico y una masa sólida,

¹⁶⁶Ibíd., p. 1.

¹⁶⁷Ibíd., p. 2.

¹⁶⁸Ibíd., p. 2.

potencialmente resultando en la pérdida de aislamiento zonal ¹⁶⁹.

Sin embargo, otro problema se asocia a la exposición de fluidos corrosivos. Ejemplos de entornos corrosivos incluyen la exposición a condiciones ácidas, ya sea causada por soluciones de ácido para el tratamiento de pozo o por la presencia de dióxido de carbono (CO_2) ¹⁷⁰.

Estudios de investigación muestran que la adición de nanopartículas al cemento tiene un impacto beneficioso en ciertas características físicas en el cemento resultante. Por ejemplo, proporciona propiedades mecánicas mejoradas, tales como resistencia a la compresión y resistencia a la tracción. Además, reducir la permeabilidad del cemento, por tanto, potencialmente la reducción de la susceptibilidad a los problemas asociados con la migración de gas o de otros entornos corrosivos, tales como los creados por CO_2 ¹⁷¹.

4.2.2. Aplicación en el área de Producción. *Optimización de los fluidos utilizados en la Recuperación Mejorada.* En la mayoría de yacimientos del mundo, alrededor de dos tercios del crudo no puede ser extraído por los métodos de producción convencionales. Por lo tanto, la recuperación mejorada de petróleo (EOR, por sus siglas en inglés) es un gran potencial. La inyección de agua es un método EOR relativamente económico, pero sólo en la primera etapa, después mejorar este método es una opción más razonable. Para esto, se puede optar por añadir algunas sustancias químicas, tales como surfactantes y polímeros para aumentar la eficiencia del proceso de inyección de agua ¹⁷²

¹⁶⁹Ibíd., p. 2.

¹⁷⁰Ibíd., p. 3.

¹⁷¹Ibíd., p. 5.

¹⁷²UNIV NORTHEAST PETROLEUM. *Preparation Method of Nanofluid for Improving Oil Recovery*. Inventores: FAJUN, Zhao.; YONGJIAN, Liu., JIHONG, Zhang., JIANGUANG, Wei; SHOUBIN, Wen y SHAOBIN, Hu. C09K8/58. Fecha de Solicitud: 16 Abril, 2014. China. Aplicación. Patente No. CN 103937478 A. Fecha de Publicación: 23 Julio, 2014. p. 3.

La inyección de polímeros aumenta la viscosidad del agua inyectada por lo que mejora la eficiencia de barrido en yacimientos heterogéneos. Los surfactantes se utilizan principalmente para reducir la tensión interfacial, por lo tanto, la fuerza debido a la acción capilar del flujo del petróleo en los poros de la matriz ¹⁷³.

El principal problema con el uso de polímeros es la degradación química y térmica. Además, los polímeros tienen un peso molecular alto por lo que son difíciles de inyectar en yacimientos de baja permeabilidad. Las altas temperaturas y la alta concentración de sal conllevan a una disminución de la eficiencia del surfactante. Por lo tanto, es necesario optimizar este tipo de fluidos ¹⁷⁴.

Fajun *et al.*, 2014 ¹⁷⁵ mostraron que la adición de nanopartículas a estos tipos de fluidos incrementa su eficiencia. Esto debido a que el diámetro de los poros de la roca generalmente está a un nivel de los micrómetros, por lo que las nanopartículas pueden fluir a través de ellos, además, su gran área superficial, incrementa el número de átomos activos coordinados en la superficie, lo que, a su vez, incrementa la energía y el equilibrio no-químico de la superficie, haciendo que las propiedades químicas sean diferentes en el sistema del nanofluido formado, por lo que la adsorción de estas nanopartículas en los sólidos de las superficies del medio poroso, produzca cambios en la humectabilidad. También hay una gran reducción de la tensión interfacial, haciendo que el fluido de inyección fluya a través de los poros, permitiendo retirar el crudo residual que se encuentra como pequeñas gotas y ser desplazado por el frente ¹⁷⁶.

¹⁷³Ibíd., p. 3.

¹⁷⁴Ibíd., p. 3.

¹⁷⁵UNIV NORTHEAST PETROLEUM. *Preparation Method of Nanofluid for Improving Oil Recovery*. Inventores: FAJUN, Zhao.; YONGJIAN, Liu., JIHONG, Zhang., JIANGUANG, Wei; SHOUBIN, Wen y SHAOBIN, Hu. C09K8/58. Fecha de Solicitud: 16 Abril, 2014. China. Aplicación. Patente No. CN 103937478 A. Fecha de Publicación: 23 Julio, 2014.

¹⁷⁶UNIV NORTHEAST PETROLEUM. Op. cit., p. 7.

NANOMATERIALES

5.1 CONCEPTOS

5.1.1. Características de los materiales nanoestructurados. Los materiales nanoestructurados o nanocristalinos, son sólidos policristalinos de una o de varias fases con un tamaño de grano del orden de unos pocos nanómetros, típicamente desde 1 hasta 100 nm en al menos una dimensión. Dado que los tamaños de grano son tan pequeños, un volumen significativo de la microestructura de estos materiales se compone de interfaces, principalmente los límites de grano. Esto significa que una gran fracción en volumen de átomos reside en los límites de grano. En consecuencia, exhiben propiedades que son significativamente diferentes y mejores comparado con sus homólogos. En comparación con un material con un tamaño de grano convencional, es decir, más grande que unos pocos micrómetros, los materiales nanocristalinos muestran mayor resistencia, alta dureza, ductibilidad, velocidades de difusión extremadamente altas y estabilidad térmica por lo que son ampliamente usados como materiales para la fabricación de partes y equipos ¹⁷⁷.

¹⁷⁷SURYANARAYANA, C. *Nanostructured Materials*. En: SURYANARAYANA, C. *Mechanical Alloying and Milling*. New York: EEUU, 2004. p. 333.

5.1.2. Clasificación de los materiales nanoestructurados. Los materiales nanoestructurados se pueden clasificar en diferentes categorías en función del número de dimensiones en las que el material tiene modulaciones en nanómetros. Por lo tanto, se pueden clasificar en 1) estructuras laminares o en capas, 2) estructuras filamentosas, y 3) materiales nanoestructurados equiaxiales ¹⁷⁸.

Una estructura en capas o laminar es una nanoestructura dimensional (1-D) en el que la magnitud de longitud y la ancho es mucho mayor que el espesor, que es de sólo unos pocos nanómetros. También se puede visualizar una forma de tubo nanoestructurado bidimensional (2-D) que puede denominarse como filamentosos y en este la longitud es sustancialmente mayor que el ancho y diámetro, que son de dimensiones nanométricas. La más común de las nanoestructuras, sin embargo, es básicamente equiaxial (las tres dimensiones son de tamaño nanométrico) y se denominan como cristales nanoestructurados ¹⁷⁹.

Los materiales nanoestructurados pueden contener fases cristalinas, cuasi cristalinas, o amorfas y pueden ser de metal, cerámica, polímero, o de material compuesto. Si los granos se componen de cristales, el material se llama nanocristalino; y este es la variedad más común de materiales nanoestructurados. Por otro lado, si los granos están compuestos por fases amorfas (vítreos) o fases cuasi-cristalinas, se denominan como *nanoglasses* y nano-cuasi-cristalinos, respectivamente ¹⁸⁰.

5.1.3. Síntesis de los materiales nanoestructurados. Los materiales nanoestructurados se han sintetizado por una serie de técnicas que tienen como partida una fase de vapor, fase líquida, o de estado sólido. Dos enfoques principales han sido tomados para sintetizar materiales nanocristalinos. Uno de ellos es

¹⁷⁸Ibíd., p. 334.

¹⁷⁹Ibíd., p. 334.

¹⁸⁰Ibíd., p. 334.

el *Top-Down* en el que un material a granel con tamaños de grano grueso convencionales se reduce a un tamaño de grano que alcanza las dimensiones nanométricas. Métodos de aleación/trituración mecánica caen en esta categoría. El otro enfoque, *Bottom Up*, en el que pequeños grupos de material con dimensiones nanométricas se producen, y estos son luego consolidados para producir el material nanoestructurado. Solidificación rápida, procesamiento plasma, autoignición caen en esta categoría ¹⁸¹.

De todos los métodos indicados anteriormente, la aleación mecánica (MA, por sus siglas en inglés) se ha utilizado más ampliamente para sintetizar materiales nanocristalinos. Esto se debe esencialmente al hecho de que es una técnica a temperatura ambiente muy simple que permite la producción de estructuras nanocristalinas en casi cualquier tipo de material. La técnica requiere relativamente equipos simples y de bajo costo, y también es posible producir cantidades a granel de material en estado sólido ¹⁸².

5.1.4. Nanocompuestos. Los nanocompuestos son una nueva clase de materiales en los que al menos una de las fases (matriz, refuerzo, o ambos) es de dimensiones nanométricas. Se clasifican generalmente en base a la matriz (por ejemplo, compuestos de matriz metálica, de matriz cerámica, o de matriz polimérica) ¹⁸³.

Otro método de clasificación se basa en la microestructura. Se pueden dividir en cuatro categorías: intragranular, intergranular, híbridos y nano/nano. En los primeros tres tipos, la fase de refuerzo está en el nivel nanométrico mientras que la matriz no lo está. Sin embargo, en la última categoría, tanto la matriz y el refuerzo son de dimensiones nanométricas y éstos dos componentes están distribuidos al azar. En el tipo intergranular (Figura 17,A), el refuerzo de tamaño nanométrico se distribuye a lo largo de los bordes de grano de la fase de matriz de tamaño micrométrico. En el tipo

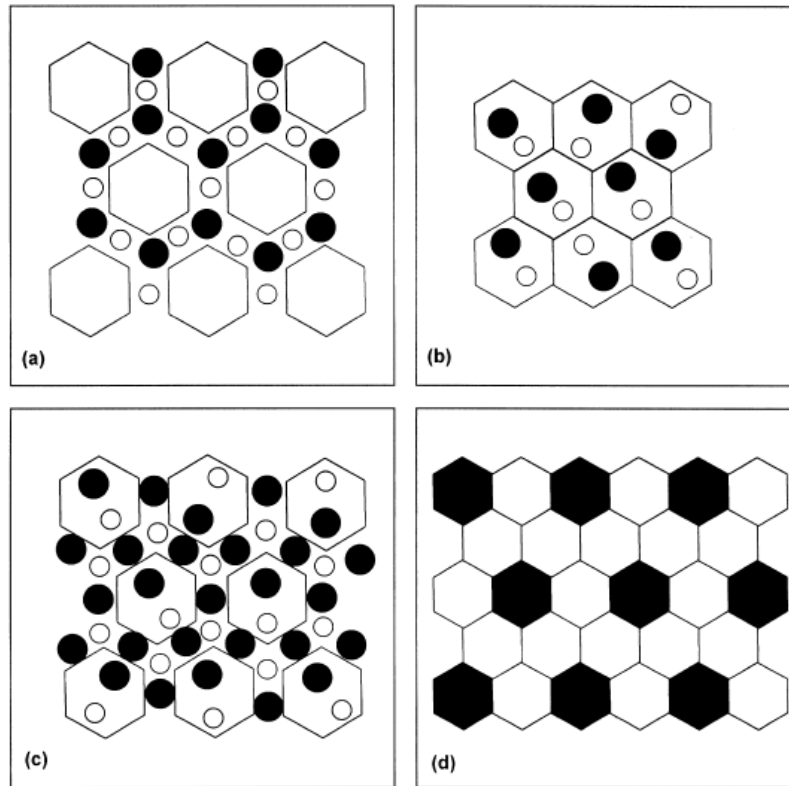
¹⁸¹Ibíd., p. 335.

¹⁸²Ibíd., p. 336.

¹⁸³Ibíd., p. 346.

intragranular (Figura 17,B), el refuerzo está contenido en los granos de mayor tamaño de la matriz, mientras que en el tipo híbrido (Figura 17,C), el refuerzo está tanto en el interior de los granos como a lo largo de los bordes de grano de la matriz ¹⁸⁴.

Figura 17. Clasificación de los nanocompuestos



Fuente: SURYANARAYANA, C. *Nanostructured Materials*. En: SURYANARAYANA, C. *Mechanical Alloying and Milling*. New York: EEUU, 2004. p. 347.

Estos nanocompuestos exhiben propiedades de alta resistencia, resistencia a la fractura, rigidez, resistencia al desgaste, y a altas temperaturas en comparación con sus contrapartes en tamaño macro, por lo que son grandes candidatos para la fabricación de partes y equipos ¹⁸⁵.

¹⁸⁴Ibíd., p. 347.

¹⁸⁵Ibíd., p. 348.

5.2 APLICACIÓN

5.2.1. Aplicación en el área de Perforación y Producción. *Desarrollo de piezas y equipos a base de materiales más ligeros y resistentes.*

A medida que la industria del Petróleo y Gas se traslada a las terminaciones más desafiantes y perforación ultra profunda de pozos a alta presión, se requieren nuevas tecnologías para aumentar la fiabilidad, aumentar al máximo el rendimiento y la minimización de los costos operativos ¹⁸⁶.

El desarrollo de materiales nanoestructurados metálicos (MSDS, por sus siglas en inglés) con alta resistencia a la deformación, al desgaste y falla es una de estas tecnologías. Estos son una familia de materiales ultraligeros, altamente resistentes, altamente deformables para la fabricación y manufactura de piezas y equipos únicos que permiten el desarrollo de diferentes operaciones sin la necesidad de algún tipo de intervención al equipo en campos petroleros comunes, lo que reduce el tiempo no productivo del campo y a su vez, elimina los riesgos de producción proporcionados por el desarrollo de las diferentes operaciones. Pueden diseñarse dependiendo de las necesidades requeridas en cada aplicación ¹⁸⁷.

Estos incorporan una alta resistencia a la compresión y a mecanismos que los deforman. Permiten el desarrollo, por ejemplo, de válvulas gas lift (GLV, por sus siglas en inglés). También permite el desarrollo de bolas de disparo ligeras, capaces de soportar presiones de hasta 15 ksi, con densidades comparables a los materiales fenólicos más débiles ¹⁸⁸.

¹⁸⁶CARREJO, N.; ESPINOZA, O. R., WIBOWO, H y GAUDETTE, S. L. *Developing A New High-Strength, Lightweight Material Using Nano-Coated Smart Materials for Oilfield Applications*. Offshore Technology Conference. 2015. OTC-26282-MS. p. 1.

¹⁸⁷Ibíd., p. 2.

¹⁸⁸Ibíd., p. 4 - 5.

NANOREVESTIMIENTOS

6.1 CONCEPTOS

6.1.1. ¿Qué es un revestimiento?. Un revestimiento o recubrimiento es un material que es depositado sobre la superficie de un objeto, denominado por lo general, como sustrato. Se utilizan para mejorar la resistencia contra diferentes agentes ambientales tales como diversos tipos de corrosión, crear nueva compatibilidad de las superficies, aumentar la dureza, y mejorar algunas de las características físicas, tales como los magnéticas y eléctricas ¹⁸⁹

6.1.2. Características de los nanorevestimientos. Nanoestructuras conformadas por una disposición de nanomateriales bi-dimensionales en forma de láminas delgadas, se denominan como nanorevestimientos o revestimientos nanoestructurados ¹⁹⁰.

¹⁸⁹ALIOFKHAZRAEI, Mahmood. *Nanocoatings: Size Effect in Nanostructured Films*. New York, EEUU: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. 251 p. ISBN 978-3-642-17965-5. p. 17.

¹⁹⁰Ibíd., p. 29.

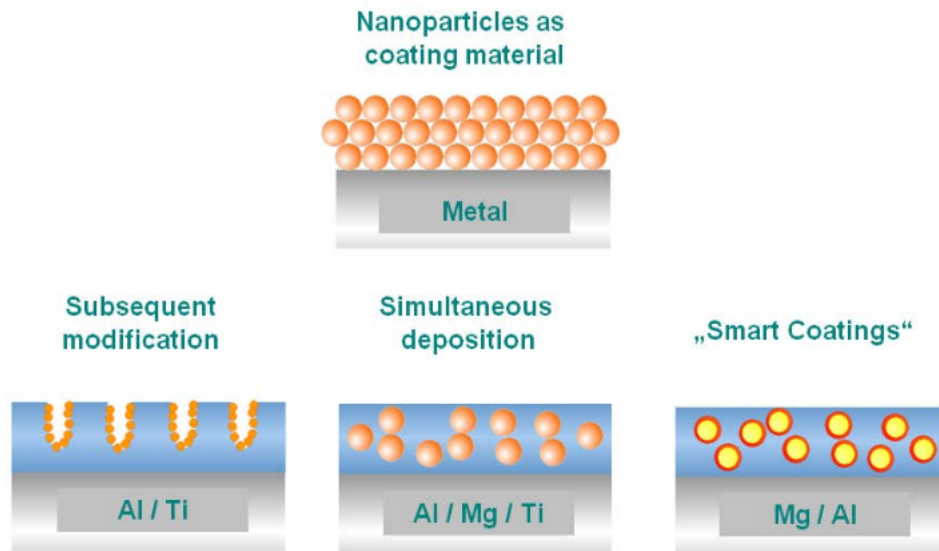
6.1.3. Síntesis de los nanorevestimientos. Los nanorevestimientos se producen a través de pulverización térmica, proceso que se basa en la deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés) y deposición física de vapor (PVD, por sus siglas en inglés) de un material en una matriz amorfa ¹⁹¹.

El material del revestimiento se calienta en un ambiente gaseoso y es rociado hacia la superficie de la matriz en forma de gotas fundidas a una alta velocidad. Debido a golpes, las gotas se establecen en una forma homogénea en la superficie y transmiten su temperatura inicial a la matriz fría por lo que rápidamente cambian a estado sólido (Figura 18). Materia prima aplicable en estos métodos incluyen nanopulvos, nanohilos y nanorods. Presentan mayor resistencia a la abrasión, dureza, estabilidad térmica, apariencia estética, y neutralidad química en comparación con los microrevestimientos ¹⁹².

¹⁹¹Ibíd., p. 29.

¹⁹²Ibíd., p. 30.

Figura 18. Síntesis de los nanorevestimientos



Fuente: FUERBETH, W. *New Coatings for Corrosion Protection Using Nanoparticles or Nanocapsules*. NACE International. 2015. NACE-2015-5554. p. 2.

6.1.4. Propiedades de los nanorevestimientos. Propiedades asociadas a la estructura cristalina del nanorevestimiento revelan que se pueden clasificar en dos grupos:

1. *Características del recubrimiento que dependen directamente del tamaño de grano*, incluyen: resistencia a la abrasión, maleabilidad, dureza, coeficiente de fricción, resistencia eléctrica, solubilidad de hidrógeno, permeabilidad, resistencia al desgaste en forma local y estabilidad térmica.
2. *Propiedades que están débilmente influenciadas por el tamaño de grano*, incluyen: densidad aparente, expansión térmica y módulo de Young ¹⁹³.

¹⁹³Ibíd., p. 47.

6.2 APLICACIÓN

6.2.1. Aplicación en el área de Perforación y Producción. *Extensión de la vida útil del equipo por mejoramiento en la resistencia a la corrosión y al desgaste.* Los equipos de perforación y producción están expuestos a diferentes elementos, tales como, los fluidos de perforación, los fluidos producidos, formaciones abrasivas, bacterias, altas temperaturas y altas presiones, altas cargas de impacto, entre otros, los cuales los desgastan y corroen, lo cual limita su longevidad o tiempo útil ¹⁹⁴.

Estudios de investigación muestran el desarrollo y aplicación de diferentes nanorevestimientos con el fin de mejorar la resistencia a la corrosión y el desgaste en los equipos de perforación y producción y así, extender su longevidad ¹⁹⁵.

Estos nanorevestimientos se forman a partir de dispersión uniforme de nanopartículas en una matriz metálica formando un revestimiento ultra-delgado con un espesor menor a 100 nm. Dependiendo de la aplicación deseada, el material, tipo de nanopartículas, la composición del revestimiento puede variar, por lo tanto, su eficiencia. Tales revestimientos pueden incluir un material sintetizable, incluyendo, por ejemplo, metales, aleaciones metálicas, materiales cerámicos y cermets ¹⁹⁶.

Los tipos de nanopartículas que se pueden encontrar en la fase de matriz pueden incluir diversas partículas de carburos, nitruros, boruros, y / o carbonitruros de zinc, cromo, bario, entre otros, así como compuestos metálicos formados con Ni, Co, y Fe ¹⁹⁷.

¹⁹⁴SMITH INTERNATIONAL INC. *Hardmetal for Use in Oil and Gas Drilling Applications*. Inventores: KESHAVAN, Madapusi K y LIANG, Dah-Ben. E21B 10/36. Fecha de Solicitud: 24 Septiembre, 2009. Estados Unidos. Concesión. Patente No. US 8561731 B2. Fecha de Publicación: 22 Octubre, 2013. p. 9.

¹⁹⁵Ibíd., p. 9.

¹⁹⁶Ibíd., p. 9.

¹⁹⁷Ibíd., p. 11.

NANOMEMBRANAS

7.1 CONCEPTOS

7.1.1. Materiales nanoporosos. Los materiales nanoporosos son un subconjunto de nanomateriales que poseen propiedades únicas: gran área superficial en relación del volumen, alta superficie interior, tamaño de tamizado exclusivo y selectividad de forma, confinamiento espacial nanométrico, y permeabilidad específica. Estos ofrecen propiedades sinérgicas que nunca pueden ser alcanzados por los compuestos puros. En consecuencia, estos materiales son de importancia científica y tecnológica, así como de un considerable interés en una amplia gama de aplicaciones que incluyen clasificación, detección, aislamiento y liberación ¹⁹⁸.

De acuerdo con la IUPAC (INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY) , los materiales nanoporosos pueden ser subdivididos en materiales microporosos ($\leq 2nm$), materiales mesoporosos ($2-50nm$) y macroporosos ($50-1000nm$). Se consideran uniformes si la distribución del tamaño y la forma del poro es

¹⁹⁸LI, Li. *Nanoporous Polymers for Membrane Applications*. Tesis, Doctorado en Ingeniería Química. Kongens Lyngby, Dinamarca: Technical University of Denmark. Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. 2012. p. 4.

relativamente homogénea. Los poros pueden ser cilíndricos, cónicos, en forma de hendidura, o de forma irregular. Pueden estar ordenados con una alineación en lugar de una red aleatoria de poros ¹⁹⁹.

7.1.2. Características de las membranas. Cada proceso de separación se caracteriza por el uso de una membrana para lograr una separación en particular. El objetivo es permitir que uno o más componentes de una mezcla penetren la membrana mientras que la eliminación de uno u otros componentes es producida permitiendo la purificación del producto. Esta membrana se puede considerar como una barrera de permeabilidad selectiva entre dos fases ²⁰⁰.

La capacidad para transportar selectivamente los componentes se atribuye a diferencias en las propiedades físicas o químicas entre la membrana y los componentes que la penetran. El transporte pasivo a través de membranas tiene lugar cuando una fuerza impulsora se aplica, es decir, un gradiente de potencial químico a través de la membrana, por ejemplo, concentración, presión, potencial eléctrico o temperatura ²⁰¹.

7.1.3. Características de las nanomembranas. En la literatura, una nanomembrana es una membrana conformada por materiales nanoporosos que tienen típicamente un diámetro de poro entre 1 nm y 1000 nm. La estructura de barrera de las nanomembranas se puede clasificar de acuerdo con su carácter poroso (Tabla 4). En consecuencia, varios procesos pueden llevarse a cabo basados en la estructura de la barrera mediante el uso de diferentes fuerzas impulsoras ²⁰².

¹⁹⁹Ibíd., p. 4.

²⁰⁰Ibíd., p. 10.

²⁰¹Ibíd., p. 10.

²⁰²Ibíd., p. 11.

Tabla 4. Clasificación de los procesos de la nanomembrana de acuerdo a la estructura y fuerzas impulsoras

<i>Estructura</i>	<i>Tamaño del Poro</i>	<i>Fuerza Impulsora</i>		
		<i>Concentración</i>	<i>Presión</i>	<i>Campo Eléctrico</i>
<i>No Porosa</i>		Pervaporación	Separación de Gas Ósmosis Inversa	Electro-diálisis
<i>Microporosa</i>	$\leq 2nm$	Diálisis	Nanofiltración	
<i>Mesoporosa</i>	2–50nm	Diálisis	Ultrafiltración	Electro-diálisis
<i>Macroporosa</i>	50–500nm		Microfiltración	

Fuente: LI, Li. *Nanoporous Polymers for Membrane Applications*. Tesis, Doctorado en Ingeniería Química. Kongens Lyngby, Dinamarca: Technical University of Denmark. Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. 2012. p. 12.

7.2 APLICACIÓN

Actualmente en la literatura no existen muchos estudios basados en la aplicación de nanomembranas en la industria energética, esto se debe a que esta tecnología no ha sido muy explorada por lo que aún se encuentra en desarrollo y por lo tanto, requiere una ampliación del conocimiento acerca de sus dimensiones e interacción, tecnologías para la producción de estas en grandes cantidades, y colección de datos de rendimiento y eficiencia a escala de ingeniería, ya que según sus pioneros las nanomembranas tendrán un gran impacto en el desarrollo de celdas de combustible, paneles solares, reactores catalíticos²⁰³ y, secuestro de CO_2 , remoción de sustancias tóxicas, filtración de impurezas en aguas de producción y crudos producidos, remoción

²⁰³HU, Michael. *Architecture Nanomembranes in situ Energy Conversion Technologies*. US. DEPARTMENT OF ENERGY. 2012.

de escamas y precipitados, inhibición de bacterias y separación de emulsiones ²⁰⁴.

7.2.1. Aplicación en el área de Producción. *Filtración del agua de inyección.* La presencia de ácido sulfúrico (H_2S) en los líquidos y gases producidos se ha vuelto un problema para muchos campos en el mundo. En la mayoría de los casos, los yacimientos son inicialmente designados como “dulces”, debido a que no contienen ácido sulfúrico. Consecuentemente los sistemas de producción empiezan a presentar problemas de corrosión. La generación de ácido sulfúrico en muchos casos se debe a la actividad de bacterias reductoras de sulfato (SRB, por sus siglas en inglés), las cuales son un grupo de microorganismos que habitan en ambientes acuosos ²⁰⁵.

Los principales nutrientes para SRB son ácidos orgánicos simples e hidrógeno molecular. Los nutrientes son oxidados a través de la reducción de sulfato a sulfuro (ácido sulfúrico). El agua de mar tiene una alta concentración de sulfatos, por lo que provee condiciones favorables para el crecimiento de SRB cuando es inyectada en los yacimientos. Además, esta alta concentración puede conllevar a problemas debido a escamas tales como $BaSO_4$ y $SrSO_4$ ²⁰⁶.

El agua inyectada en pozo productores es usualmente tratada con químicos que reducen el potencial de acidificación y escamas, pero su aplicación en proyectos de inyección no sólo es costosa, también presenta consideraciones ambientales de importancia ²⁰⁷.

Una forma alternativa para el control de la actividad de SRB es el control de los factores biológicos que los favorecen. Uno de estos factores es la concentración de sulfatos en el agua de inyección. Una reducción de esta concentración reducirá los problemas de

²⁰⁴KONG, Xiangling y OHADI, Michael. Op. cit., p. 5 – 6.

²⁰⁵SELAND, A.; TORLEIV, B., SURINDER, M y BAKKE, R. *Membrane Filtration of Seawater for Oil Reservoir Injection*. Society of Petroleum Engineers. 1992. SPE-24805-MS. p. 407.

²⁰⁶Ibíd., p. 407.

²⁰⁷Ibíd., p. 407.

escamas y también limitará la actividad de SRB y, consecuentemente el potencial de precipitación. Filtración por nanomebranas puede ser aplicado en miras de reducir la concentración en el agua, en especial el agua de mar de campos *off-shore* ²⁰⁸.

El proceso consiste en dejar fluir el agua de inyección a través de la nanomembrana, lo que filtra las impurezas, incluyendo los sulfatos, esto conlleva a la formación de una “retorta” a lo largo de la membrana y al flujo de una corriente de agua libre de impurezas. Estas nanomembranas tienen un alto grado de retención de moléculas orgánicas y aniones di-multivalentes comparado a sus homólogos, pero dependen del tipo de nanomaterial del cual fue sintetizado la nanomebrana ²⁰⁹.

²⁰⁸Ibíd., p. 407.

²⁰⁹Ibíd., p. 408 – 409.

NANOCATALIZADORES

8.1 CONCEPTOS

8.1.1. ¿Qué es un catalizador?. Los catalizadores proporcionan mejoras en la velocidad de reacción y selectividad del producto mediante la reducción de la energía de activación por el cual se producen reacciones químicas. Generalmente reaccionan con uno o más de los reactivos que forman productos intermedios, y conducen al producto final de la reacción. Una amplia variedad de sustancias químicas muestra actividad catalítica, pero la mayoría de procesos industriales emplean catalizadores heterogéneos ²¹⁰.

Los catalizadores heterogéneos están conformados por tres componentes elementales: el soporte, el metal activo y el promotor ²¹¹.

²¹⁰KROPF, A. J.; MILLER, J. T., MARSHALL, C. L. y NEYLON, M. K. *X-Ray Absorption Studies of Catalyst Nanostructures*. En: SCHWARZ, A.; CONTESCU, Cristian y PUTYERA, Karol. Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Volume 6. New York, EEUU: Marcel Dekker, Inc., 2004. p. 750 – 765. ISBN: 978-1-4398-3439-8. p. 755.

²¹¹HERNANDEZ GARCÍA, Paola. *Síntesis y Evaluación de Catalizadores Soportados en Óxidos Mixtos en la Hidrosulfuración de Tiofeno*. Tesis, Ingeniero Químico Petrolero. México, D.F: Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. 2008. p. 6.

El soporte es la matriz sobre la cual se deposita la fase activa, que se forma durante el proceso de preparación del catalizador. Por lo general son materiales porosos y entre los más comunes se encuentran: carbón, silicio, aluminio, zeolitas, magnesio, titanio, aluminio-silicio, aluminio-magnesio, aluminio-titanio, entre otros. La diferencia que se puede presentar en los distintos tipos de soportes es en la actividad catalítica ^{*}, ya que ésta se debe a diversos factores tales como: la existencia de enlaces químicos del metal activo con el soporte, la diferencia de tipos de sitios activos, la estructura física del soporte, la morfología de la fase activa, entre otros ²¹².

El metal activo es el responsable de la actividad catalítica. El promotor es aquella sustancia que, incorporada al metal activo o al soporte en pequeñas proporciones, permite mejorar las características del catalizador en cualquiera de sus funciones: actividad, estabilidad ^{*} o selectividad. Se conocen dos tipos de promotores, los texturales, que contribuyen a dar mayor estabilidad a la fase activa, y los electrones, que incrementan la actividad ²¹³.

Se preparan típicamente por impregnación del soporte con una solución que contiene un el metal activo, seguido por tratamiento térmico o calcinación para eliminar el agua y convertir la sal metálica a una fase compatible que se transforma fácilmente en una fase activa bajo condiciones de reacción ²¹⁴.

8.1.2. Características de los nanocatalizadores. Los nanocatalizadores heterogéneos se componen de partículas de tamaño nanométrico de metal, óxido de metal o sulfuros de metal (*metal activo*) soportados en materiales porosos de gran área

* Relacionada con la velocidad de reacción química o consumo de metano.

²¹²Ibíd., p. 7.

* Relacionada al rendimiento y refleja la contribución relativa de las reacciones secundarias frente a la deseada o principal.

²¹³Ibíd., p. 7.

²¹⁴KROPF, A. J.; MILLER, J. T., MARSHALL, C. L. y NEYLON, M. K. Op. cit., p. 755.

superficial (*soporte*).²¹⁵.

8.1.3. Preparación del nanocatalizador. Aunque hay muchos métodos para la preparación de nanocatalizadores, las nanopartículas catalíticas son más a menudo preparadas por disolución de los componentes del metal en un solvente adecuado y en contacto con un soporte de gran área superficial. Posteriormente, el solvente se seca y las sales de metal pueden ser tratadas térmicamente, reducidas, oxidadas, o sulfuradas. Muchos de los nanocatalizadores incluyen promotores metálicos y no metálicos que alteran significativamente su actividad, selectividad, o estabilidad. El grado de interacción del promotor con el componente activo está a menudo determinada por la elección de los compuestos de metal y pretratamiento durante la síntesis²¹⁶.

8.1.4. Pretratamiento del nanocatalizador. Una vez que las nanopartículas de metal se depositan sobre el soporte, el nanocatalizador generalmente se trata antes de la reacción, para producir el estado activo del nanocatalizador o, al menos, para producir una fase activa que se transforma fácilmente en el nanocatalizador bajo condiciones de reacción. Las condiciones de pretratamiento típicas se establecen con el fin de aumentar la temperatura en el aire (o gas inerte), seguido por reducción de los metales en hidrógeno, oxidación en el aire, o sulfuración con H_2S ; las cuales a menudo afectan la actividad del nanocatalizador²¹⁷.

²¹⁵Ibíd., p. 755.

²¹⁶Ibíd., p. 756.

²¹⁷Ibíd., p. 758.

8.1.5. Parámetros que afectan las propiedades catalíticas. Los nanocatalizadores tienen un área superficial muy grande lo que tiene un efecto positivo directo en la tasa de la reacción. Sin embargo, hay propiedades a la escala nanométrica basadas en la estructura y forma, que también pueden afectar a la actividad catalítica de un material. Estas se describen a continuación ²¹⁸

Efectos del tamaño de las partículas. Hay varios factores que mejoran en la actividad catalítica debido al tamaño de las nanopartículas, por ejemplo, el aumento de la relación de superficie a volumen, la presencia de las altas densidades en los átomos coordinados y la carga electrónica, facilitan la disociación de los reactivos o estabilización de especies intermedias de reacción, y el cambio de la configuración local del sitio de adsorción ²¹⁹.

El rendimiento de un catalizador heterogéneo depende fuertemente de la capacidad de la superficie para unirse de manera eficiente con los reactivos, estabilizar los intermedios deseados, y liberar eficazmente los productos. Estas propiedades están determinadas por la resistencia de la unión de la superficie y especies adsorbidas y, por las estabilidades termodinámicas relativas de los intermedios ²²⁰.

Efectos de la distancia entre partículas. Aunque el tamaño de partícula se puede controlar bien a través de los diferentes métodos de síntesis, el control de la distancia entre partículas sigue siendo difícil. Este factor puede desempeñar un papel en la determinación de la reactividad de las nanopartículas. Grandes distancias entre partículas conducen a una estabilidad mayor contra la aglomeración y, por lo tanto, a una mayor vida útil del catalizador ²²¹.

²¹⁸SADJADI, Sodeh. *Catalysis: Nanoparticles and Catalysis*. En: ILDUSOVICH KHARISOV, Boris.; VASILIEVNA KHARISSOVA, Oxana y ORTIZ-MENDEZ, Ubaldo. CRC Concise Encyclopedia of Nanotechnology. Taylor & Francis Group, LLC. 2016. ISBN: 978-1-4665-8089-3. p. 123.

²¹⁹Ibíd., p. 123.

²²⁰Ibíd., p. 123.

²²¹Ibíd., p. 124.

Efectos en la forma de las partículas. El rendimiento de los nanocatalizadores está estrechamente asociado a la morfología de las partículas. La actividad catalítica mejora mediante la alteración de la forma de las nanopartículas. En particular, el control morfológico de las nanopartículas puede exponer selectivamente los planos reactivos de los cristales, y por lo tanto diferentes reactividades y selectividades pueden ser obtenidos en distintas facetas ²²².

Efectos del soporte. Un problema importante en la utilización de nanopartículas es su fuerte tendencia a formar aglomerados, lo que disminuye, sin duda, la actividad catalítica debido al crecimiento de grano o no disponibilidad de la gran área de superficie. La aglomeración se puede prevenir en la sintetización del nanocatalizador a través de diversas técnicas, pero la técnica más sencilla y fiable es soportar las nanopartículas en materiales sólidos ²²³.

8.2 APLICACIÓN

8.2.1. Aplicación en el área de Producción. Mejoramiento y recuperación in-situ de crudos pesados. Grandes cantidades de petróleo pesado y bitumen se encuentran en Canadá, Venezuela y los Estados Unidos. Estos recursos de petróleo pesado y bitumen se caracterizan por tener bajas gravedades específicas ($0 - 18^\circ\text{API}$), viscosidades elevadas ($> 100,000\text{cp}$), y alto contenido de azufre (por ejemplo, $> 5\%$ en peso). Como resultado, estos recursos son difíciles y costosos de refinar en productos vendibles ²²⁴.

²²²Ibíd., p. 126.

²²³Ibíd., p. 126.

²²⁴WORLD ENERGY SYSTEM, INC. Process for Dispersing Nanocatalysts into Petroleum-Bearing Formations. Inventores: LANGDON, John y WARE, Charles H. E213 43/24. Fecha de Solicitud: 18 Enero, 2008. Estados Unidos. Concesión. Patente No. US 7712528 B2. Fecha de Publicación: 11 Mayo, 2010. p. 9.

La pirólisis se produce cuando el crudo se quiebra térmicamente a temperaturas de más de aproximadamente 650°F. Aunque la pirólisis reduce la viscosidad del crudo, a veces de manera espectacular, a menudo resulta en la formación de grandes cantidades de coque. Esta reacción térmica también provoca un aumento deseable en la gravedad API, pero tiene poco efecto sobre el azufre y tiende a aumentar el número de ácido total, lo que reduce considerablemente el valor del crudo a las refinerías. Para superar estas limitaciones, es útil mejorar en forma *in-situ* el crudo pesado antes de que sea producido en los pozos ²²⁵.

Estudios han mostrado que hacer fluir un material catalítico que contiene un nanocatalizador y un agente reductor en la formación que contiene el crudo pesado/bitumen permite su mejoramiento (*upgrading*). El método consiste en la exposición del crudo pesado con el nanocatalizador en la formación, después es calentado a través de un generador de vapor colocado dentro de la formación a una temperatura de menos de 600°F aproximadamente, esto causa reacciones como las que se producen en las refinerías y permite obtener productos más ligeros dentro de la formación, y consecuentemente su extracción ²²⁶.

La mezcla del agente reductor con el nanocatalizador, una vez es inyectado en la formación y se combina con el crudo pesado, promueve la transformación y el mejoramiento, incluyendo una reducción del contenido de azufre, debido a que la reacción generada por la acción del nanocatalizador y el calor inducido reduce su viscosidad, concentración de impurezas de azufre, y el aumento de su gravedad API, permitiendo la producción de productos más ligeros. Estos son recuperados en superficie y pueden llegar a tener una concentración de azufre de aproximadamente 30 % - 50 % en peso menor a la del crudo ²²⁷.

²²⁵Ibíd., p. 9.

²²⁶Ibíd., p. 14.

²²⁷Ibíd., p. 15.

8.2.2. Aplicación en el área de Refinación y Procesamiento. A medida que la industrialización se expande a nivel mundial, la demanda de petróleo como fuente de energía y como materia prima de productos que disfrutan los consumidores aumenta necesariamente. Esta demanda ejerce presión en alta calidad de los suministros de petróleo que puedan conseguirse fácilmente ²²⁸.

Dado que la tecnología catalítica es la clave para el refinado de petróleo y procesamiento petroquímico, y los catalizadores son el núcleo de ésta, el desarrollo de nuevos catalizadores tendría un gran impacto en el refinado de petróleo y la industria petroquímica. Los nanomateriales ofrecen muchas posibilidades como catalizadores para satisfacer las demandas futuras en esta tecnología ²²⁹

Conversión efectiva de hidrocarburos (incluyendo crudos pesados y crudos ácidos) en combustibles limpios. Con el fin de minimizar los efectos negativos en la salud y en el ambiente generados por las emisiones de los automóviles, las restricciones legales sobre el contenido de azufre, contenido de oxígeno, presión de vapor, contenido total de compuestos aromáticos, contenido de olefinas, índice de cetano y densidad de combustibles son cada vez más estrictas. Procesos tales como craqueo catalítico, hidrodesulfuración y hidrocaqueo son aplicados en plantas de refinación con el fin de tratar las corrientes (crudos pesados, livianos y cortes de destilación) que forman los combustibles y así cumplir con los requerimientos. Todos estos procesos usan catalizadores para su funcionamiento, pero presentan ciertas limitaciones ²³⁰

²²⁸PETORAZA SAS. *Nanocatalysts for Hydrocracking and Methods of Their Use*. Inventores: PATIÑÓ, José Edgar y CORTÉS, Farid Bernardo. B01J 37/03. Fecha de Solicitud: 5 Junio, 2013. Colombia. Aplicación. Patente No. WO 2013183004 A2. Fecha de Publicación: 12 Diciembre, 2013. p. 1.

²²⁹KING ABDULAZIZ CITY FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY RIYADH. *Nanocatalyst for Conversion of Monoolefins, Process for Conversion of Monoolefins and Process for Preparing Catalyst*. Inventores: AL-KINANY, Mohammed.; AL-KHOWAITER, Soliman., AL-DREES, Saud., ALSHEHRY, Feras y AL-RASHEED, Rasheed. B01J 23/882. Fecha de Solicitud: 8 Diciembre, 2010. Europa. Aplicación. Patente No. EP20100194156. Fecha de Publicación: 15 Junio, 2011. p. 2.

²³⁰RESEARCH INSTITUTE OF PETROLEUM INDUSTRY. *Hydrodesulphurization Nanocatalyst, Its Use and a Process for its Production*. Inventores: AMINI, Bahman.; KHERIROLLAH, Jozani., MANSOUR, Kalbasi., KHORAMI, Payman., MOHAJERI, Ali., PARVIZ, Dorsa., RASHIDI, Alimorad. B01J 23/75. Fecha de Solicitud: 2 de Diciembre, 2008. Europa. Aplicación. Patente No. EP2196260A1. Fecha de Publicación: 16 de Junio, 2010. p. 2.

Por ejemplo, en el proceso de hidrodesulfuración se usan catalizadores en presencia de cantidades sustanciales de hidrógeno, a altas presiones y temperaturas, con el fin de promover la reacción del hidrógeno con las impurezas de la carga. En este, la fracción hidrocarbúrica es mezclada con hidrógeno y pasada por el catalizador con el fin de romper los enlaces de carbono-azufre presentes en el material a tratar y saturar con hidrógeno las valencias libres resultantes o los dobles enlaces olefínicos ²³¹.

Sin embargo, no son capaces de producir combustibles con un nivel cero de azufre, mientras que se mantiene otros requisitos de los combustibles debido a sus bajas capacidades de absorción, propiedades eléctricas y térmicas casi nulas y, también su química superficial no es controlable ²³².

Estudios de investigación han mostrado que implementar nanocatalizadores a estos procesos, permite una mayor reducción del contenido de azufre, contenido de oxígeno, presión de vapor, contenido total de compuestos aromáticos, contenido de olefinas, índice de cetano y densidad en las corrientes comparado con catalizadores convencionales, esto se debe a la gran área superficial de los nanomateriales, la cual permite una mayor dispersión de los metales activos sobre el material de soporte, esto mejora la actividad catalítica, por lo tanto, la eficiencia de la reacción generada en cada proceso, lo que permite obtener combustibles más limpios y ecológicos ²³³.

²³¹DÁVILA VIVAS, Keidy.; DUGARTE, María de los Ángeles., GUTIERREZ, Mileidys., MUÑOZ, Cintia. *Planta de Hidrodesulfuración para reducir la cantidad de compuestos azufrados presentes en crudo pesado*. Tesis, Químico Industrial. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Química Aplicada. Escuela de Ingeniería Química. 2012. p. 20.

²³²RESEARCH INSTITUTE OF PETROLEUM INDUSTRY. Op. cit., p. 2.

²³³Ibíd., p. 8.

NANOTECNOLOGÍA EN COLOMBIA

Se prevé que en el año 2020 la Nanotecnología facturará USD 3 trillones a nivel mundial. Lo anterior es consecuencia de resultados históricos. Como ejemplo, en el año 2009, el mercado global de productos que involucran Nanotecnología alcanzó la cifra de USD 254 millones, previéndose un crecimiento a una tasa promedio anual del 23% para los próximos 10 años. EEUU y la Unión Europea sumaban el 67% de dicho mercado, mientras que Asia el 27%. El porcentaje restante, un 6%, equivalente a unos USD 15 millones, correspondía al resto de países del mundo los cuales cuentan con una menor apropiación y/o desarrollo de la Nanotecnología, entre los cuales se incluye Colombia²³⁴.

La tendencia de la innovación en Nanotecnología puede evaluarse bien sea por la dinámica de artículos y patentes o por las cifras de ventas de productos que incorporan Nanotecnología. En el primer caso, por ejemplo, datos muestran que en el período 1990-2008, cerca de 17.600 compañías en el mundo publicaron unos 52.100 artículos científicos y aplicaron para unas 45.050 patentes en el dominio de la Nanotecnología. En relación con las ventas de productos, por ejemplo, en el año 2009,

²³⁴M. C., Rocco.; C. A., Mirkin y M. C., Hersam. *Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020: Retrospective and Outlook*. World Technology Evaluation Center Report. 2010. p. 476.

las ventas totales en Nanotecnología ascendieron a unos USD 254 billones ²³⁵.

En este contexto, no sólo para Colombia, sino en cualquier economía emergente, investigaciones aplicadas basadas en Nanotecnología, deberían ser la base de proyectos, programas y actividades que contribuyan a la promoción del desarrollo nacional. Tomando como referente el caso de países donde la Nanotecnología efectivamente ha contribuido en mayor o menor medida a incrementar los niveles de competitividad y de desarrollo, esto debido a la implementación de una plataforma nacional en Nanotecnología claramente focalizada ²³⁶.

Principales economías, tanto del primer mundo como de los países emergentes con un acelerado ritmo de crecimiento, tienen en común interesantes niveles de inversión en ACTI (*Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación*) como porcentaje de su PIB (*Producto Interno Bruto*). En Estados Unidos es del 2,8 % y el 3,4 % en Japón. La Unión Europea (UE) con un 1,96 %, siendo superada por China; que alcanzó el 1,98 %, proyectándose a un 2,5 % al 2020. Con inversiones igualmente considerables, están Israel con un 4 %; así como Corea y Singapur con 3 %. Incluso en Latinoamérica, Chile tomó la decisión de pasar del 0,7 % al 1 %, y Brasil, un 1.62 %. No obstante, a excepción de Brasil, en promedio, Latinoamérica y el Caribe invierten 1.09 %; es decir mucho menos que el nivel de China y de los países de alto ingreso ²³⁷.

En el caso de Colombia la Ley 1286 de 2009 trazó la ruta que busca alcanzar al menos un 1 % de inversión del PIB en ACTI, esto con la intención de convertir a Colombia en el tercer país más competitivo de América Latina, tal como supone la visión que definió el Gobierno Nacional para el año 2032, mediante la creación del Sistema Nacional de Competitividad e Innovación (SNCEI). Pero para el año 2013 era del 0.449 %, lo cual

²³⁵MARTÍNEZ, Vladimir.; MEJÍA, Sergio. JARAMILLO, Franklin y ÁLVAREZ, Mónica. *Nanotecnología para Colombia: Una Mirada Histórica, Pasando por el Contexto Global, Latinoamericano y las Regiones*. En: Revista Nano Ciencia y Tecnología. Vol. 2, No. 1. p. 51.

²³⁶Ibíd., p. 51.

²³⁷Ibíd., p. 52.

no refleja el nivel de claridad que debe asumir un país frente al hecho de que la ciencia y el desarrollo tecnológico, que producen innovación, deberían convertirse en la primera fuerza productiva y en el corazón de su competitividad y la de sus empresas ²³⁸.

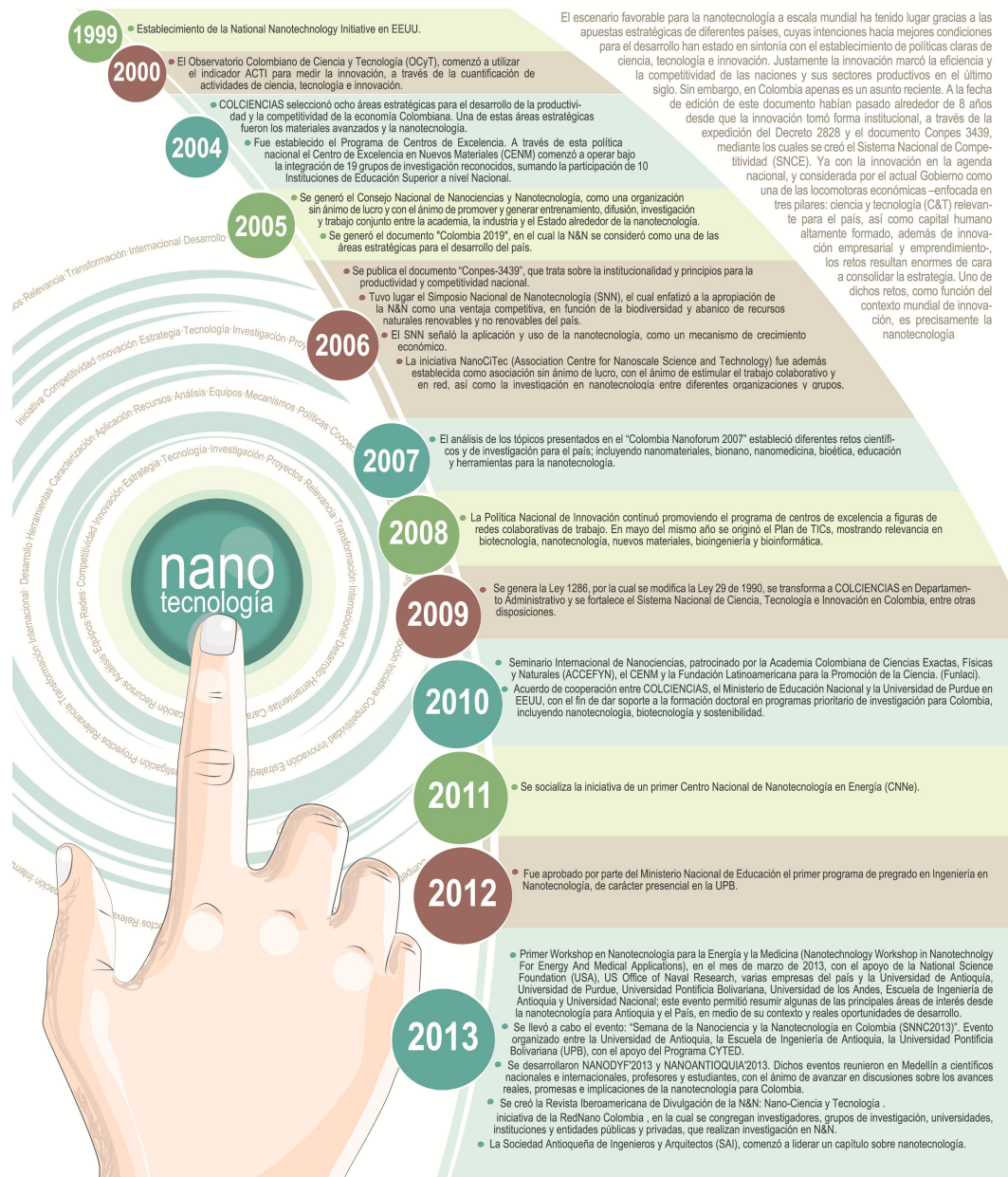
En un escenario ideal, la creación de una PNIN (Plataforma Nacional en Investigación Aplicada a la Nanotecnología) simultáneamente con otras estrategias para incrementar el nivel de inversión en ACTI, alcanzando el 1 % del PIB, permitiría llegar en promedio a unos COP \$8.741,62 miles de millones/año a partir del año 2020 para inversión en investigación en Nanotecnología ²³⁹.

²³⁸MONTOYA RESTREPO, Carolina María.; FLÓREZ YEPES, Elizabeth. ECHEVERRI GARCÍA, Elkin. JARAMILLO ISAZA, Franklin. MARTÍNEZ TEJADA, Hader Vladimir. LÓPEZ RENDÓN, Jorge Eliecer. SANTA MARÍN, Juan Felipe. ÁLVAREZ LAINEZ, Mónica. GAÑÁN ROJO, Piedad Felisinda y MONTOYA-MEJÍA, Sergio Adolfo. *Política en Nanotecnología para Antioquia (PNA): Visión 2013 – 2021*. Medellín, 2013. p. 8.

²³⁹MARTÍNEZ, Vladimir. *Clasificación de las Externalidades para el Establecimiento de un Modelo de Viabilidad Económico & Social. Informe 013*. Dirección Científica y Proyección, Centro Nacional de Nanotecnología. EPM, Medellín. 2013.

9.1 CONTEXTO DE DESARROLLO DE LA NANOTECNOLOGÍA EN COLOMBIA

Figura 19. Antecedentes históricos de apropiación y desarrollo de la Nanotecnología en Colombia.



Fuente: MARTÍNEZ, Vladimir.; MEJÍA, Sergio., JARAMILLO, Franklin y ÁLVAREZ, Mónica. *Nanotecnología para Colombia: Una Mirada Histórica, Pasando por el Contexto Global, Latinoamericano y las Regiones*. En: Revista Nano Ciencia y Tecnología. Abril, 2014. Vol. 2, No. 1. p. 55.

El escenario favorable para la Nanotecnología a nivel mundial ha tenido lugar gracias a las apuestas estratégicas de diferentes países, que han tenido como fin mejorar las condiciones para el desarrollo a través del establecimiento de políticas claras de ciencia, tecnología e innovación. Justamente la innovación marcó la eficiencia y la competitividad de las naciones y sus sectores productivos en el último siglo. Sin embargo, en Colombia apenas es un asunto reciente ²⁴⁰.

Históricamente, entre 1999 y 2000, se mostró una tendencia creciente en el número de publicaciones relacionadas a la Nanotecnología, esto debido al establecimiento de la National Nanotechnology Initiative en EEUU, en la que diferentes grupos de investigación de Colombia participaron ²⁴¹.

Algunas políticas y retos académicos se hicieron más evidentes desde el 2000, cuando el Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología (OCyT), comenzó a utilizar el ACTI para medir la innovación. Posteriormente en el año 2004, COLCIENCIAS seleccionó ocho áreas estratégicas para el desarrollo de la productividad y competitividad del país. Una de estas áreas estratégicas fueron los materiales avanzados y la Nanotecnología. En el mismo año fue establecido el Programa de Centros de Excelencia. A la luz de esta política nacional comenzó a operar el Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) ²⁴².

En febrero del año 2005, se creó el Consejo Nacional de Nanociencia y Nanotecnología, adscrito a IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), como una organización sin ánimo de lucro para la promoción, difusión y trabajo conjunto alrededor de la Nanotecnología ²⁴³.

²⁴⁰MONTOYA, Carolina.; FLÓREZ, Elizabeth. ECHEVERRI, Elkin. JARAMILLO, Franklin. MARTÍNEZ, Vladimir. LÓPEZ, Jorge. SANTA MARÍN, Juan Felipe. ÁLVAREZ, Mónica. GAÑÁN ROJO, Piedad y MONTOYA, Sergio. Op. cit., p. 14.

²⁴¹MARTÍNEZ, Vladimir.; MEJÍA, Sergio. JARAMILLO, Franklin y ÁLVAREZ, Mónica. Op. Cit., p. 52.

²⁴²Ibíd., p. 53

²⁴³Ibíd., p. 53.

Algunas de las actividades realizadas por el Consejo se destacan: Nanoforum Colombia 2005, Curso Abierto de Nanotecnología, Simposio de Nanorrobótica, Seminario de Materia Programable. En agosto del mismo año, como una política nacional derivada del Departamento de Planeación (DNP), se generó el documento “*Colombia 2019*”, en el cual la Nanociencia y la Nanotecnología (N&N) se consideró como una de las áreas estratégicas para el desarrollo del país ²⁴⁴.

En el año 2006 la innovación tomó forma institucional mediante la expedición del Decreto 2828 y el documento CONPES-3439, sobre la institucionalidad y principios para la productividad y competitividad nacional, que crearon el Sistema Nacional de Competitividad e Innovación (SNCeI). En el mismo año tuvo lugar el Simposio Nacional de Nanotecnología (SNN), el cual enfatizó la apropiación de la N&N como una ventaja competitiva, en función de la biodiversidad y recursos naturales renovables y no renovables del país. Simultáneamente, el SNN señaló la aplicación y uso de la Nanotecnología como un mecanismo de crecimiento económico ²⁴⁵.

Sumado a lo anterior, la iniciativa NanoCiTec fue establecida como una asociación sin ánimo de lucro, para la estimulación del trabajo colaborativo y en red, así como la investigación en nanociencia y Nanotecnología. Estos grupos se han dedicado a promover programas de investigación para el tratamiento del cáncer, incluyendo investigaciones sobre el uso de nanopartículas para su diagnóstico y tratamiento, además de sensores a nanoescala con funciones de diagnóstico. Además, ha facilitado el acceso a diferentes instrumentos y equipos de producción para la caracterización de materiales. Ha realizado investigación en producción de nuevos materiales, estudios de citotoxicidad y remediación entre otras ²⁴⁶.

²⁴⁴Ibíd., p. 53.

²⁴⁵Ibíd., p. 53.

²⁴⁶Ibíd., p. 53.

En el año 2007 el análisis de los tópicos presentados en “Colombia Nanoforum 2007”, estableció diferentes retos científicos y de investigación para el país; incluyendo nanomateriales, nanomedicina, bioética, educación y herramientas para la Nanotecnología. Este mismo año aproximadamente el 56% de los grupos categorizados “A” en COLCIENCIAS, desarrollaban proyectos relacionados con Nanotecnología. Sin embargo, sólo 2 de 34 grupos estaban dedicados exclusivamente a esta área; el CENM y el Centro de Complejidad CeiBa ²⁴⁷.

Durante el año 2008, la Política Nacional de Innovación continuó promoviendo el programa de centros de excelencia a figuras de redes colaborativas de trabajo. En mayo del mismo año, se originó el Plan de TICs (*Tecnologías de la Información y la Comunicación*), mostrando relevancia en biotecnología, Nanotecnología, nuevos materiales y bioingeniería ²⁴⁸.

En el año 2009 se genera la Ley 1286, se transforma a COLCIENCIAS en Departamento Administrativo y se fortalece el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia, entre otras disposiciones ²⁴⁹.

En el año 2010, el Seminario Internacional de Nanociencias señaló que países con menores recursos para investigación en C&T estaban dedicando esfuerzos y ejecutando inversiones en sectores estratégicos con énfasis en Nanotecnología. Como ejemplo, Singapur, aunque pequeño cuenta con una clara vocación de apoyo a la N&N. Igualmente, muchos otros países de gran, medio o pequeño tamaño cuentan con una estrategia definida y un apoyo considerable a dicho campo; como Irlanda, Taiwán o Corea del Sur ²⁵⁰.

²⁴⁷Ibíd., p. 53.

²⁴⁸Ibíd., p. 53.

²⁴⁹Ibíd., p. 53.

²⁵⁰Ibíd., p. 54.

En el mismo año, se estableció el acuerdo de cooperación entre COLCIENCIAS, el Ministerio de Educación Nacional y la Universidad de Purdue en EEUU, con el fin de dar soporte a la formación doctoral para Colombia en programa que incluyen Nanotecnología, biotecnología y sostenibilidad ²⁵¹.

En el año 2011, se concibió el primer Centro Nacional de Nanotecnología en Energía (CNNe), desarrollado por Empresas Públicas de Medellín (EPM) con integración entre la Empresa (EPM) y diferentes universidades a nivel regional, incluyendo la Universidad de Antioquia, la Universidad Pontificia Bolivariana, la Universidad Nacional y el Instituto Metropolitano (ITM) en la ciudad de Medellín ²⁵².

Actualmente, el CNNe ha evolucionado a una figura aún más incluyente, en la que además de la potencial participación de diferentes instituciones de educación superior (IES) de la región y del país, se viene promoviendo la inclusión de otras empresas, además de EPM, en medio de la visión de una plataforma nacional en Nanotecnología. En este sentido, el CNNe no se centra exclusivamente a intereses en energía, sino que se presenta como herramienta transversal de apoyo al desarrollo industrial de la región a través del nuevo proyecto Centro Nacional de Nanotecnología (CN2) ²⁵³.

Precisamente, de cara a la continua promoción del proyecto CN2 se organizó el primer Workshop in Nanotechnology for Energy and Medical Applications en el mes de marzo de 2013. Este evento permitió resumir algunas de las principales áreas de interés desde la Nanotecnología para Antioquia y el país, en medio de su contexto y reales oportunidades de desarrollo. Dichas áreas estratégicas de interés incluyen: energía, nanobiomateriales, educación y ciberinfraestructura, aplicaciones industriales, nanomedicina y técnicas avanzadas de caracterización ²⁵⁴.

²⁵¹Ibíd., p. 54.

²⁵²Ibíd., p. 54.

²⁵³Ibíd., p. 54.

²⁵⁴Ibíd., p. 54.

Posteriormente, en el mes de julio de 2013 se llevó a cabo el evento: “Semana de la Nanociencia y la Nanotecnología en Colombia (SNNC2013)”. Simultáneamente durante la misma semana además del SNNC2013, se desarrollaron NANODYF’2013 y NANOANTIOQUIA’2013. Dichos eventos reunieron en Medellín a científicos nacionales e internacionales, profesores y estudiantes, con el ánimo de avanzar en discusiones sobre los avances reales, promesas e implicaciones de la Nanotecnología para Colombia ²⁵⁵.

Otros eventos importantes a mencionar se relacionan con los resultados a nivel de formación de personas; entre los cuales se cuentan los avances del SENA en los años 2011-2013, contando con más de 800 jóvenes capacitados en temáticas relacionadas con Nanotecnología. Igualmente, a finales del mes de noviembre de 2012 fue aprobado por parte del Ministerio Nacional de Educación el primer programa de pregrado en Ingeniería en Nanotecnología, de carácter presencial en la UPB-Medellín. En el segundo trimestre de 2013, NanoCitec creó la Revista Iberoamericana de Divulgación de la N&N: Nano-Ciencia y Tecnología, con el apoyo financiero del Grupo Carl Zeiss y mnNanotechnologies ²⁵⁶.

Estos eventos se complementan con otras iniciativas, como la que lidera la Universidad del Valle en conjunto con entidades francesas y de otros países de Latinoamérica, en la red NanoAndes. Desde el 2013 la iniciativa de la RedNano Colombia, en la cual se congregan investigadores, grupos de investigación, universidades, instituciones y entidades públicas y privadas, que realizan investigación en N&N. Finalmente, en el mismo año, desde el mes de abril, la Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos (SAI), comenzó a liderar un capítulo académico sobre Nanotecnología ²⁵⁷.

²⁵⁵Ibíd., p. 54.

²⁵⁶Ibíd., p. 54.

²⁵⁷Ibíd., p. 56.

9.2 DIVULGACIÓN DE LA NANOCIENCIA Y LA NANOTECNOLOGÍA EN COLOMBIA

Si bien la Nanotecnología ha sido definida en Colombia como un área estratégica para el desarrollo nacional, los esfuerzos concretos en el área son aún incipientes. A diferencia de otros países de América Latina, Colombia no cuenta con una política de fomento de la Nanotecnología y la intervención gubernamental en ese campo se limita al programa de centros de excelencia ²⁵⁸.

En cuanto a publicaciones científicas basadas en Nanotecnología, se ha mostrado una tendencia creciente en la última década, debido principalmente al establecimiento de la National Nanotechnology Initiative en EEUU, en la que diferentes grupos de investigación de Colombia participaron, así como por el creciente, pero no suficiente número de recursos destinados a la investigación en el país. A pesar de esto, el incremento en la productividad científica no resulta muy alta si se compara con otros países ²⁵⁹.

Según información recuperada de la base de datos Web of Knowledge, la mayor cantidad de artículos se encuentra concentrada en el período 2006 – 2008 en las áreas de física, materia condensada y materiales ²⁶⁰.

Dentro de las instituciones educativas que han trabajado en la divulgación de la Nanociencia y la Nanotecnología se encuentran la Universidad Nacional de Colombia con aplicación en áreas de las Ciencias, Medicina e Ingeniería, la Universidad Distrital

²⁵⁸PÉREZ MARTELO, Constanza y VINCK, Dominique. *Redes Sociotécnicas de Cogestión de Conocimiento en Nanotecnologías en Colombia: ¿Entre la Visibilidad Internacional y la Apropiación Local?* En: Revista Redes. Vol. 15, No. 29 (Mayo, 2009); p. 116.

²⁵⁹MARTÍNEZ, Vladimir.; MEJÍA, Sergio., JARAMILLO, Franklin y ÁLVAREZ, Mónica. *Nanotecnología para Colombia: Una Mirada Histórica, Pasando por el Contexto Global, Latinoamericano y las Regiones.* En: Revista Nano Ciencia y Tecnología. Vol. 2, No. 1 (Abril, 2014); p. 53.

²⁶⁰PÉREZ MARTELO, Constanza y VINCK, Dominique. *Op. cit.*, p. 118.

Francisco José de Caldas, la Universidad del Valle y la Universidad de Antioquia, entre otras. Asimismo, instituciones privadas también han dado su aporte a la divulgación; entre ellas se encuentran la Universidad de los Andes, en donde se ha establecido un curso básico de carácter informativo, además de cursos especializados de posgrado en nanoelectrónica; la Pontificia Universidad Javeriana, con enfoque en nanomedicina; la Universidad Santo Tomás, la Universidad el Bosque con investigaciones sobre el tratamiento contra el cáncer; la Universidad del Rosario, que ofrece conferencias y seminarios para su comunidad educativa, así como proyectos de investigación en algunas de sus áreas de formación ²⁶¹

²⁶¹CAMACHO B., A.; DUQUE, C. A., GIRALDO, J. J. y GUERRERO, M. E. *La Divulgación en Colombia de la Nanociencia y la Nanotecnología en Tiempos de Cambio*. En: Revista Mundo Nano. Vol. 4, No. 2 (julio, 2011); p. 34.

AVANCES ACADÉMICO – TÉCNICOS EN NANOTECNOLOGÍA APLICADOS A LA INDUSTRIA EN COLOMBIA

De acuerdo con López *et al.*, 2010 ²⁶², las patentes de invención concedidas a universidades colombianas representan el 0,94 % de las otorgadas a residentes y 0,007 % del total concedido. Si bien estas cifras muestran un panorama poco alentador, en años recientes en el país se han generado importantes dinámicas en torno al desarrollo tecnológico liderado por universidades y otros entes, que han conllevado algunos resultados en la interacción con la industria ²⁶³.

Recientemente, la Nanotecnología ha ido ganando espacios dentro de la investigación en el país, reconociéndose sus características distintivas asociadas a su escala y su innegable impacto en el desarrollo industrial, gracias a diferentes aportes al desarrollo que han hecho las universidades colombianas a través de sus grupos de investigación, las cuales se han enfocado en aplicaciones relacionadas a la ciencia de materiales, las

²⁶²LÓPEZ, M.; SCHMAL, R. y CABRALES, F. *Comportamiento de las Patentes Universitarias: Colombia, Chile y España*. 2010. Citado por: JIMÉNEZ, Claudia.; CASTELLANO, Oscar y VILLA, Eliana. *La Gestión de Tecnologías Emergentes en el Ámbito Universitario*. En: Revista Tecno Lógicas. No. 26 (Junio, 2011); p. 155.

²⁶³Ibíd., p. 155.

comunicaciones, y el bienestar y la salud ²⁶⁴.

Por ejemplo, se destacan, el desarrollo de una línea de fármacos conformados por diferentes nanomateriales, los cuales viajan por el organismo para atacar enfermedades de manera eficiente y localizada comparado con sus homólogos realizado por la Facultad de Ciencia de la Universidad Javeriana. También, el desarrollo de biosensores que detectan virus en el agua por la Universidad de Pamplona, así como apósitos que ayudan a curar rápidamente las quemaduras por el Tecnoparque, nodo Medellín. A esto se suma patentes como la obtenida por la Universidad Javeriana por una película que mejora la imagen de las pantallas planas de los televisores o monitores, lámparas y láseres orgánicos ²⁶⁵

Otro desarrollo a destacar es el realizado, luego de varios años de trabajo, por los investigadores Marianny Yajaira Combariza Montañez, Cristian Blanco Tirado, y Martha Liliana Chacón Patiño de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, los cuales crearon un producto compuesto por fibras naturales de fique y nanopartículas de óxido de manganeso, que denominaron como nanofique, con el que se puede degradar fácilmente los tintes tóxicos utilizados en la coloración de textiles, como por ejemplo el índigo que le da el color azul a los jeans, para limpiar y purificar el agua ²⁶⁶

Por este producto innovador, se recibió recientemente la patente por parte de la Superintendencia de Industria y Comercio. Con está ya son 12 patentes concedidas a la UIS, 11 en Colombia y 1 en Estados Unidos ²⁶⁷.

²⁶⁴Ibíd., p. 160.

²⁶⁵REVISTA SEMANA, COLCIENCIAS. *Nanotecnología, la Revolución a la que le Apuesta Colombia*. En: Revista Semana (3 Abril, 2016); Sección Ciencia. p. 72.

²⁶⁶REVISTA SEMANA. *Crean Fique Que Purifica El Agua*. En: Revista Semana (18 Julio, 2016); Sección Tecnología. p. 1.

²⁶⁷Ibíd., p. 1.

En lo referente a desarrollos académicos/técnicos de la Nanotecnología con enfoque hacia la industria del Petróleo y Gas, el número de investigaciones realizadas en las universidades colombianas es bajo, esto se debe en gran parte, a la falta de políticas que fomenten el desarrollo e implementación de la Nanotecnología en el país y, a pesar que en el país existen Centros de Excelencia enfocados al desarrollo científico y tecnológico, no existe a la fecha, grupos de investigación enfocados al desarrollo y aplicación de la Nanotecnología en la industria petrolera.

La revisión realizada a repositorios de universidades públicas y privadas del país, en especial, aquellas que cuentan con programas académicos relacionados a la industria del Petróleo y Gas, como también a artículos técnicos de OnePetro, mostró que la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, es una de las instituciones educativas con mayor número de investigaciones publicadas en relación a aplicación de la Nanotecnología en la industria del Petróleo y Gas, entre las que se encuentran:

1. Optimización de fluidos de perforación usando nanopartículas funcionalizadas.

Betancur *et al.*, 2014 ²⁶⁸ evaluaron el uso de nanopartículas de sílice y alúmina funcionalizadas a diferentes concentraciones en fluidos de perforación base agua, a partir de estudios reológicos y pruebas de filtrado, con el fin de reducir las pérdidas de filtrado y el espesor de la retorta.

Las nanopartículas de sílice y alúmina se modificaron a nivel superficial mediante el método de impregnación incipiente con el fin de obtener nanopartículas funcionalizadas o soportadas con materiales de diferente naturaleza, las cuales son: residuo de refinería, obtenido de la Refinería de Barrancabermeja; carboximetilcelulosa, níquel y asfaltenos.

²⁶⁸BETANCUR MARQUEZ, Stefania.; CORTES CORREA, Farid y ALZATE ESPINOSA, Guillermo. *Mejoramiento de Los Fluidos de Perforación Usando Nanopartículas Funcionalizadas: Reducción de las Pérdidas De Filtrado y del Espesor de la Retorta.* En: Boletín Ciencias de la Tierra. No. 35 (julio, 2014); p. 5 – 14.

Los resultados mostraron que las nanopartículas de alúmina presentan una mayor reducción en las pérdidas de filtrado que las nanopartículas de sílice con un valor de reducción del 33 % y en el espesor de la retorta con un valor de 46.34 %, esto debido a la naturaleza hidrofílica de la sílice.

2. Aplicación de nanofluidos para el recobro mejorado de hidrocarburos.

Ospina, 2015 ²⁶⁹ evaluó diferentes nanofluidos para el mejoramiento in-situ de crudo pesado, mediante técnicas de caracterización de materiales y pruebas a alta presión con la finalidad de estimar la cantidad de crudo que puede ser mejorado parcialmente por cambios en las temperaturas de crackeo de moléculas pesadas de hidrocarburo (asfaltenos).

El mejoramiento del crudo pesado resultó ser efectivo con la adición del nanofluido identificado como PRNF B 5000^TM, el cual presentó una reducción de la viscosidad del 95 – 96 %, valor que no cambió con el tiempo y después de realizada las pruebas, el crudo se percibía de manera más diferente, es decir, más fluido.

3. Aplicación de un nanofluido conformado por un bio-surfactante para la recuperación de crudo.

Otálvaro, 2015 ²⁷⁰ evaluó la efectividad de un nanofluido conformado por un bio-surfactante y nanopartículas con el fin de aplicarse en métodos de recobro de crudo, a partir de una serie de pruebas sistemáticas basadas en la tensión interfacial y análisis del flujo de fluidos. Los resultados mostraron un factor de recobro del 80 % utilizando únicamente una concentración de nanofluido del 0.05 % v/v, además concluyó que el uso de nanopartículas mejora la efectividad del

²⁶⁹OSPINA, Natalia. *Evaluación de la Aplicación de Nanofluidos para Mejoramiento In-Situ del Crudo Pesado*. Tesis, Magíster en Ingeniería de Petróleos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Procesos y Energía. 2015. 57 p.

²⁷⁰OTÁLVARO, Julián. *Síntesis y Evaluación de un Novedoso Nanofluido Basado en Bio-Surfactante para Procesos de Recobro Mejorado de Crudo Pesado*. Tesis, Magíster en Ingeniería Química. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Procesos y Energía. 2015. 46 p.

surfactante natural debido a su capacidad de disminuir los valores de tensión interfacial en mayor medida que con el uso únicamente del surfactante.

4. Aplicación de nanofluidos para la inhibición de asfaltenos.

Zabala *et al.*, 2013²⁷¹ aplicaron y evaluaron un nanofluido para la inhibición de asfaltenos en el campo Cupiagua Sur en el campo identificado como CPSXL4, el cual produce crudo volátil y presenta un alto grado de precipitación de asfaltenos, siendo este, el mecanismo con mayor influencia en el daño de la formación.

Este trabajo de estimulación permitió un mejoramiento en el IPR del pozo debido a la reducción del skin o daño en la formación, un incremento del API del crudo de 40°API antes de la operación de estimulación a 41.5°API al final de la etapa de inhibición con las nanopartículas, además la producción post-inhibición se registró por casi 8 meses, en los cuales no se registró cambios en la tasa de producción, la cual corresponde a 300 bbls por encima de la tasa de flujo antes del proceso de inhibición.

A pesar de que, a la fecha, no hay investigaciones publicadas, la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, ya cuenta con proyectos de investigación relacionados a la aplicación de la Nanotecnología en la industria del Petróleo y Gas, estas se encuentran en etapas de desarrollo, las cuales incluyen,

1. Estudios del comportamiento y de factibilidad técnica de nanocompuestos en el tratamiento de separación de sólidos finos en crudos pesados.
2. Caracterización de nanomateriales para restaurar derrames de hidrocarburos en zonas afectadas en el país²⁷²

²⁷¹ZABALA ROMERO, R. D.; ACUÑA, H. M., CORTES, F., PATIÑO, J. E., CESPEDES CHAVARRO, C., MORA, E., BOTERO, O. F., y GUARIN, L. *Application and Evaluation of a Nanofluid Containing Nanoparticles for Asphaltene Inhibition in Well CPSXL4*. Offshore Technology Conference. 2013. OTC-24310-MS.

²⁷²Información obtenida a partir del buscador público de trabajos y monografías de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander. [Consultado: 31 de Julio de 2016].

Esto marca el inicio en el desarrollo de investigaciones relacionadas a la Nanotecnología y su divulgación tanto a nivel académico como en la industria en la Escuela.

Cada aplicación de la Nanotecnología en la industria ha abierto espacios para la investigación y el desarrollo a nivel mundial, como por el ejemplo, en el área de nanosensores, la que conllevó al nacimiento del Consorcio Avanzado de Energía, en el cual desde su fundación se han desarrollado proyectos enfocados al desarrollo, diseño e implementación de sensores en áreas como la exploración y recuperación mejorada. Este grupo está integrado por investigadores y científicos de 30 universidades del mundo y 7 de las más grandes compañías petroleras a nivel mundial, las cuales financian dichos proyectos.

Por lo tanto, es claro, que existe un abanico de oportunidades de investigación para la Universidad Industrial de Santander y demás universidades del país, como también para la industria petrolera colombiana. Y debido a la interdisciplinariedad también abre la oportunidad de desarrollos a partir de uniones con otras disciplinas, como la Electrónica y la Ciencia de Materiales. Debido a que toda investigación especialmente en el aspecto tecnológico requiere de algún tipo de inversión para su desarrollo, algo a recalcar es la importancia de que se establezca en el país una Plataforma Nacional de Nanotecnología y políticas enfocadas a la inversión en Nanotecnología, en miras del desarrollo académico y nacional.

CONCLUSIONES

- 1 La Nanotecnología trata principalmente con la síntesis, caracterización, exploración y explotación de materiales con dimensiones generalmente en el rango de unos pocos nanómetros, dimensiones con las que uno no está acostumbrado a lidiar diariamente, y en parte, esta escala pequeña, que tiene aún muchas fronteras por explorarse, explica la fascinación que ha suscitado a nivel mundial ya que es posible el desarrollo de materiales que presentan nuevas propiedades que no tenían a mayor escala, y que permiten aplicarlos de nuevas formas.
- 2 El confinamiento de las partículas en una estructura de baja dimensión, tal como la nanométrica, acciona un cambio imperial en su comportamiento y la manifestación de nuevos efectos dependientes del tamaño, que generalmente caen en la categoría de efectos cuánticos, modifican las propiedades eléctricas, térmicas, magnéticas y ópticas de los materiales ofreciendo así una rica paleta de fenómenos tecnológicos listos a explotarse.
- 3 El amplio abanico de aplicaciones, tanto a corto, mediano y largo plazo de la Nanotecnología y diferentes estudios de mercado encontrados en la literatura sustenta el hecho que la Nanotecnología es una tecnología revolucionaria que producirá un cambio de paradigma industrial y tiene el potencial de generar impactos y otorgar ventajas económicas no sólo a las industrias sino también a los

- países que tomen participación en su desarrollo.
- 4 En un mundo donde el acceso fácil al petróleo ya no es la norma y, la exploración y producción en escenarios extremos domina, ha hecho que la industria del Petróleo y Gas se enfrente a nuevos y difíciles retos técnicos para cumplir con la creciente demanda global de energía, en donde, los últimos años, la Nanotecnología se ha establecido como candidato potencial para ofrecer soluciones a estos retos.
- 5 Es evidente que hay numerosas áreas de la industria petrolera en las que la Nanotecnología puede contribuir a tecnologías más eficientes, menos costosas, y más ecológicas que las que están disponibles actualmente y permite en gran medida el paradigma actual de la industria.
- 6 El número de patentes y artículos presentados los últimos años muestran que la aplicación de la Nanotecnología en la industria petrolera es un tema reciente, por lo que aún se encuentra en etapas de investigación y desarrollo y, antes de que pueda aplicarse en forma práctica, numerosos problemas necesitan ser resueltos, tales como, la producción de nanomateriales a bajo costo y fácilmente industrializados. Una vez estos problemas se resuelvan, la Nanotecnología se aplicará extensivamente en casi cada área de la industria de aceite y gas.
- 7 Algunas de las barreras que pueden retardar la implementación de la Nanotecnología en el futuro incluyen, la falta de apoyo a la innovación en el sector E&P, problemas para la adopción, costos y riesgos y, en especial la falta de conocimiento, es por esto, que es necesario que esfuerzos como los que se han realizado por parte del Consorcio Avanzado de Energía se multipliquen con el fin implementar la Nanotecnología en forma óptima.

- 8 Si bien la Nanotecnología ha sido definida en Colombia como un área estratégica para el desarrollo nacional, los esfuerzos concretos en el área son aún incipientes. A diferencia de otros países de América Latina, Colombia no cuenta con una política de fomento de la Nanotecnología. Sin embargo, esto no ha impedido que en el país se estén desarrollando investigaciones en este aspecto, por parte de universidades públicas y privadas y, por entes tales como las Empresa Públicas de Medellín, las cuales tienen claro que la Nanotecnología conlleva al desarrollo.
- 9 La revisión realizada a repositorios de universidades públicas y privadas del país mostró que la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, es una de las instituciones educativas con mayor número de investigaciones publicadas en relación a aplicación de la Nanotecnología en la industria del Petróleo y Gas.
- 10 A pesar de que, a la fecha, no hay investigaciones publicadas, la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad, ya cuenta con proyectos de investigación en desarrollo relacionados a la aplicación de la Nanotecnología en la industria del Petróleo y Gas, estas se encuentran en etapas de desarrollo, esto marca el inicio del desarrollo de investigaciones y divulgación científica relacionadas a la Nanotecnología en la Escuela.
- 11 Es evidente que existe un abanico de oportunidades de investigación para la Universidad Industrial de Santander y demás universidades del país, como también para la industria petrolera colombiana. Y debido a la interdisciplinariedad también abre la oportunidad de desarrollos a partir de uniones con otras disciplinas.

RECOMENDACIONES

- 1 Creación de un grupo de investigación enfocado a la aplicación de la Nanotecnología en la industria del Petróleo y Gas en la Escuela de Ingeniería de Petróleos, a través del cual se incentive e implemente el desarrollo de trabajos de investigación relacionados a cada una de las aplicaciones en los estudiantes de la Escuela y otras Escuelas de la Universidad.
- 2 Desarrollo de eventos para la divulgación científica de la Nanotecnología en la Escuela de Ingeniería de Petróleos como también otras escuelas, tanto de la Universidad Industrial de Santander, como otras universidades del país. Estos eventos pueden incluir cursos con carácter educativo y sin ánimo de lucro, cátedras, congresos, seminarios, entre otros.
- 3 Debido a que el desarrollo e investigación de la Nanotecnología es reciente, estudios de investigación relacionados a los riesgos y medidas de control relacionados a su implementación son muy mínimos, por lo que se sugiere el desarrollo de estudios de investigación que permitan inventariar y/o definir los riesgos relacionados a los nanomateriales y señale las medidas de seguridad y control que deben tomarse durante su uso y aplicación, tanto a escala de laboratorio como a escala de campo.

BLIBLIOGRAFÍA

- [1] AGHABOZORG, Hamidreza.; SADEGH HASSANI, Sedigheh y RASHIDI, Alimorad. *Catalysis: Nanocatalysts - Preparation, Characterization, and Their Application in Oil and Gas Processes*. En: ILDUSOVICH KHARISOV, Boris.; VASILIEVNA KHARISSOVA, Oxana y ORTIZ-MENDEZ, Ubaldo. CRC Concise Encyclopedia of Nanotechnology. Taylor & Francis Group, LLC. 2016. ISBN: 978-1-4665-8089-3.
- [2] AKYILDIZ, Ian y MIQUEL JORNET, Josep. *Electromagnetic Wireless Nanosensor Networks*. En: Nano Communications Networks. Vol. 1, No. 1 (Marzo, 2010); p. 3 – 19.
- [3] ALENCAR, M. S.; DA SILVA, R. P., GIACOMETTI, D., FORERO, A. y LABES, A. *Nanocoatings Applied to Corrosion Protection at the Oil and Gas Industry Trends*. Offshore Technology Conference. 2013. OTC- 24425-MS.
- [4] ALIOFKHAZRAEI, Mahmood. *Nanocoatings: Size Effect in Nanostructured Films*. New York, EEUU: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. 251 p. ISBN: 978-3-642-17965-5.

-
- [5] BAKER HUGHES INCORPORATED. *Nanofluids and Methods of Use for Drilling and Completion Fluids*. Inventores: QUINTERO, Lirio.; CARDENÁS, Antonio Enrique y CLARK, David E. C09K 8/92. Fecha de Solicitud: 22 de Junio, 2011. Estados Unidos. Concesión. Patente No. US8822386 B2. Fecha de Publicación: 2 de Septiembre, 2014.
- [6] BETANCUR MÁRQUEZ, Stefanía.; CORTÉS CORREA, Farid y ALZATE ESPINOSA, Guillermo. *Mejoramiento de los Fluidos de Perforación Usando Nanopartículas Funcionalizadas: Reducción de las Pérdidas de Filtrado y del Espesor de la Retorta*. En: Boletín Ciencias de la Tierra. No. 35 (julio, 2014); p. 5 – 14.
- [7] CAMACHO B., A.; DUQUE, C. A., GIRALDO, J. J. y GUERRERO, M. E. *La Divulgación en Colombia de la Nanociencia y la Nanotecnología en Tiempos de Cambio*. En: Revista Mundo Nano. Vol. 4, No. 2 (Julio, 2011); p. 34 – 42.
- [8] CAMPILLO, Beatriz y ZULETA, Guillermo. *Bioética y Nanotecnología*. En: Revista Lasallista de Investigación. Vol. 11, No. 1 (Enero, 2004); p. 63 – 69.
- [9] CARREJO, N.; ESPINOZA, O. R., WIBOWO, H y GAUDETTE, S. L. *Developing A New High-Strength, Lightweight Material Using Nano-Coated Smart Materials for Oilfield Applications*. Offshore Technology Conference. 2015. OTC-26282-MS.
- [10] CENTRO COCHRANE IBEROAMERICANO, TRADUCTORES. *Manual Cochrane de Revisiones Sistemáticas de Intervenciones. Versión 5.1.0. (Actualizada en Marzo de 2011)*. Barcelona, España: Centro Cochrane Iberoamericano. 2012. 639 p.

-
- [11] CHAPMAN, David y TRYBULA, Walt. *Meeting the Challenges of Oilfield Exploration Using Intelligent Micro and Nano-Scale Sensors*. En: IEEE International Conference on Nanotechnology (12: 20-23, Agosto, 2012: Birmingham, Reino Unido). Paper. p. 1 – 6.
- [12] COCUZZA, M.; PIRRI, F., ROCCA, V., y VERGA, F. *Is The Oil Industry Ready for Nanotechnologies?*. Offshore Mediterranean Conference. 2011. OMC-2011-070.
- [13] COOKSON, Colter. *Nanotech Sensors to Reveal Reservoir*. En: The American Oil & Gas Reporter. Reporte Especial (Julio, 2014). p. 1 – 5.
- [14] CREMADES, Ana Isabel y MAESTRE, David. *Nanociencia y Nanotecnología*. En: CASADO, María. Bioética y Nanotecnología. Navarra, España: Civitas, 2010.
- [15] DÁVILA VIVAS, Keidy.; DUGARTE, María de los Ángeles., GUTIERREZ, Mileidys., MUÑOZ, Cintia. *Planta de Hidrodesulfuración para Reducir la Cantidad de Compuestos Azufrados Presentes en Crudo Pesado*. Tesis, Químico Industrial. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Química Aplicada. Escuela de Ingeniería Química. 2012. 66 p.
- [16] FREITAS, R. A. *What is Nanomedicine?*. En: Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine. Vol. 1, No. 1 (Marzo, 2005). p. 2 – 9.
- [17] FUERBETH, W. *New Coatings for Corrosion Protection Using Nanoparticles or Nanocapsules*. NACE International. 2015. NACE-2015-5554.

- [18] HALLIBURTON ENERGY SERVICES, INC. *Spectroscopic Nanosensor Logging Systems and Methods*. Inventores: JONES, Christopher.; SHEN, Jing., PELLETIER, Michael y MORYS, Marian. E21B 47/00. Fecha de Solicitud: 1 de Junio, 2011. Estados Unidos. Aplicación. Patente No. WO2011153190A1. Fecha de Publicación: 8 de Diciembre, 2015.
- [19] HALLIBURTON ENERGY SERV INC; RODDY CRAIG WAYNE; COVINGTON RICKY L; CHATTERJI JITEN; BRENNEIS DARRELL CHAD; CURTIS PHILIP ANTHONY. *Cement Compositions and Methods Utilizing Nano-Clay*. Inventores: WAYNE RODDY, Craig.; COVINGTON, Ricky L, CHATTERJI, Jiten, CHAD BRENNEIS, Darrell. C04B14/ 10. Fecha de Solicitud: 24 Septiembre, 2010. Estados Unidos. Aplicación. Patente No. WO 2011036463 A1. Fecha de Publicación: 31 Marzo, 2011.
- [20] HERNANDEZ GARCÍA, Paola. *Síntesis y Evaluación de Catalizadores Soportados en Óxidos Mixtos en la Hidrodesulfuración de Tiofeno*. Tesis, Ingeniero Químico Petrolero. México, D.F: Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. 2008. 82 p.
- [21] JIMÉNEZ, Claudia.; CASTELLANO, Oscar y VILLA, Eliana. *La Gestión de Tecnologías Emergentes en el Ámbito Universitario*. En: Revista Tecno Lógicas. Vol. 26 (Junio, 2011). p. 145 – 163.
- [22] JIMÉNEZ, W. C.; URDANETA, J. A., PANG, X., GARZON, J. R., NUCCI, G. y ARIAS, H. *Innovation of Annular Sealants During the Past Decades and Their Direct Relationship with On/Offshore Wellbore Economics*. Society of Petroleum Engineers. 2016. SPE-180041-MS.

- [23] KING ABDULAZIZ CITY FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY RIYADH. *Nanocatalyst for Conversion of Monoolefins, Process for Conversion of Monoolefins and Process for Preparing Catalyst*. Inventores: AL-KINANY, Mohammed.; AL-KHOWAITER, Soliman., AL-DREES, Saud., ALSHEHRY, Feras y AL-RASHEED, Rasheed. B01J 23/882. Fecha de Solicitud: 8 Diciembre, 2010. Europa. Aplicación. Patente No. EP20100194156. Fecha de Publicación: 15 Junio, 2011.
- [24] KONG, Xiangling y OHADI, Michael. *Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry - Overview of the Recent Progress*. Society of Petroleum Engineers. 2010. SPE-138241-MS.
- [25] KRAUS, Richard S. *Prospección, Perforación y Producción de Petróleo y Gas Natural. Sumario*. En: Organización Internacional del Trabajo, O. I. T y Asuntos Sociales. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Petróleo y Gas Natural. 3 ed. España: Ministerio de Trabajo, 2001. p. 75. (1 -15).
- [26] KROPF, A. J.; MILLER, J. T., MARSHALL, C. L. y NEYLON, M. K. *X-Ray Absorption Studies of Catalyst Nanostructures*. En: SCHWARZ, A.; CONTESCU, Cristian y PUTYERA, Karol. Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 6. New York, EEUU: Marcel Dekker, Inc., 2004. 1490 p. ISBN: 978-1-4398-3439-8.
- [27] LI, Li. *Nanoporous Polymers for Membrane Applications*. Tesis, Doctorado en Ingeniería Química. Kongens Lyngby, Dinamarca: Technical University Of Denmark. Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. 2012. 180 p.
- [28] LOWE, Christopher. *Nanobiotechnology: The Fabrication and Applications of Chemical and Biological Nanostructures*. En: Current Opinion in Structural Biology. Vol. 10, No. 4 (Agosto, 2004); p. 428 – 434.

- [29] LUX RESEARCH. *The Nanotech Report*. 4 ed. Key Findings, 2006.
- [30] MARTÍNEZ, Vladimir. *Clasificación de las Externalidades para el Establecimiento de un Modelo de Viabilidad Económico & Social*. Informe 013. Dirección Científica y Proyección del Centro Nacional de Nanotecnología. Empresas Públicas de Medellín. 2013. 38 p.
- [31] MARTÍNEZ, Vladimir.; MEJÍA, Sergio., JARAMILLO, Franklin y ÁLVAREZ, Mónica. *Nanotecnología para Colombia: Una Mirada Histórica, Pasando por el Contexto Global, Latinoamericano y las Regiones*. En: Revista Nano Ciencia y Tecnología. Vol. 2, No. 1 (Abril, 2014); p. 49 – 64.
- [32] MIHAIL. C., Rocco.; CHAD. A., Mirkin y MARK. C., Hersam. *Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020: Retrospective and Outlook*. World Technology Evaluation Center Report. 2010. 614 p.
- [33] MOHAJERI, Mahdi.; HEMMATI, Mahmoud y SADAT SHEKARABI, Azadeh. *An Experimental Study on Using a Nanosurfactant in an EOR Process of Heavy Oil in a Fractured Micromodel*. En: Journal of Petroleum Science and Engineering. 2015. Vol. 126 (Febrero, 2015); p. 162 – 173.
- [34] MOLINA MONTOYA, Nancy. *Herramientas para Investigar: ¿Qué es el Estado del Arte?* En: Revista Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular. Vol. 1, No. 5 (Julio, 2005); p. 73 – 75.
- [35] MONTOYA, Carolina.; FLÓREZ, Elizabeth., ECHEVERRI, Elkin., JARAMILLO, Franklin., MARTÍNEZ, Vladimir., LÓPEZ, Jorge., SANTA MARÍN, Juan Felipe., ÁLVAREZ, Mónica., GAÑÁN ROJO, Piedad y MEJÍA, Sergio. *Política en Nanotecnología para Antioquia (PNA): Visión 2013 – 2021*. 2013. 38 p.

- [36] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). *Real Time Oil Reservoir Evaluation Using Nanotechnology*. Inventores: LI, Jing y MEYYAPPAN, Meyya. G01N 33/24. Fecha de Solicitud: 12 Julio, 2006. Estados Unidos. Concesión. Patente No. US 7875455 B1. Fecha de Publicación: 25 Junio, 2011.
- [37] NEDERLANDSE ORGANISATIE VOOR. *Fluorescent Nano-Sensors for Oil and Gas Reservoir Characterization*. Inventores: TURKENBURG, Daniel.; CHIN, Patrick y FISCHER, Rudolf. PCT/IB2013/00116.1. Fecha de Solicitud: 15 de Abril, 2013. Estados Unidos. Aplicación. Patente No. US20150090456A1. Fecha de Publicación: 2 de abril, 2015.
- [38] OSPINA, Natalia. *Evaluación de la Aplicación de Nanofluidos para Mejoramiento In-Situ del Crudo Pesado*. Tesis, Magíster en Ingeniería de Petróleos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Procesos y Energía. 2015. 57 p.
- [39] OTÁLVARO, Julián. *Síntesis y Evaluación de un Novedoso Nanofluido Basado en Bio-Surfactante para Procesos de Recobro Mejorados de Crudo Pesado*. Tesis, Magíster en Ingeniería Química. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Procesos y Energía. 2015. 46 p.
- [40] PALMBERG, Christopher.; DERNIS, Hélène y MIGUET, Claire. *Nanotechnology: An Overview Based on Indicators and Statistics*. STI WORKING PAPER. Organization for Economic Co-operation and Development. 2009. DSTI/DOC (2009)7.
- [41] PARREIRAS, V. M. A. y ANTUNES, A. M. S. *Technological Prospection on Nanotechnology Applied to the Petroleum Industry: Recent Patents on Nanotechnology*. 2015. p. 106 – 113.

- [42] PÉREZ MARTELO, Constanza y VINCK, Dominique. *Redes Sociotécnicas de Cogestión de Conocimiento en Nanotecnologías en Colombia: ¿Entre la Visibilidad Internacional y la Apropiación Local?* En: Revista Redes. Vol. 15, No. 29 (Mayo, 2009); p. 113 – 137.
- [43] PETRORAZA SAS. *Nanocatalysts for Hydrocracking and Methods of Their Use*. Inventores: PATIÑÓ, José Edgar y CORTÉS, Farid Bernardo. B01J 37/03. Fecha de Solicitud: 5 Junio, 2013. Colombia. Aplicación. Patente No. WO 2013183004 A2. Fecha de Publicación: 12 Diciembre, 2013.
- [44] PHANTOMS FOUNDATION. *Nanociencia y Nanotecnología en España: Un Análisis de la Situación Presente y de las Perspectivas del Futuro*. 2008. 229 p.
- [45] PIANTANIDA, Marco.; VENEZIANI, Maurizio., FANTONI, Roberto Fresca., MICKELSON, William., MILGROME, Oren., SUSSMAN, Allen., ZHOU, Quin., ACKERMAN, Ian y ZETTL, Alex. *An Innovative Wireless H₂S Based on Nanotechnology to Improve Safety in Oil and Gas Facilities*. Society of Petroleum Engineers. 2013. SPE-166544.
- [46] PRADEPP, T. *NANO: The Essentials, Understanding Nanoscience and Nanotechnology*. New Delhi, India: McGraw-Hill. 2007. 432 p. ISBN: 0-07-154830.
- [47] RAMSDEN, Jeremy. *Nanotechnology: An Introduction*. Oxford, Inglaterra: Elsevier, Inc., 2011. 306 p. ISBN: 978-0-08-096447-8.
- [48] RESEARCH INSTITUTE OF PETROLEUM INDUSTRY. *Hydrodesulphurization Nanocatalyst, Its Use and a Process for its Production*. Inventores: AMINI, Bahman.; KHERIROLLAH, Jozani., MANSOUR, Kalbasi., KHORAMI, Payman., MOHAJERI, Ali., PARVIZ, Dorsa., RASHIDI, Alimorad.

- B01J 23/75. Fecha de Solicitud: 2 de Diciembre, 2008. Europa. Aplicación. Patente No. EP2196260A1. Fecha de Publicación: 16 de Junio, 2010.
- [49] REVISTA SEMANA. *Crean Figue Que Purifica El Agua*. En: Revista Semana (18 Julio, 2016); Sección Tecnología. p. 1.
- [50] REVISTA SEMANA, COLCIENCIAS. *Nanotecnología, la Revolución a la que le Apuesta Colombia*. En: Revista Semana. (3 Abril, 2016). Sección Ciencia. p. 72.
- [51] SADJADI, Sodeh. *Catalysis: Nanoparticles and Catalysis*. En: ILDUSOVICH KHARISOV, Boris.; VASILIEVNA KHARISSOVA, Oxana y ORTIZ-MENDEZ, Ubaldo. CRC Concise Encyclopedia of Nanotechnology. Taylor & Francis Group, LLC. 2016. 255 p. ISBN: 978-1-4665-8089-3.
- [52] SALAMANCA-BUENTELLO, Fabio.; PERSAD, Deepa., COURT, Erin., MARTIN, Douglas., DAAR, Abdallah y SINGER, Peter. *Nanotechnology and the Developing World*. En: Plos Med. Vol. 2, No. 5 (Mayo, 2005); p. 383 – 386.
- [53] SAXL, Otilia. *Nanotechnology in Europe, in Nanotechnology: Global Strategies, Industry Trends and Applications*. Chichester, Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd. 2005. 182 p. Online ISBN: 9780470021071.
- [54] SCHLUMBERGER CA LTD. *Oilfield Apparatus Comprising Swellable Elastomers Having Nanosensors Therein and Methods of Using Same in Oilfield Applications*. Inventores: RASHMI B, Bhavsar. C08L101/14. Fecha de Solicitud: 24 Marzo, 2008. Canadá. Aplicación. Patente No. CN 101545371 A. Fecha de Publicación: 29 Mayo, 2008.

-
- [55] SELAND, A.; TORLEIV, B., SURINDER, M y BAKKE, R. *Membrane Filtration of Seawater for Oil Reservoir Injection*. Society of Petroleum Engineers. 1992. SPE-24805-MS.
- [56] SHANBEDI, Mehdi.; AMIRI, Ahmad., ZEINALI HERIS, Saeed., NEWAZ KAZI, Salim y BEE TENG, Chew. *Nanofluids: Basic Principles and Modern Aspects*. En: ILDUSOVICH KHARISOV, Boris.; VASILIEVNA KHARISSOVA, Oxana y ORTIZ-MENDEZ, Ubaldo. CRC Concise Encyclopedia of Nanotechnology. Taylor & Francis Group, LLC. 2016. p. 724 – 768.
- [57] SOHEL MURSHED, S. M.; CHOONG LEONG, Kai y YANG, Chun. *Thermophysical Properties of Nanofluids*. En: SATTLER, Klauss. *Handbook of Nanophysics*. New York, EEUU: Taylor and Francis Group, LLC, 2011. ISBN: 978-1-4200-7545-1. p. 1 – 14.
- [58] STATNANO. *Applications of Nanotechnology in Petroleum Industry Based on Active Enterprises*. Enero, 2016. 49 p.
- [59] SULEIMANOV, B. A.; ISMAILOV, F. S. y VELIYEV, E. F. *Nanofluid for Enhanced Oil Recovery*. En: Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol. 78, No. 2 (Agosto, 2011); p. 431 – 437.
- [60] SURYANARAYANA, C. *Nanostructured Materials*. En: SURYANARAYANA, C. Mechanical Alloying and Milling. New York: EEUU, 2004. p. 333 – 357.
- [61] THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING. *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties*. Reino Unido: The Royal Society, 2004. 115 p. ISBN: 0-85403-604-0.

- [62] THOMAS, Sabu.; RAFIEI, Saeedeh., MAGHSOODLOU, Shima y AFZALI, Arezo. *Foundations of Nanotechnology: Nanoelements Formation and Interaction*. Oakland, Canada: Apple Academic Press, Inc., 2015. 411 p. ISBN: 978-1-4822-5239-2.
- [63] TRANFIELD, David.; DENYER, David y SMART, Palminder. *Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review*. En: British Journal of Management. Vol. 14 (Septiembre, 2003); p. 207 – 222.
- [64] U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *International Energy Outlook 2016 With Projections to 2014*. 2016. 276 p. DOE/EIA-0484(2016).
- [65] UNIV NORTHEAST PETROLEUM. *Preparation Method of Nanofluid for Improving Oil Recovery*. Inventores: FAJUN, Zhao.; YONGJIAN, Liu., JIHONG, Zhang., JIANGUANG, Wei; SHOUBIN, Wen y SHAOBIN, Hu. C09K8/58. Fecha de Solicitud: 16 Abril, 2014. China. Aplicación. Patente No. CN 103937478 A. Fecha de Publicación: 23 Julio, 2014.
- [66] VARGAS, German. *Seis Modelos Alternativos de Investigación Documental para el Desarrollo de la Práctica Universitaria en Educación, el Caso del Proyecto de Extensión REDUC – Colombia en la Universidad Pedagógica Nacional*. En: Revista Educación Superior y Desarrollo. Vol. 5, No. 3 (Mayo, 1987); p. 7 – 37.
- [67] VILA SEOANE, Maximiliano Facundo. *Nanotecnología: Su Desarrollo en Argentina, sus Características y Tendencias a Nivel Mundial. Tesis, Magíster en Gestión de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación*. Los Polvorines, Argentina: Universidad Nacional de General Sarmiento. Instituto de Industria. 2011. 152 p.
- [68] WILSON, A. *Wireless H₂S Sensor Uses Nanotechnology to Improve Safety in Oil and Gas Facilities*. Society of Petroleum Engineers. 2014. SPE-0814-0101-JPT.

-
- [69] WONGLIMPIYARAT, Jarunee. *The Nanorevolution of Schumpeter's Kondratiev Cycle*. En: Technovation. Noviembre, Vol. 25, No. 11 (Noviembre, 2005); p. 1349 – 1354.
- [70] WORLD ENERGY SYSTEM, INC. *Process for Dispersing Nanocatalysts into Petroleum-Bearing Formations*. Inventores: LANGDON, John y WARE, Charles H. E213 43/24. Fecha de Solicitud: 18 Enero, 2008. Estados Unidos. Concesión. Patente No. US 7712528 B2. Fecha de Publicación: 11 Mayo, 2010.
- [71] WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION. *Pipeline Leakage Protection Vault and System Therof*. Inventor: ZULFIQUAR, Mohammed. IPC: F17D 5/02. Fecha de Solicitud: 18 de Noviembre, 2014. Estados Unidos. Aplicación. Patente No. WO2015071633A2. Fecha de Publicación: 21 de Mayo, 2015.
- [72] ZABALA ROMERO, R. D.; ACUÑA, H. M., CORTES, F., PATIÑO, J. E., CESPEDES CHAVARRO, C., MORA, E., BOTERO, O. F., y GUARIN, L. *Application and Evaluation of a Nanofluid Containing Nanoparticles for Asphaltenes Inhibition in Well CPSXL4*. Offshore Technology Conference. 2013. OTC-24310-MS.

ANEXOS

ANEXO A. Artículo Publicable

Se encuentra en el archivo denominado como Paper en formato Word y PDF.

Como objetivo del trabajo de investigación se planteó la elaboración de este artículo que se presenta como una opción de publicación en una revista o publicación seriada.

REVISIÓN DE LA APLICACIÓN DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO Y GAS

Leidy Yuliana Vivas Riaño¹

RESUMEN

Este artículo presenta una investigación realizada sobre la Nanotecnología y sus aplicaciones en la industria del Petróleo y Gas a nivel mundial, en la cual se desarrolló una revisión sistemática con el fin de establecer un marco teórico de referencia que plasme el estado actual de la literatura de la temática y contribuya a su conceptualización y comprensión, y, ilustre los potenciales impactos positivos en la industria, debido a su desarrollo e implementación.

La investigación desarrollada permitió el análisis de la temática de Nanotecnología, su historia y antecedentes, la definición y comprensión de sus conceptos básicos, la identificación y clasificación de sus aplicaciones en áreas específicas de la industria del Petróleo y Gas, a través del análisis de contenido realizado a artículos científicos, tesis de grado, publicaciones seriadas, patentes y material editorial seleccionados.

Palabras Claves: Nanotecnología, Aplicaciones, Industria del Petróleo y Gas.

ABSTRACT

This project presents a research about the main applications of Nanotechnology in Oil and Gas industry worldwide, using a systematic review methodology to establish a theoretical framework that reflects the current state of the literature and contribute to its conceptualization and understanding, and, illustrates the potential positive impacts on the industry, caused by his development and implementation.

The research developed allowed the analysis of Nanotechnology, his history and background, the definition of the basic concepts and the identification of his application in specific areas of the Oil and Gas industry, through the analysis of the selected scientific articles, dissertations, patents, serial publications and reference documents.

Key Words: Nanotechnology, Applications, Oil and Gas Industry.

¹ Escuela de Ingeniería De Petróleos, Universidad Industrial De Santander, UIS, Carrera 27 Calle 9, Bucaramanga, Colombia.
e-Mail: leydy.vivas@correo.uis.edu.co