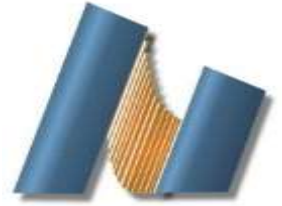




UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
CENTRO DE NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍA



LICENCIATURA EN NANOTECNOLOGÍA
MICROELECTRÓNICA Y NANOFABRICACIÓN

PROPULSIÓN Y MANIPULACIÓN DE NANOMOTORES DE Fe_2O_3 TIPO NÚCLEO-CORAZA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN NANOTECNOLOGÍA

PRESENTA:
JULIÁN DAVID ASSAD BUSTILLOS

DIRECTOR DE TESIS
DR. VÍCTOR JULIÁN GARCÍA GRADILLA

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA ENERO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hago constar que el trabajo que presento es de mi autoría y que todas las ideas, citas textuales, datos, ilustraciones, gráficas, etc. sacados de cualquier obra o debidas al trabajo de terceros, han sido debidamente identificados y citados en el cuerpo del texto y en la bibliografía y acepto que en caso de no respetar lo anterior puedo ser sujeto de sanciones universitarias.

Afirmo que el material presentado no se encuentra protegido por derechos de autor y me hago responsable de cualquier reclamo relacionado con la violación de derechos de autor.

Julián David Assad Bustillos

Agradecimientos

A Ratt, Tordo, Toacha y Anit por el amor que me han dado.

A toda mi familia y amigos, ya que ninguna persona llega lejos en la soledad.

Al Dr. Víctor Julián García Gradilla por su paciencia y serenidad, una gran virtud digna de reconocer. De igual manera a Alex Tiznado, Ana Mízquez, Aritz Barrondo, Eugenio Méndez y Óscar Raymond por su invaluable apoyo.

Al proyecto CB-2014/239953 del CONACYT, por financiar este trabajo.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Nanomotores	2
1.3. Nanorreactores	4
1.4. Régimen de bajo número de Reynolds y movimiento browniano.....	5
2. Antecedentes	7
2.1. Movimiento ultrasónico de nanoalambres guiado por un campo magnético	7
2.2. Propulsión acústica de nanocorazas.....	8
2.3. Movimiento de micro y nanopartículas basado en campos magnéticos	9
2.3.1. Magnetostática y fuerzas magnéticas	9
2.3.2. Manipulación de estructuras basada en campos magnéticos alternos	15
2.3.3. Manipulación de estructuras basada en campos magnéticos no homogéneos	17
3. Hipótesis.....	19
4. Objetivos	20
4.1. Objetivo general.....	20
4.2. Objetivos particulares	20
5. Metodología	21
5.1. Propulsión de partículas núcleo-coraza por ultrasonido	22
5.2. Propulsión de partículas núcleo-coraza por campos magnéticos.....	24
5.2.1. Propulsión de partículas núcleo-coraza de Fe ₂ O ₃ mediante un campo magnético alterno y homogéneo	25
5.2.1.1. Pruebas de movimiento de partículas núcleo-coraza mediante campos magnéticos alternos	25

5.2.2.	Propulsión de partículas núcleo-coraza mediante un campo magnético no homogéneo	26
5.2.2.1.	Diseño y fabricación del sistema de propulsión por campos magnéticos no homogéneos o gradientes.....	26
5.2.2.2.	Caracterización magnética del sistema de propulsión por campos magnéticos no homogéneos.....	27
5.2.2.3.	Pruebas de movimiento de partículas núcleo-coraza mediante campos magnéticos no homogéneos.....	28
6.	Resultados	29
6.1.	Pruebas de propulsión de las partículas núcleo-coraza de Fe_2O_3 por medio de la celda ultrasónica	29
6.2.	Pruebas de propulsión de las partículas núcleo-coraza de Fe_2O_3 con un par de bobinas de Helmholtz	31
6.2.1.	El efecto del campo alterno en las partículas	32
6.3.	Pruebas de propulsión de las partículas núcleo-coraza de Fe_2O_3 con un par de solenoides con núcleo ferromagnético.....	34
6.3.1.	Caracterización del sistema de manipulación magnética	34
6.3.2.	Trayectorias y velocidades de las partículas núcleo-coraza de Fe_2O_3	40
6.3.3.	El efecto del campo no homogéneo en las partículas.....	44
7.	Conclusiones	48
8.	Referencias	50

Índice de figuras

Figura 1 i) Esquema de una nanopartícula núcleo-coraza. ii) Diferentes nanopartículas de núcleo-coraza: (a) nanopartícula de núcleo esférico; (b) nanopartícula núcleo hexagonal; (c) múltiples materiales núcleo recubiertos por una coraza de un solo material; (d) material nanomatrix; (e) núcleo móvil dentro de coraza hueca. ^[15,16]	5
Figura 2. Ilustración esquemática de una aleación de metal Au – Ni – Au impulsada por ultrasonido y guiada por el campo magnético. ^[20]	8
Figura 3. A) Esquema del método de fabricación de las nanocorazas. B) Movimiento simultaneo de las nanocorazas propulsadas. ^[21]	8
Figura 4 a) Comportamientos de B/H para materiales ferromagnéticos, diamagnéticos y paramagnéticos.....	12
Figura 5 Ciclo de histéresis general para un material ferromagnético. ^[24]	13
Figura 6. Comparación entre el ciclo de histéresis de un material ferromagnético suave y duro.....	13
Figura 7. A) Gráfica típica de un material ferromagnético. B) Para valores de campo inducido B pequeños, se trabaja con la permeabilidad inicial. C) Para valores de campo mayores, con la permeabilidad máxima.....	14
Figura 8. Estructuras helicoidales ampliamente usadas en sistemas de campos magnéticos rotatorios. A) Imagen SEM de una estructura helicoidal utilizada por Abbott et al. ^[27] B) La bobina triaxial de Helmholtz utilizada por Gao et al., para generar el campo magnético giratorio y esquema del movimiento de su estructura. ^[28] C) Esquema de una hélice con una punta ferromagnética en un campo magnético giratorio. El momento magnético de la punta se alinea constantemente con el campo giratorio B. ^[22]	16
Figura 9. Microrrobots utilizados en los sistemas de campos magnéticos no homogéneos. A) Microrrobot de Ni con longitud de 940 μm B) Estructura magnética de NdFeB con longitud de 2.7 mm. C) Diagrama del microrrobot cilíndrico en el espacio de trabajo para su manipulación. Longitud de 1000 μm ^[17, 18, 29]	17
Figura 10. Separación de partículas magnéticas mediante un imán permanente. ^[19]	18
Figura 11. Micrografía por microscopía electrónica de transmisión (TEM) de las partículas empleadas.....	21

Figura 12. Esquema de preparación de las partículas empleadas. Se depositaron en un tubo Eppendorf, se pusieron en solución y finalmente se dispersaron en una tina ultrasónica	22
Figura 13. Sistema de propulsión ultrasónica. A) Esquema de la placa de ultrasonido. B) Fotografía del sistema	23
Figura 14. A) Se introduce el imán permanente a la vecindad de las partículas para que puedan sentir el campo magnético del imán. B) Rotación del imán para dar dirección a las partículas.....	24
Figura 15. Sistema magnético empleado para campos rotatorios. A) Esquema del sistema de bobinas de Helmholtz ^[28] . B) Fotografía del sistema de bobinas de Helmholtz.....	25
Figura 16 Esquema del sistema magnético empleado para la generación de campos no homogéneos.....	27
Figura 17. Fotografía del sistema con la punta del gaussímetro en el área de trabajo del sistema.....	28
Figura 18 Trayectoria de las partículas núcleo-coraza de Fe ₂ O ₃ -@Fe ₂ O ₃ impulsadas por ultrasonido en tres tiempos diferentes: A) t=0s, B) t=2.0s, C) t=4.0s. Condiciones: 4.1 MHz, 5 V. Todas las partículas se desplazaron en la misma dirección que la partícula resaltada.....	30
Figura 19. Comparación entre una partícula de tipo Janus ^[32] y una de tipo núcleo-coraza ^[15] . La asimetría y la densidad de las partículas juegan un papel importante en el movimiento por ultrasonido.	31
Figura 20. Pruebas de propulsión de partículas núcleo-coraza de Fe ₂ O ₃ -@Fe ₂ O ₃ por medio de campos magnéticos alternos. Posición de un cúmulo de partículas después de un periodo: A) t=0s, B) t=0.10s, C) t=0.20s. Condiciones: 50 Hz, 3.5 A.....	32
Figura 21. El torque en una partícula magnetizada en un campo magnético. Si la partícula es libre de rotar, ésta girará hasta encontrarse paralela en la dirección del campo.....	33
Figura 22. Curvas B/H para los dos embobinados utilizados en el sistema.	35
Figura 23. Esquema de un solenoide de longitud finita. Se puede calcular el campo magnético inducido B para cualquier punto dentro del solenoide.	36
Figura 24. Gráficas del incremento del campo al aumentar la corriente B/A de los embobinados izquierdo y derecho en tres puntos en el área de trabajo: en la superficie	

(línea gris), en el centro (línea roja) y en el extremo opuesto de cada embobinado (línea azul).....	39
Figura 25. Trayectorias de las partículas de tipo núcleo-coraza de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-@Fe}_2\text{O}_3$ impulsadas por campos magnéticos no homogéneos a diferentes valores de corriente durante 30s. Mediciones a: A) 0.2 A (60.74 μm recorridos), B) 0.4 A (76.50 μm recorridos) y C) 0.6 A (96.05 μm recorridos)	40
Figura 26. Comparación del aumento de la trayectoria total recorrida durante 30s conforme aumentó la corriente aplicada (0.2, 0.4 y 0.6 A).	41
Figura 27. Trayectoria de partícula de tipo núcleo-coraza de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-@Fe}_2\text{O}_3$ impulsada por campos magnéticos no homogéneos a 1.1 A durante 4.01s.....	41
Figura 28. Comparación del tiempo transcurrido en recorrer la misma distancia (96.05 μm) entre los motores propulsados a diferente corriente. Los nanomotores propulsados a 0.6 A, tardaron 30s (línea azul); los propulsados a 1.1, tardaron 1.85 s (línea verde).....	42
Figura 29. Trayectorias de las partículas de tipo núcleo-coraza de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-@Fe}_2\text{O}_3$ impulsadas por campos magnéticos no homogéneos a 1.1 A. Se presenta control en la dirección de las partículas a lo largo del eje x.....	44

Índice de tablas

Tabla 1 Gradiente magnético en tres puntos del área de trabajo conforme cambió la intensidad de corriente I.	39
Tabla 2. Velocidades promedio alcanzadas a diferentes valores de intensidad de corriente I.	43

1. Introducción

1.1. Generalidades

Cuando la humanidad pudo dedicarse al estudio de su entorno, dejando de preocuparse por su supervivencia inmediata, fue cuando se considera que empezó la historia humana. El descubrimiento de la agricultura y el desarrollo de las primeras herramientas permitió que los seres humanos pudieran asentarse, mejorando su calidad de vida. Posteriormente la escritura fue desarrollada, consecuencia de la evolución del pensamiento, y logró que la transmisión de ideas se facilitara dentro de las comunidades. Con el paso del tiempo, estos primeros asentamientos se convirtieron en ciudades, las cuales fungieron como ateneos en los que el desarrollo tecnológico surgió en pro del mejoramiento de la especie. ^[1]

De todo el desarrollo tecnológico producto de la humanidad, cabe destacar que todo aquello relacionado con el movimiento fue de gran interés. Desde la antigüedad, ya existían unas primeras nociones de la física, como fue el caso de Aristóteles, quien fue precursor y referente de la época con ideas que prevalecieron por años. ^[2] Siglos después, Isaac Newton publicó su obra Principia, en la que consolida las bases de la mecánica clásica (también conocida como mecánica Newtoniana). ^[3] A lo largo de los años se fueron entendiendo los fundamentos del movimiento y con ello se lograron crear dispositivos más avanzados, como aquellos capaces de generar movimiento. Aunque ya existieran conceptos de máquinas automatizadas, aquellas no fueron posibles de manera efectiva sino hasta hace aproximadamente dos siglos, durante la revolución industrial, gracias al avance tecnológico en el aspecto energético y el desarrollo de los primeros motores funcionales. ^[4] Desde entonces, se ha dedicado un gran número de investigaciones en el desarrollo de nuevas formas de generar movimiento y también al mejoramiento en la eficiencia de los motores.

Ahora es posible lograr el movimiento automatizado a la voluntad humana, que es reflejado en las máquinas que hoy en día conocemos y usamos, desde los ejemplos más evidentes como un avión o un automóvil, hasta una lavadora, encontrada en un gran número de hogares. Actualmente, la palabra motor no resulta ajena. Esta palabra se define como una máquina

destinada a producir movimiento a expensas de otra fuente de energía. ^[5] Tomando esa definición, no existe nada que lo limite a dimensiones de longitud específicas. Por tal razón, es natural que se empujen los límites en el estado del arte ya que la humanidad ha sido caracterizada por una constante ambición a conocer y controlar cada vez más su entorno.

Con el desarrollo de la nanotecnología se ha dado paso a una nueva faceta de la ciencia que aún tiene bastante por explorar. Se ha abierto la idea de escalar los dispositivos y máquinas empleadas actualmente a tamaños de escalas nanométricas. A este tipo de dispositivos, se les añade el prefijo de acuerdo con las dimensiones de estos. Por lo que, en el caso de un motor producido a la nanoescala, se emplea el término nanomotor. El paradigma de la "manipulación átomo por átomo", que presenta la nanotecnología en la extensión de los procesos de miniaturización existentes y el traslado de los métodos a escala de nanómetros tienen una gran fuerza, ya que extienden el poder de la manipulación a una escala que está fuera de proporción con nuestro entorno. ^[6]

1.2.Nanomotores

Los nanomotores constituyen en la actualidad un campo de investigación relativamente nuevo, que no lleva más de 20 años. Los nanomotores son dispositivos diminutos que pueden ser autopropulsados o alimentados externamente en la fase líquida por diferentes tipos de fuentes de energía, como catalítica, magnética o acústica. ^[7] Estos dispositivos exhiben una variedad de características tales como: movimientos mecánicos, por ejemplo: rotación, balanceo, desplazamiento, contracción; también diferentes composiciones; tamaños, que van desde la escala nanométrica hasta la microescala; formas, como alambres, varillas, esferas y tubos; así como mecanismos de propulsión. De acuerdo con Chalupniak et al., una clasificación global de los nanomotores puede realizarse con base en el mecanismo de propulsión de los mismos. ^[8]

Los nanomotores pueden moverse como resultado de varias reacciones químicas y fenómenos físicos. Una de las áreas en las que se inició el desarrollo de los nanomotores fue aquella que funciona químicamente. Posteriormente, se descubrió que además de los

procesos químicos, el movimiento también puede ser inducido por energía física, como campos magnéticos o ultrasonidos. ^[8] Por lo tanto, la forma en la que se comportarán los nanomotores dependerá de parámetros como tipo de combustible, su concentración, así como de las propiedades físicas del motor, como las dimensiones y la relación entre la superficie y el volumen. ^[9]

El mecanismo de propulsión por medio de ultrasonido ha generado interés, ya que no requiere ningún tipo de combustible químico. El ultrasonido opera en un rango que no es audible para los humanos, y estas ondas acústicas de frecuencia demostraron la capacidad de rotar, alinear, propulsar y ensamblar estructuras en una solución de alta fuerza iónica. ^[12]

Sin embargo, uno de los enfoques más prometedores en comparación con otros mecanismos de propulsión es el de los nanomotores impulsados por campos magnéticos. Esto es debido a que los motores magnéticos se pueden dirigir eficientemente según el tipo de campo magnético utilizado: homogéneo, no homogéneo, giratorio u oscilante o el tipo de material magnético dentro del motor: ferromagnético, paramagnético o diamagnético. ^[10] Dado que el movimiento es inducido por campos magnéticos externos, la presencia de cualquier combustible en el entorno del nanomotor tampoco es necesaria. Además, es considerado como una fuente de propulsión relativamente barata ya que un sistema magnético puede constar de simplemente un imán, y puede integrarse fácilmente en dispositivos más sofisticados. ^[8] Debido a la guía magnética externa, los motores pueden moverse según la trayectoria deseada. ^[11]

Actualmente, continúa la investigación respecto a las formas en las que se puede generar movimiento en la nanoescala. Siguen realizándose pruebas para posibles aplicaciones tanto en la creación de otros dispositivos como en aplicaciones *in vivo* en sistemas biológicos. La fabricación de dispositivos tan pequeños, que era una idea que antaño parecía inverosímil, podrá convertirse en algo regular; a tal grado que el no creer en el control total de estos dispositivos diminutos será igual de ridículo que aquellos que creían que era imposible crear una máquina capaz de volar.

Se han realizado avances desde la creación de los primeros nanomotores, lo cual ha derivado en que se conozcan diversas técnicas de fabricación en la actualidad para la obtención de estructuras específicas. La forma deseada de estas estructuras variará según el medio o el

mecanismo de propulsión que se desea utilizar. Diferentes estructuras se han estudiado en estos últimos años, algunas de ellas serán presentadas más adelante. Sin embargo, poca o nula investigación se ha realizado en otras diversas estructuras para determinar si pueden fungir como un nanomotor capaz de ser propulsado y dirigido de una manera controlada. Un ejemplo son los nanorreactores, que son dispositivos capaces de llevar a cabo reacciones en la escala nanométrica y que pueden tener conformaciones muy peculiares.

1.3. Nanorreactores

Los nanorreactores son estructuras que cuentan con una cavidad interna y la capacidad de tener encapsulado algún otro material interno. Este elemento interno puede estar aislado dentro del volumen de la cavidad, pero también puede inducir una conformación específica entre ambas partes. Poseen varias aplicaciones, especialmente en catálisis. ^[13] Entre los diversos tipos de nanorreactores, las corazas autoensambladas han demostrado su uso como buenos catalizadores de una amplia gama de reacciones. También son candidatos viables para una variedad de aplicaciones terapéuticas, tales como, la terapia de reemplazo enzimático o la administración de profármacos. ^[14]

Los avances en las nuevas técnicas de síntesis permiten fabricar no solo las nanopartículas de forma esférica, sino también una variedad de otras formas. Estas partículas huecas pueden clasificarse como partículas de tipo núcleo-coraza o core-shell en inglés (Figura1). Las combinaciones entre el material del núcleo y de la coraza pueden consistir de diferentes combinaciones como: materiales inorgánicos-inorgánicos, inorgánicos-orgánicos, orgánicos-inorgánicos y orgánicos-orgánicos. La elección del material de cubierta de la nanopartícula núcleo-coraza generalmente depende en gran medida de la aplicación final y el uso que se le desea dar a la partícula. ^[15] Su estructura también puede estar conformada de diferentes tamaños y formas, tanto del núcleo como la coraza. Pueden tener forma esférica, céntrica, excéntrica, en forma de estrella o tubular. ^[16]

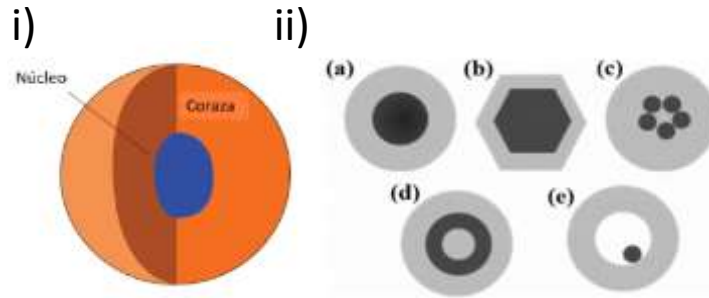


Figura 1 i) Esquema de una nanopartícula núcleo-coraza. ii) Diferentes nanopartículas de núcleo-coraza: (a) nanopartícula de núcleo esférico; (b) nanopartícula núcleo hexagonal; (c) múltiples materiales núcleo recubiertos por una coraza de un solo material; (d) material nanomatrix; (e) núcleo móvil dentro de coraza hueca. ^[15,16]

Debido a la gran versatilidad de estas estructuras, pueden conformarse de distintos materiales y poseer un gran número de aplicaciones. ^[14] Pero no todos los nanorreactores operan en las mismas condiciones, ya que algunos pueden reaccionar de manera negativa o no esperada en sistemas complejos, como sucede en pruebas *in vivo*. Las estructuras de tipo núcleo-coraza compuestas de materiales magnéticos han resultado de gran interés ya que se conocen diversas técnicas reproducibles para su fabricación y suelen ser inertes en seres vivos, además de que pueden estar suspendidos en solución sin reaccionar en el medio. ^[8]

1.4. Régimen de bajo número de Reynolds y movimiento browniano

Las estructuras de tipo núcleo coraza usualmente son utilizadas en un medio acuoso. Cuando son dispersadas en un fluido, su comportamiento cambiará de acuerdo al medio en el que se encuentre, así como su concentración. ^[16] Si una estructura núcleo-coraza o cualquier otra partícula en solución requiere ser desplazada en el medio, es necesario aplicar una fuerza que permita el movimiento de la partícula. La trayectoria y el desplazamiento de la partícula también dependerá fuertemente del tipo de fluido en el que se encuentre. Dependiendo de la viscosidad del fluido, se puede presentar un flujo laminar o turbulento al momento de aplicar la fuerza de desplazamiento necesaria. Eso es fácilmente visto en la escala macrométrica, pero el comportamiento de una partícula en un fluido es diferente cuando se trabaja en una escala menor a $1 \mu\text{m}$. ^[7]

De manera similar a los motores en la escala macrométrica, los motores que funcionan en la micro y nanoescala convierten la energía de varias fuentes en movimiento mecánico. Ese es el principio de cualquier motor, sin embargo, también presentan diferencias significativas que se deben tomar en cuenta. ^[7] Una de ellas es que a medida que disminuye el tamaño de una partícula en un líquido, las fuerzas inerciales dejan de actuar sobre ella. Conforme las fuerzas inerciales dejan de tomar importancia en el movimiento en escalas micro y nanométricas, las fuerzas viscosas en un fluido toman relevancia, convirtiéndose en dominantes. El número de Reynolds (Re) es un número adimensional que representa la proporción de estas dos fuerzas. ^[17] Esta proporción está relacionada con la densidad (ρ), la velocidad de la partícula, la viscosidad del medio (η) y la longitud característica del objeto. Esto resulta en un número Re del orden de 10^{-4} para los motores en la micro y nanoescala. ^[7] Un entorno de bajo número de Reynolds tiene diferentes dinámicas de fluidos en la micro y nanoescala en comparación con aquellas en la macroescala. Aquello plantea la necesidad de estrategias adecuadas de propulsión capaces de ejercer una fuerza constante para generar movimiento instantáneo, dado que la inercia ya no contribuye efectivamente al movimiento. ^[8]

Además, para los motores a nano y microescala que funcionan en medios acuosos, las colisiones con moléculas de agua se vuelven cada vez más significativas a medida que disminuyen sus tamaños. El movimiento browniano inducido por tales colisiones interfiere significativamente con la direccionalidad de los motores con un tamaño inferior a $1 \mu\text{m}$, y los motores parecen dispersarse al azar. ^[7, 18, 19]

2. Antecedentes

Como fue mencionado, diversos mecanismos de propulsión se han desarrollado para la manipulación de partículas para fungir como nanomotores. Para fines de este trabajo, se abordó una parte del estado del arte previo en lo concerniente a la propulsión por ultrasonido y propulsión magnética. El primer mecanismo está fundamentado en el uso de frecuencias ultrasónicas que permiten rotar, alinear y propulsar estructuras; mientras que el segundo se basa en la utilización de una fuente magnética para guiar en una trayectoria deseada a una estructura afín al campo externo aplicado.

2.1. Movimiento ultrasónico de nanoalambres guiado por un campo magnético

Uno de los trabajos más significativos del movimiento de micro y nanomotores por medio de ultrasonido ha sido elaborado por García-Gradilla et al.^[10]

Tres segmentos de nanoalambres conformados por Au-Ni-Au se funcionalizaron con lectina y un anticuerpo contra la Proteína A (proteína de superficie que se encuentra en la pared celular de *Staphylococcus aureus*) (Figura 2). En aquellas pruebas se realizó la guía utilizando un campo magnético suministrado por un imán permanente y un transductor piezoeléctrico, el cual generó frecuencias de ultrasonido para generar movimiento en los motores (Figura 2). Adicionalmente, se utilizaron tales nanoalambres para la detección de bacterias (*Escherichia coli*), así como en pruebas para la administración de fármacos, debido a que contaba con un segmento polimérico sensible al pH.

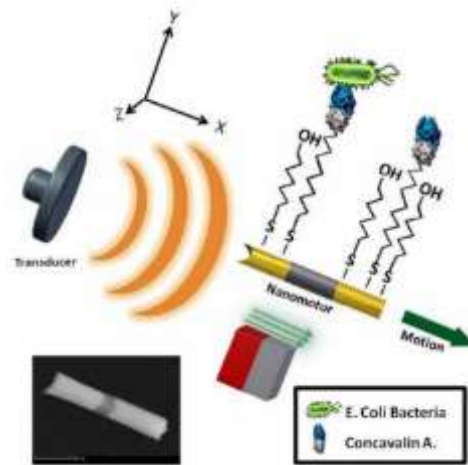


Figura 2. Ilustración esquemática de una aleación de metal Au – Ni – Au impulsada por ultrasonido y guiada por el campo magnético. ^[20]

2.2. Propulsión acústica de nanocorazas

En el trabajo realizado por Soto et al. ^[21], se realizó un nuevo diseño para partículas capaces de desplazarse por métodos acústicos, utilizando una geometría de nanocorazas. Tal estructura se sintetizó utilizando un proceso de plantilla de esfera como se observa en la Figura 3. Estos nanomotores de esfera hueca mostraron una propulsión acústica altamente eficiente en la nanoescala. El mecanismo de propulsión de estos motores está basado en diferencias de presión sobre la asimetría de su superficie. Esta presión es suficiente para producir la fuerza necesaria para generar movimiento.

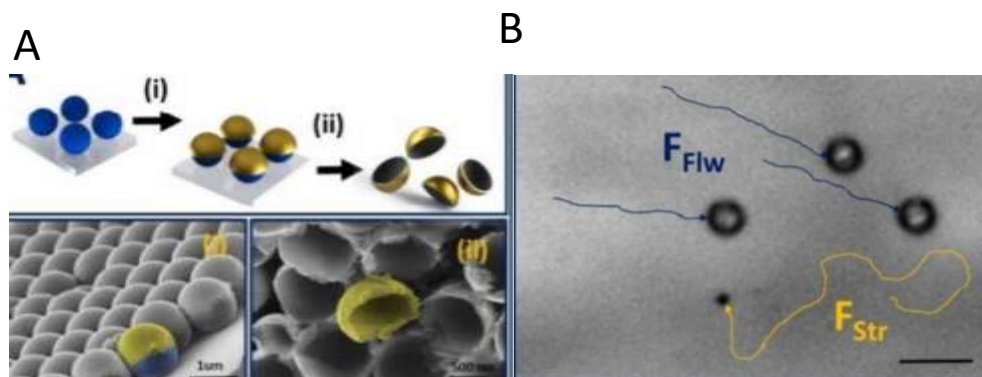


Figura 3. A) Esquema del método de fabricación de las nanocorazas. B) Movimiento simultaneo de las nanocorazas propulsadas. ^[21]

2.3. Movimiento de micro y nanopartículas basado en campos magnéticos

En los últimos años, se han fabricado diferentes estructuras magnéticas con diversas formas como esferas, alambres y hélices. ^[10] Dependiendo de la forma de la estructura, el mecanismo de propulsión empleado ha variado según lo necesario para que la estructura sea propulsada. Entre los mecanismos empleados, dos de ellos destacaron en la elaboración del presente trabajo: mediante la utilización de un campo magnético alterno, el cual es un mecanismo bastante recurrente; y por medio de un campo magnético no homogéneo, siendo este último menos utilizado y con un amplio potencial por explorar. Para entender el funcionamiento de ambos mecanismos de propulsión, se deben entender los fenómenos físicos en donde intervienen campos magnéticos.

2.3.1. Magnetostática y fuerzas magnéticas

Los fenómenos magnéticos han despertado curiosidad a lo largo de la historia, misma que ha hecho que se estudien desde la edad antigua. No obstante, fue hasta el siglo pasado que se sentaron las bases para poder entender estos fenómenos. Los campos magnéticos pueden ser producidos por corrientes eléctricas libres o por materiales magnéticos, como los imanes permanentes. ^[22] Un campo magnético H es el que se produce cuando hay una carga eléctrica en movimiento. Esto fue descubierto por primera vez por Oersted en 1819. ^[23] La inducción magnética, denotada por B , representa la magnitud del campo interno de un material que está sujeto a un campo H . De acuerdo con la ley de Ampere, la inducción magnética B es la respuesta en un medio cuando se ha generado un campo H por una corriente ^[23,24]

$$B = \mu H \quad \text{Ec. 1}$$

Las unidades para B son teslas [T] mientras que para H son [A/m]. La relación entre B y H está denotada por parámetro μ , el cual se conoce como permeabilidad. Esta es una propiedad específica del medio a través del cual pasa el campo H y en el que se mide B . La permeabilidad magnética μ tiene dimensiones [H / m]. En el vacío, es decir, en ausencia de

un material al cuál inducir un campo magnético, la permeabilidad tiene un valor $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \approx 12.57 \times 10^{-7} \frac{H}{m}$. [23]

La ley Biot-Savart, permite calcular el campo magnético B o H generado por una corriente eléctrica. Es considerada una de las leyes fundamentales del electromagnetismo. La ley proporciona la contribución de campo generada por una corriente que fluye en un elemento de longitud del conductor

$$dB = \frac{\mu_0 I dL \times u}{4 \pi r^2} \quad \text{Ec. 2}$$

donde I es la corriente que fluye en un elemento de longitud dL en un conductor, r es la distancia radial, u es un vector unitario a lo largo de la dirección radial y dB es la contribución al campo magnético en r debido al elemento de corriente IdL [23, 25]

La permeabilidad en un material guarda relación con la permeabilidad del vacío. Esta relación está dada por:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \text{Ec.3}$$

donde μ_r se llama la permeabilidad relativa y es un valor adimensional. La permeabilidad relativa de un material es una medida del grado en que se puede magnetizar el material, o la facilidad con que se puede inducir un campo B en presencia de un campo H comparado con el de la permeabilidad del vacío μ_0 .

Los campos magnéticos producidos por materiales magnéticos son el resultado de la magnetización M (momento magnético por unidad de volumen) dentro del material [A/m]. La magnitud de M es proporcional al campo aplicado de la siguiente manera: [22]

$$M = \chi H \quad \text{Ec. 4}$$

A χ se le conoce como susceptibilidad magnética. La susceptibilidad magnética y la permeabilidad relativa se relacionan de la siguiente manera:

$$\chi = \mu_r - 1 \quad \text{Ec. 5}$$

Estas expresiones permiten ver que la inducción magnética B consta de dos contribuciones: una del campo magnético y la otra de la magnetización. La inducción magnética es simplemente la suma de estas dos contribuciones $\mu_0 H$ y $\mu_0 M$:^[23,18]

$$B = \mu_0 (H + M) \quad \text{Ec. 6}$$

En presencia de un campo magnético H , los momentos magnéticos dentro de un material interactúan con dicho campo. Debido a que la forma de esta interacción es distinta para ciertos grupos de materiales, existen diferentes clasificaciones de los materiales. La más común es la clasificación de los materiales en paramagnéticos, diamagnéticos y ferromagnéticos. Existen otros grupos como los ferrimagnéticos, antiferromagnéticos o superparamagnéticos, pero estos abarcan un número más reducido de materiales además de que todos estos grupos fueron descubiertos años después de los tres grupos clásicos ya mencionados.^[23]

Volviendo a la clasificación inicial, los materiales diamagnéticos son aquellos para los cuales χ es pequeño y negativo ($\chi \approx -10^{-5}$). Su respuesta magnética se opone al campo magnético aplicado. En los materiales paramagnéticos, χ es pequeño y positivo ($\chi \approx 10^{-3} - 10^{-5}$). La magnetización de los paramagnéticos es débil pero alineada paralelamente a la dirección del campo magnético aplicado.^[22,23] Aunque poseen valores de susceptibilidad diferentes, los materiales para y diamagnéticos tienen en común que la relación entre B y H es lineal, que no sucede así con los ferromagnéticos.^[24] (Figura 4)

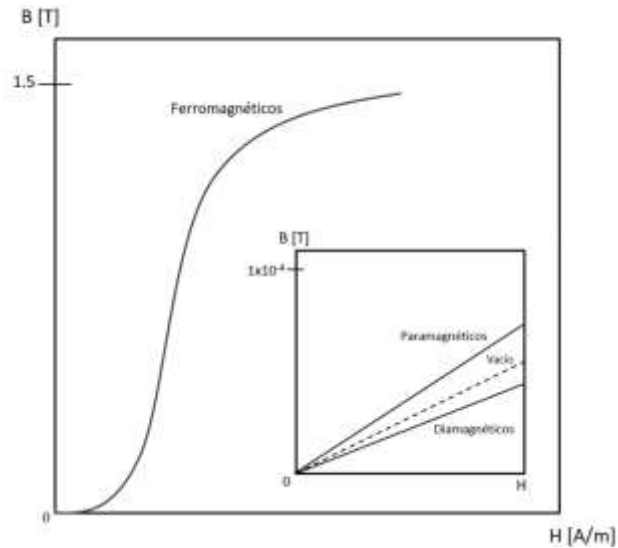


Figura 4 a) Comportamientos de B/H para materiales ferromagnéticos, diamagnéticos y paramagnéticos.

Los materiales ferromagnéticos poseen susceptibilidad positiva, mucho mayor que 1 y típicamente pueden tener valores de $\chi \approx 50-10000$. El ferromagnetismo ocurre para materiales con electrones no apareados, es decir, aquellos electrones cuyos espines no están compensados por otros electrones de espín opuesto. Como consecuencia, es energéticamente favorable para que los espines cercanos se alineen en paralelo y formen dominios. Cada dominio suele estar orientado en la misma dirección, pero esta dirección varía entre los diferentes dominios. [23]

Al comenzar con material no magnetizado ($B = 0$), la aplicación de un campo magnético conduce a la curva discontinua en la figura 3. La magnetización se satura cuando todos los dominios apuntan en la misma dirección. Cuando se elimina el campo externo, el valor del campo B no vuelve a cero y el material se mantendrá magnetizado. Si el campo H se reduce al invertir la dirección del campo, la curva tampoco volverá sobre su trayectoria original. Esto produce un efecto de histéresis en el que el campo B se retrasa con respecto al campo H aplicado (Figura 5). Para reducir el campo B dentro del material a cero, se debe aplicar un campo H de magnitud H_c en una dirección opuesta a la del campo original. Este campo necesario para cambiar la dirección de la magnetización se denomina campo coercitivo. [22,24]

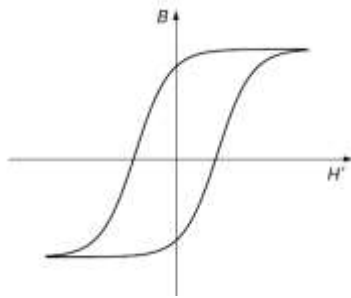


Figura 5 Ciclo de histéresis general para un material ferromagnético. [24]

El tamaño y la forma de la curva de histéresis para materiales ferromagnéticos son de gran importancia. Los materiales ferromagnéticos se clasifican como duros o suaves según su ciclo de histéresis (Figura 6). Los materiales magnéticos duros suelen utilizarse en imanes permanentes, ya que poseen una alta resistencia a la desmagnetización. Se caracterizan por poseer alta remanencia del campo inducido, coercitividad, así como baja permeabilidad inicial y altas pérdidas de energía de histéresis. Por otra parte, los materiales magnéticos suaves se utilizan en dispositivos que están sujetos a campos magnéticos alternos y en sistemas que puedan modular el campo magnético fácilmente, ya que las pérdidas de energía serán bajas. Para que esto ocurra, el área relativa del bucle de histéresis debe ser pequeña. [23, 24]

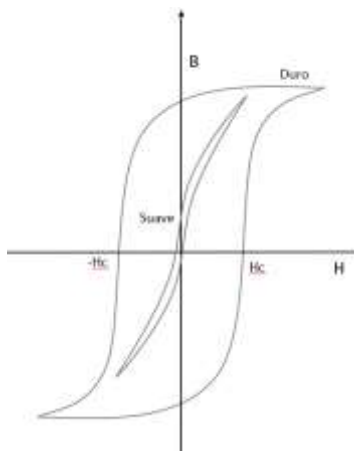


Figura 6. Comparación entre el ciclo de histéresis de un material ferromagnético suave y duro.

Normalmente, debido a la naturaleza no lineal de los materiales ferromagnéticos, se debe trabajar con un valor de μ en el rango de valores en los que se desea trabajar. Para valores pequeños de B (<0.1 T), se suele trabajar con la permeabilidad inicial μ_i (Figura 7 B). Por otra parte, si se llega a valores cercanos a la saturación magnética del material, se utiliza la permeabilidad máxima μ_{max} , que suele ser un factor entre 2 y 5 por encima del valor inicial (Figura 7 C). [23,24] Esto es una aproximación para asemejar una conducta lineal a un comportamiento no lineal.

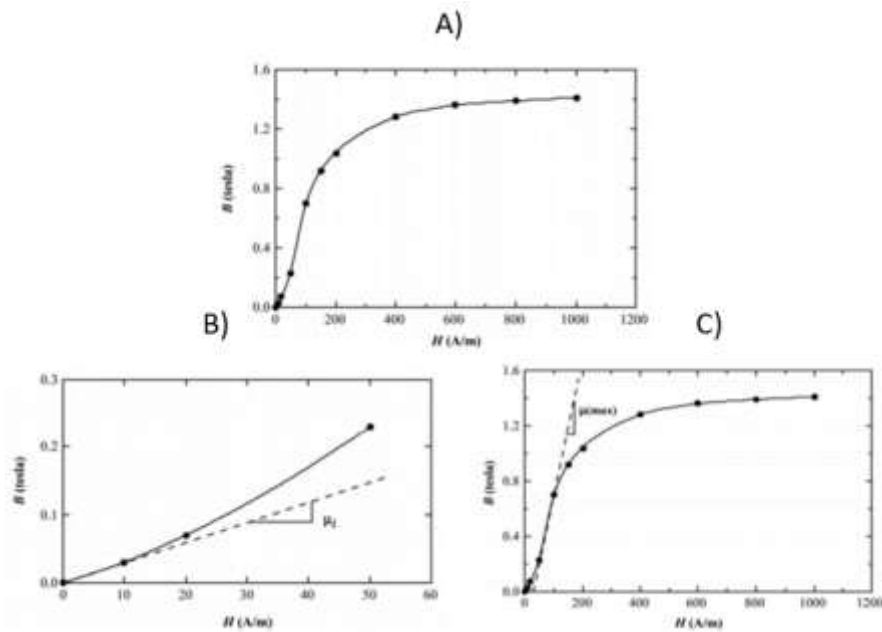


Figura 7. A) Gráfica típica de un material ferromagnético. B) Para valores de campo inducido B pequeños, se trabaja con la permeabilidad inicial. C) Para valores de campo mayores, con la permeabilidad máxima.

Retomando el enfoque de movimiento, para que se produzca un desplazamiento es necesario aplicar una fuerza. Los campos magnéticos generan una fuerza y un torque sobre objetos que pueden ser magnetizados. Esta fuerza magnética y torque que se ejercen sobre un objeto con magnetización uniforme M en un campo magnético inducido B se definen como: [18,24,26]

$$F = \nabla_m(M \cdot \nabla)B \quad \text{Ec. 7}$$

$$T = \nabla_m M \times B \quad \text{Ec. 8}$$

donde V_m es el volumen del objeto magnetizado. Estas dos interacciones son las que permiten el movimiento en los mecanismos de propulsión magnética por campos alternos y por campos no homogéneos.

2.3.2. Manipulación de estructuras basada en campos magnéticos alternos

Inspirado por el movimiento de las bacterias, Nelson et al., fabricaron una estructura compuesta por una cola helicoidal construida con arsénico indio-galio/arsénico galio (InGaAs/GaAs) y un metal ferromagnético en la cabeza de la hélice (Figura 8A). La punta magnética fue conformada por capas de cromo/níquel/oro (Cr/Ni/Au) obtenidas mediante una técnica de auto-desplazamiento. Al ser expuesta la estructura a un campo magnético giratorio, la rotación de la cabeza inducida magnéticamente genera un movimiento de traslación en una dirección dependiente de la quiralidad de la hélice. ^[10,27]

Este tipo de estructuras se han vuelto comunes. Gao et al. ^[28], reportaron la fabricación de estructuras helicoidales construidas a base de plantas. Las microestructuras helicoidales se derivan de vasos espirales conductores de agua de diferentes plantas, que aprovechan las estructuras biológicas intrínsecas de la naturaleza. Posteriormente se les aplicó un depósito secuencial de capas delgadas de Ti y Ni (Figura 8B). ^[28]

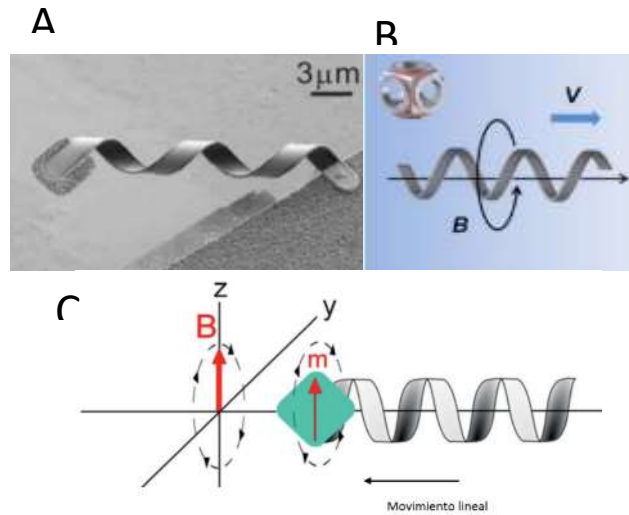


Figura 8. Estructuras helicoidales ampliamente usadas en sistemas de campos magnéticos rotatorios. A) Imagen SEM de una estructura helicoidal utilizada por Abbott et al. ^[27] B) La bobina triaxial de Helmholtz utilizada por Gao et al., para generar el campo magnético giratorio y esquema del movimiento de su estructura. ^[28] C) Esquema de una hélice con una punta ferromagnética en un campo magnético giratorio. El momento magnético de la punta se alinea constantemente con el campo giratorio B. ^[22]

Cuando un dipolo magnético está expuesto a un campo magnético, se alineará a lo largo del campo magnético (Figura 8C). Este principio se puede utilizar para inducir el movimiento de rotación en una estructura que contiene un dipolo magnético permanente girando el campo magnético aplicado. Esto se puede lograr girando una barra magnética o configurando dos bobinas perpendiculares a través de las cuales se alimenta una corriente oscilante. De igual manera, si se desea cambiar la dirección del movimiento, solo basta con invertir el campo magnético giratorio en la dirección opuesta. Para este tipo de sistemas, valores de campo < 10 mT son generalmente suficientes para producir movimiento. ^[22, 28]

Se han realizado numerosas pruebas para el diseño y fabricación de estructuras capaces de ser propulsadas por campos magnéticos alternos. Ahora se han explorado nuevas formas de manipulación por medio de campos magnéticos, como lo son los campos no homogéneos.

2.3.3. Manipulación de estructuras basada en campos magnéticos no homogéneos

Experimentos realizados por Yesin et al.,^[18] Ghanbari et al.,^[17] y Kummer et al.,^[29] se basan en la manipulación de microrrobots de tamaños milimétricos. En los tres trabajos se abordó la manipulación de microrrobots magnéticos en fluidos viscosos para ver su comportamiento en este tipo de medio y abrir el panorama para desarrollo de nuevas aplicaciones médicas. Los microrrobots se sometieron al gradiente producido por un campo magnético externo. (Figura 9)

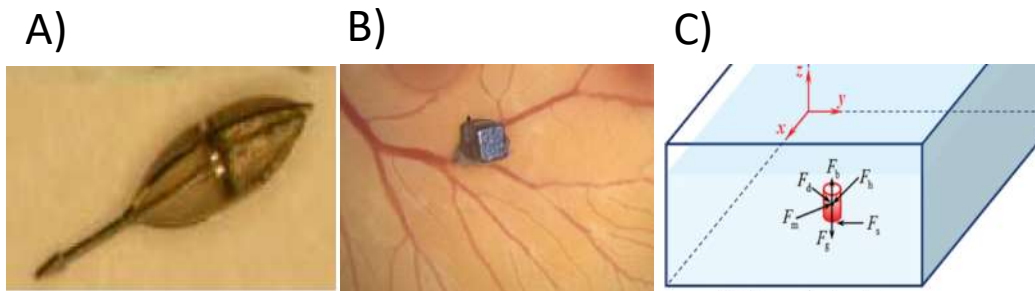


Figura 9. Microrrobots utilizados en los sistemas de campos magnéticos no homogéneos. A) Microrrobot de Ni con longitud de 940 μm B) Estructura magnetita de NdFeB con longitud de 2.7 mm. C) Diagrama del microrrobot cilíndrico en el espacio de trabajo para su manipulación. Longitud de 1000 μm ^[17, 18, 29]

Schaller et al. investigaron el comportamiento de partículas con tamaños de desde 425 hasta 50 nm en un gradiente de campo magnético. El experimento consistió en acercar un imán permanente a la muestra y observar el comportamiento de las partículas en tamaños en la nanoescala (Figura 10). En este experimento se mostró un acercamiento a cómo partículas nanométricas interactúan en un fluido bajo la acción de un gradiente en el campo magnético, pero sin poder modular o controlar su movimiento. ^[19]

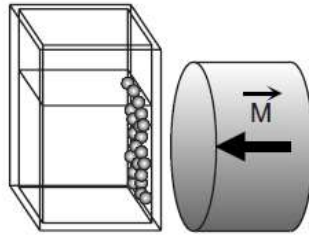


Figura 10. Separación de partículas magnéticas mediante un imán permanente. ^[19]

La preparación de motores con formas específicas es desafiante e involucra técnicas de fabricación complejas y costosas. ^[10,22,27,28] Por lo tanto, existe campo de investigación para explorar un nanomotor magnético más básico, simple y fácilmente disponible para futuras aplicaciones. Las partículas tipo núcleo-coraza cumplen con estas características al ser de formas simples, resistentes y actualmente existen diversas formas de fabricarse, ya sea con ayuda del método de pirólisis por pulverización, ablación láser o por alguna otra técnica ^[15,16] En el presente trabajo se busca conocer si es posible generar un movimiento controlado de este tipo de estructuras simétricas en el rango de la nanoescala por algún mecanismo de propulsión.

3. Hipótesis

Es posible lograr un movimiento controlado de partículas tipo núcleo-coraza magnéticas sin la necesidad de romper la simetría en su estructura por medio de un sistema de propulsión que no necesite un combustible en el medio.

4. *Objetivos*

4.1. Objetivo general

Manipular el movimiento de estructuras esféricas magnéticas de tipo núcleo-coraza en solución.

4.2. Objetivos particulares

Encontrar un mecanismo de propulsión traslacional funcional y reproducible para el control de movimiento de partículas nanométricas núcleo-corazas que siga una trayectoria deseada.

Probar diferentes técnicas de propulsión libres de combustible tales como ultrasonido y campos magnéticos para el movimiento de nanopartículas magnéticas núcleo coraza.

Caracterizar el sistema en el cual se haya encontrado el mecanismo de propulsión adecuado para las partículas

5. Metodología

Este trabajo consistió en la determinación de un mecanismo de propulsión adecuado para dirigir partículas magnéticas de tipo núcleo-coraza de Fe_2O_3 . Para ello se realizaron pruebas de propulsión por medio de ultrasonido y por campos magnéticos. Las pruebas de campos magnéticos se subdividieron de acuerdo con el tipo de campo empleado: un campo alterno y homogéneo; y un campo no homogéneo. Para cada prueba se utilizó un sistema específico de acuerdo con los requerimientos necesarios de los mecanismos de propulsión, los cuales serán detallados a continuación.

Para todas las pruebas, se utilizaron partículas de tipo núcleo-coraza de Fe_2O_3 -@ Fe_2O_3 sintetizadas por López Cisneros ^[30], mediante el método de pirólisis por pulverización, las cuales se ilustran en la Figura 11. Las partículas poseen un tamaño promedio de 200 nm y muestran una estructura definida de forma esférica.

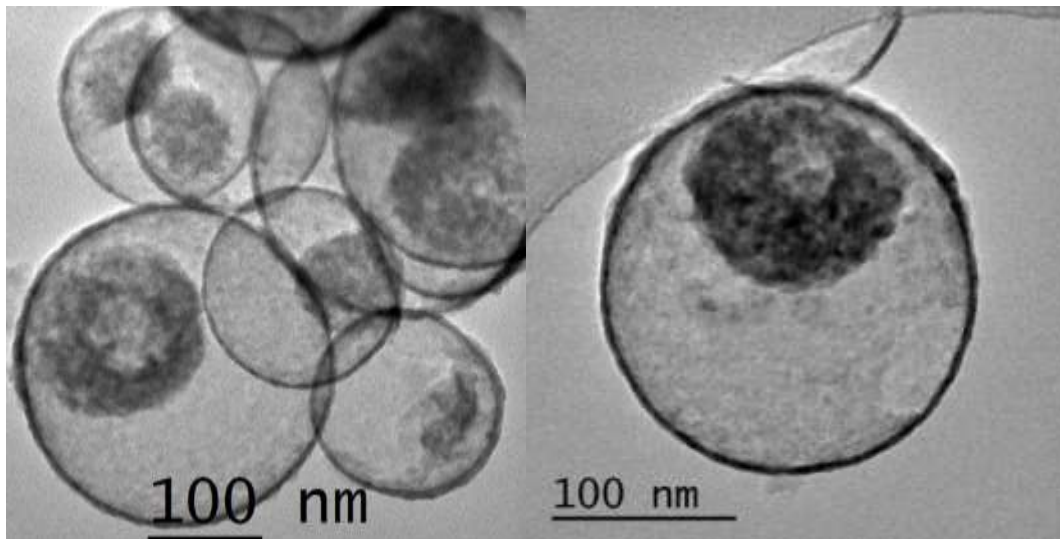


Figura 11. Micrografía por microscopía electrónica de transmisión (TEM) de las partículas empleadas.

Se tomó una cantidad arbitraria de las partículas en polvo y se depositaron en un tubo Eppendorf de 3 ml. A las partículas en polvo, se les añadió agua desionizada para poder trabajar con ellas en solución. La cantidad de agua añadida fue la necesaria para poder aforar el vial a su capacidad máxima. Las partículas se dispersaron en el agua por medio de una tina

ultrasónica (Figura 12). Posteriormente fueron sometidas a tres pruebas distintas de propulsión presentadas a continuación:

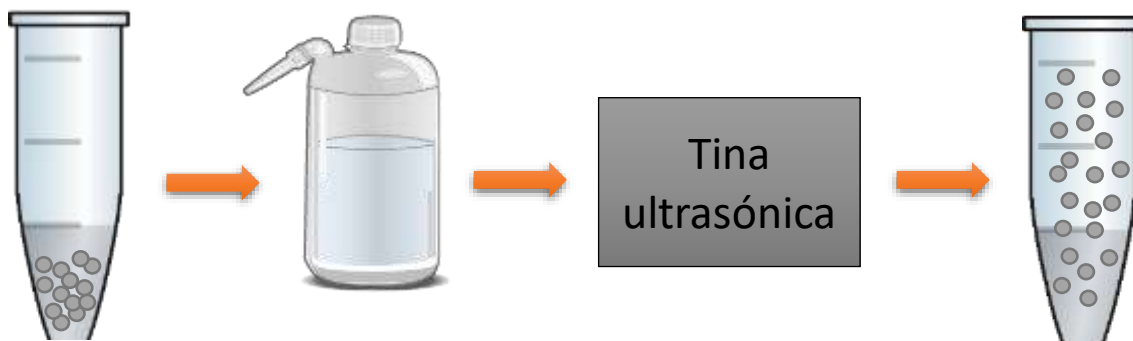


Figura 12. Esquema de preparación de las partículas empleadas. Se depositaron en un tubo Eppendorf, se pusieron en solución y finalmente se dispersaron en una tina ultrasónica

5.1. Propulsión de partículas núcleo-coraza por ultrasonido

Para los experimentos de propulsión de los nanomotores por ultrasonido, se utilizó una celda capaz de vibrar en frecuencias del orden de los MHz y así determinar si es posible dirigir las partículas núcleo-coraza de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-@Fe}_2\text{O}_3$ mediante una vibración ultrasónica que desplazará a las partículas. La celda empleada fue utilizada de igual manera, en la metodología de García Gradilla et al. ^[20] que consiste en una placa base a la que se le hizo una cavidad de 5 mm de diámetro y 180 μm de altura en donde se colocó la muestra en solución. La placa está forrada por cinta Kapton y la cavidad es cubierta con un cubreobjetos. Las ondas ultrasónicas se generan por medio de un transductor piezoeléctrico colocado en la placa base, que a su vez está conectado a un generador de señales (Figura 13).

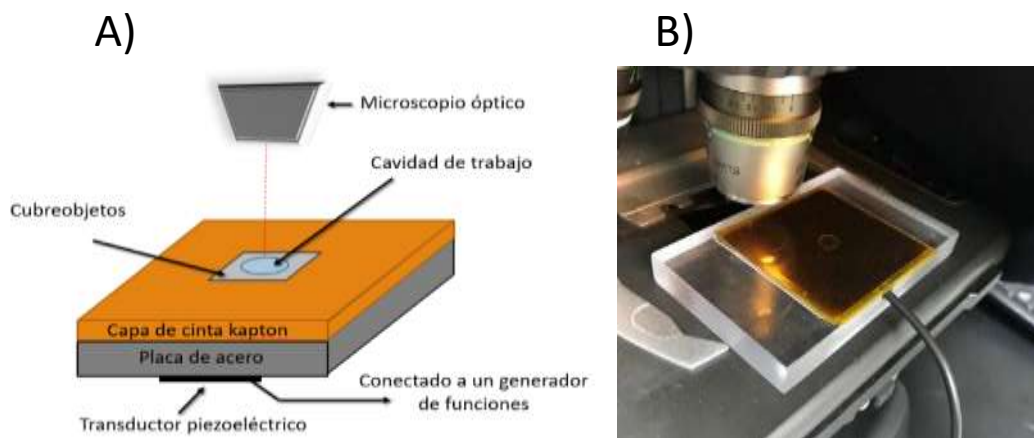


Figura 13. Sistema de propulsión ultrasónica. A) Esquema de la placa de ultrasonido. B) Fotografía del sistema

La señal empleada se produjo con un generador *RIGOL DG 1032*, monitoreada mediante un osciloscopio *TEKTRONIX TDS3014B*. La fuente de voltaje suministrada al sistema fue una DC *SHANGHAI MASTECH HY3020-R*. Una cámara CCD *HAMATATSU ORCA-FLASH 4.0* instalada en un microscopio *NIKON ECLIPSE NI* dio apoyo visual de la parte superior de la celda. La precisión en el seguimiento de las partículas estuvo limitada principalmente por la resolución permitida del microscopio.

Para esta primera prueba de propulsión, se colocó la solución dentro de la celda y las partículas se sometieron a una vibración ultrasónica a una frecuencia de 4.1 MHz a 5 V. Un imán permanente de neodimio se acercó a la celda para hacer que las partículas interaccionaran con él debido a la naturaleza magnética de ellas (Figura 14). Con esto, se buscó conocer si esta interacción era suficiente para direccionar de manera controlada los motores. Posteriormente, se observó por microscopía el comportamiento de las partículas y la información se analizó mediante el software *NIS-ELEMENTS AR*.

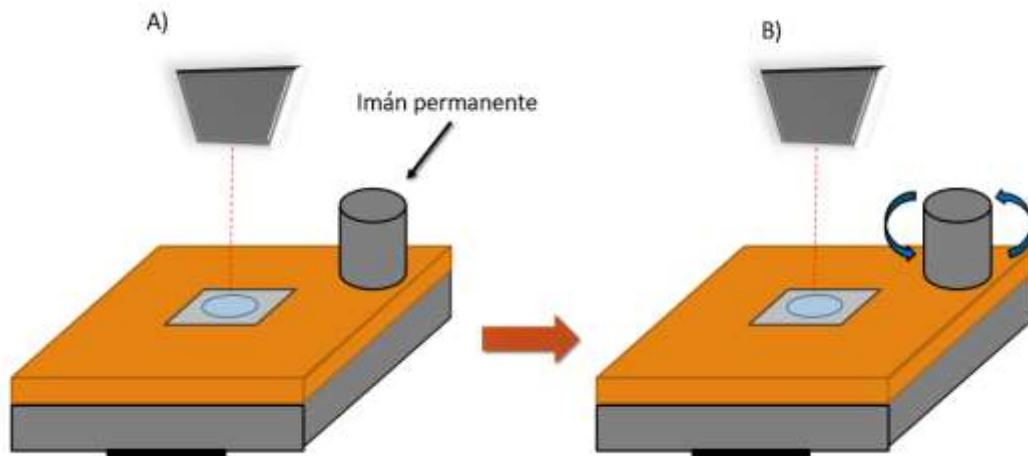


Figura 14. A) Se introduce el imán permanente a la vecindad de las partículas para que puedan sentir el campo magnético del imán. B) Rotación del imán para dar dirección a las partículas.

5.2. Propulsión de partículas núcleo-coraza por campos magnéticos

Finalizadas las pruebas realizadas con ultrasonido, las partículas núcleo-coraza de Fe_2O_3 -@ Fe_2O_3 se sometieron de igual manera a pruebas de propulsión por medio de campos magnéticos. Dos variantes se tomaron a consideración: la propulsión por medio de un campo alterno generado por bobinas de Helmholtz, y la propulsión por medio de un campo continuo no homogéneo generado por un par de solenoides. Cada mecanismo funciona de manera diferente: el primero genera un campo uniforme que cambiará de orientación cada medio periodo, mientras que el segundo generará un campo no uniforme basado en un gradiente, es decir, que se tendrá un valor distinto de campo en diferentes puntos del espacio en donde se encuentre el campo magnético.

5.2.1. Propulsión de partículas núcleo-coraza de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-@Fe}_2\text{O}_3$ mediante un campo magnético alterno y homogéneo

Este sistema constó de un par de bobinas de Helmholtz, similar al utilizado en la metodología de Gao et al. ^[28] Se utilizó alambre de Cu esmaltado AWG 28 con 100 vueltas por bobina. El sistema contó con tres pares de bobinas soportados en una pieza de aluminio (Figura 15). El diámetro de las bobinas fue de 5.5 cm y cada par se encontró a esa misma distancia entre ellas. Similar al trabajo de Gao, se utilizaron dos ejes.

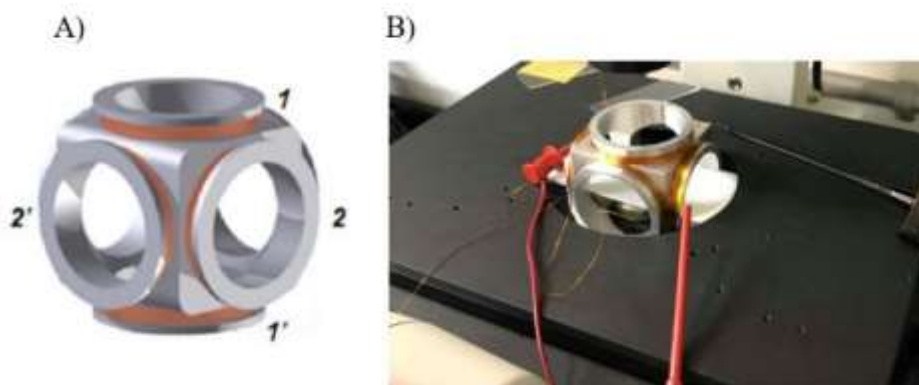


Figura 15. Sistema magnético empleado para campos rotatorios. A) Esquema del sistema de bobinas de Helmholtz ^[28]. B) Fotografía del sistema de bobinas de Helmholtz

Para el suministro de corriente y de la señal alterna, se utilizó el mismo equipo previamente mencionado para la propulsión ultrasónica. Adicionalmente, la señal generada fue amplificada por medio de un equipo *BOSS R3004-1200 W*.

5.2.1.1. Pruebas de movimiento de partículas núcleo-coraza mediante campos magnéticos alternos

El siguiente paso consistió en observar el desplazamiento de las partículas núcleo-coraza de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-@Fe}_2\text{O}_3$ en un microscopio, al ser excitadas por el campo magnético oscilatorio. Se colocaron 5 μL de la solución en un porta muestras, el cual se introdujo en el centro del par

de bobinas. Se suministró una corriente de 3.5 A y se moduló la frecuencia de la señal senoidal desde 10-100 Hz para observar el cambio en la oscilación de las partículas a mayores frecuencias. La visualización de las partículas a diferentes frecuencias se realizó mediante un microscopio invertido NIKON ECLIPSE TI. El seguimiento de las trayectorias se realizó de manera similar a las pruebas con ultrasonido, empleando la misma cámara CCD y el mismo software.

5.2.2. Propulsión de partículas núcleo-coraza mediante un campo magnético no homogéneo

Por último, se decidió probar el comportamiento de las partículas sometidas a un campo magnético no homogéneo. Este sistema constó de un par de solenoides con un núcleo ferromagnético adheridos a una placa circular con un área de trabajo entre cada solenoide. Cada embobinado se alimentó independientemente con la fuente de voltaje utilizada en las pruebas pasadas. El sistema de retroalimentación visual fue exactamente igual al utilizado en la anterior prueba por campos magnéticos.

5.2.2.1. Diseño y fabricación del sistema de propulsión por campos magnéticos no homogéneos o gradientes

El sistema empleado fue diseñado tomando en cuenta la necesidad de obtener gradientes magnéticos que variaran según la intensidad de corriente empleada sin que los electroimanes se retuvieran magnetizados al cortar la corriente. Cada electroimán consistió en un embobinado de 1380 vueltas con alambre esmaltado AWG 30. Para incrementar el campo magnético se utilizó un núcleo ferromagnético en el interior de cada alambrado. Éste consistió en acero al carbono, conocido como un material ferromagnético suave.^[18] Cada electroimán al final tuvo una longitud de 7.50 cm y un diámetro de 1.40 cm (Figura 16). Se

despreció el incremento en el diámetro debido a las vueltas con el alambre de cobre. La separación entre cada embobinado fue de un valor 0.698 cm dejando suficiente espacio para manipular los nanomotores. La separación entre el centro del área de trabajo y cada uno de los embobinados fue una distancia $a=0.349$ cm. El espacio fue suficiente para poder introducir la muestra y que el decaimiento en el campo debido a la distancia fuera del solenoide no afectara en las pruebas de movimiento.

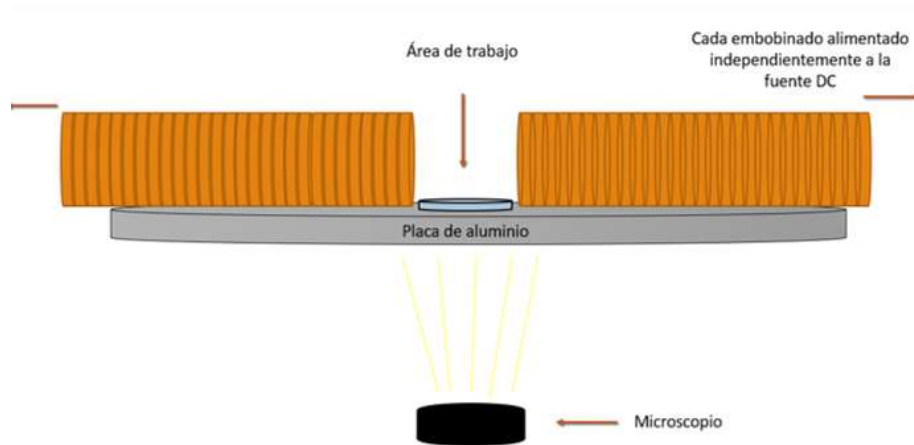


Figura 16 Esquema del sistema magnético empleado para la generación de campos no homogéneos.

5.2.2.2. Caracterización magnética del sistema de propulsión por campos magnéticos no homogéneos

Posterior a su creación, el sistema se caracterizó mediante un gaussímetro HIRST GMO5 para conocer con exactitud la magnitud de los campos magnéticos trabajados. Este instrumento cuenta con una punta transversal que mide el campo magnético por medio del efecto Hall. Mediante un soporte, se colocó la punta de manera paralela a la cara de cada embobinado. Se midieron tres posiciones para cada uno a lo largo del eje x. Las tres posiciones elegidas fue a una distancia de $x=0$, $x=0.349$ cm y $x=-0.349$ cm. Se tomó como

referencia de inicio ($x=0$) el centro del área de trabajo y tomando como limitante la distancia hasta llegar a cada uno de los embobinados. (Figura 17)



Figura 17. Fotografía del sistema con la punta del gaussímetro en el área de trabajo del sistema

El sistema se caracterizó con valores de corriente desde 0-1.2 A, invirtiendo la polaridad para obtener así un ciclo de histéresis. Eso permitió conocer la coercitividad, así como un valor promedio de la permeabilidad magnética de los núcleos ferromagnéticos. Finalmente se analizó el gradiente magnético unidireccional formado en el área de trabajo en distintos puntos por medio de MATLAB.

5.2.2.3. Pruebas de movimiento de partículas núcleo-coraza mediante campos magnéticos no homogéneos

Una vez caracterizado el sistema, se probó para así poder determinar si se presenta movimiento en las partículas núcleo-coraza de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-@Fe}_2\text{O}_3$. Se colocaron en 5 μL de solución en un cubreobjetos al centro del área de trabajo. Se realizaron cuatro pruebas de movimiento a diferentes intensidades de corriente: a 0.2, 0.4, 0.6, y 1.1 A. En cada una de las seis pruebas, se registró la trayectoria y la velocidad promedio de un motor en la solución y se analizaron los resultados.

6. Resultados

6.1. Pruebas de propulsión de las partículas núcleo-coraza de Fe_2O_3 por medio de una celda ultrasónica

La primera prueba a la que se sometieron las partículas núcleo-coraza de Fe_2O_3 -@ Fe_2O_3 para conocer si era posible su movimiento de manera controlada, fue por medio del mecanismo de propulsión ultrasónico. La celda fue encendida y se le aplicó una señal senoidal con un voltaje de 5 V a una frecuencia de 4.1 MHz, la cual fue reportada anteriormente como la frecuencia de resonancia en la celda con agua desionizada ^[12].

En la figura 18, se muestra el comportamiento de las partículas en la celda al ser expuestas a ultrasonido. Las partículas siguieron una trayectoria definida por un flujo en forma de remolino dentro de la celda, mas no fue un movimiento controlado. Cuando el imán permanente se acercó a las partículas, éstas se orientaron al campo magnético de igual manera como lo hace una brújula. Se observó que las partículas se alineaban al campo magnético generado por el imán, pero esta orientación no generó cambio alguno en la trayectoria de los motores. El flujo generado en el fluido por esparramiento e interferencia de las ondas que se producen en la celda hizo que las partículas fueran en una misma dirección, sin control alguno.

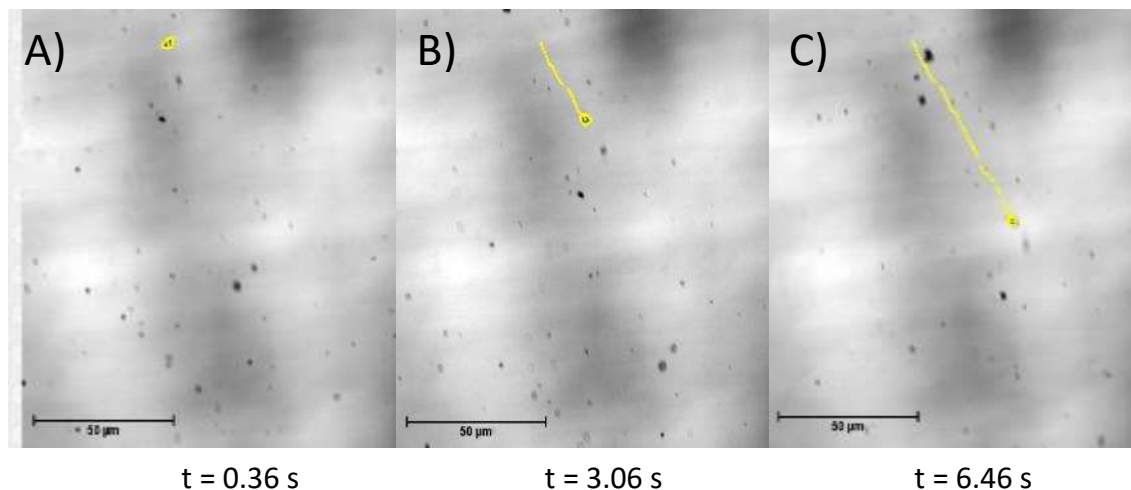


Figura 18 Trayectoria de las partículas núcleo-coraza de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-@Fe}_2\text{O}_3$ impulsadas por ultrasonido en tres tiempos diferentes: A) $t=0\text{s}$, B) $t=2.0\text{s}$, C) $t=4.0\text{s}$. Condiciones: 4.1 MHz, 5 V. Todas las partículas se desplazaron en la misma dirección que la partícula resaltada.

Uno de los problemas por el cual no se logró un movimiento controlado fue debido a la poca asimetría de las partículas. De acuerdo con Nadal y Lauga,^[32] se demostró que las ondas acústicas estacionarias pueden ser utilizadas para inducir la auto propulsión de partículas metálicas rígidas en la dirección perpendicular a la onda acústica, no obstante, es de gran importancia que la partícula posea una densidad al menos dos veces mayor a la del fluido y cierto grado de asimetría, como sucede con los nanomotores Janus (partículas compuestas por dos mitades de distinta naturaleza, nombradas así por el dios romano Jano) (Figura 19.)^[7,8,10,] Si bien las partículas núcleo-coraza empleadas pueden no ser exactamente esferas, no se presenta un gradiente de presión en la partícula que permita impulsarla en alguna dirección. Como el flujo es equivalente en cada punto de la esfera, las fuerzas capaces de mover la partícula se contrarrestan unas con otras. Además, las partículas son menos densas que el fluido haciendo que sean arrastradas con él. Dicha desviación se produce para partículas de densidad menor al doble de la densidad del fluido.^[32] Esto hace que en partículas con densidad similar al medio no se pueda producir un movimiento controlado. En partículas Janus, es fácil tener una mitad lo suficientemente densa para ser impulsada por este mecanismo de propulsión a diferencia de una partícula núcleo coraza en la que su densidad se mantiene homogénea a lo largo de la esfera. Como este método no resultó

efectivo para lograr un movimiento controlado de este tipo de partículas, se realizaron pruebas cambiando el mecanismo de propulsión.

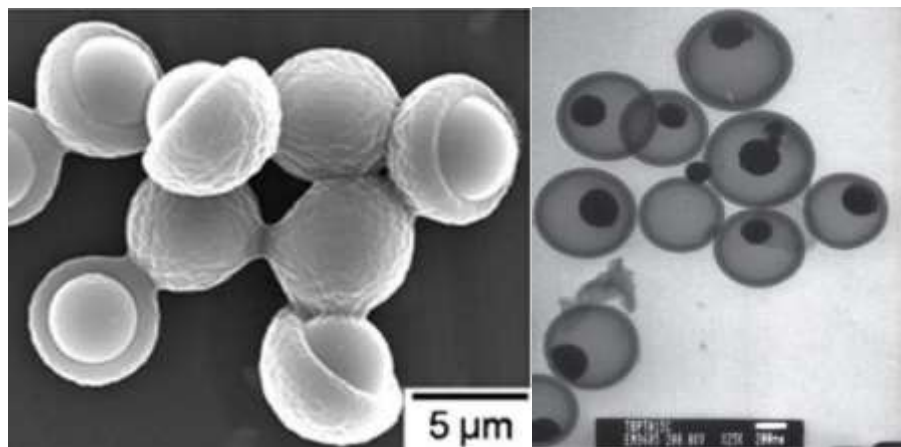


Figura 19. Comparación entre una partícula de tipo Janus ^[32] y una de tipo núcleo-coraza ^[15]. La asimetría y la densidad de las partículas juegan un papel importante en el movimiento por ultrasonido.

6.2. Pruebas de propulsión de las partículas núcleo-coraza de Fe_2O_3 con un par de bobinas de Helmholtz

Este fue el primer mecanismo de propulsión magnético por el cual fueron sometidas las partículas núcleo-coraza de Fe_2O_3 -@ Fe_2O_3 . Para estas pruebas de propulsión fue necesario generar un campo magnético homogéneo alterno. Para generar tal campo, se utilizó un par de bobinas de Helmholtz, al que se le introdujo la muestra en solución como se explicó en la metodología. Este tipo de sistema es ideal para la creación de un campo uniforme ya que cada embobinado contribuye a la formación de un campo homogéneo a una distancia equidistante entre ellos. Esto permite que actúen como un dipolo haciendo que el campo se mantenga casi igual en los puntos entre cada embobinado. Por medio del generador de señales se alternó el campo en el tiempo para hacer que oscilara.

Después de depositar las partículas dentro del par de bobinas de Helmholtz sin encender, se observó movimiento Browniano, es decir, el movimiento aleatorio de las partículas en un

fluido. Al momento de hacer pasar la corriente eléctrica en el par de bobinas, las partículas reaccionaron a la presencia del campo magnético alineándose con él. Este comportamiento fue similar a cuando se acercó el imán de neodimio previamente en las pruebas por ultrasonido, con la diferencia de que el campo generado en la prueba de ultrasonido se mantuvo constante al tratarse de un imán permanente. Se puede apreciar en la figura 20, el cambio en orientación de las partículas en tres diferentes momentos, en un tiempo inicial $t = 0$, $t = 0.25s$ y $t = 50s$. En la figura se hizo énfasis en un cúmulo de partículas ya que fue posible apreciar mejor el cambio en su posición de acuerdo con el campo magnético alterno a diferencia de partículas aisladas, ya que al ser esféricas no se aprecia tan detalladamente su rotación. Las partículas se alinearon en dirección al campo aplicado haciendo que rotaran conforme al cambio de dirección del campo magnético. A medida que se aumentó la frecuencia solo se incrementó la velocidad de rotación de las partículas. En ningún caso se presentó movimiento traslacional.

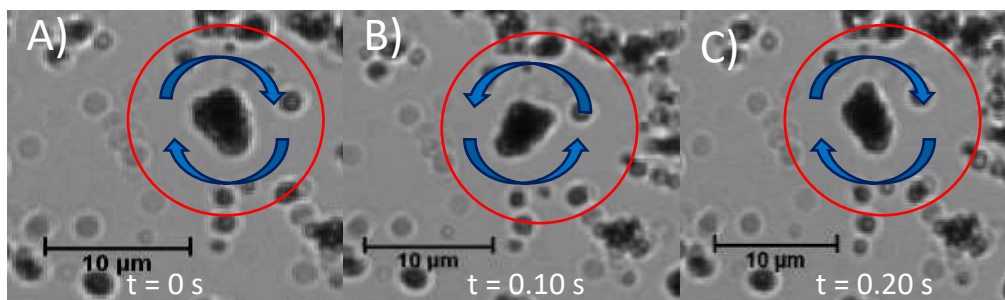


Figura 20. Pruebas de propulsión de partículas núcleo-coraza de Fe_2O_3 -@ Fe_2O_3 por medio de campos magnéticos alternos. Posición de un cúmulo de partículas después de un periodo: A) $t=0s$, B) $t=0.10s$, C) $t=0.20s$. Condiciones: 50 Hz, 3.5 A

6.2.1. El efecto del campo alterno en las partículas

Tomando en cuenta los parámetros antes mencionados de las bobinas de Helmholtz, la expresión del campo magnético generado en el centro del sistema se obtuvo resolviendo la ecuación de Biot-Savart (Ecuación 2) para este caso. Tal resultado es:

$$B = \frac{\mu_0 nI}{2r} \left[\left(1 + \frac{x^2}{r^2} \right)^{\frac{3}{2}} + \left(1 + \frac{(r-x)^2}{r^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad \text{Ec. 10}$$

Sustituyendo con $r=5.5$ cm, $x=r/2$, y $n=100$ se obtuvo un valor del campo magnético inducido B de 5.72 mT en el centro de ambos embobinados cuando se suministró una corriente de 3.5 A.

En un régimen de bajo número de Reynolds, se debe ejercer una fuerza constantemente para que cualquier partícula en el fluido, en este caso los motores, puedan desplazarse. ^[11,17] Si una partícula magnética se coloca en un campo magnético uniforme H , quedará polarizada según el campo inducido sobre ella. En cada polo actuará una fuerza en direcciones opuestas. Por lo tanto, un campo magnético uniforme solo puede ejercer un torque o una rotación en el eje de la partícula magnética, pero no una traslación como lo indica la ecuación 8 (Figura 21). ^[24,18,26] Una fuerza de traslación ocurrirá sobre los motores solo si hay un gradiente del campo en al menos una dirección, $\partial B_x / \partial x$ como se muestra en la ecuación 7. Esto será discutido más adelante, en el sistema basado de campos magnéticos no homogéneos.

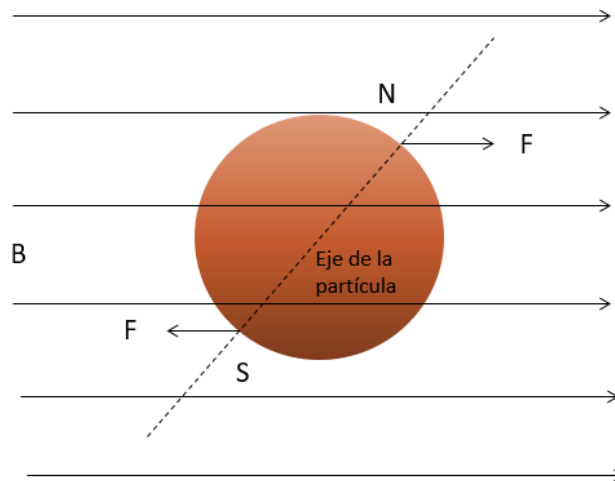


Figura 21. El torque en una partícula magnetizada en un campo magnético. Si la partícula es libre de rotar, ésta girará hasta encontrarse paralela en la dirección del campo

Para que un motor pueda desplazarse por medio de este método, comúnmente se requiere romper la simetría del sistema por rotación del cuerpo o deformación estructural, como las estructuras helicoidales presentadas anteriormente ^[10,27,28]. El problema aquí radicó en que las partículas se asemejan a una esfera y este tipo de forma es bastante simétrica. Inclusive si se tomara en cuenta que no son esferas perfectamente simétricas, las pruebas experimentales demostraron que esta estructura no es óptima para un movimiento controlado, tal y como sucedió con la prueba por ultrasonido.

Este tipo de sistema magnético opera con valores de campo muy pequeños (<10 mT), además, debido a su conformación es difícil que puedan generar un gradiente que pueda ejercer una fuerza de desplazamiento. Aun cuando se tuviese la estructura adecuada que rompa la simetría del sistema, la velocidad que podrán alcanzar las partículas está limitada a la frecuencia a la que puede alternarse el campo magnético.

6.3. Pruebas de propulsión de las partículas núcleo-coraza de Fe_2O_3 con un par de solenoides con núcleo ferromagnético

El segundo mecanismo de propulsión magnética al que fueron sometidas las partículas utilizó un campo no uniforme y continuo, es decir que no cambió su dirección en el tiempo. En esta prueba, las partículas de tipo núcleo-coraza de Fe_2O_3 -@ Fe_2O_3 en solución se introdujeron en el centro del segundo sistema magnético. El sistema empleado se caracterizó para conocer las propiedades de los dos embobinados usados para la generación del gradiente magnético. Seguido a la caracterización, se registraron las trayectorias de las partículas dependiendo la corriente aplicada y finalmente se discutió el efecto de este tipo de campo, basado en gradientes magnéticos, sobre las partículas metálicas.

6.3.1. Caracterización del sistema de manipulación magnética

El sistema, como puede observarse en la Figura 16, constó de dos bobinas idénticas a una separación de 0.698 cm. Antes de la introducción de las partículas al sistema de

electroimanes, se caracterizó el sistema creado para conocer el valor del campo B según el campo aplicado H al variar la corriente desde 0-1.2 A. Las gráficas a continuación muestran la respuesta para cada uno de los electroimanes. (Figura 22)

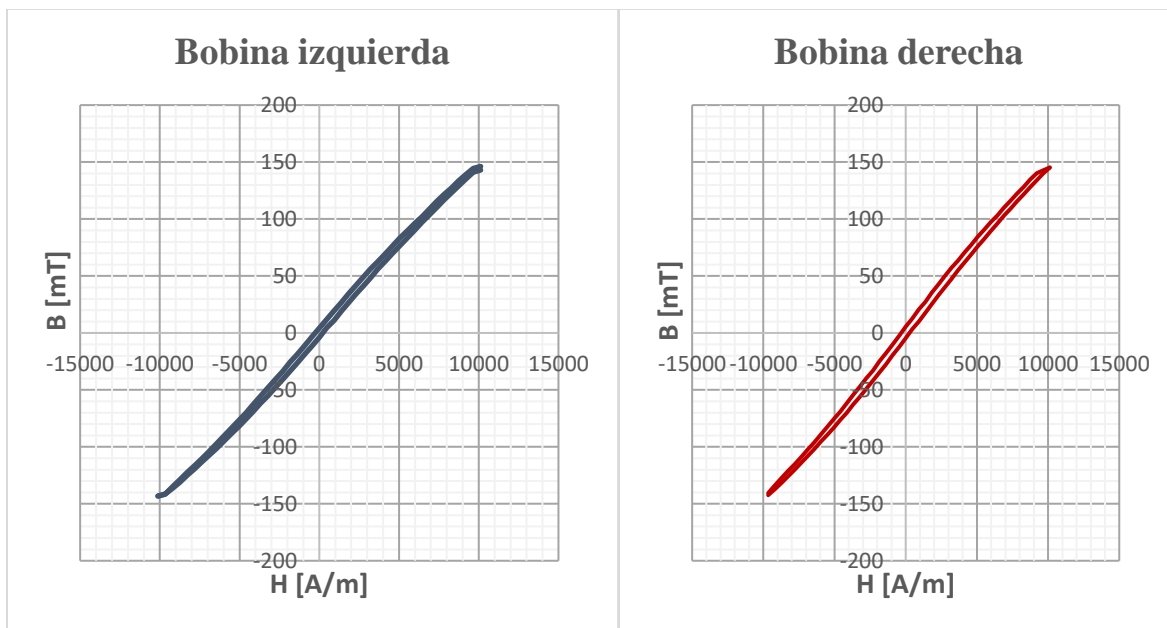


Figura 22. Curvas B/H para los dos embobinados utilizados en el sistema.

En la Figura 22 se aprecian la curva B/H para cada solenoide en el sistema. En ella se puede apreciar una baja remanencia de campo inducido B ya que, al disminuir la corriente aplicada, el campo B no sobrepasa los 3 mT cuando H está en 0 A/m. También se aprecia una baja coercitividad ya que la distancia entre ambos puntos de la curva cuando B=0 en las dos gráficas es casi despreciable. A diferencia de las bobinas de Helmholtz, las cuales inducen el campo magnético en el aire, este nuevo sistema utiliza un núcleo ferromagnético en cada embobinado. Éste amplifica la intensidad del campo B capaz de ser generado significativamente, pero no responde a una respuesta lineal como lo haría el aire. La relación entre el campo H aplicado y el campo B inducido se conoce como permeabilidad magnética μ , como fue explicado en la sección de antecedentes. Para cada material se posee un valor único de μ . Por este motivo fue necesario caracterizar el acero usado como núcleo en cada uno de los electroimanes.

En cuanto al tipo acero utilizado en el sistema, observó una baja coercitividad (<250 A/m), característica de los materiales ferromagnéticos suaves ^[24]. La figura 22 muestra que los

electroimanes pueden ser fácilmente magnetizados y desmagnetizados al aumentar o disminuir la corriente eléctrica; esto se traduce en una poca retención del campo al cortar el suministro de corriente o al invertir la polaridad.

Los valores máximos medidos del campo magnético B fueron de 149.9 mT y 148.9 mT para los solenoides izquierdo y derecho respectivamente. No se pudo determinar un valor de saturación B_s en el cual fuese claro el valor máximo alcanzable del campo en el ciclo de histéresis. Esto es debido a las limitaciones en el suministro de corriente por parte de la fuente de alimentación, llegando a suministrar un máximo de 1.2 A.

Para fines de este experimento, no se invirtió la polaridad en ningún momento en las pruebas de movimiento de las partículas. Por este motivo solo resultaron de interés los valores en el primer cuadrante de la gráfica, aquellos con valores positivos de B y H de la figura 22. Si bien en ambas gráficas es notorio un decaimiento en el campo a mayores valores de corriente, indicando que se aproxima a la saturación magnética, en su mayoría se puede apreciar un incremento cuasi lineal. Con tal incremento, se asumió que el valor de permeabilidad se mantuvo constante, lo cual facilitó el trabajo, ya que como fue mencionado antes, a diferencia de los materiales diamagnéticos o paramagnéticos, la magnetización en materiales ferromagnéticos es altamente no lineal y depende tanto de su historia como del campo aplicado. ^[17,18]

Mediante la ecuación 2 se pudo obtener una expresión analítica para calcular el campo magnético en cada punto de un solenoide (Ec. 11). Esta expresión sólo es válida si se considera un solenoide de longitud finita como es esquematizado en la Figura 23.

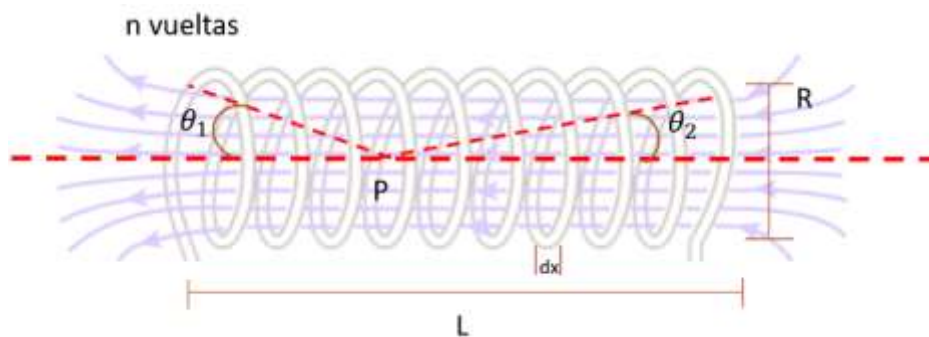


Figura 23. Esquema de un solenoide de longitud finita. Se puede calcular el campo magnético inducido B para cualquier punto dentro del solenoide.

$$dB = \frac{\mu_0 I r^2 (n dx)}{(x^2 + r^2)^{3/4}} \quad \text{Ec. 11}$$

La cual resulta en:

$$B = \frac{1}{2L} \mu_0 n I [\cos \theta_1 + \cos \theta_2] \quad \text{Ec. 12}$$

La dependencia del radio influye en la generación del campo H, esto solo es válido cuando el área transversal al eje de magnetización no es mucho menor que la longitud del solenoide. Es decir, que debe ser $L \gg D$.

Para el centro del solenoide se tiene $\theta_1 = 45$ y $\theta_2 = 45$. Tomando en cuenta la ecuación 1, se obtuvo:

$$H = \frac{nI}{L} \quad \text{Ec. 13}$$

Que es la expresión característica para definir el campo H en el centro de un solenoide con n número de vueltas, largo y delgado. [23]

Debido a que este sistema de propulsión de motores se basa en el campo externo a los electroimanes, el único valor que resultó de interés fue el de su superficie. Aunque las partículas no llegaron a tocar la superficie de cada electroimán, la medición del valor del campo B en la superficie del núcleo sirvió de referencia para conocer aproximadamente qué valores de campo se utilizaron en el área de trabajo. Tomando en cuenta los valores de campo obtenidos experimentalmente, se pudo obtener un valor aproximado de μ .

Para un extremo del solenoide $\theta_1 = 0$ y $\theta_2 = 90$, la ecuación 12 resulta:

$$B = \frac{\mu n I}{2L} \quad \text{Ec. 14}$$

Con esa expresión se conoce el valor del campo en el extremo del embobinado. Tomando en cuenta aquello se obtuvo como resultado un valor μ de $1.24 \times 10^{-5} \frac{H}{m}$. Multiplicando este

valor por la permeabilidad del vacío (Ec. 3), da como resultado un valor relativo de $\mu_r = 9.94$. Esto quiere decir que resultó casi 10 veces más intenso el campo magnético generado a diferencia de utilizar solo el aire. Este valor concuerda con los reportados para aceros al carbono. ^[23] Se han reportado también aleaciones con valores mayores de permeabilidad ^[29] sin embargo, disparan el precio de fabricación del sistema. Esto hace que los aceros magnéticos sean una buena opción para un sistema magnético a un bajo costo capaz de generar campos suficientemente grandes para poder operar.

La ecuación 12 no funciona para puntos exteriores al solenoide ya que el comportamiento del campo B fuera del sistema es diferente a su interior debido a la presencia del acero. Se ha reportado que el decaimiento en el campo magnético varía proporcionalmente con la distancia en puntos externos de la fuente que produce dicho campo magnético. El decaimiento del campo conforme se aleja de los extremos del solenoide varía según la forma y el tipo de material, por lo que no existe una expresión que defina a cada uno. Aun así, se puede aproximar de manera válida el decaimiento a $1/r^2$ en un gran número de imanes y electroimanes mientras posean simetría en sus polos. ^[24] En los experimentos realizado por Yesin et al. quienes utilizaron un par de bobinas de Helmholtz ^[18] así como por Schaller ^[19], quién utilizó un imán cilíndrico permanente, también mostraron que el decaimiento del campo con la fuente magnética empleada se asemejó a $1/r^2$. Fue por esto por lo que la distancia de separación entre los dos embobinados es < 1 cm, ya que permite introducir la muestra sin problema al no comprometer la intensidad del campo que sienten las partículas. Una mayor separación resultaría en una evidente caída en el campo que afectaría las velocidades que puedan tener los motores.

La medición del campo B generado por cada uno de los electroimanes por separado en tres diferentes puntos en el área de trabajo se presentan a continuación: (Figura 24)

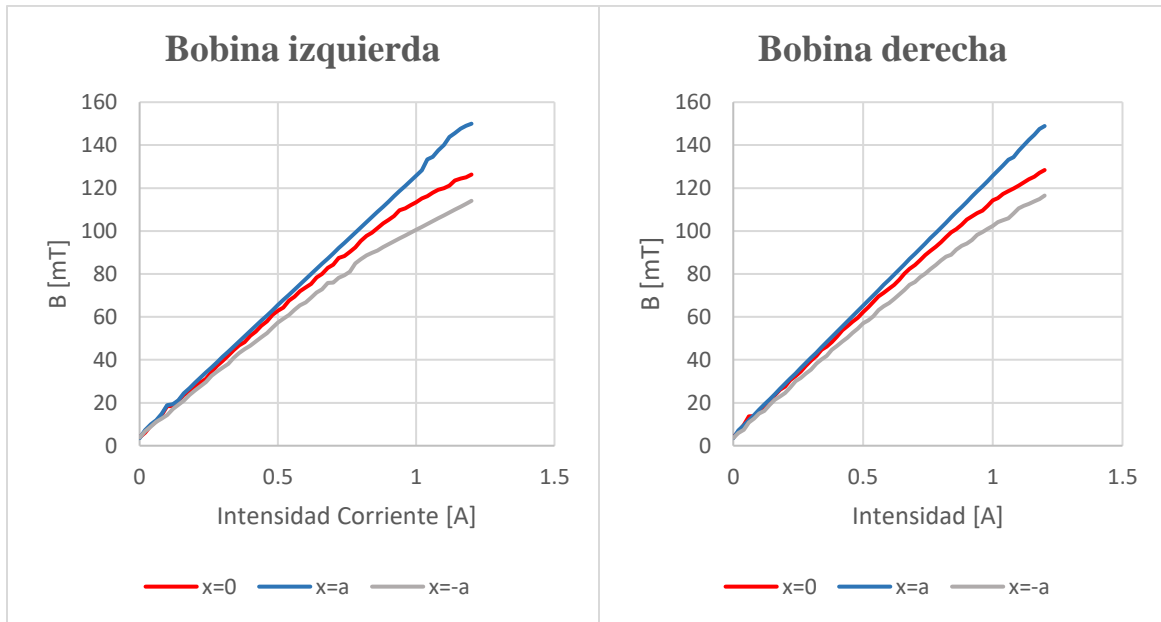


Figura 24. Gráficas del incremento del campo al aumentar la corriente B/A de los embobinados izquierdo y derecho en tres puntos en el área de trabajo: en la superficie (línea gris), en el centro (línea roja) y en el extremo opuesto de cada embobinado (línea azul).

Con los resultados anteriores fue posible obtener el gradiente magnético unidireccional. Los valores del gradiente a lo largo del eje x se presentan en la siguiente tabla para cinco valores de corriente:

Tabla 1 Gradiente magnético en tres puntos del área de trabajo conforme cambió la intensidad de corriente I.

Intensidad [A]	$\partial B_x / \partial x$ [T/m]		
	x=-a	x=0	x=a
0.2	1.3	2.1	2.9
0.4	2.2	3.2	4.3
0.6	4.0	5.3	6.7
0.8	6.6	7.6	8.6
1.1	10.6	13.4	16.2

6.3.2. Trayectorias y velocidades de las partículas núcleo-coraza de Fe_2O_3

Terminada la caracterización del sistema, se realizaron las pruebas de movimiento de las partículas. Los experimentos consistieron en encender cada embobinado por separado y conocer cómo cambió la velocidad de los motores conforme se incrementó la corriente eléctrica.

Se depositaron 5 μL de la solución en el centro del área de trabajo y se realizaron pruebas de velocidad a 4 valores de corriente: 0.2, 0.4, 0.6 y 1.1 A. En las Figuras 25 y 27 se muestran las trayectorias que exhibieron las partículas a lo largo del eje x. Las trayectorias entre las 4 pruebas pueden compararse gráficamente en las figuras 26 y 28:

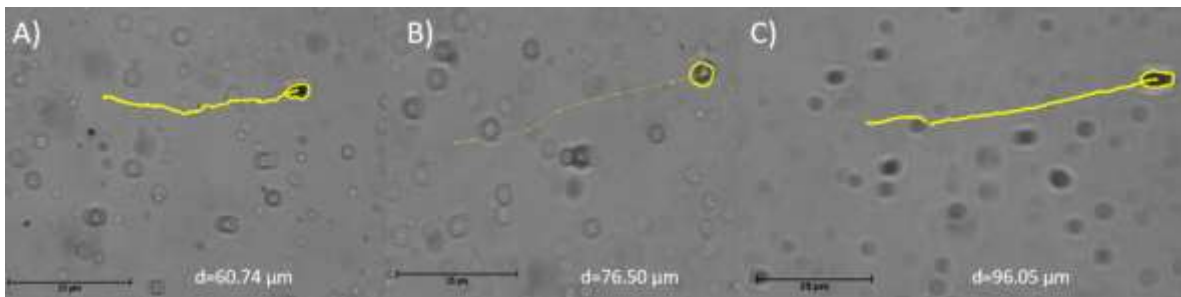


Figura 25. Trayectorias de las partículas de tipo núcleo-coraza de Fe_2O_3 -@ Fe_2O_3 impulsadas por campos magnéticos no homogéneos a diferentes valores de corriente durante 30s. Mediciones a: A) 0.2 A (60.74 μm recorridos), B) 0.4 A (76.50 μm recorridos) y C) 0.6 A (96.05 μm recorridos)

En las primeras pruebas de velocidad, únicamente se analizó el movimiento en una sola dirección para poder observar si se presentó un incremento en la velocidad conforme se aumentó la corriente. El incremento gradual en la velocidad es presentado gráficamente a continuación (Figura 26).



Figura 26. Comparación del aumento de la trayectoria total recorrida durante 30s conforme aumentó la corriente aplicada (0.2, 0.4 y 0.6 A).

Se puede apreciar de la Figura 26 que a medida que se aumentó la corriente eléctrica suministrada, los motores recorrieron una mayor distancia en el mismo tiempo. Cuando se aumentó a 1.1 A, casi el doble de corriente, el aumento en la distancia recorrida fue mucho más significativo que en las pruebas pasadas (Figura 27). Al analizar las trayectorias de las partículas de tipo núcleo-coraza a 1.1 A en una sola dirección, se notó que recorrieron una distancia 1.3 veces mayor que a 0.6 A en tan solo una fracción del tiempo (4.01 s).

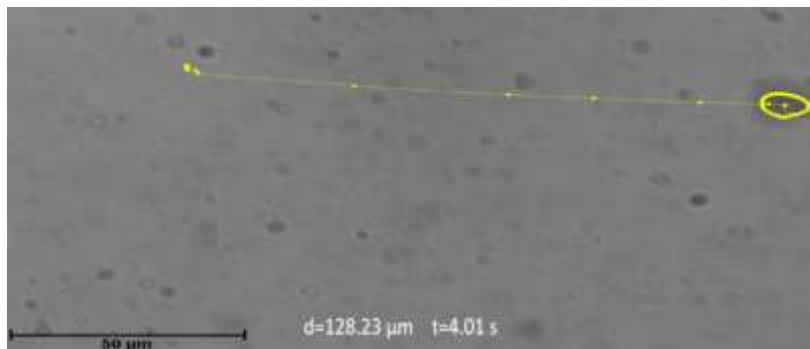


Figura 27. Trayectoria de partícula de tipo núcleo-coraza de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-@Fe}_2\text{O}_3$ impulsada por campos magnéticos no homogéneos a 1.1 A durante 4.01s.

Posteriormente se realizó una comparación entre las últimas dos pruebas de movimiento realizadas. Se observa en la Figura 28 que a un valor de 1.1 A, los motores recorrieron 16 veces más rápido la misma distancia viajada con una corriente de 0.6 A durante 30 s.

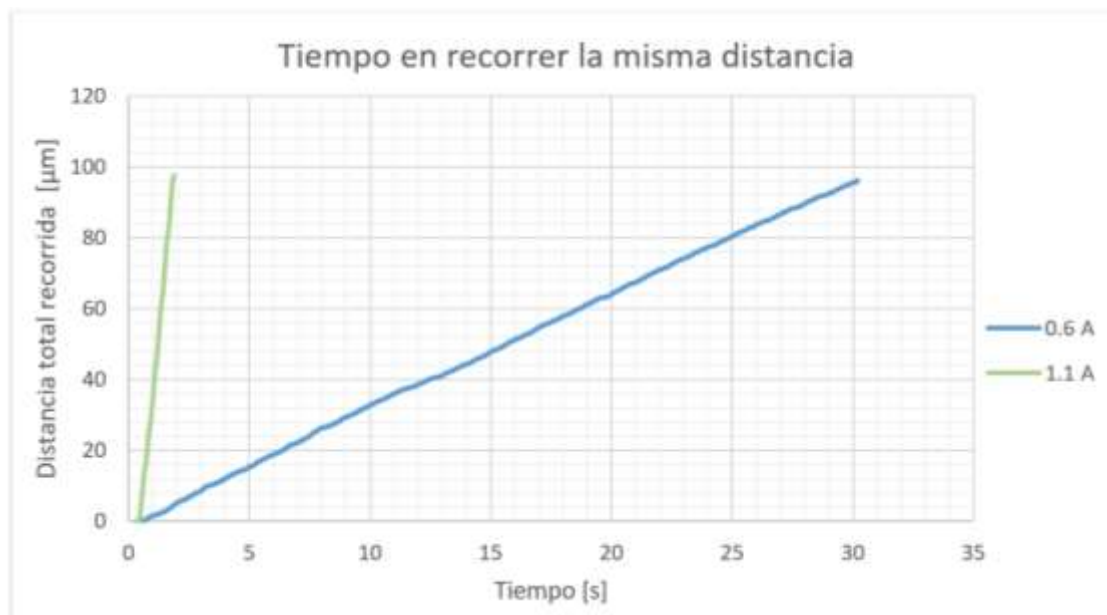


Figura 28. Comparación del tiempo transcurrido en recorrer la misma distancia ($96.05 \mu\text{m}$) entre los motores propulsados a diferente corriente. Los nanomotores propulsados a 0.6 A, tardaron 30s (línea azul); los propulsados a 1.1 A, tardaron 1.85 s (línea verde).

Comparando con la tabla 1, se observa que al aplicar 1.1 A, el gradiente generado es 2.5 veces mayor que suministrando únicamente 0.6 A. Esto se traduce en una fuerza de desplazamiento mayor de acuerdo a la ecuación 7. Esta mayor fuerza de desplazamiento explica el notorio incremento de velocidad apreciado de las partículas núcleo-coraza, haciendo que se pueda recorrer una mayor distancia en menor tiempo. Después de analizar las trayectorias a lo largo de una sola dirección, se registraron las velocidades promedio de motores en las mismas pruebas en la siguiente tabla.

Tabla 2. Velocidades promedio alcanzadas a diferentes valores de intensidad de corriente I.

Intensidad de corriente [A]	Velocidad promedio [$\mu\text{m/s}$]
0.2	2.07
0.4	2.55
0.6	3.24
1.1	23.02

A pesar de haber indicado en la caracterización del sistema que el valor máximo alcanzado fue de 1.2 A, no se trabajó con este valor. Esto fue debido a que solo se podía mantener aquel valor no más de 10 s sin que empezara a decaer por el calor generado. La principal razón fue que el calibre del alambre fue muy delgado, creando una alta resistencia, lo que se traduce en un incremento de temperatura. Con un valor 1.1 A se pudo trabajar lo suficientemente bien para poder controlar las partículas. El electroimán presentó un campo magnético de 137.4 mT. En el área de trabajo, a lo largo del eje de simetría en la dirección x, a $x=0$, $x=0.695$ y 0.695 , el gradiente resultó de 10.6 T/m, 13.4 T/m y 16.2 T/m respectivamente para cada punto. Aunque a 1.1 A se consideró óptimo para trabajar, se presentó un calentamiento considerable en los embobinados, lo suficiente para tener que esperar a que se enfriara el sistema para poder retirar la muestra cuando se terminaron las pruebas.

Teóricamente, cambiar la dirección del gradiente de campo permite la inversión de la dirección del movimiento. Para verificar dicho movimiento reversible del nanomotor, se realizó un experimento bajo un gradiente magnético opuesto, como se ilustra en la Figura 29. En ella, se muestra la trayectoria del motor bajo el campo magnético alterado manualmente. El motor regresó rápidamente a su posición original en el eje horizontal al volver a aplicar el gradiente de campo magnético en la dirección contraria. La desviación respecto en el eje vertical fue debido al movimiento browniano, ya que no se tuvo control a lo largo de ese eje.

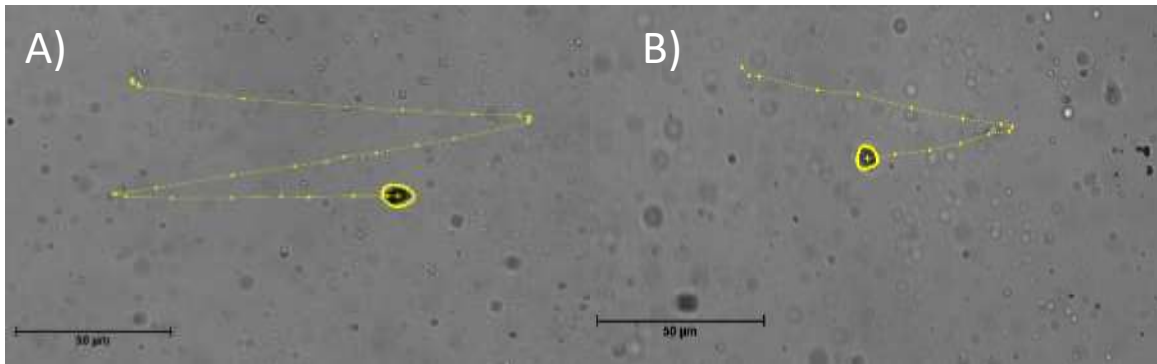


Figura 29. Trayectorias de las partículas de tipo núcleo-coraza de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-@Fe}_2\text{O}_3$ impulsadas por campos magnéticos no homogéneos a 1.1 A. Se presenta control en la dirección de las partículas a lo largo del eje x. A) t=

Como fue esperado, la velocidad aumentó de 2.07 a 23.02 $\mu\text{m/s}$ al aumentar el gradiente de campo aplicado de 2.1 a 13.4 T/m, respectivamente. Además, la modulación del campo magnético permitió un control preciso del movimiento de los nanomotores, haciendo que se pudieran detener y dirigirse en la dirección opuesta. Se encontró que el motor detiene su movimiento direccional inmediatamente después de apagar el campo magnético, es decir, que el movimiento direccional del motor se detuvo en ausencia del gradiente del campo magnético y se renovó al encenderse. Tal capacidad para regular la velocidad de los nanomotores es importante para aplicaciones prácticas en el transporte de carga o la administración de fármacos.

La partícula elegida para cada prueba de velocidad fue aleatoria, no obstante, se procuró que se encontrara en una zona lejos de la frontera física del espacio analizado. Si la partícula se hubiera encontrado cerca de los límites de la gota depositada o en la superficie del contenedor, fuerzas de adhesión actuarían en las partículas, alterando la velocidad a la que se desplazan.

6.3.3. El efecto del campo no homogéneo en las partículas

Está reportado que los sistemas basados en campos no homogéneos con un gradiente para controlar el movimiento funcionan con cualquier estructura magnética que pueda tener sus

dominios magnéticos alineados ^[17,29]. Por lo tanto, las partículas experimentan una fuerza de desplazamiento independientemente de la forma. La generación de un gradiente en el campo magnético inducido impondrá una fuerza propulsora en el motor. En dicho campo magnético no uniforme, la fuerza magnética sobre un cuerpo magnetizado está dado por la ecuación 7 mencionada previamente.

Suponiendo que no fluya corriente eléctrica a través de la región del cuerpo magnetizado, se requiere que $\nabla \times B=0$. Esto hace que la ecuación 7 de la fuerza pueda expresarse como: ^[26]

$$F= v \left[\frac{dB}{dx} \quad \frac{dB}{dy} \quad \frac{dB}{dz} \right]^T M \quad \text{Ec. 15}$$

A lo largo de una dirección resulta como:

$$F= v M \frac{dB}{dx} \quad \text{Ec.16}$$

Aunque es posible crear campos magnéticos altos ≈ 2 T, tal y como sucede en los equipos de imagen por resonancia magnética (IRM), no es esta magnitud la que hará que una partícula magnetizada se desplace hacia otro polo magnético. Es el cambio en el campo magnético por unidad de longitud lo que genera una traslación al no existir un equilibrio de fuerzas en el dipolo magnético que se desea desplazar. Retomando los equipos de resonancia magnética, a pesar de llegar a los 2 T, los gradientes que pueden generar continuamente están en el rango de 0.01 a 0.05 T/m; ^[18] sin tomar en cuenta que generar campos tan altos resulta en elevados costos de consumo eléctrico y suelen ocupar habitaciones enteras. El sistema utilizado fue capaz de generar gradientes de hasta 13.4 T/m en el centro del área de trabajo, 260 veces más grande que en un equipo IRM, con un campo neto de 137.4 mT, 15 veces menor a los 2 T que puede generar el equipo comparado.

Las ecuaciones 7 y 8 indican que las fuerzas magnéticas dependen del volumen del cuerpo magnetizado. Por lo tanto, los campos requeridos y los gradientes de campo para ejercer cierta fuerza en tal objeto aumentan rápidamente a medida que éste se vuelve más pequeño. En el trabajo de Yesin et al. ^[18] este comportamiento se atribuye principalmente a la cantidad reducida de material magnético en las partículas en la nanoescala. Por otro lado, Wang et al. ^[7] afirman que el tamaño de partícula juega un papel importante en el comportamiento del

motor, pero el nivel actual de comprensión del problema es bastante limitado para dar una conclusión concreta.

A pesar de que se generó la fuerza suficiente para mover a las partículas núcleo-coraza, los resultados experimentales indicaron que el movimiento browniano se presentó en los momentos en los que se invirtió el gradiente, por lo tanto, la capacidad de control se vio ligeramente comprometida. Si se desea aumentar el control de las partículas en todo el plano o inclusive en tres dimensiones, la adición de más electroimanes es sugerida. Esto aumentaría el control sobre las partículas, pero comprometería la accesibilidad para introducir la muestra, así como la capacidad de introducir tal sistema en el microscopio. Un futuro rediseño podrá reacomodar la posición de los electroimanes y solucionar este problema.

Ya sea un sistema de dos embobinados (como el utilizado en estas pruebas), o un sistema con n número de electroimanes, se podrá calcular el campo en cada punto del espacio de trabajo producido por cada uno o por la combinación de ellos. Esto solo puede ocurrir si se asume que cada electroimán posee un núcleo magnético suave con histéresis despreciable y los núcleos se mantienen dentro de sus regiones de magnetización lineal. ^[26] Se discutió anteriormente que este comportamiento ocurrió con los núcleos de acero usados en este sistema como se pudo apreciar en la Figura 22. Con esta consideración, tanto el campo magnético como el gradiente del campo pueden ser descritos por la superposición lineal de los campos individuales de todos los electroimanes que se encuentren encendidos.

Las pruebas de movimiento mostraron que es posible la manipulación controlada de las partículas. A pesar de que se puedan mover en una dirección deseada, para ser considerado como movimiento autónomo, cada motor debe ser capaz de poseer una trayectoria independiente a los demás motores tal y como es explicado por Wang et al. ^[7] Como la fuente de movimiento que impulsa a los motores es un campo magnético externo, éste ejerce las mismas fuerzas simultáneamente en todos los motores de la muestra. Debido a que las trayectorias de los motores propulsados por campos magnéticos son en la misma dirección, el movimiento resultante no es autónomo.

Para finalizar, es importante remarcar que en todo momento se asumió la ausencia de interacciones hidrodinámicas, magnéticas y electrostáticas entre las partículas. Trabajos

como el de Schaller et al., han estudiado con más detalle las interacciones entre partículas en la micro y nanoescala así como las fuerzas de arrastre y viscosidad en un fluido. ^[19]

Incluyendo todas las fuerzas que actúan sobre la partícula, la ecuación de movimiento unidimensional de la partícula en la dirección x expresada anteriormente (Ecuación 16), se puede expresar ahora como:

$$F = vM \frac{dB_x}{dx} - \gamma \frac{dx}{dt} + F_b + F_1 \quad \text{Ec.17}$$

Donde γ es el coeficiente de fricción de la partícula en el fluido que ejerce una fuerza en la dirección opuesta, F_b es la interacción debido al movimiento browniano y F_1 son las interacciones partícula-partícula (flujo de partículas vecinas, interacciones magnéticas dipolares y repulsión electrostática). ^[19]

Despreciar estas interacciones facilitó el trabajo y permitió poder focalizarse en conocer de manera general si era posible lograr el movimiento de partículas tipo núcleo-coraza para que funjan como motores. Como perspectiva a futuro, la manipulación de partículas puede brindar aplicaciones en las que el movimiento controlado sea fundamental, como lo es transporte de fármacos. ^[29] Un posterior y más profundo análisis en las propiedades magnéticas de las partículas, así como sus interacciones en fluidos similares al medio en el que se quieran aplicar son necesarios para poder ver su viabilidad en futuras aplicaciones.

7. Conclusiones

Se demostró que las partículas esféricas de tipo núcleo-coraza magnéticas de Fe_2O_3 pueden ser propulsadas por campos magnéticos no homogéneos en agua, mientras que por medio de ultrasonido o de un campo magnético alterno no fue el caso. En la propulsión por ultrasonido, las partículas de densidad homogénea no presentan un movimiento controlado mientras su densidad sea similar a la del fluido en el que se encuentren.

Debido a la naturaleza esférica de las partículas de tipo núcleo-coraza, el mecanismo de propulsión por medio de campos magnéticos alternos no es efectivo, debido a que solo presenta rotación de la partícula sobre su propio eje. Este tipo de sistema requiere que la estructura a manipular posea asimetría para funcionar. Por otra parte, los gradientes magnéticos utilizados permitieron manipular el movimiento de los nanomotores. La aceleración, desaceleración y detención por completo fue posible regulando el gradiente magnético en el área de trabajo.

Se puede crear un sistema que pueda controlar una partícula magnética en el espacio en la dirección deseada con el uso de electroimanes con materiales ferromagnéticos suaves como núcleo. Si el material núcleo se asemeja a un material suave ideal, se puede considerar su magnetización como una respuesta lineal. Esto facilita conocer el campo magnético neto en cualquier punto en el área de trabajo.

Se presentó la influencia del movimiento browniano en los tamaños de partícula empleados. Esta interacción no puede ser ignorada en una manipulación precisa, más aún si se desea disminuir aún más el tamaño de partícula que se desea manipular. Control sobre la influencia del movimiento browniano se reduce mientras se posea menos libertad de moverse en el espacio. La adición de más electroimanes al sistema podrá solucionar este problema.

Sistemas basados en campos no homogéneos pueden generar un movimiento controlado adecuado para partículas magnéticas que no pueden romper su simetría, como lo son las partículas esféricas tipo núcleo-coraza. El diseño simple de las partículas elimina la necesidad de una complejidad geométrica en el material. Esto hace que sea esperado que este tipo de

partículas puedan ofrecer aplicaciones prácticas. Para expandir en su utilidad práctica, posterior y más profundo análisis en las propiedades magnéticas de las partículas, así como sus interacciones en fluidos similares al medio en el que se deseen aplicar son necesarios para poder ver su viabilidad.

8. Referencias

1. Service, Elman R. "Primitive culture." *Encyclopaedia Britannica*. Web, 1999. Recuperado de <https://www.britannica.com/topic/primitive-culture#ref68784>
2. Aristóteles. "Física". Libro III, *El movimiento*. Ed. España Pp 79-85
3. Newton, I. "Newton's Principia: the mathematical principles of natural philosophy". *University of California Libraries Early American mathematics books*.
4. Buchanan, R. *History of technology Encyclopaedia Britannica*. Web, 1998. Recuperado de <https://www.britannica.com/technology/history-of-technology>
5. Real Academia Española. (2015). Motor. En *Diccionario de la lengua española* (23.a ed.). Recuperado de <http://dle.rae.es/?id=PwbtdE5>
6. Vincent Bontems, "L'imaginaire des nanotechnologies. Nanomonde ou nanocosme ?", *Études* 2008/4 (Tomo 408), Pp. 484-494.
7. Wei Wang, Wentao Duan, Suzanne Ahmed, Thomas E. Mallouk, Ayusman Sen. "Small power: Autonomous nano- and micromotors propelled by self-generated gradients". *Nano Today* (2013) 8, 531–554
8. Andrzej Chalupniak, Eden Morales-Narváez, Arben Merkoçi "Micro and nanomotors in diagnostics" *Advanced Drug Delivery Reviews* 95 (2015) 104–116
9. M. Guix, C.C. Mayorga-Martinez, A. Merkoçi, *Nano/micromotors in (bio)chemical science applications*, *Chem. Rev.* 114 (2014) 6285–6322.
10. Loai K. E. A. Abdelmohsen, Fei Peng, Yingfeng Tu and Daniela A. Wilson. "Micro- and nano motors for biomedical applications" *Journal of Materials Chemistry B* Issue 17, 2014
11. M. Garcia, J. Orozco, M. Guix, W. Gao, S. Sattayasamitsathit, A. Escarpa, A. Merkoçi, J. Wang, "Micromotor-based lab-on-chip immunoassays", *Nanoscale* 5 (2013) 1325–1331.
12. W. Wang, L.A. Castro, M. Hoyos, T.E. Mallouk, "Autonomous motion of metallic microrods propelled by ultrasound", *ACS Nano* 6 (2012) 6122–6132.
13. Sadjadi S. "Supramolecular Coordination Cages as Nanoreactors" *Organic Nanoreactors* (2016) 257-303 DOI: 10.1016/B978-0-12-801713-5.00009-4
14. Postupalenko V., Einfalt T., Lomora M., Dinu I., Palivan C. G., "Bionanoreactors: From Confined Reaction Spaces to Artificial Organelles" *Organic Nanoreactors* (2016) 341-371 DOI: 10.1016/B978-0-12-801713-5.00011-2

15. Chaudhuri R. G., Paria S., “Core/Shell Nanoparticles: Classes, Properties, Synthesis Mechanisms, Characterization, and Applications” *Chem. Rev.* (2012) 112, 2373–2433 DOI: 10.1021/cr100449n
16. Kumar K. S., Kumar V. B., Paik P., “Recent Advancement in Functional Core-Shell Nanoparticles of Polymers: Synthesis, Physical Properties, and Applications in Medical Biotechnology” *Journal of Nanoparticles* (2013) DOI: 10.1155/2013/672059
17. Ghanbari A., Chang P., Nelson B., Choi H. Electromagnetic Steering of a Magnetic Cylindrical Microrobot Using Optical Feedback Closed-Loop Control. *Journal International Journal of Optomechatronics*, núm 8. 2014. DOI 10.1109/TMAG.2012.2224693.
18. Berk Yesin, K., Vollmers, K., & Nelson, B. J. Modeling and Control of Untethered Biomicrobots in a Fluidic Environment Using Electromagnetic Fields. *The International Journal of Robotics Research*, (2006). 25(5–6), 527–536. DOI: 10.1177/027836490606065389
19. Schaller V., Kräling U., Rusu C., Petersson K., Wipenmyr J., Krozer A., Wahnström G., Sanz A., Enoksson P., Johansson C. Motion of nanometer sized magnetic particles in a magnetic field gradient. *Journal of Applied Physics*, núm 104. 2008. DOI: 10.1063/1.3009686.
20. Victor Garcia-Gradilla, Jahir Orozco, Sirilak Sattayasamitsathit, Fernando Soto, Filiz Kuralay, Ashley Pourazary, Adlai Katzenberg, Wei Gao, Yufeng Shen, and Joseph Wang. “Functionalized Ultrasound-Propelled Magnetically-Guided Nanomotors: Towards Practical Biomedical Applications” *ACS Nano*, (2013) DOI: 10.1021/nn403851v
21. Fernando Soto, Gregory L. Wagner, Victor Garcia-Gradilla, Kyle T. Gillespie, Deepak R. Lakshmiopathy, Emil Karshalev, Chava Angell, Yi Chena and Joseph Wang. “Acoustically Propelled Nanoshells”. *Nanoscale*, 8, 17788-17793 (2016) DOI: 10.1039/C6NR06603H
22. Roger S. M. Rikken, Roeland J. M. Nolte, Jan C. Maan, Jan C. M. van Hest, Daniela A. Wilsonb and Peter C. M. Christianen “Manipulation of micro- and nanostructure motion with magnetic fields” *Soft Matter*, (2014) 10, 1295 DOI: 10.1039/c3sm52294f
23. Jiles, D. *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. Springer Science + Business Media (1991) ISBN 978-0-412-38640-4
24. Coey J. *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge. 2010. 635p. ISBN-13 978-0-511-677434
25. Georgia Tech University. *Ley Biot-Savart*. *Hyperphysics*, Recuperado de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>. 27/11/2018
26. Simone Schuerle, Sandro Erni, Maarten Flink, Bradley E. Kratochvil, and Bradley J. Nelson, Fellow, “Three-Dimensional Magnetic Manipulation of Micro- and Nanostructures for Applications in Life Sciences” *Ieee Transactions On Magnetics*, Vol. 49 (2013) DOI: 10.1109/TMAG.2012.2224693

27. Abbott, J. J., Peyer, K. E., Lagomarsino, M. C., Zhang, L., Dong, L., Kaliakatsos, I. K., & Nelson, B. J., "How Should Microrobots Swim?" *The International Journal of Robotics Research*, 28(11-12), 1434–1447. (2009). DOI:10.1177/0278364909341658
28. Gao, W., Feng, X., Pei, A., Kane, C. R., Tam, R., Hennessy, C., & Wang, J. Bioinspired Helical Microswimmers Based on Vascular Plants. *Nano Letters*, 14(1), 305–310. (2013). DOI: 10.1021/nl404044d
29. Michael P. Kummer, Jake J. Abbott, Bradley E. Kratochvil, Ruedi Borer, Ali Sengul, And Bradley J. Nelson, "Octomag: An Electromagnetic System For 5-Dof Wireless Micromanipulation", *Ieee Transactions On Robotics*, Vol. X, No. X. (2010) DOI: 10.1109/Tro.2010.2073030
30. López Cisneros, M. (2018). Síntesis de nanorreactores por spray pyrolysis (tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
31. Nadal, F., & Lauga, E. Asymmetric steady streaming as a mechanism for acoustic propulsion of rigid bodies. *Physics of Fluids*, 26(8), 082001. (2014) DOI:10.1063/1.4891446
32. Hu, J., Zhou, S., & Sun, Y. Fabrication, properties and applications of Janus particles. *Chem. Soc. Rev.*, 2012, 41, 4356–4378 DOI: 10.1039/c2cs35032g