



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

CENTRO DE NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍA

SÍNTESIS DE NANOMOTORES DE PROPULSIÓN
MAGNÉTICA BASADOS EN FIBRAS HELICOIDALES
DE PLANTAS VASCULARES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN NANOTECNOLOGÍA

P R E S E N T A :

DIANA ISABEL SANDOVAL BOJÓRQUEZ



TUTOR DE TESIS:
DR. VICTOR JULIÁN GARCÍA GRADILLA

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, AGOSTO 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

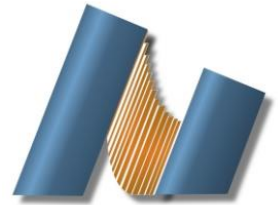
DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
CENTRO DE NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍA



LICENCIATURA EN NANOTECNOLOGÍA
MICROELECTRÓNICA Y NANOFABRICACIÓN

SÍNTESIS DE NANOMOTORES DE PROPULSIÓN MAGNÉTICA BASADOS EN
FIBRAS HELICOIDALES DE PLANTAS VASCULARES

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

PRESENTA:
DIANA ISABEL SANDOVAL BOJÓRQUEZ

DIRECTOR DE TESIS
DR. VÍCTOR JULIÁN GARCÍA GRADILLA

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, AGOSTO 2017

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.

Diana Isabel Sandoval Bojórquez

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por ayudarme a cumplir mis sueños y a alcanzar mis metas, por su apoyo, por su amor.

A mi familia, por ser una parte fundamental en mi vida.

A Sergio, por prestarme tus ojos para ver la vida, por ser siempre mi compañero de equipo, por tu confianza, ik hou van je kip.

A mi familia playitas, Misael, Brian, Lalo y Alam. Gracias por quererme como soy desde el primer momento, gracias por siempre estar.

A mis chicas, Ximena, Gisela, Sarahí. Gracias por hacer que la distancia no fuera un obstáculo para nuestra amistad.

A Lau, por siempre estar dispuesta a escuchar, por todo tu cariño.

A mis roomies, Ere y Marina. Gracias por todas las risas, por la paciencia, por su amistad.

To Josephine, thanks for showing that friendship has no boundaries.

A Lenin y Charlotte, por su apoyo para la realización de este trabajo, por su entusiasmo, por las pláticas del Ecuador.

A todos los profesores que han sido parte de mi formación académica, en especial a aquellos que dejan el alma en el aula.

A mis compañeros y amigos de generación, por tantos momentos juntos, por los juegos, las risas, el estudio y sobre todo las pizzas.

A Juan Peralta, Raúl Tafolla y Paco Núñez. Gracias por sus palabras de aliento y por estar siempre al pendiente.

A mi asesor, Dr. Víctor García, gracias por abrirme las puertas de su laboratorio, gracias por todo su apoyo.

A mis sinodales, Dr. Eduardo Murillo, Dr. Felipe Castellón, Dr. Javier Pérez y M. C. Karla Alejo, por su tiempo y disposición.

Al proyecto CONACYT no.239953 por financiar este trabajo y por apoyarme con una beca para la realización de la tesis.

A mi *alma mater*, la UNAM.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	1
1.1. Nanomotores	1
1.1.1. Tipos de nanomotores	2
1.1.2. Perspectiva	3
2. Antecedentes	4
2.1. Nanomotores de propulsión magnética	4
2.1.1. Hélices fabricadas por depósito en ángulo	4
2.1.2. Hélices fabricadas por escritura 3D	5
2.1.3. Hélices fabricadas por electrodeposición	6
2.1.4. Hélices fabricadas usando fibras helicoidales de plantas vasculares	7
3. Objetivos	9
3.1. Objetivo general	9
3.2. Objetivos particulares	9
4. Metodología	10
4.1. Fabricación de los nanomotores	11
4.1.1. Obtención de fibras helicoidales	11
4.1.2. Recubrimiento por método de pulverización catódica por magnetrón	12
4.1.3. Cortado	15
4.2. Implementación del sistema de propulsión magnética	15
4.3. Experimentos de movimiento	16
4.4. Técnicas de caracterización	17

4.4.1. Microscopía de fuerza atómica	17
4.4.2. Microscopía óptica	18
5. Resultados y Discusión	19
5.1. Hélices magnéticas	19
5.2. Sistema de propulsión	23
5.3. Experimentos de movimiento	24
6. Conclusiones	30
Referencias	32

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1 A) Imagen de SEM de una sección de oblea que contiene $\sim 10^9$ hélices/cm ² . B) Imagen de SEM de una hélice de SiO ₂	5
2.2. a) Diseño de patrones por escritura directa con láser en el CPM. b) Hélice de CPM de 3 vueltas [14].	5
2.3. Esquema de la fabricación de hélices magnéticas por electrodeposición. a) Electrodeposición de Au; b) codeposición de varillas Pd/Cu; c) eliminación de la plantilla y la sección de Au; d) decapado de Cu; e) recubrimiento de Ni [15].	6
2.4. A) Esquema para la preparación de las hélices magnéticas. B) Imagen de las fibras helicoidales al ser aisladas. El acercamiento permite observar la alta densidad y uniformidad de las hélices. C) Imagen de microscopio óptico de hélices magnéticas de la especie <i>A. africanus</i> . Escala 30 μ m [16].	7
Figura 4.1. Esquema que muestra la organización de las etapas involucradas en este trabajo.	10
Figura 4.2. (a) Ilustración de la sección transversal del apio. (b) Ilustración de la sección transversal de un haz vascular del apio. Ph=Floema, Xy=Xilema y Te=Estructuras de soporte. (c) Ilustración de una fibra helicoidal. (d) Imagen que muestra la orientación de los haces vasculares en el apio. Las hélices están alineadas con el eje largo paralelo al eje largo de los haces vasculares [18].	12
Figura 4.3. Esquema del proceso de pulverización catódica por magnetron [22].	13
Figura 4.4. Imagen que muestra dos segmentos de silicio colocados uno sobre otro y sujetos a un porta muestras con un clip.	14
Figura 4.5. Bobina de Helmholtz triaxial. Solamente se usaron los pares arriba-abajo e izquierda-derecha.	15
Figura 4.6. Equipo utilizado para generar el campo magnético rotatorio.	16
Figura 4.7. Representación esquemática del funcionamiento del AFM [23].	17
Figura 5.1. (a) Secciones de haces vasculares cortados de manera transversal. Se observan largos segmentos de hélices. (b) Imagen de hélices vistas en el microscopio óptico invertido. Escala 200 μ m.	19

Figura 5.2 Micrografía de AFM de (a) depósito de níquel-titanio a 50 W de potencia y (b) depósito de níquel-titanio a 100 W de potencia. Perfiles de AFM de (c) depósito de níquel-titanio a 50 W de potencia y (d) depósito de níquel-titanio a 100 W de potencia.	21
Figura 5.3 Imagen de microscopio óptico invertido de hélices recubiertas con níquel a una potencia de 100 W. Escala 100 μm	22
Figura 5.4 Nanomotores helicoidales suspendidos en agua desionizada. (a) Longitud= 121.36 μm , diámetro=52.89 μm . (b) L=107.23 μm , d=47.53 μm . (c) L=47.90 μm , d=32.50. Escala 100 μm	23
Figura 5.5 (a) Esquema de la rotación perpendicular al eje de la hélice, movimiento tiempo tambaleo. (b) Esquema de la rotación alrededor del eje de la hélice, movimiento tipo sacacorchos [15].	25
Figura 5.6 (A) Capturas del video de movimiento de la hélice mostrada en la Figura 5.5a a 20 Hz. Escala 200 μm . (B) Capturas del video de movimiento de la hélice mostrada en la Figura 5.5b a 15 Hz. Escala 100 μm . (C) Capturas del video de movimiento de la hélice mostrada en la Figura 5.5b a 30 Hz. Escala 100 μm	25
Figura 5.7 Gráfica que muestra la frecuencia de rotación de las hélices comparada con la frecuencia de rotación del campo magnético.	27
Figura 5.8. Imágenes del video de movimiento de un nanomotor a 5 Hz a: (a) 0 s, (b) 5 s, (c) 10 s, (d) 15 s y (e) 20 s. L=47.90 μm , d=32.50. La flecha indica la dirección del movimiento. Escala 200 μm	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Datos de movimiento de un nanomotor a frecuencias entre 5 y 100 Hz	29
--	----

RESUMEN

Los nanomotores de propulsión magnética son atractivos por su potencial para ser utilizados en aplicaciones biomédicas, ya que no requieren de combustibles externos para propulsarse. En este trabajo se realiza la fabricación de nanomotores de propulsión magnética utilizando como plantilla fibras helicoidales presentes en los haces vasculares del apio (*Apium graveolens*). El nanomotor consta de una pequeña sección de hélice recubierta con una capa de níquel. Los experimentos de propulsión se llevaron a cabo en presencia de un campo magnético rotatorio generado por dos pares de bobinas de Helmholtz. Se presenta el análisis del movimiento de las hélices magnéticas a distintas frecuencias y se realiza una comparación con los nanomotores fabricados por métodos sintéticos.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En diciembre de 1959, Richard P. Feynman dio una plática en el Instituto Tecnológico de California (*Caltech* por sus siglas en inglés) ante algunos miembros de la comunidad científica [1]. Su charla era una invitación a entrar en un nuevo campo de la ciencia, un campo donde fuera posible manipular y controlar la materia escalas pequeñas [2]. Su propósito no era discutir acerca de cómo llevar a cabo la manipulación y el control de la materia a esas escalas, su intención era plantear lo que sería posible hacer sin violar las leyes de la física y retar a la comunidad científica a encontrar la forma de hacerlo [1,3].

No cabe duda que durante su plática Feynman mencionó información novedosa e intrigante que incentivó la discusión en diversos círculos científicos. Uno de los pensamientos más trascendentales que se vislumbra en su discurso es que las ideas no son imposibles de realizar [3]. Una de las ideas “imposibles” que menciona es la posibilidad de crear máquinas pequeñas que puedan ser introducidas en el cuerpo, que puedan viajar hasta ciertas regiones y en esas regiones realizar tareas específicas [1]. Esta y otras ideas que parecen extraídas de una película de ciencia ficción, fueron los detonantes para que la comunidad científica echara a volar su imaginación sobre lo que se podría hacer en ese amplio espacio del fondo del que hablaba Feynman.

1.1 Nanomotores

Desde que Feynman enunció la posibilidad de crear pequeñas máquinas durante su visionaria charla, surgieron numerosas preguntas referentes al funcionamiento de estos dispositivos, el tipo de energía requerida para realizar movimiento y las fuerzas responsables de éste [4]. Sin embargo, fue hasta finales

del siglo XX cuando se empezó a utilizar el término motor para definir el comportamiento de micro y nano sistemas [5].

El término nanomotor se utilizó inicialmente para referirse a sistemas biológicos de escalas nanométricas que tenían un comportamiento similar al de los motores mecánicos [5]. A partir del estudio detallado de estos nanomotores biológicos se comenzaron a crear dispositivos artificiales que tratan de imitar su funcionamiento [6-9]. Por lo anterior, se puede definir un nanomotor como un dispositivo a escala nanométrica cuya respuesta ante un estímulo específico es el movimiento.

1.1.1 Tipos de nanomotores

Desde la fabricación del primer nanomotor por un grupo de la Universidad de Penn State en el año 2004 [10], se han desarrollado diversas estrategias para fabricar nanomotores de distintos tipos que puedan ser propulsados por diferentes estímulos para realizar diversas tareas [7]. Es por esto por lo que se puede clasificar a los nanomotores por su forma, su método de propulsión, si usan o no combustible, por su composición y por su aplicación [7,8]. La principal clasificación que se les da a los nanomotores es por su método de propulsión [8].

Nanomotores catalíticos

Este tipo de nanomotores es propulsado por la reacción química que ocurre entre un material catalítico que forma parte del nanomotor, y un combustible que puede ser agua, peróxido de hidrógeno, ácidos, bases, entre otros [8]. Según la reacción que se lleve a cabo, el movimiento puede ser generado por burbujas, difusioforesis y electroforesis [7,9].

Nanomotores propulsados por ultrasonido

El ultrasonido es energía acústica en forma de ondas con una frecuencia por arriba del rango auditivo de los humanos. Estas ondas sonoras de alta frecuencia son responsables del movimiento de este tipo de nanomotores. El movimiento es atribuido a un gradiente de presión inducido asociado a la forma asimétrica del nanomotor [7-9,11].

Nanomotores propulsados por campo magnético

Este tipo de nanomotores está inspirado en el movimiento de organismos biológicos flagelados como bacterias y espermatozoides. Su propulsión se debe a la aplicación de campos magnéticos externos generados por imanes permanentes o por arreglos ortogonales de bobinas [7-9,12].

1.1.2 Perspectiva

En la última década, el desarrollo de nanomotores ha sido de gran interés debido a las diversas aplicaciones en las que pueden ser empleados [6]. Algunas de estas aplicaciones, principalmente en el área biomédica, requieren que estos dispositivos puedan ser implementados en ambientes específicos y, por lo tanto, deben ser diseñados y fabricados para cumplir con ciertos requerimientos. Es por ello por lo que se han desarrollado nanomotores que sean biocompatibles y que no requieran de algún combustible para moverse [12]. En el presente estudio se presenta la fabricación y el análisis de movimiento de nanomotores helicoidales cuyo método de propulsión es un campo magnético rotatorio.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 Nanomotores de propulsión magnética

Los nanomotores que son propulsados por campos magnéticos externos han atraído gran atención debido a que pueden realizar tareas complejas sin utilizar combustible alguno [12-16]. Se han fabricado nanomotores de propulsión magnética de distintos tipos tales como: nanoalambres flexibles, esferas dobles, nanoalambres estriados y hélices [9]. Estos últimos son particularmente atractivos, ya que bajo la influencia de un campo magnético rotatorio, son capaces de transformar la rotación sobre su eje en movimiento traslacional tipo sacacorchos.

2.1.1 Hélices fabricadas por depósito en ángulo

En 2009, Ghosh *et al.* [13] reportaron la fabricación de nanomotores helicoidales formados por una cabeza de esferas de silica (200-300 nm de diámetro) y colas helicoidales de SiO₂. Este elemento se depositó sobre las esferas de silica por el método de depósito en ángulo. Posteriormente, se realizó un recubrimiento de cobalto por evaporación térmica. Las hélices se magnetizaron en dirección radial para que rotaran sobre el eje principal en presencia de un campo magnético rotatorio (Figura 2.1).

En el estudio utilizaron una bobina de Helmholtz triaxial para generar un campo magnético homogéneo. Con frecuencias de alrededor de 170 Hz, se aplicaron campos magnéticos de 50-60 G. En presencia de estos campos magnéticos, las hélices alcanzaron una velocidad traslacional aproximada de 40 μm por segundo. Además, fueron guiadas por trayectorias programadas para realizar figuras como letras, con lo cual se demostró tener un alto control al manipularlas [13].

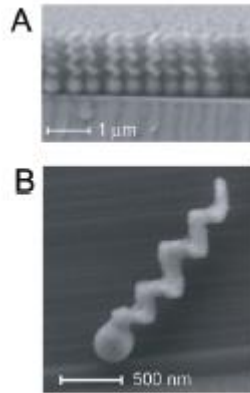


Figura 2.1 A) Imagen de SEM de una sección de oblea que contiene $\sim 10^9$ hélices/cm². B) Imagen de SEM de una hélice de SiO₂ [13].

2.1.2 Hélices fabricadas por escritura 3D

En 2014, Peyer *et al.* [14] fabricaron hélices formadas por un compuesto de polímero magnético (CPM). Por el método de centrifugado, depositaron CPM sobre un portamuestras de vidrio. Usando un equipo de escritura directa con láser, siguieron las trayectorias helicoidales predefinidas. Aplicaron campos magnéticos de 3, 6 y 9 mT usando una bobina Helmholtz triaxial. En presencia de estos campos, las hélices presentaron una velocidad traslacional de hasta 8 μm por segundo (Figura 2.2).

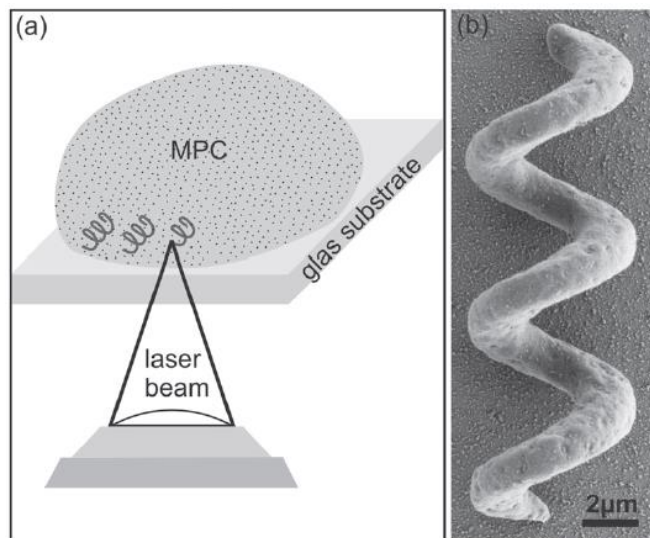


Figura 2.2. a) Diseño de patrones por escritura directa con láser en el CPM. b) Hélice de CPM de 3 vueltas [14].

2.1.3 Hélices fabricadas por electrodeposición

En 2014, Li *et al.* [15] reportaron hélices fabricadas por electrodeposición sobre una plantilla que consiste en una membrana con un recubrimiento de óxido de aluminio. Inicialmente se electrodepositaron varillas de oro de aproximadamente 1 μm de longitud. Posteriormente se hizo un codepósito de varillas de paladio y cobre. Se eliminó la plantilla y la sección de oro, y enseguida se realizó el decapado del cobre para obtener hélices de paladio. Finalmente, se depositó níquel a las hélices por el método de evaporación por haz de electrones (Figura 2.3).

En este estudio se utilizó un par de bobinas Helmholtz para generar un campo magnético rotatorio, usando frecuencias entre 1 y 1000 Hz. A una frecuencia de 150 Hz se registró una velocidad traslacional de 15 μm por segundo. Posteriormente, se realizaron experimentos en cultivos celulares, en los cuales los nanomotores fueron propulsados de manera exitosa [15].

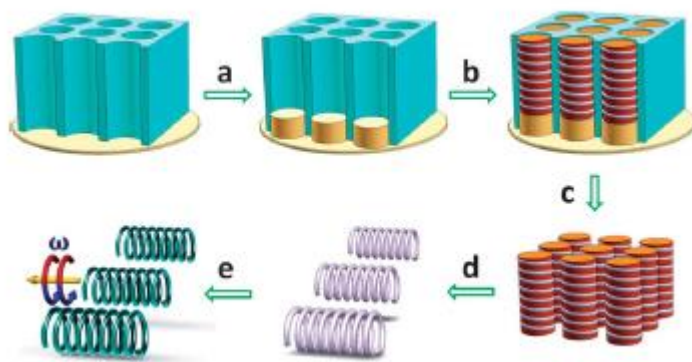


Figura 2.3. Esquema de la fabricación de hélices magnéticas por electrodeposición. a) Electrodeposición de Au; b) codepósito de varillas Pd/Cu; c) eliminación de la plantilla y la sección de Au; d) decapado de Cu; e) recubrimiento de Ni [15].

2.1.4 Hélices fabricadas usando fibras helicoidales de plantas vasculares

En 2014, Gao *et al.* [16] utilizaron fibras de plantas vasculares como plantillas para fabricar hélices magnéticas. Extrajeron mecánicamente fibras helicoidales de los capilares de las plantas, las cuales se recubrieron con una película delgada de titanio y una película delgada de níquel por el método de evaporación por haz de electrones. Las hélices magnéticas fueron cortadas en secciones de 30-60 μm (Figura 2.4).

Realizaron experimentos de propulsión usando un campo magnético rotatorio de 10 G a una frecuencia de 10-80 Hz. Se registró una velocidad máxima de 250 μm por segundo. Además, fue posible propulsar a estas hélices en suero sanguíneo a una velocidad máxima de 90 μm por segundo [16].

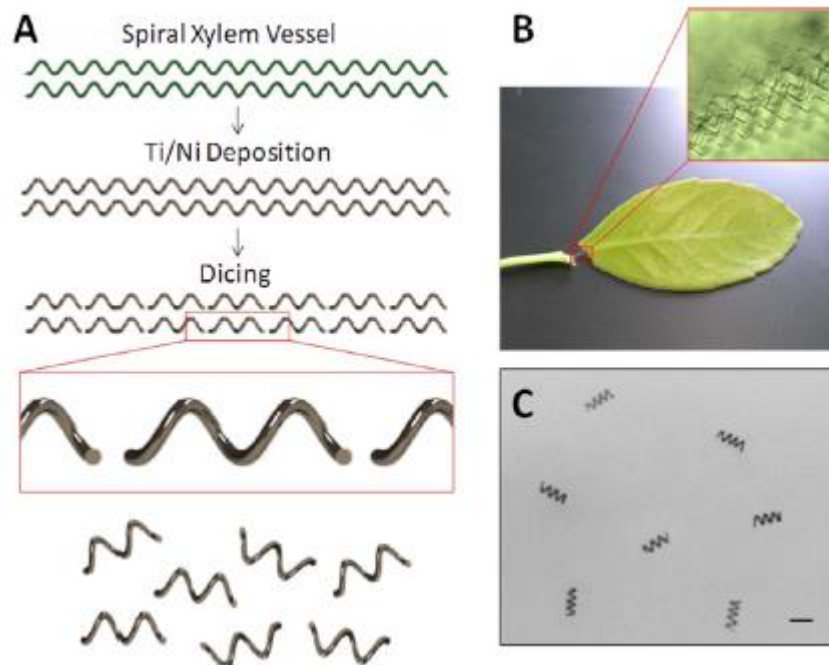


Figura 2.4. A) Esquema para la preparación de las hélices magnéticas. B) Imagen de las fibras helicoidales al ser aisladas. El acercamiento permite observar la alta densidad y uniformidad de las hélices. C) Imagen de microscopio óptico de hélices magnéticas de la especie *A. africanus*. Escala 30 μm [16].

Como se puede vislumbrar, los nanomotores helicoidales son atractivos por su potencial para ser utilizados en aplicaciones biomédicas. Sin embargo, para poder ser ampliamente utilizados, es importante desarrollar métodos de fabricación que sean eficientes y de bajo costo. Usar como plantilla las fibras helicoidales presentes en las plantas vasculares, es una gran alternativa para los métodos de fabricación sintéticos [13-15]. En este trabajo se fabricaron nanomotores de propulsión magnética usando fibras helicoidales de planta, tal como lo proponen Gao *et al* [16].

CAPÍTULO 3

OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Fabricar nanomotores helicoidales usando como plantilla las fibras que se encuentran dentro de los capilares del apio (*Apium graveolens*) y propulsarlos magnéticamente mediante un campo magnético rotatorio.

3.2 Objetivos particulares

- Lograr extraer las fibras helicoidales que se encuentran en los capilares del apio.
- Usando la técnica de pulverización catódica, realizar un recubrimiento de níquel sobre las hélices.
- Implementar el sistema de propulsión magnética.
- Lograr la propulsión de las hélices utilizando un campo magnético rotatorio.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

El desarrollo de este trabajo involucra la fabricación de los nanomotores, la implementación de un sistema de propulsión y la realización de experimentos de movimiento. En la Figura 4.1 se observa un esquema donde se aprecia la organización de estas fases.

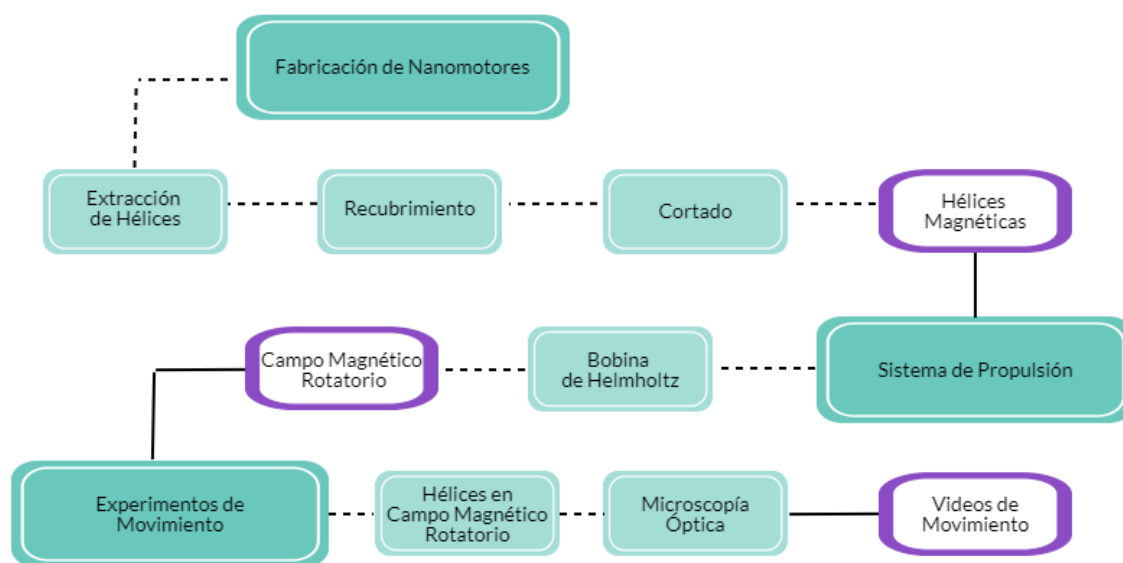


Figura 4.1. Esquema que muestra la organización de las etapas involucradas en este trabajo.

Para la fabricación de los nanomotores se requiere la extracción de las fibras helicoidales presentes en los capilares del apio. Posteriormente, se hace un depósito de níquel sobre las hélices y estas son cortadas en segmentos de alrededor de 70 μm . Para propulsar a las hélices magnéticas, se generó un campo magnético rotatorio usando dos pares de bobinas de Helmholtz. Una vez obtenido el campo magnético rotatorio, se procedió a realizar los experimentos de movimiento. Las hélices magnéticas fueron suspendidas en agua desionizada y se colocaron en presencia del campo magnético rotatorio a distintas frecuencias. Se usó un microscopio óptico y una cámara digital para grabar el comportamiento de las hélices. A partir de los videos obtenidos, se realizó el análisis del movimiento de las hélices.

4.1 Fabricación de los nanomotores

Como se mencionó con anterioridad, existen diversos métodos para fabricar nanomotores helicoidales [13-15], sin embargo, la mayoría de ellos requieren de sistemas complejos y procesos de fabricación muy costosos [16]. En comparación con los métodos de fabricación sintéticos, la naturaleza ofrece una variedad de estructuras sofisticadas en las plantas. Es por esto por lo que se puede aprovechar la morfología natural de las estructuras que se encuentran en las plantas y convertirlas en materiales funcionales [16].

4.1.1 Obtención de fibras helicoidales

Las plantas vasculares presentan un sistema de vasos conductores por los cuales circulan agua, nutrientes y minerales. Existen dos tipos de vasos conductores: el xilema y el floema. El xilema se extiende a lo largo de toda la planta y transporta agua y nutrientes desde la raíz hasta las hojas. Durante la transpiración, las plantas experimentan presión negativa en el sistema vascular. Para soportar esto, las plantas han desarrollado estructuras que le dan soporte y evitan el colapso. Algunas de estas estructuras de soporte consisten en hélices de celulosa [16-18].

Para obtener las fibras helicoidales del apio, es necesario extraer los haces vasculares, ya que en ellos se encuentra el xilema que las contiene (Figura 4.2). Se colocaron secciones de haces vasculares de aproximadamente 7 cm sobre porta muestras de vidrio y se realizó un cuidadoso corte transversal para exponer las fibras helicoidales. Con cinta Kapton, se sujetaron los extremos de los haces vasculares al porta muestras de vidrio.

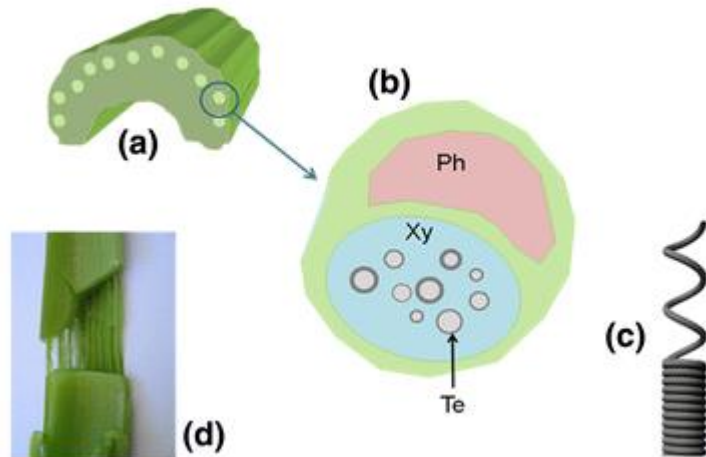


Figura 4.2. (a) Ilustración de la sección transversal del apio. (b) Ilustración de la sección transversal de un haz vascular del apio. Ph=Floema, Xy=Xilema y Te=Estructuras de soporte. (c) Ilustración de una fibra helicoidal. (d) Imagen que muestra la orientación de los haces vasculares en el apio. Las hélices están alineadas con el eje largo paralelo al eje largo de los haces vasculares [18].

4.1.2 Recubrimiento por método de pulverización catódica por magnetron

Con el fin de lograr que las hélices presenten un comportamiento magnético, se realizó sobre ellas un depósito de níquel por la técnica de pulverización catódica por magnetron (Figura 4.3). Esta técnica consiste en bombardear con iones energéticos una superficie sólida llamada blanco.

El proceso de pulverización catódica se basa en la generación de un plasma entre dos electrodos que se encuentran dentro de una cámara de vacío. Para generar el plasma la cámara se lleva a presiones bajas (10^{-6} Torr) y se introduce un gas inerte, usualmente argón, a presiones de entre 10^{-1} y 10^{-3} Torr. Cuando se aplica un voltaje suficiente entre los electrodos, el gas se ioniza parcialmente y se forma el plasma. Los iones son acelerados hacia el blanco, el cual funciona como cátodo. Los átomos de la superficie del blanco son expulsados en dirección del sustrato debido a las colisiones entre ellos y los iones energéticos. Al entrar en contacto con la superficie del sustrato, los átomos se condensan en la superficie [19-20].

Durante el bombardeo con los iones, también se emiten electrones secundarios de la superficie del blanco. Colocar un campo magnético paralelo al blanco puede restringir a estos electrones a un área cercana al blanco. Los imanes se colocan de tal forma que un polo se encuentra en el centro del blanco y el otro polo se encuentra en forma de anillo en el extremo externo del blanco. Confinar a los electrones de esta forma, incrementa la ionización del gas. Esto resulta en un incremento de partículas energéticas bombardeando el blanco, lo cual genera altas tasas de depósito. A esta técnica se le conoce como pulverización catódica por magnetrón y es ampliamente utilizada para depositar una gran variedad de materiales [21].

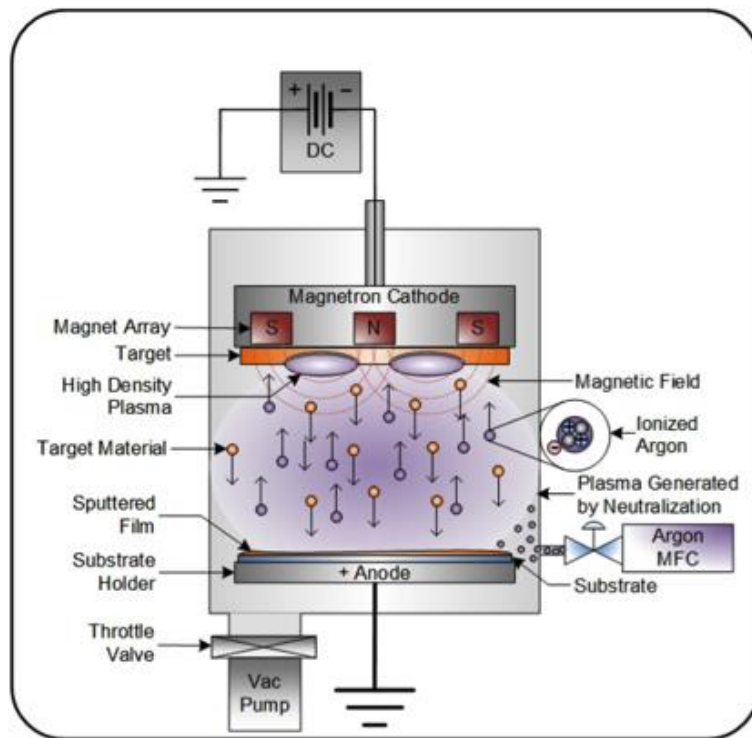


Figura 4.3. Esquema del proceso de pulverización catódica por magnetrón [22].

Condiciones del depósito

Previo a realizar el depósito de níquel sobre las hélices, se realizó un depósito de titanio con el fin de mejorar su adherencia [16]. Sin embargo, antes de llevar a cabo ambos depósitos, fue necesario caracterizar la tasa de depósito de los materiales. Para obtener la tasa de depósito, se colocaron dos segmentos de silicio, uno sobre otro, y se sujetaron a un porta muestras usando un clip (Figura 4.4). De esta forma se obtuvieron escalones de material depositado, cuyo espesor fue medido posteriormente. La presión base dentro de la cámara se mantuvo alrededor de 10^{-6} Torr y el flujo de argón introducido fue de $27.4 \text{ cm}^3/\text{min}$. Ambos depósitos, de titanio y níquel, se llevaron a cabo a potencias de 50 y 100 W, contando con una presión de trabajo de 2.1×10^{-3} Torr. Ya que el propósito del recubrimiento de titanio era simplemente mejorar la adherencia del níquel, la duración del depósito fue de 1 minuto. Por otro lado, la duración del depósito de níquel fue de 5 minutos, debido a que se requerían cantidades considerables de material magnético sobre la hélice. Una vez que se determinó la potencia óptima para el depósito, se procedió a realizar el recubrimiento sobre las hélices.



Figura 4.4. Imagen que muestra dos segmentos de silicio colocados uno sobre otro y sujetos a un porta muestras con un clip.

4.1.3 Cortado

Una vez que las hélices se encontraban recubiertas, se realizó el cortado en segmentos de 45-140 μm . Se seleccionaron segmentos de hélices recubiertas y se colocaron en porta muestras limpios. Con el microscopio óptico se ubicaba la zona de interés y usando una navaja de acero se realizaron los cortes pertinentes.

4.2 Implementación del sistema de propulsión magnética

Para generar un campo magnético rotatorio se usaron dos pares de bobinas de Helmholtz colocados de manera ortogonal entre ellos (Figura 4.5). Para realizar el embobinado, se usó cable de cobre esmaltado calibre 28 y se dieron 80 vueltas por bobina. El diámetro de las bobinas es de 5.5 cm y cada par se encontraba a un diámetro de distancia.

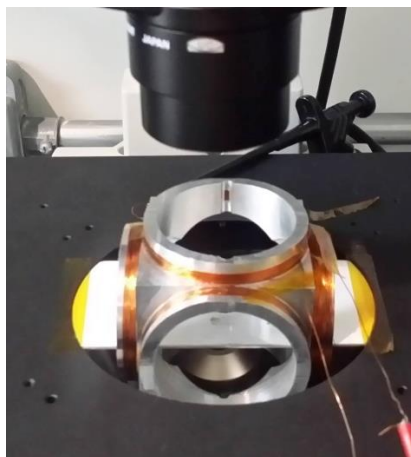


Figura 4.5. Bobina de Helmholtz triaxial. Solamente se usaron los pares arriba-abajo e izquierda-derecha.

Para generar el campo magnético rotatorio se le suministro a cada par de bobinas una señal senoidal usando un generador de funciones de dos canales *RIGOL DG 1032*. Para amplificar la señal proporcionada por el generador de funciones, se usó un amplificador de audio *BOSS R3004-1200 W* el cual se conectó a una fuente de voltaje de DC *SHANGHAI MASTECH HY3020-R*. Para monitorear la amplitud y el desfase entre las señales, se usó un osciloscopio *TEKTRONIX TDS3014B*. En la

Figura 4.6 se muestra la disposición del equipo, así como la bobina colocada en el microscopio.



Figura 4.6. Equipo utilizado para generar el campo magnético rotatorio.

4.3 Experimentos de movimiento

Una vez realizado el cortado de la hélice, se colocó el porta muestras de tal forma que la hélice se ubicara lo más cerca del centro del arreglo de bobinas y se agregaron 5 μL de agua desionizada y 5 μL de una solución de dodecilsulfato sódico (SDS por sus siglas en inglés) 0.04 M como surfactante para lograr que las hélices se suspendieran en el agua.

Para encender el sistema de propulsión, primero se colocaron los parámetros de las señales senoidales. La amplitud de las ondas fue de 13 Vpp y el desfase entre las señales fue de 263° . Se trabajó con frecuencias de entre 5 y 100 Hz. Para encender el amplificador se le suministraron 15 V con la fuente de voltaje.

Se capturaron videos de movimiento de las hélices a distintas frecuencias usando un microscopio óptico invertido *Nikon Eclipse Ti*, una cámara digital

HAMAMATSU Digital Camera C11440 y el software NIS-Elements AR. Para el análisis de los videos se utilizó el módulo *Tracking* del software NIS-Elements.

4.4 Técnicas de caracterización

4.4.1 Microscopía de fuerza atómica

Para caracterizar la tasa de depósito del níquel, se utilizó el microscopio de fuerza atómica (AFM por sus siglas en inglés) *Park System XE-70*. El AFM es un instrumento que adquiere imágenes de la superficie de las muestras utilizando una punta que se encuentra montada en una micropalanca (Figura 4.7). Sobre esta micropalanca se hace incidir un láser que se refleja hacia un fotodetector que se encuentra dividido en cuatro cuadrantes. Esto permite obtener lecturas simultáneas de desplazamiento vertical y lateral. La punta del AFM escanea la muestra línea por línea utilizando un piezoeléctrico. Mientras se realiza el escaneo de la muestra se registran cambios en la señal del fotodetector debido a pequeñas desviaciones del piezoeléctrico ocasionadas por la topografía en la superficie de la muestra. Con los datos obtenidos se puede generar una imagen en 3D ya que se conoce la posición del piezoeléctrico en cada punto de la zona analizada [23,24].

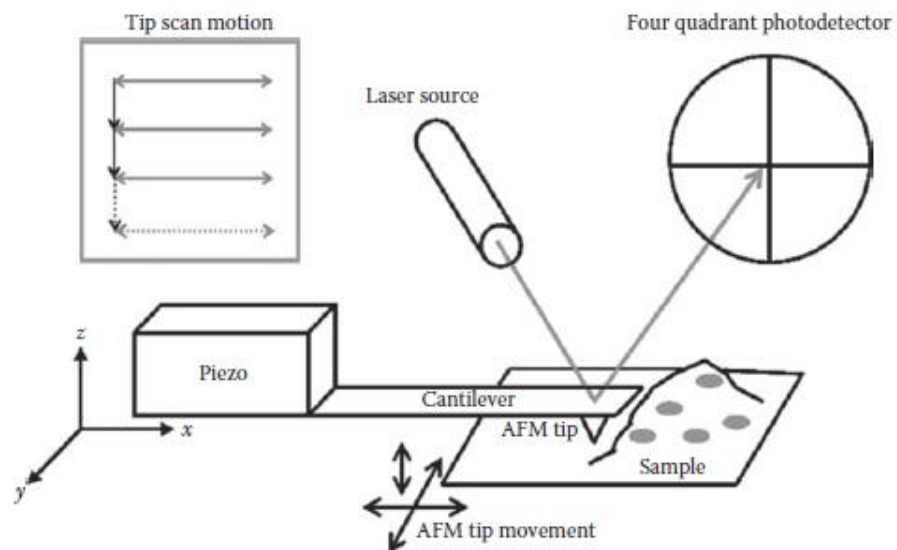


Figura 4.7. Representación esquemática del funcionamiento del AFM [23].

4.4.2 Microscopía óptica

El microscopio óptico compuesto es un instrumento que utiliza la luz visible para producir una imagen ampliada de un objeto o muestra. Esta imagen se proyecta en la retina del ojo o en algún dispositivo de imágenes. Como se ha mencionado, para visualizar las hélices magnéticas se utilizó un microscopio óptico invertido *Nikon Eclipse Ti*. Este tipo de microscopio tiene la fuente de luz por encima de la platina y los objetivos por debajo de esta, teniendo una estructura invertida en comparación con el microscopio óptico convencional. Sin embargo, el principio de funcionamiento y la formación de imagen es el mismo que el del microscopio óptico compuesto [25].

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Hélices magnéticas

Para obtener las fibras helicoidales, primero se extrajeron los haces vasculares del apio. Estos se colocaron en un porta muestras para realizar la extracción de las fibras helicoidales. Los haces vasculares fueron cortados ligeramente, de tal forma que al separarlos en secciones estos pudieran exhibir las fibras. En la Figura 5.1a se observan los haces vasculares recién extraídos del apio cortados ligeramente, de tal forma que se aprecia una fibra que une ambos segmentos del haz vascular. Estas fibras son largos segmentos de hélices sin recubrimiento alguno. La Figura 5.1b es una imagen tomada con el microscopio óptico invertido de la sección circular que se marca en la Figura 5.1a. Se observa una alta densidad de hélices de aproximadamente 50 μm de diámetro cuyas longitudes son de al menos 600 μm .

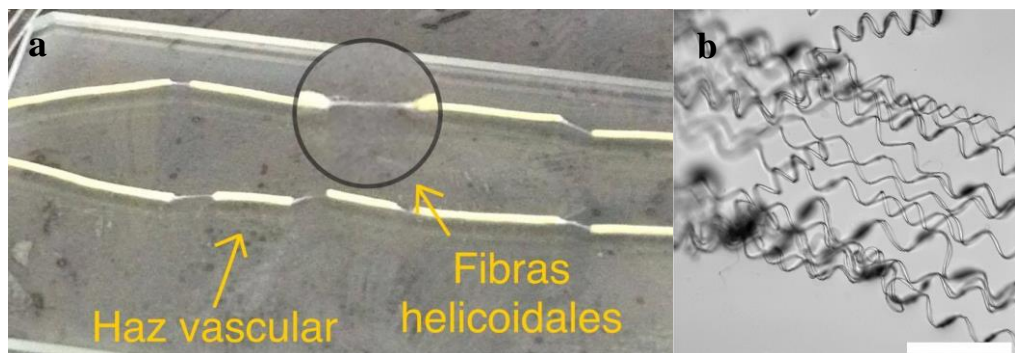


Figura 5.1. (a) Secciones de haces vasculares cortados de manera transversal. Se observan largos segmentos de hélices. (b) Imagen de las hélices vistas en el microscopio óptico invertido. Escala 200 μm .

Durante el cortado de los haces vasculares se tuvo preciso cuidado de no estirar las fibras demasiado, ya que de suceder esto, las fibras perdían su forma helicoidal. Una vez expuestas las fibras, se debía tener precaución en su manejo puesto que se rompen con facilidad. Por este motivo se optó por sujetarlas al porta muestras usando cinta kapton antes de realizar el recubrimiento.

En los primeros dos depósitos realizados se colocaron muestras para formar escalones de depósito (Figura 4.4). Como se mencionó con anterioridad, se requería de un depósito de titanio previo al depósito de níquel con el fin de mejorar su adherencia [16]. La diferencia entre el primer y el segundo depósito fue la potencia con la que se llevaron a cabo, el primero fue a 50 W y el segundo a 100 W. Se utilizaron dos potencias con el fin de caracterizar a qué condiciones se obtenía la cantidad de material deseada de manera controlada. Los parámetros de los depósitos se pueden consultar en la metodología.

Se utilizó la técnica de AFM para caracterizar los escalones de depósito. La Figura 5.2a muestra una micrografía de AFM del escalón con un depósito de 1 minuto de titanio y 5 minutos de níquel a una potencia de 50 W. En ella se observan claramente dos regiones, una en tonos cercanos al negro y otra en tonos cercanos al blanco. La presencia de estas dos tonalidades nos permite afirmar que se formó un escalón de depósito, ya que el color oscuro representa puntos de la muestra con menor altitud y el color claro representa puntos de mayor altitud en la muestra. En la Figura 5.2b se muestran cinco perfiles obtenidos de la micrografía, donde se puede notar que existe una diferencia de altura promedio de 18 nm. Para conocer la proporción de los materiales en el depósito, se utilizó el rendimiento de la pulverización catódica (*sputter yield*). El rendimiento te dice cuántos átomos de material son arrancados por ion incidente, por lo tanto, su valor depende del material del que está formado el blanco. El rendimiento del níquel es 2.17 veces mayor que el rendimiento del titanio, esto significa que se desprenden el doble de átomos de níquel que de titanio por ion incidente. A partir de este dato y conociendo el espesor y los tiempos de depósito de cada material, fue posible calcular la tasa de

depósito. Se obtuvo que la tasa del depósito de titanio fue de 1.63 nm/min, mientras que la tasa de depósito del níquel fue de 3.26 nm/min [26].

De forma similar se procedió a hacer el análisis de la micrografía de AFM para el depósito que se llevó a cabo a una potencia de 100 W (Figura 5.2c). Tal como sucedió con el depósito realizado a 50 W, la muestra presenta un escalón de depósito que es evidente por las dos regiones presentes en la micrografía. La Figura 5.2d muestra cinco perfiles obtenidos de la micrografía, donde se puede apreciar que existe una diferencia de altura promedio de 35 nm. Se realizó el cálculo de la tasa de depósito de cada material de la misma forma en que se obtuvo para el depósito a 50 W de potencia. Se obtuvo que la tasa de depósito de titanio a 100 W de potencia fue de 3.18 nm/min, mientras que la tasa de depósito del níquel a 100 W de potencia fue de 6.36 nm/min.

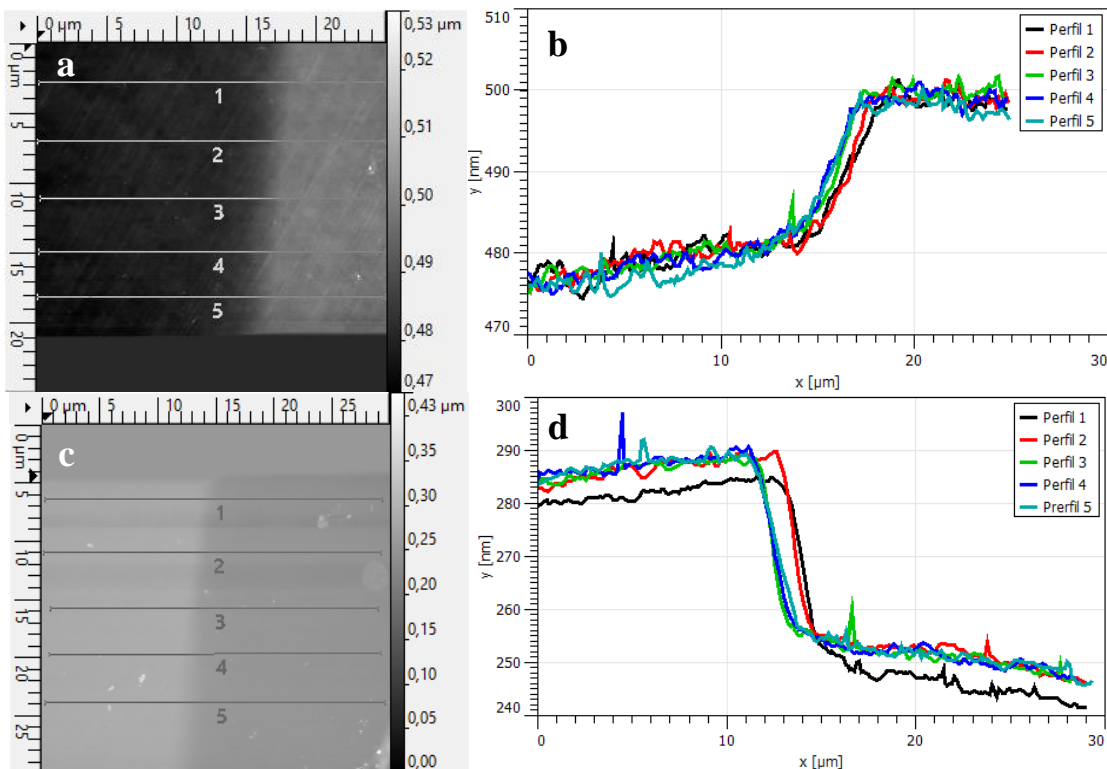


Figura 5.2 Micrografía de AFM de (a) depósito de níquel-titanio a 50 W de potencia y (b) depósito de níquel-titanio a 100 W de potencia. Perfiles de AFM de (c) depósito de níquel-titanio a 50 W de potencia y (d) depósito de níquel-titanio a 100 W de potencia.

En los recubrimientos posteriores se depositó titanio durante 1 minuto y níquel durante 5 minutos a una potencia de 100 W, ya que a esta potencia se generaba un depósito níquel cuyo espesor era de 31.8 nm, que es lo más cercano a lo reportado por Gao *et al* [16], donde realizaron un recubrimiento de níquel de 80 nm y obtuvieron una velocidad de 250 μ /s a 70 Hz de frecuencia.

En la Figura 5.3 se observan segmentos de hélices de aproximadamente 600 μ m de largo y 40 μ m de diámetro, después de haber recibido un depósito de níquel-titanio de 35 nm de espesor. Si se compara la imagen con la mostrada en la Figura 5.1b se aprecia un cambio de contraste en las hélices mostradas. En algunas secciones de las hélices con recubrimiento es posible notar que hay reflejo de la luz ocasionado por el recubrimiento de níquel, lo cual no se observa en las hélices que no están recubiertas. Estos y otros segmentos de características similares, fueron cortados en segmentos de entre 45 y 140 μ m.

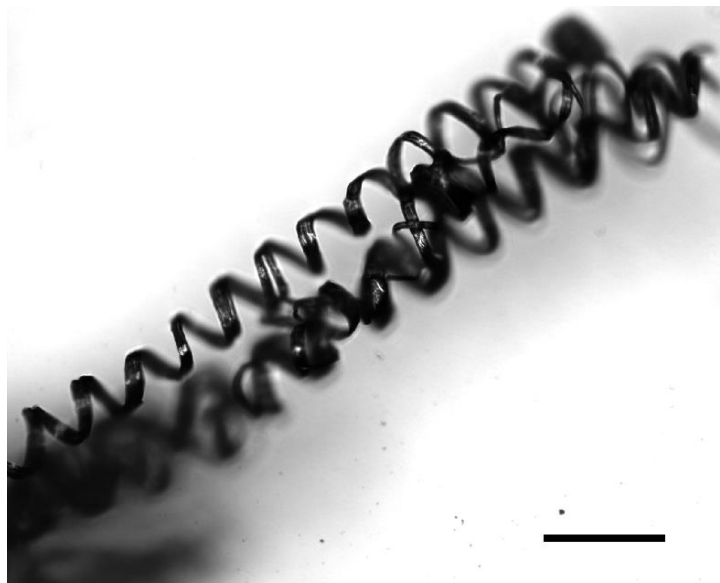


Figura 5.3 Imagen de microscopio óptico invertido de hélices recubiertas con níquel a una potencia de 100 W. Escala 100 μ m.

En la Figura 5.4 se observan algunos de los segmentos obtenidos después de haber realizado el corte. Estas hélices magnéticas fueron utilizadas durante los experimentos de movimiento que se muestran más adelante. Se puede apreciar que

las hélices pueden estar formadas por una o por más hebras. Se observa que la longitud entre ellas varía. Esto se debe a que el corte fue realizado con una navaja, lo cual dificultó obtener una consistencia en su longitud. Si se desea obtener una gran cantidad de hélices magnéticas, se sugiere extraer una gran cantidad de fibras helicoidales y una vez realizado el depósito de material magnético, colocarles una capa de esmalte para uñas con el fin de confinarlas y proteger su estructura. Después se realiza el cortado y se disuelve el esmalte utilizando acetona. Si lo que se desea es obtener una alta precisión se sugiere hacer el cortado de las hélices utilizando haz de iones enfocado (FIB por sus siglas en inglés) o utilizar un AFM con una estación de micrótopo [27,28]. Sin embargo, utilizar estas técnicas en el proceso de cortado, aumentaría el costo de producción de las hélices.

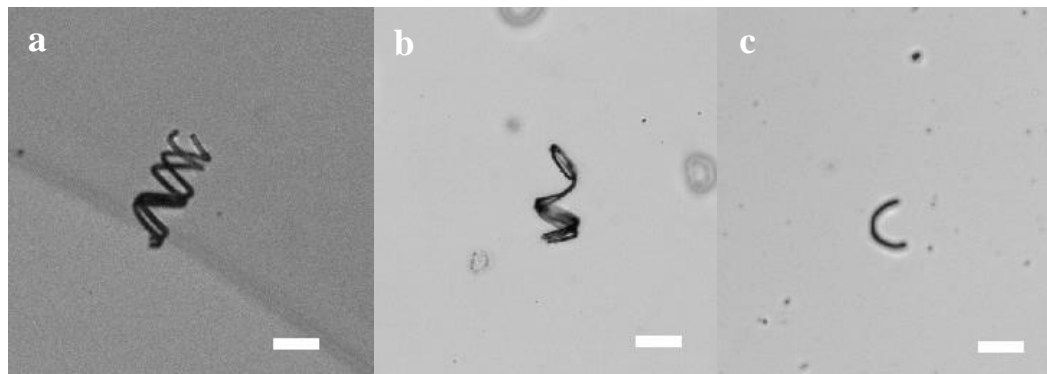


Figura 5.4 Nanomotores helicoidales suspendidos en agua desionizada. (a) Longitud=121.36 μm , diámetro=52.89 μm . (b) $L=107.23 \mu\text{m}$, $d=47.53 \mu\text{m}$. (c) $L=47.90 \mu\text{m}$, $d=32.50$. Escala 100 μm .

5.2 Sistema de propulsión

Para lograr la propulsión en las hélices magnéticas, se requiere de un sistema que proporcione un campo magnético rotatorio. Con este fin, se utilizó un arreglo ortogonal de dos pares de bobinas de Helmholtz como el que se muestra en la Figura 4.5. Se realizó el cálculo del campo magnético producido por el sistema utilizado tal como se muestra a continuación.

De acuerdo con la ley de Biot-Savart, el campo magnético producido por una bobina en puntos que se encuentran en el eje central perpendicular a ella, se puede calcular a partir de la siguiente ecuación [29]:

$$B = \frac{\mu_0 i N R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} \quad \text{Ec. 1}$$

donde R es el radio de la bobina, i es la corriente que circula en ella, N es el número de vueltas que tiene, z es la distancia entre el centro de la bobina y el punto donde se desea calcular el campo, y μ_0 es la permeabilidad en el vacío.

Para calcular el campo que se produce en el centro del arreglo ortogonal de bobinas, primero se calculó el campo magnético producido en el centro de cada par de bobinas. Por simetría, el campo magnético en el punto medio entre las dos bobinas será dos veces el campo magnético producido en ese punto por una sola bobina.

La corriente que se midió en cada bobina fue de 3.5 A, sustituyendo este dato y los parámetros de la bobina (ver metodología) en la Ec. 1, se obtiene que el campo magnético producido por cada bobina es 2.26 mT. Por lo tanto, el campo producido en el centro de cada par es 4.52 mT.

El campo magnético que se produce en el centro del arreglo ortogonal es la suma vectorial de los campos producidos en el centro de cada par de bobina. Así, el valor del campo magnético para la bobina que se utilizó fue de 6.39 mT.

5.3 Experimentos de movimiento

Para verificar que las hélices magnéticas se comportan como nanomotores se realizaron experimentos de movimiento utilizando el sistema de propulsión magnética. Los primeros experimentos se realizaron a frecuencias de 15, 20 y 30

Hz. A estas frecuencias se encontró que los nanomotores presentaban una rotación perpendicular al eje de la hélice (Figura 5.5a) y rotación alrededor del eje de la hélice (Figura 5.5b).

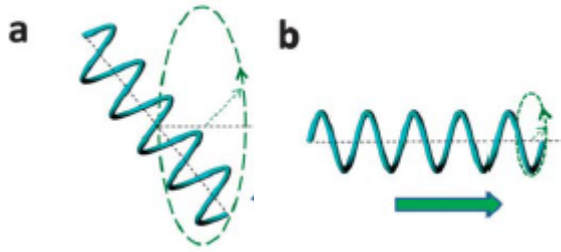


Figura 5.5 (a) Esquema de la rotación perpendicular al eje de la hélice, movimiento tiempo tambaleo. (b) Esquema de la rotación alrededor del eje de la hélice, movimiento tipo sacacorchos [15].

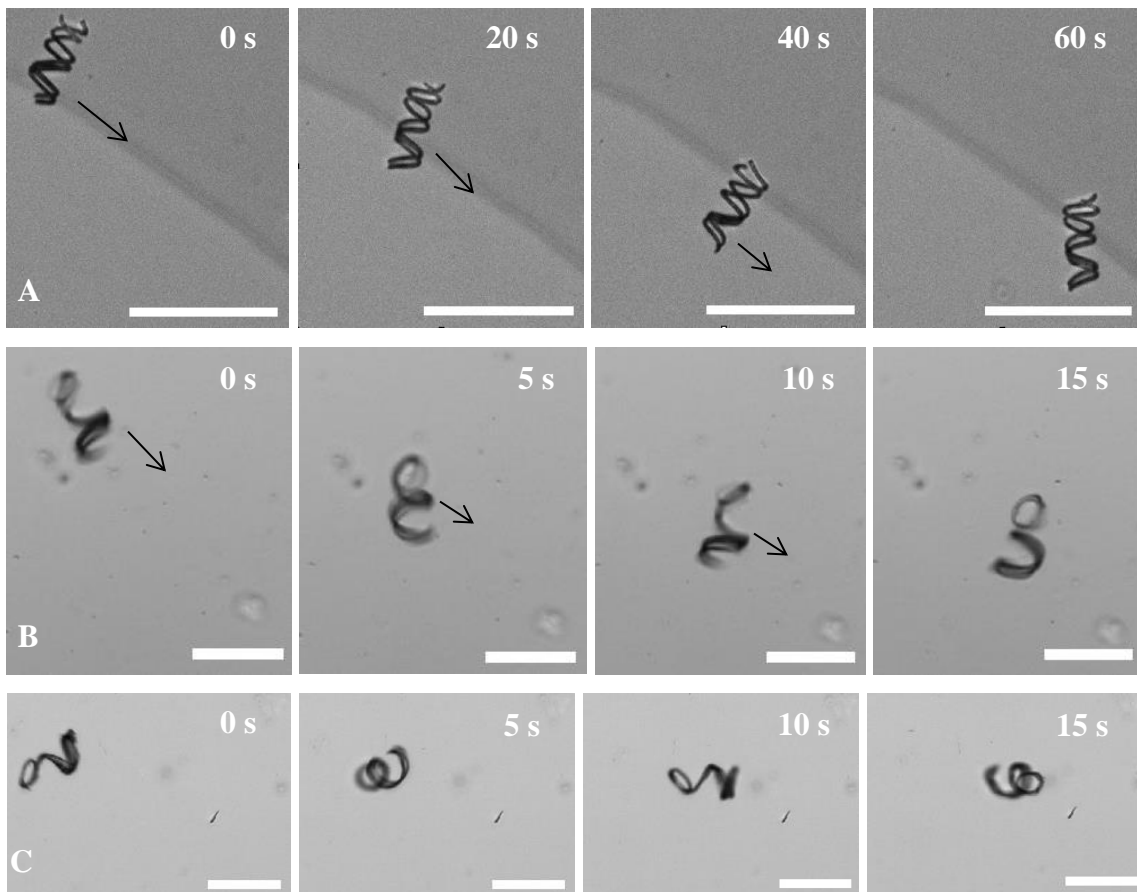


Figura 5.6 (A) Capturas del video de movimiento de la hélice mostrada en la Figura 5.5a a 20 Hz. Escala 200 μm . (B) Capturas del video de movimiento de la hélice mostrada en la Figura 5.5b a 15 Hz. Escala 100 μm . (C) Capturas del video de movimiento de la hélice mostrada en la Figura 5.5b a 30 Hz. Escala 100 μm .

En la Figura 5.6 se muestran imágenes de capturas realizadas a los videos de movimiento de las hélices utilizadas durante los primeros experimentos. En la Figura 5.6A se observa una hélice de doble hebra (Figura 5.4a) a una frecuencia de 20 Hz. Se aprecia que realiza giros alrededor de su eje y que su desplazamiento se desvía hacia la derecha mientras se traslada de arriba hacia abajo. En la Figura 5.6B se aprecia una hélice de una sola hebra (Figura 5.4b) a una frecuencia de 15 Hz. Es posible apreciar la rotación alrededor de su eje, así como el desvío en su trayectoria, tal como sucede con la hélice mostrada en la Figura 5.6A. Este desvío en la trayectoria puede ocurrir debido a fuerzas de fricción entre las hélices magnéticas y el porta muestras. En la Figura 5.6C se aprecia la misma hélice que en la Figura 5.6B, sin embargo, esta se encuentra a 30 Hz. Se aprecia que a esta frecuencia la hélice está rotando de forma perpendicular a su eje.

El movimiento esperado de las hélices en presencia de un campo magnético rotatorio, es la rotación alrededor de su eje a la misma frecuencia con la que rota el campo magnético. Se realizaron experimentos para demostrar si las hélices presentaban este tipo de movimiento. Para ello, se sometió a una hélice (Figura 5.4c) a frecuencias de entre 5 y 100 Hz. En la Tabla 5.1 se observan los resultados obtenidos de las revoluciones efectuadas por la hélice y la distancia que recorrió a cada frecuencia a la que fue sometida. Este nanomotor presentó movimiento tipo sacacorchos en todas las frecuencias a las que fue sometido.

Tabla 5.1 Datos de movimiento de un nanomotor a frecuencias entre 5 y 100 Hz.

Frecuencia (Hz)	Revoluciones en 20 s	Distancia recorrida (μm)
5	102	381.68
10	33	211.58
15	32.5	242.21
20	9	48.44
25	21	72.44
30	16.5	36.11
70	1.5	8.17
100	2	19.28

El níquel, al ser un material ferromagnético, presenta alineación de sus momentos magnéticos en una misma dirección y sentido cuando se encuentra en presencia de un campo magnético externo [30]. Por este motivo, al aplicarse un campo magnético rotatorio a las hélices, se esperaba que estas giraran a la misma frecuencia de giro del campo. Sin embargo, como se observa en la Tabla 5.1, esto solo se cumple a los 5 Hz. Por arriba de esta frecuencia se observa una disminución en la frecuencia de giro de la hélice, tal como se puede observar en la Figura 5.7. En esta gráfica se observa una disminución abrupta de la frecuencia de rotación de la hélice magnética.

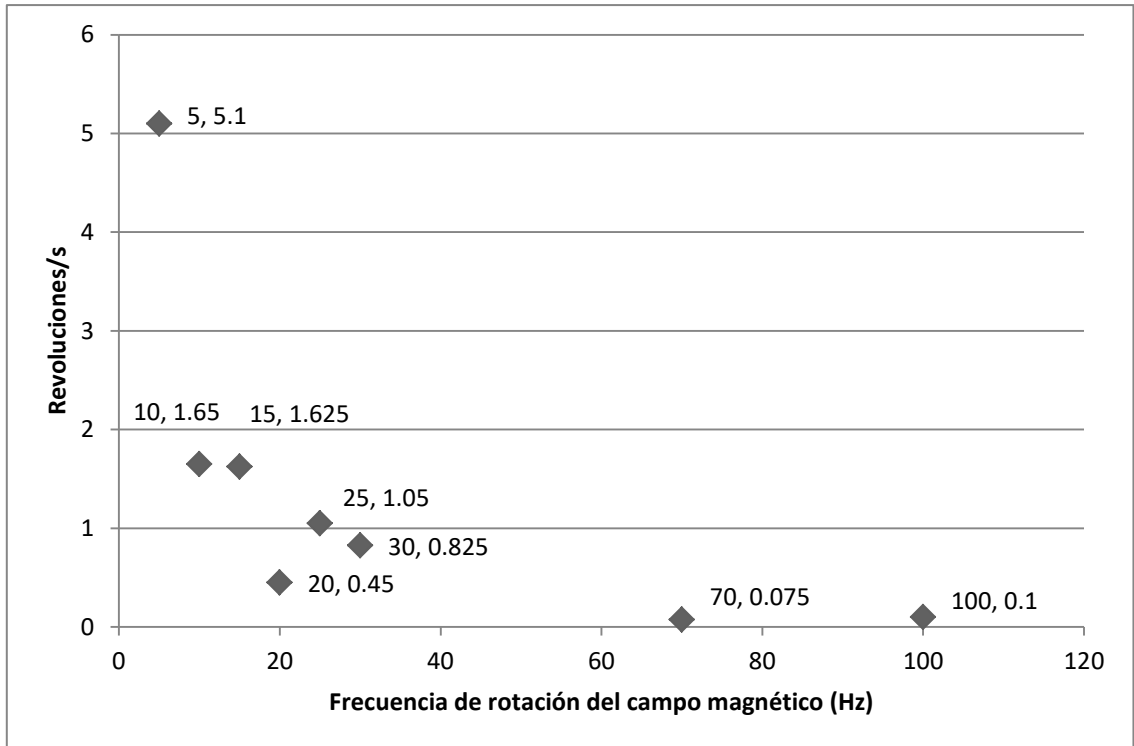


Figura 5.7 Gráfica que muestra la frecuencia de rotación de las hélices comparada con la frecuencia de rotación del campo magnético.

De acuerdo a lo reportado por Peyer *et al* [14,31], un parámetro importante en el movimiento de los nanomotores helicoidales es la *frecuencia de salida*. Esta frecuencia se alcanza cuando el arrastre en los nanomotores es más grande que el torque magnético disponible para rotarlos. En ese punto, el nanomotor ya no puede seguir la rotación del campo magnético y pierde sincronía con este.

En frecuencias menores a la frecuencia de salida, los nanomotores helicoidales son capaces de rotar a la misma frecuencia del campo magnético aplicado. La continua rotación de la hélice alrededor de su eje, produce un avance en dirección del eje. Sin embargo, a frecuencias mayores a la frecuencia de salida, el campo magnético rota más rápido que los nanomotores. Esto ocasiona un decremento en la velocidad del nanomotor [14].

Según lo reportado por Peyer *et al* [14], la frecuencia de salida para nanomotores helicoidales en presencia de un campo magnético de 6 mT es de 4.5 Hz; mientras que la frecuencia de salida para nanomotores helicoidales en presencia de un campo magnético de 9 mT es de 8 Hz. Debido a que el campo magnético producido por nuestro sistema de propulsión es de 6.29 mT, podemos esperar que la frecuencia de salida sea aproximadamente 5 Hz. Esto concuerda con los resultados presentados en la Tabla 5.1.

La frecuencia de salida depende de manera lineal de la magnitud del torque magnético máximo, por lo tanto, incrementando el torque magnético se incrementa la frecuencia de salida. El torque magnético se puede incrementar aumentando la fuerza del campo magnético o aumentando el volumen de material magnético presente en los nanomotores helicoidales. La fuerza del campo magnético se regula por la cantidad de corriente que circula por las bobinas. Por otra parte, incrementar el volumen de material magnético se traduce en un aumento del volumen total del nanomotor, lo que significa que se crean fuerzas de arrastre adicionales. Aunque se dé un aumento en la frecuencia de salida, no necesariamente se incrementa la velocidad máxima [31].

En la Figura 5.8 se observan capturas del video de movimiento del nanomotor a una frecuencia de 5 Hz. Se observa que existe un desvío a la derecha mientras el nanomotor se mueve de arriba hacia abajo, tal como sucedió con las hélices mostradas en la Figura 5.6A y 5.6B. Este desvío que presentan las hélices al rotar sobre su eje se debe a las fuerzas de arrastre que perciben los nanomotores al encontrarse cerca de una frontera [31].

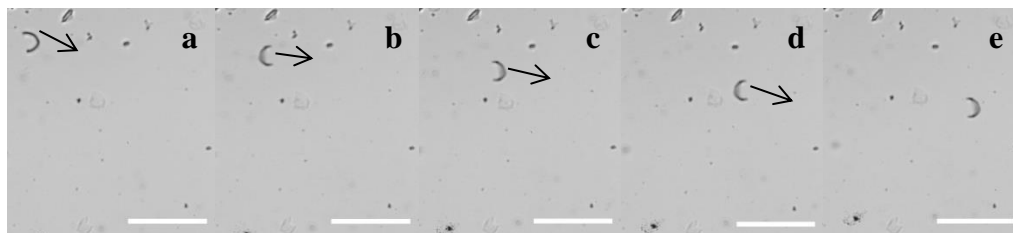


Figura 5.8. Imágenes del video de movimiento de un nanomotor a 5 Hz a: (a) 0 s, (b) 5 s, (c) 10 s, (d) 15 s y (e) 20 s. Longitud=47.90 μm , diámetro=32.50. La flecha indica la dirección del movimiento. Escala 200 μm .

La velocidad registrada para la hélice de la Figura 5.8 en dirección de su eje fue de 8.83 $\mu\text{m/s}$. Esta velocidad es similar a la reportada por Peyer *et al* para nanomotores helicoidales en presencia de un campo magnético de 9 mT a una frecuencia de 8 Hz. Por lo anterior, podemos afirmar que el método de fabricación utilizado en este trabajo produce nanomotores con características de movimiento equiparables a aquellos fabricados por el método de escritura directa por láser reportados por Peyer *et al* [14].

Para mejorar la respuesta de las hélices magnéticas, se sugiere incrementar la cantidad de material magnético depositado, para obtener un recubrimiento similar a lo reportado por Gao *et al*, donde realizaron un recubrimiento de níquel de 80 nm y obtuvieron una velocidad de 250 $\mu\text{m/s}$ a 70 Hz de frecuencia. El incremento de la cantidad de material magnético se logra al aumentar la duración de los depósitos y/o realizarlos a una mayor potencia. Además, se sugiere incrementar la intensidad del campo magnético producido por el sistema, aumentando el número de vueltas de las bobinas. Ambos incrementos producirían una frecuencia de salida más alta, lo que se traduce en una mayor velocidad de las hélices.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Es posible la fabricación de nanomotores de propulsión magnética utilizando como plantillas fibras helicoidales presentes en los capilares del apio y recubriéndolas con una capa de material magnético como el níquel. La longitud de las hélices magnéticas se encontraba entre 45 y 140 μm , al cortarse de manera manual. Sin embargo, se sugiere una alternativa para mejorar el cortado de las hélices magnéticas, ya que con el método aquí propuesto es difícil obtener una consistencia en las longitudes de las hélices.

Se realizaron experimentos para observar si la frecuencia de rotación de las hélices magnéticas se encontraba en sincronía con la frecuencia de rotación del campo. Se observó que a frecuencias mayores a 5 Hz, los nanomotores perdían sincronía con la rotación del campo magnético, ya que el arrastre en ellos es mayor que el torque magnético disponible para rotarlos. Por lo tanto podemos afirmar que la cantidad de material magnético depositada no fue suficiente para hacer rotar a las hélices en sincronía con la rotación del campo magnético a frecuencias por arriba de los 5 Hz.

Es posible obtener movimiento tipo sacacorchos aun cuando las hélices no rotan en sincronía con el campo magnético. Sin embargo, existe un desvío a la derecha durante su traslación de arriba hacia abajo debido a las fuerzas de arrastre que se generan con la superficie del porta muestras.

Existen diversos métodos de fabricación de nanomotores helicoidales, la mayoría de ellos sintéticos. El método de fabricación utilizado en este trabajo es capaz de producir nanomotores con características de movimiento equiparables a aquellos fabricados por el método de escritura directa por láser reportados por Peyer *et al*, siendo el método aquí utilizado más sencillo y más económico.

El control y desempeño de nanomotores helicoidales aún tiene grandes retos por resolver. Tomar medidas como aumentar la magnitud del campo magnético aplicado y/o aumentar la cantidad de material magnético presente en las hélices, son factores que permitirían obtener una frecuencia de salida más alta y en consecuencia aumentar su velocidad.

REFERENCIAS

- [1] Richard P. Feynman. There's Plenty of Room at the Bottom. *Engineering and Science*, 22-36, 1960.
- [2] Chris Tourney. Plenty of room, plenty of history. *Nature Nanotechnology*, (4):783-784, 2009.
- [3] Editorial. 'Plenty of room' revisited. *Nature Nanotechnology*, (4):781, 2009.
- [4] Geoffrey A. Ozin, Ian Manners, Sébastien Fournier-Bidoz, and André Arsenault. Dream Nanomachines. *Advanced Materials*, (17):3011-3018, 2005.
- [5] Vincenzo Balzani, Alberto Credi, Francisco M. Raymo, and J. Fraser Stoddart. Artificial Molecular Machines. *Angewandte Chemie International Edition*, 19 (39):3348-3391, 2000.
- [6] Samuel Sánchez, Lluís Soler, and Jaideep Katuri. Chemically Powered Micro- and Nanomotors. *Angewandte Chemie International Edition*, (54):1414-1444, 2015.
- [7] 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*, (2):2395-2408, 2014.
- [8] Maria Guiz, Carmen C. Mayorga-Martinez, and Arben Merkoci. Nano/Micromotors in (Bio)chemical Science Applications. *Chemical Reviews*, (114):6285-6322, 2014.
- [9] Kwanoh Kim, Jianhe Guo, Z. X. Liang, F. Q. Zhu, and D. L. Fan. Man-made rotary nanomotors: a review of recent developments. *Nanoscale*, (8):10471-10490, 2016.
- [10] Walter F. Paxton, Kevin C. Kistler, Christine C. Olmeda, Ayusman Sen, Sarah K. St. Angelo, Yanyan Cao, Thomas E. Mallouk, Paul E. Lammert, and Vincent H. Crespi. Catalytic Nanomotors: Autonomous Movement of Striped Nanorods. *Journal of the American Chemical Society*, (126): 13424-13431, 2004.
- [11] Joseph Wang and Wei Gao. Nano/Microscale Motors: Biomedical Opportunities and Challenges. *ACS Nano*, 7(6):5745-5751, 2012.

- [12] Wei Gao and Joseph Wang. Synthetic micro/nanomotors in drug delivery. *Nanoscale*, (6):10486-10494, 2014.
- [13] Ambarish Ghosh and Peer Fischer. Controlled Propulsion of Artificial Magnetic Nanostructured Propellers. *Nano Letters*, 6(9):2243-2245, 2009.
- [14] K. E. Peyer, E. Siringil, L. Zhang, and B. J. Nelson. Magnetic polymer composite artificial bacterial flagella. *Bioinspiration & Biomimetics*, (9), 2014.
- [15] Jinxing Li, Sirilak Sattayasamitsathit, Renfeng Dong, Wei Gao, Ryan Tam, Xiaomiao Feng, Stephen Al, and Joseph Wang. Template electrosynthesis of tailored-made helical nanoswimmers. *Nanoscale*, (6):9415-9420, 2014.
- [16] Wei Gao, Xiaomiao Feng, Allen Pei, Christopher R. Kane, Ryan Tam, Camille Hennessy, and Joseph Wang. Bioinspired Helical Microswimmers Based on Vascular Plants. *Nano Letters*, (14):305-310, 2014.
- [17] Fernandez, G. (2010) *Plantas vasculares y no vasculares*. Botanipedia. Consultado el 23 de julio de 2017, recuperado de http://www.botanipedia.org/index.php?title=PLANTAS_VASCULARES_Y_NO_VASCULARES
- [18] Gray, D. Isolation and handedness of helical coiled cellulosic thickenings from plant petiole tracheary elements. *Cellulose*, (21):3181-3191, 2014.
- [19] *Fundamentals of sputtering* (2015) Thin Film Consulting. Consultado el 26 de julio de 2017, recuperado de <http://www.thfc.de/fundamentals-of-sputtering>
- [20] Adachi, H. and Wasa, Kiyotaka. (2012) *Thin Films and Nanomaterials*. Handbook of Sputter Deposition Technology. 2da Edición. Elsevier. Pág. 33-39.
- [21] Kelly, P. and Arnell, R. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*, 3(56):159-172, 2000.
- [22] Hughes, M. (2014) *What Is Sputtering? Magnetron Sputtering?* SEMICORE. Consultado el 26 de julio de 2017, recuperado de <http://www.semicore.com/what-is-sputtering>
- [23] Cabrini, S. and Hawata, S. (2012) *Scanning Probe Lithography*. Nanofabrication Handbook. CRC Press. Pág. 207-210.

- [24] *Microscopio de Fuerza Atómica (AFM)* (2017) LINAN-IPICYT. Consultado el 27 de julio de 2017, recuperado de http://www.linan-ipicyt.mx/Microscopio_de_Fuerza_Atomic.html
- [25] Murphy, D. *Fundamentals of light microscopy and electronic imaging*. John Wiley & Sons. 2002.
- [26] National Physical Laboratory. (2015) Ar Sputtering Yields at 0°. Consultado el 02 de Agosto de 2017, recuperado de <http://www.npl.co.uk/upload/pdf/arsputtable.pdf>
- [27] L.A. Giannuzzi and F. A. Stevie. A review of focused ion beam milling techniques for TEM specimen preparation. *Micron*, (30):197-204, 1999.
- [28] Anton E. Efimov, Alexander G. Tonevitsky, Maria Dittrich, and Nadezda B. Matsko. Atomic force microscope (AFM) combined with the ultramicrotome: a novel device for the serial section tomography and AFM/TEM complementary structural analysis of biological and polymer samples. *Journal of Microscopy*, 3(226):207-216, 2007.
- [29] David Halliday, Robert Resnick and Jearl Walker. *Fundamental of Physics*. Willey, 10 ed. 870-880, 2014.
- [30] William D. Callister Jr. and David G. Rethwich. *Materials Science and Engineering*. Willey, 9 ed. 803-830, 2014.
- [31] Kathrin E. Peyer, Arthur W. Mahoney, Li Zhan, Jake J. Abbott, and Bardley J. Nelson. Bacteria-Inspired Microrobots. *Microbiorobotics*. Elsevier, 165-187, 2012.