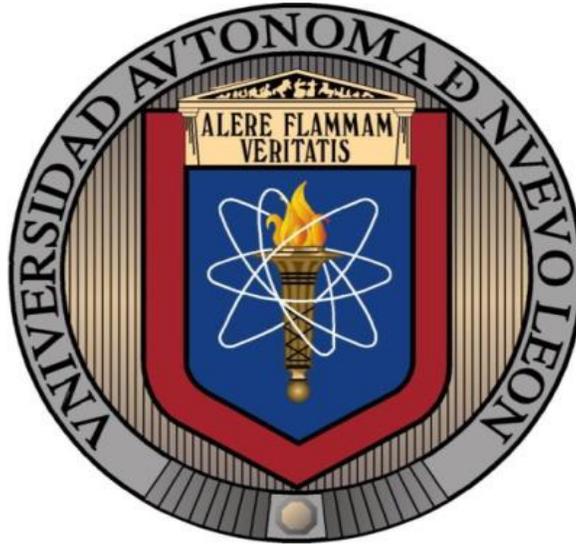


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



TESIS

**ESTUDIO Y CONTROL DE UN MATERIAL HÍBRIDO MAGNÉTICO
PVB/Fe₂O₃ APLICADO COMO MICROACTUADOR TIPO
CANTILÉVER**

**POR
JESÚS ROMO RICO**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

NOVIEMBRE, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TESIS

**ESTUDIO Y CONTROL DE UN MATERIAL HÍBRIDO MAGNÉTICO
PVB/Fe₂O₃ APLICADO COMO MICROACTUADOR TIPO
CANTILÉVER**

**POR
JESÚS ROMO RICO**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

NOVIEMBRE DE 2018



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis Estudio y control de un material híbrido PVB/Fe₂O₃ aplicado como microactuador tipo cantiléver] realizada por el alumno(a) Jesús Romo Rico ,con número de matrícula 1649886 , sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales

El Comité de Tesis

Dra. Beatriz Cristina López Walle
Director

Dr. Martin Edgar Reyes Melo
Revisor

Dr. Manuel García Méndez
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 11 de octubre de 2018

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a mis padres, Jesús Romo Trujillo y Lourdes Monserrat Rico López por su apoyo incondicional en esta y en cada etapa de mi vida.

Quiero agradecer a la Dra. Beatriz C. López Walle por permitirme ser su alumno y darme la oportunidad de trabajar con ella en este tema de tesis, por sus enseñanzas y por todo el tiempo que me dedicó estos años. También quiero agradecer al Dr. Martín Edgar Reyes Melo por compartir conmigo sus conocimientos, su pasión por la ciencia y por asesorarme durante todo este tiempo. Ambos han contribuido en mi formación personal y profesional de gran manera. Me siento muy orgulloso de ser su alumno.

Al Dr. Manuel García Méndez por su revisión y comentarios en este trabajo de tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico para la realización de este estudio de maestría.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por admitirme como estudiante y hacerme sentir como en casa en sus instalaciones cada vez que me encuentro ahí. Al Centro de Innovación, Investigación y Desarrollo en Ingeniería y Tecnología, por las instalaciones y apoyo brindado para la realización de esta tesis.

Al Dr. Alejandro Torres por su apoyo en la obtención de las imágenes de microscopía y al Dr. Marco Antonio Garza Navarro por su ayuda en la realización de la caracterización magnética de esta tesis.

A mis profesores del Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales, en especial al Dr. Marco Antonio Loudovic Hernández Rodríguez por ser un ejemplo para mí todo este tiempo de conocerlo.

A mis compañeros del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico por su amistad, sus valiosos comentarios y buenos momentos que hemos compartido, en especial al Dr. Jesús Gabino Puente Córdova, al M.C. Ángel Alberto Aguilar Morones, al M.C. Eleazar Gándara Martínez, al M.C. César Heberto Ochoa Ruiz, al M.C. Ernesto Lorenzo Bonet, al M.C. Osmel Pérez Acosta, al Dr. Ismael Díaz Peña y al Dr. Fernando Salinas Salinas.

Al Institut Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies de la Université de Franche-Comté, al Dr. Kanty Rabenorosa por su apoyo y al Dr. Nicolas Andreff, así como a los compañeros con los que compartí mi tiempo en este instituto.

Quiero darles las gracias a mis amigos de toda la vida, mi hermano Sebastián Romo Rico, Elizard González Becuar, Miguel Fernández de Castro, Armando Chan Quiñonez, Irving Armando Quiroz Rincón, Gaspar Robles Alegría, Valentín Valdez Corrales, Iván E. Aboites Núñez y Jose Alejandro Madrid Rea. Ellos saben la manera en la que han contribuido en mi vida y también por el apoyo moral brindado durante la realización de este trabajo de tesis.

A la PHK por la paciencia y satisfacciones que me ha otorgado en el proceso de escritura de esta tesis.

Por último, y no menos importante, a Evgenia Stamateri por su cariño, apoyo y motivación constante este último año.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	1
TABLA DE CONTENIDO	2
RESUMEN	4
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	7
1.1 Justificación.	9
1.2 Hipótesis.	10
1.3 Objetivo.	10
1.4 Objetivos específicos.	10
CAPÍTULO II	
MATERIAL HÍBRIDO MAGNÉTICO	12
2.1 Material híbrido magnético PVB/Fe ₂ O ₃ .	12
2.2 Síntesis del material híbrido magnético PVB/Fe ₂ O ₃ .	14
2.3 Microactuadores magnéticos en configuración cantiléver.	16
CAPÍTULO III	
TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS	21
3.1 Microscopía electrónica de transmisión.	21
3.2 Caracterización magnética.	23
3.3 Introducción al magnetismo.	24
3.4 Mediciones experimentales de magnetización.	30
3.5 Enfriamiento con campo cero (<i>Zero Field Cooling, ZFC</i>) y enfriamiento con campo aplicado (<i>Field Cooling, FC</i>).	32
3.6 Mediciones experimentales de la termorremanencia.	33
CAPÍTULO IV	
COMPORTAMIENTO DEL MICROACTUADOR EN FUNCIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS ESTÁTICOS Y CUASI-ESTÁTICOS	36
4.1 Medición experimental del campo magnético aplicado.	36

4.2 Montaje experimental para el estudio del comportamiento del microactuador.	39
4.3 Comportamiento magneto-reológico del microactuador en función de campos magnéticos estáticos.	41
4.4 Comportamiento del microactuador en función de campos magnéticos cuasi-estáticos.	45
4.5 Comparativo de desplazamientos entre campos magnéticos estáticos y cuasi-estáticos.	47
CAPÍTULO V	
COMPORTAMIENTO DE MICROACTUADORES BICAPA EN FUNCIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS ESTÁTICOS	50
5.1 Fabricación de microactuadores bicapa Cu+PVB/Fe ₂ O ₃ .	51
5.2 Caracterización del electroimán.	52
5.3 Montaje experimental para el estudio del comportamiento de los microactuadores bicapa.	54
5.4 Caracterización del comportamiento de los microactuadores bicapa.	55
5.5 Modelo matemático del comportamiento de los microactuadores.	57
5.6 Sistema de control <i>Input Shaping</i> .	61
CAPÍTULO VI	
CONCLUSIONES	67
REFERENCIAS	69
ÍNDICE DE FIGURAS	73
LISTA DE TABLAS	77
ANEXO A	
A.1 Instrucciones y código para la aplicación del <i>System Identification Toolbox</i> de MATLAB.	78
ANEXO B	
B.1 Instrucciones y código para la aplicación del sistema de control <i>Input Shaping</i> .	84

RESUMEN

En este trabajo de tesis de maestría se llevó a cabo el estudio y control del comportamiento del material híbrido magnético a base de polivinil butiral (PVB) y nanopartículas de óxido de hierro (Fe_2O_3), PVB/ Fe_2O_3 , utilizado como microactuador tipo cantiléver.

La síntesis del PVB/ Fe_2O_3 se realizó en dos etapas. Primero, se preparó un material precursor en forma de película delgada (espesor: $\sim 60 \mu\text{m}$) a base de PVB y una sal de cloruro de hierro tetrahidratado, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Segundo, se aplicó un tratamiento térmico-químico al material precursor obtenido en la etapa anterior, lo que permitió la síntesis *in situ* de las nanopartículas de Fe_2O_3 . El producto que se obtiene, una vez sintetizadas las nanopartículas de óxido de hierro embebidas en la matriz polimérica, son las películas híbridas magnéticas.

A este material se le realizó una caracterización morfológica y otra magnética. En la caracterización morfológica se demuestra la presencia de nanopartículas dispersas de Fe_2O_3 , y de aglomerados de nanopartículas, dentro de la matriz polimérica de PVB. Las nanopartículas dispersas tienen un diámetro promedio de 3 nm. En la caracterización magnética se observó que el material tiene propiedades superparamagnéticas a temperatura ambiente; esta propiedad se asocia al diámetro de las nanopartículas magnéticas del material.

Se fabricaron dos tipos de microactuadores en forma de cantiléver: el primer tipo está compuesto de la película de PVB/ Fe_2O_3 ; y el segundo tipo es un microactuador bicapa compuesto de una película flexible de cobre (material diamagnético) y PVB/ Fe_2O_3 en la punta, $\text{Cu} + \text{PVB}/\text{Fe}_2\text{O}_3$.

Se hizo un estudio del comportamiento del microactuador de PVB/ Fe_2O_3 en función de campos magnéticos estáticos (cuya función temporal es en forma de escalón) y cuasi-estáticos (cuya función temporal es en forma de escalera). De

estos experimentos se observó que el desplazamiento de los microactuadores es función del campo magnético externo aplicado. Al aplicar un campo magnético estático de 0 a 478.5 Oe, se obtuvo un desplazamiento final de 133 μm , observándose una respuesta oscilatoria subamortiguada. Cuando se aplicó el campo magnético cuasi-estático, también de 0 a 478.5 Oe, se alcanzó un desplazamiento mayor, de 279 μm . Este incremento en la magnitud del desplazamiento se debe a la interacción entre las nanopartículas de óxido de hierro y la matriz polimérica del material híbrido PVB/ Fe_2O_3 . Cada escalón de campo magnético induce un aumento de la magnetización de los momentos magnéticos de las nanopartículas de Fe_2O_3 en dirección del vector del campo magnético aplicado. La orientación de los momentos magnéticos se transmite a la matriz polimérica a través de su interfase con las nanopartículas magnéticas, lo que provoca el arrastre de las macromoléculas de PVB, generando a su vez el desplazamiento del microactuador.

Para finalizar el estudio, se evaluó el comportamiento de los microactuadores bicapa Cu+PVB/ Fe_2O_3 únicamente en función de campos magnéticos estáticos, en forma de escalón. El desplazamiento máximo obtenido fue de 15.81 μm al utilizar un campo magnético de 14.8 Oe. Al igual que para los microactuadores de la película de PVB/ Fe_2O_3 , se observó una respuesta oscilatoria subamortiguada en función del tiempo. Este tipo de respuesta se representó matemáticamente con un modelo análogo de segundo orden, masa-resorte-amortiguador, en MATLAB[®]. Al introducir las variables experimentales al programa, éste calcula los parámetros del modelo que describen el comportamiento del microactuador. Posteriormente, en Simulink[™] se desarrolló un sistema de control *Input Shaping (IS)* capaz de regular las oscilaciones de este tipo. La respuesta de los microactuadores bicapa se evaluaron utilizando las técnicas *Zero Vibration*, *Zero Vibration Derivative* y *Zero Vibration and Double Derivative (ZV, ZVD y ZVDD, respectivamente)*.

Como resultado se observa una reducción considerable en la amplitud de las oscilaciones producidas por los microactuadores bicapa. Su estabilización se alcanzó cuando se utilizaron las técnicas ZVD y ZVDD. Sin embargo, no es necesario utilizar ZVDD debido a que aumenta el tiempo requerido para el proceso de cómputo, obteniendo un resultado similar al usar ZVD.

Los resultados obtenidos en este trabajo de tesis demuestran que la película híbrida magnética de PVB/Fe₂O₃ se puede desempeñar como microactuador magnético funcional, lo que lo posiciona como un candidato potencial para utilizarse en aplicaciones de diversas ramas de ingeniería, que van desde dispositivos eléctricos, electrónicos, médicos o incluso microrobots nadadores.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La investigación y el desarrollo de materiales híbridos ha sido un campo ampliamente abordado en los últimos años. Un material híbrido está compuesto por una o varias fases inorgánicas dispersas dentro de una matriz, generalmente, de naturaleza orgánica. Estos materiales permiten mejorar las propiedades resultantes, comparadas con las propiedades individuales de los materiales convencionales (metales, polímeros y cerámicos). La síntesis de materiales híbridos se obtiene mediante diversos métodos: sol-gel, coprecipitación química, polimerización, entre otros. En ellos el proceso de síntesis se realiza principalmente mediante una mezcla, a nivel molecular, de dos componentes inherentemente incompatibles, como los óxidos inorgánicos y los polímeros orgánicos [1-5].

Dependiendo de sus características, los materiales híbridos pueden ser materiales inteligentes. Estos últimos son materiales diseñados con una o más propiedades, capaces de cambiar significativamente de forma controlada mediante estímulos externos aplicados, regresando a su estado original una vez que dicho estímulo cesa. Los estímulos externos más comunes son: cambios de presión, gradientes de temperatura, campos magnéticos, campos eléctricos, deformación mecánica, gradientes de pH, etc. [6]. Existen materiales inteligentes poliméricos que funcionan en respuesta a campos magnéticos externos. Estos materiales se identifican como materiales magnetoactivos y comprenden fluidos magnetoreológicos, geles y polímeros magnéticos.

En lo que a aplicaciones se refiere, los polímeros magnetoactivos se utilizan en dispositivos de microactuación magnética, como micropinzas, microelevadores, microválvulas, microbombas, dispositivos biomédicos, entre otras [7-10].

En esta tesis de maestría se estudió el comportamiento de una película inteligente de material híbrido magnético compuesta de nanopartículas de óxido de hierro (Fe_2O_3), las cuales están dispersas de manera homogénea en una matriz de polivinil butiral (PVB). Dicha película fue evaluada durante su funcionamiento como microactuador tipo cantiléver bajo diferentes condiciones.

A continuación, se describe la composición del presente manuscrito:

- Capítulo 1: Se introduce el trabajo realizado, se presenta la justificación, hipótesis y objetivos.
- Capítulo 2: Se describe el material híbrido estudiado y su proceso de síntesis; se ilustran también algunas aplicaciones a base de materiales semejantes al empleado.
- Capítulo 3: Se exponen las técnicas de caracterización utilizadas para el estudio de la morfológica y propiedades magnéticas, se presentan los resultados obtenidos y su discusión.
- Capítulo 4: Se describe el estudio realizado y los resultados obtenidos del desplazamiento de un microactuador tipo cantiléver a base de la película híbrida magnética, aplicándole campos magnéticos estáticos y cuasi-estáticos.
- Capítulo 5: Se presenta el experimento realizado que permitió conocer el desplazamiento de dos microactuadores bicapa tipo cantiléver compuestos de cobre Cu y el material híbrido magnético PVB/ Fe_2O_3 , al aplicársele campos magnéticos tipo escalón. El resultado experimental se compara con

un modelo matemático computacional y, a partir de este modelo, se desarrolla y evalúa un sistema un control *Input Shaping, IS*.

- Capítulo 6: Se expone la conclusión del presente trabajo y se menciona el trabajo a futuro de esta investigación.

1.1 Justificación.

En la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME), de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), como parte de las actividades de investigación desarrolladas por el cuerpo académico consolidado, Síntesis y Caracterización de Materiales, se han sintetizado materiales híbridos que responden a campos magnéticos externos. Los materiales híbridos sintetizados son de composición diferente, principalmente en lo referente al tipo de matriz polimérica utilizada, como la carboximetilcelulosa (CMC) o el polivinil butiral (PVB). Esta matriz polimérica se combina con una fase dispersa de nanopartículas de óxido de hierro (Fe_2O_3).

La tesis de maestría del Dr. Jesús Gabino Puente Córdova, dirigida por el Dr. Martín Edgar Reyes Melo, describe la síntesis y caracterización del material híbrido PVB/ Fe_2O_3 , donde las nanopartículas de Fe_2O_3 fueron sintetizadas *in situ*. Este material responde a campos magnéticos externos [11], lo cual está asociado a que la síntesis de este material híbrido es el resultado de la combinación de la matriz polimérica de PVB con las nanopartículas de óxido de hierro Fe_2O_3 . Las propiedades estructurales y morfológicas del PVB, en conjunto con las propiedades magnéticas del Fe_2O_3 , hacen de este material un excelente candidato para aplicaciones en dispositivos eléctricos y electrónicos, sensores, dieléctricos y microactuadores magnéticos. Así, el interés de este trabajo de tesis consiste en mostrar que este material puede ser utilizado como microactuador magnético.

1.2 Hipótesis.

La evaluación *in situ* del comportamiento mecánico de una película híbrida magnética que desarrolla la función de microactuador, permite un estudio más preciso y cercano a su comportamiento real, al aplicarle un estímulo magnético, y permite proponer y utilizar un sistema de control con el fin de regular su respuesta mecánica.

1.3 Objetivo.

Diseñar y fabricar un microactuador adaptado a las características de un material híbrido magnético en forma de película delgada a base de nanopartículas de óxido de hierro (Fe_2O_3) dispersas en una matriz polimérica de PVB, el cual permita caracterizar el comportamiento del material híbrido magnético, en función de un campo magnético externo aplicado, con la intención de proponer un sistema de control adecuado para dicha aplicación.

1.4 Objetivos específicos.

- Sintetizar películas híbridas magnéticas de PVB/ Fe_2O_3 con espesor de $\sim 60 \mu\text{m}$.
- Diseñar y fabricar microactuadores magnéticos, tipo cantiléver, que se adapten a las características de las películas híbridas magnéticas de PVB/ Fe_2O_3 .
- Realizar la caracterización morfológica y magnética del material híbrido magnético.

- Caracterizar el comportamiento mecánico de los microactuadores, centrado principalmente en el análisis del desplazamiento del cantiléver al aplicar campos magnéticos externos.
- Desarrollar un modelo matemático computacional que describa el comportamiento (desplazamiento) del microactuador.
- Aplicar un control virtual *Input Shaping* con el fin de regular el desplazamiento del microactuador.

En el siguiente capítulo se describe el material, PVB/Fe₂O₃, su síntesis y se dan ejemplos de microactuadores magnéticos en cantiléver.

CAPÍTULO II

MATERIAL HÍBRIDO MAGNÉTICO

En este capítulo se describe el proceso empleado para sintetizar *in situ* nanopartículas de óxido de hierro (Fe_2O_3) en la matriz polimérica de PVB, dando como resultado la película híbrida magnética de PVB/ Fe_2O_3 . También se describen ejemplos de dispositivos de microactuación magnética que tienen similitud a los microactuadores magnéticos, objeto de estudio de esta tesis.

2.1 Material híbrido magnético PVB/ Fe_2O_3 .

El material híbrido magnético utilizado en este trabajo de tesis está compuesto por una matriz polimérica de polivinil butiral (PVB) y nanopartículas de óxido de hierro (Fe_2O_3).

El PVB es un compuesto macromolecular, el cual es muy conocido por ser utilizado ampliamente como película adhesiva y transparente en la manufactura de vidrio laminado, esto con la finalidad de impedir el desprendimiento de esquirlas de vidrio cuando se produce un proceso de fractura. El PVB tiene una elevada resistencia al impacto, buena adherencia a sustratos y transparencia. Además, es compatible con una amplia gama de otras resinas poliméricas y también muestra buena solubilidad en diferentes solventes [12]. Gracias a sus propiedades, el PVB se encuentra en una gran variedad de aplicaciones, por ejemplo, pigmentos, recubrimientos para madera, metales y vidrio, impermeabilizantes y adhesivos, entre otros [12-15].

Los óxidos de hierro abundan en la naturaleza y también pueden ser sintetizados fácilmente en el laboratorio. Existen 16 tipos de óxidos de hierro, estos se

componen por Fe, O, y/o OH. Las diferencias entre ellos son la cantidad de electrones de valencia del hierro y su estructura cristalina. Los más utilizados en nuevas tecnologías de materiales magnéticos son la magemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), la hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) y la magnetita (Fe_3O_4) en forma de nanopartículas magnéticas. Las nanopartículas magnéticas de óxido de hierro, con diámetro característico promedio menor a 20 nm, tienen propiedades superparamagnéticas [16]. Su magnetización es cero en ausencia de un campo magnético externo; en tanto, cuando se les aproxima un campo magnético, estas se magnetizan fácilmente. La magnetización/desmagnetización ocurre en un proceso muy rápido (que parecería ser inmediato, pero no lo es) al aproximar/retirar un campo magnético externo. Estas nanopartículas son utilizadas en una gran variedad de aplicaciones tecnológicas como pigmentos, cosméticos, materiales para almacenamiento de datos, ferrofluidos, transporte de fármacos, catalizadores, baterías de litio, tintas para impresoras, tratamiento de agua, etc. [16-20].

Al sintetizar el PVB/ Fe_2O_3 , las propiedades superparamagnéticas de las nanopartículas, sumadas sinérgicamente a la flexibilidad, estabilidad y rigidez del PVB, lo hacen un material híbrido que puede utilizarse como microactuador magnético de carácter polifuncional (dieléctrico-magnético), es decir, este material podría utilizarse en dispositivos eléctricos, electrónicos y mecatrónicos. También, a partir de este material pueden prepararse ferrofluidos donde la viscosidad puede ser controlada por medio de un campo magnético externo [11]. Existe una gran variedad de materiales híbridos magnéticos que están conformados por una matriz polimérica y nanopartículas magnéticas. Estos tienen un amplio marco de aplicaciones, las cuales van desde sensores de presión, materiales para absorción de microondas, dispositivos electroluminiscentes hasta celdas solares flexibles, por mencionar algunos [21-25].

A continuación, se presenta el proceso de síntesis de las películas delgadas de PVB/Fe₂O₃.

2.2 Síntesis del material híbrido magnético PVB/Fe₂O₃.

Las películas híbridas magnéticas de PVB/Fe₂O₃ se fabricaron mediante un proceso de síntesis desarrollado en dos etapas, el cual es producto del trabajo de tesis de maestría del Dr. Jesús Gabino Puente Córdova [11], dirigido por el Dr. Martín Edgar Reyes Melo. Dichas etapas están ilustradas en la figura 2.1.

En la primera etapa se disuelven, por un lado, 1.6 g de la sal precursora FeCl₂•4H₂O en 15 ml de tetrahidrofurano (THF) y, por el otro, 1.6 g de PVB con 15 ml del mismo solvente. Las dos soluciones, por separado, se agitan a 700 rpm durante 30 min, a 40°C. Una vez completado este periodo, ambas soluciones se mezclan y se agitan a 700 rpm durante 30 min, a 45°C. El tiempo de agitación utilizado para cada disolución es 15 minutos menor al tiempo utilizado en la síntesis de referencia. Esto se hizo para reducir los tiempos de síntesis y se observó que esta reducción de tiempo no altera cualitativamente el efecto superparamagnético de las películas resultantes, como se apreciará en los capítulos siguientes. Una vez obtenida la mezcla, se prepararon películas por medio de *casting* [26], las cuales se dejan secar a temperatura ambiente por 24 horas a fin de separar el solvente mediante un proceso de convección natural. Al finalizar esta primera etapa se obtienen las películas híbridas precursoras.

En la segunda etapa, las películas híbridas precursoras se sumergen en un tratamiento químico de una solución acuosa de 3.3 M de NaOH (2.64 g en 20 ml de H₂O), a 55°C. En este proceso se aprecia un cambio de tonalidad en el color, de amarillo a café oscuro. Posteriormente, se añade por goteo peróxido de hidrógeno y el material pasa de color café oscuro a rojo cobrizo. Este cambio de

color se atribuye a la formación de óxido de hierro (Fe_2O_3) en el material [27]. Una vez observado este último cambio de tonalidad, se lava el material con agua desionizada varias veces, con el propósito de eliminar residuos del proceso, obteniendo como resultado el material híbrido magnético.

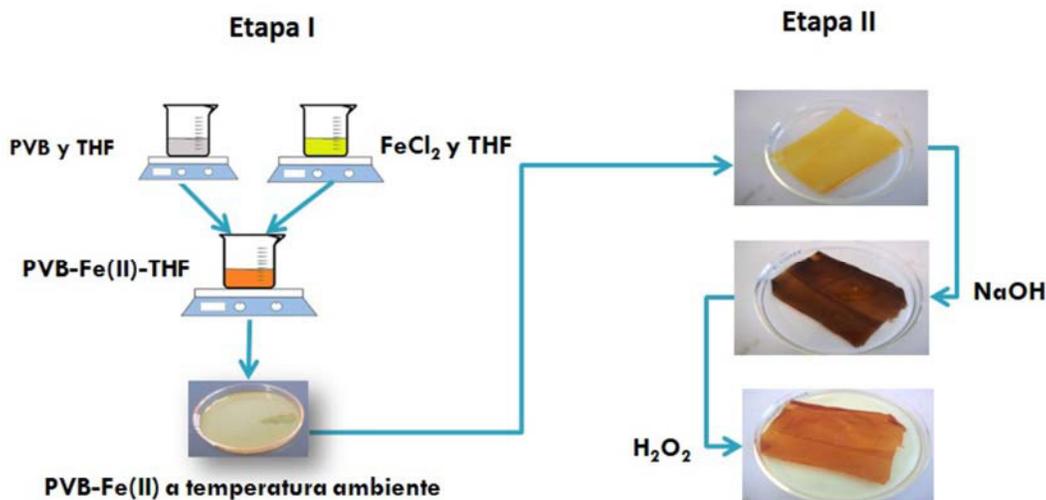


Figura 2.1: Diagrama del proceso de síntesis de las películas de PVB/ Fe_2O_3 . Etapa I: síntesis del material híbrido precursor. Etapa II: tratamiento químico del material precursor, a fin de producir el material híbrido magnético.

Al finalizar la síntesis del material híbrido magnético PVB/ Fe_2O_3 , se realizó una prueba magnética cualitativa a fin de comprobar la respuesta de las películas obtenidas a campos magnéticos externos. Para esto, a una película de material híbrido magnético ($\sim 60 \mu\text{m}$ de espesor) se le aproximó el campo magnético de un imán, lo suficiente para observar una reacción de atracción a dicho campo (ver figura 2.2). El movimiento de atracción observado entre el imán y la película es un indicador cualitativo de la contribución magnética de las nanopartículas de Fe_2O_3 dentro de la matriz polimérica, lo que demuestra de manera cualitativa el posible uso de este material magnético en sistemas de microactuación magnética.

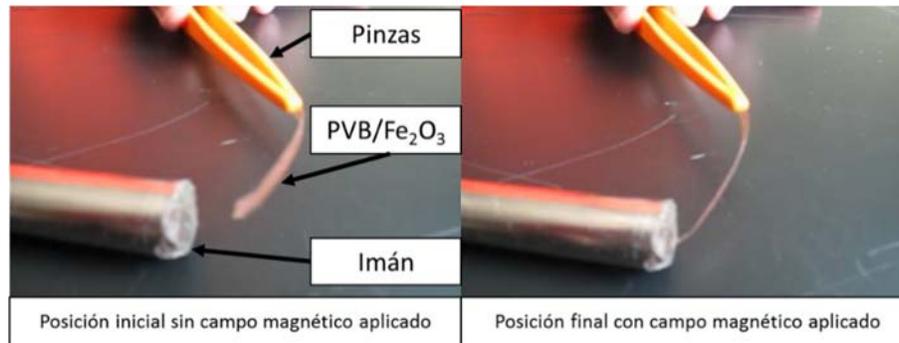


Figura 2.2: Análisis cualitativo del comportamiento magnético de una película delgada de PVB/Fe₂O₃ (~60 μm de espesor), sin campo magnético aplicado (izquierda) y con campo magnético aplicado (derecha).

Con el fin de posicionar este estudio de maestría dentro de la literatura, a continuación se presentan ejemplos afines al microactuador a desarrollar.

2.3 Microactuadores magnéticos en configuración cantiléver.

Un microactuador es un dispositivo, de orden micrométrico, capaz de convertir un estímulo energético en movimiento mecánico. Los estímulos pueden ser de distintos tipos: hidráulicos, mecánicos, eléctricos, magnéticos, térmicos, gradientes de pH, etc. La clasificación de los microactuadores es función del tipo de estímulo y de la configuración que presentan.

En este trabajo se desarrolla un microactuador magnético en configuración cantiléver. Este dispositivo responde con movimiento mecánico a la aplicación de un campo magnético. Esta configuración y tipo de estímulo han sido estudiados antes por integrantes del cuerpo académico consolidado “Síntesis y caracterización de materiales”, empleando una película híbrida magnética de nanopartículas de óxido de hierro dispersas en carboximetilcelulosa, CMC/Fe₂O₃ [28, 29]. Las dimensiones del microactuador tipo cantiléver a base de este material (CMC/Fe₂O₃) fueron de 17.94 mm de longitud, 2.81 mm de ancho y 0.30 mm de espesor, logrando desplazamientos máximos de 1.55 mm con campos magnéticos generados por una corriente eléctrica directa de 1.4 A [28]. Este material también

fue empleado en el desarrollo de un microinterruptor electromecánico completamente funcional, siendo el elemento móvil de dicho interruptor [29].

El interés de este trabajo de tesis es estudiar un microactuador magnético en cantiléver similar al ya estudiado, pero, en este caso, a base de la película híbrida magnética de PVB/Fe₂O₃. Se decide hacer este estudio usando ahora esta matriz polimérica (PVB) debido a su flexibilidad mecánica y su carácter insoluble al agua.

En esta sección se presentan ejemplos de microactuadores magnéticos y en configuración cantiléver con el fin de posicionar este estudio dentro de la comunidad científica en el área.

Primeramente, en la figura 2.3 se presenta un microactuador magnético en cantiléver. Este microactuador está compuesto por una película de SiN de 1.3 mm de largo, 0.4 mm de ancho y 3 μm de espesor. Ésta sostiene una estructura multicapa de un imán permanente de NdFeB/Ta en forma de viga (1 mm de largo, 2 mm de ancho y 4 μm de espesor). Este dispositivo consigue un desplazamiento máximo de 700 μm, aplicando una corriente directa de 0.6 A a un electroimán [30].

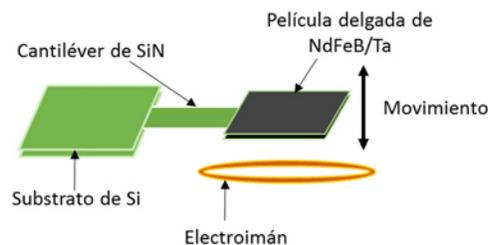


Figura 2.3: Configuración de un microactuador compuesto por un sustrato de Si, sobre el cual se apoya un cantiléver de SiN y, en su extremo, una película delgada multicapa de imán permanente de NdFeB/Ta [30].

Otro ejemplo consiste en un microactuador tipo membrana para ser utilizado como microbomba en sistemas para microfluidos (ver figura 2.4). Este microactuador está compuesto por elementos de Ni₈₀Fe₂₀ embebidos y posicionados

estratégicamente dentro de una membrana de polidimetilsiloxano (PDMS). Los elementos micromagnéticos miden $870\ \mu\text{m}$ de largo, $100\ \mu\text{m}$ de ancho y $22\ \mu\text{m}$ de espesor. El desplazamiento máximo reportado fue superior a $80\ \mu\text{m}$, generados al aplicar un campo magnético externo de $0.11\ \text{Oe}$. Para variar el campo magnético, se modificaba la distancia entre el campo y la membrana magnética [31].

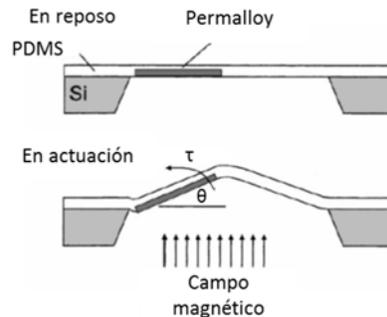


Figura 2.4: Representación del principio de actuación del microactuador magnético compuesto por una membrana de PDMS y elementos micromagnéticos de $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ [31].

A continuación, se muestra un microactuador bicapa en cantiléver. Este microactuador utiliza un campo magnético de centenas de Oe, por lo que está destinado a usos en microsistemas magnéticos donde se necesitan desplazamientos relativamente largos (en comparación con la distancia del electroimán al microactuador en cuestión). El microactuador está compuesto por una capa de FeSiB de $0.7\ \mu\text{m}$ de espesor, depositado en un sustrato de poliamida (PA). El tamaño del cantiléver fue de $5\ \text{mm}$ de longitud, $1\ \text{mm}$ de ancho y $30\ \mu\text{m}$ de espesor. Su desplazamiento máximo fue de aproximadamente $10\ \mu\text{m}$ al aplicar un campo magnético de $126\ \text{Oe}$ (ver figura 2.5) [32].

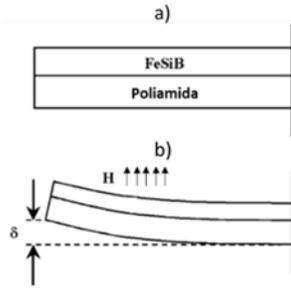


Figura 2.5: Microactuador bicapa en cantiléver de FeSiB y poliamida: a) sin campo magnético aplicado; b) con campo magnético [32].

Enseguida, la figura 2.6 presenta un microactuador para uso en sensores magnéticos. Se destaca la simulación por elemento finito del desplazamiento del microactuador al aplicar campos magnéticos externos. Los resultados de la simulación son coherentes con los resultados experimentales publicados. Este microactuador está compuesto de polvo de ferrita magnética embebido en una resina epoxi. Este material, situado en el extremo libre de una viga en cantiléver de 7 mm de longitud, 1 mm de ancho y 25 μm de espesor, tiene forma de disco delgado (4 mm de diámetro y 90 μm de espesor, aproximadamente). El desplazamiento máximo que se obtuvo con este microactuador fue de 30 μm al aplicar una corriente eléctrica de 100 mA [33].

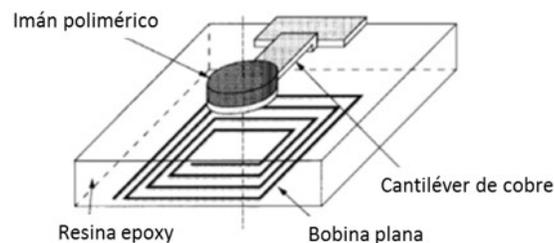


Figura 2.6: Vista esquemática del microactuador en cantiléver compuesto de polvo de ferrita embebido en una resina epoxi [33].

De los microactuadores en cantiléver presentados, se puede observar que el desplazamiento mayor obtenido corresponde al producido por el microactuador de CMC/ Fe_2O_3 , al aplicarle un campo magnético generado por una corriente eléctrica de 1.4 A. Al comparar los desplazamientos obtenidos, el tamaño y el tipo de

microactuador, y el campo magnético/corriente eléctrica aplicados de los diferentes microactuadores magnéticos, podemos establecer como hipótesis que el PVB/Fe₂O₃ funcionará como microactuador magnético competente si en éste se obtienen desplazamientos dentro del rango de los microactuadores presentados en esta sección (700 µm, 80 µm, 10 µm, 30 µm) con alimentación semejante (0.6 A, 0.11 Oe, 126 Oe, 100 mA).

Así, con el fin de conocer los atributos de este material, se utilizaron técnicas de caracterización morfológica y magnética. Los resultados se presentan en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO III

TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS

En esta sección se describen las técnicas de caracterización morfológica y magnética utilizadas para el estudio de las películas de PVB/Fe₂O₃. Éstas se emplearon con el propósito de observar la distribución de las nanopartículas, su tamaño y las propiedades superparamagnéticas de las películas.

3.1 Microscopía electrónica de transmisión.

El análisis de la morfología se llevó a cabo en un microscopio electrónico de transmisión (TEM) Titan FEI. Para llevar a cabo esta caracterización, una porción del material fue pulverizada. Posteriormente, se mezcló con H₂O en un tubo de ensayo y fue sometida a un baño ultrasónico con la finalidad de obtener una suspensión de este polvo para colocarlo en el portamuestras del TEM.

La figura 3.1 fue obtenida en campo oscuro (*Dark Field, DF*). Este tipo de imágenes es útil para revelar partículas cristalinas dentro de materiales amorfos y/o para mostrar defectos en estructuras cristalinas como dislocaciones o precipitados. En esta figura es posible observar aglomerados de partículas en tonos claros. Estos aglomerados tienen un tamaño característico promedio de 1 μm de diámetro. La formación de estos aglomerados puede atribuirse a que no se haya obtenido una disolución completa de las sales de hierro debido al tiempo de agitación utilizado en el proceso de síntesis. También es posible observar una distribución de partículas poco heterogénea, y de tamaño característico promedio nanométrico embebidas dentro de la matriz de PVB.

La figura 3.2 muestra los resultados obtenidos en HRTEM en campo claro (*Bright Field, BR*). En la figura 3.2 a) se pueden apreciar arreglos de los planos que constituyen a las nanopartículas de óxido de hierro en el material híbrido magnético. La figura 3.2 b) ilustra, en una escala menor, el efecto del proceso de cristalización de las nanopartículas dispersas en la matriz polimérica.

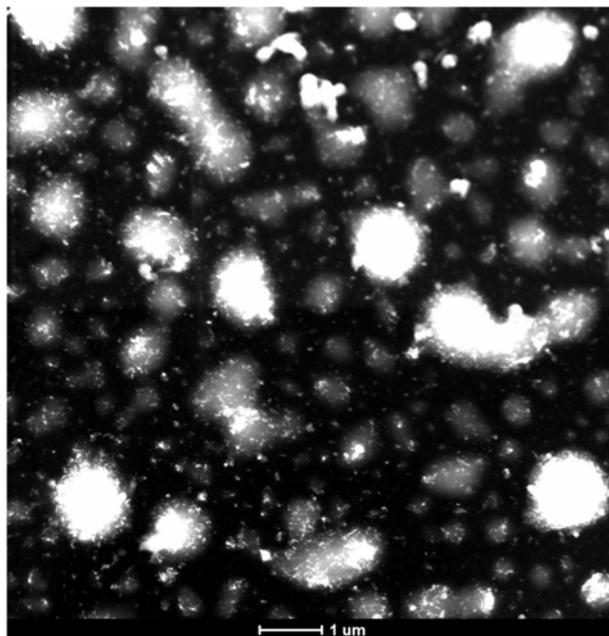


Figura 3.1: Imagen de TEM en campo oscuro del material híbrido magnético PVB/Fe₂O₃. El óxido de hierro se aprecia en tonos claros.

Se midió el tamaño característico de 41 nanopartículas en un área de 900 nm², de las cuales se obtuvo el histograma de frecuencias correspondiente, mostrado en la figura 3.3. Se encontró una variación de diámetros que oscilan entre los 2.5 nm ya los 11 nm, con tamaño característico promedio de 3.3 nm.

En resumen, se observaron aglomerados de partículas compuestos por nanopartículas de Fe₂O₃, de 3.3 nm de tamaño característico promedio y distribuidas de manera poco heterogénea dentro de la matriz polimérica de PVB.

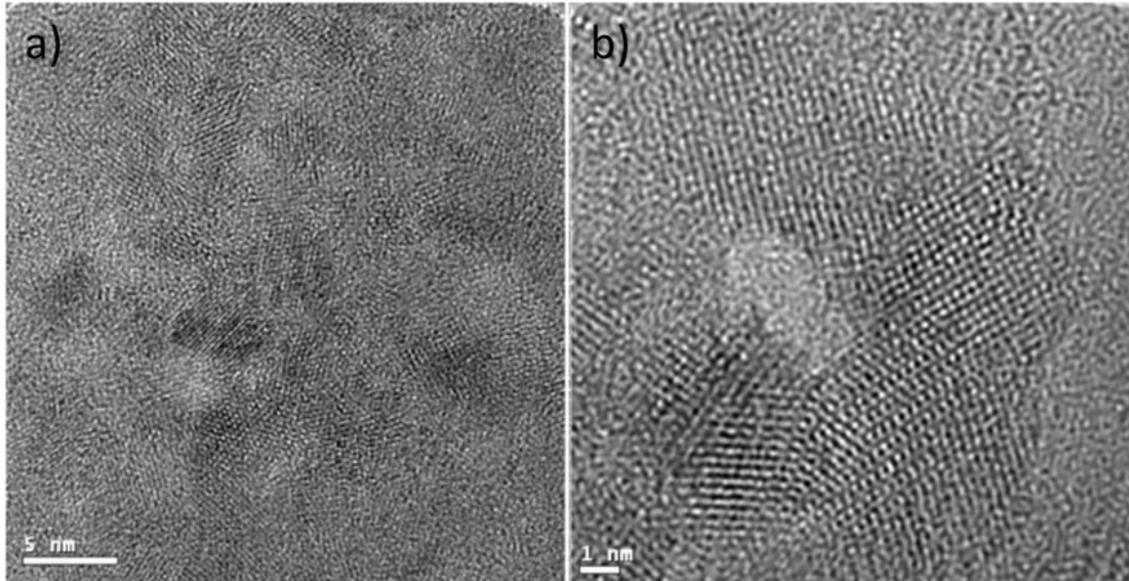


Figura 3.2: Imagen de HRTEM en campo claro: a) nanopartículas de Fe_2O_3 embebidas en la matriz polimérica de PVB (escala: 5 nm), b) acercamiento a una región de la muestra (escala: 1 nm) para observar los efectos del proceso de cristalización de las nanopartículas.

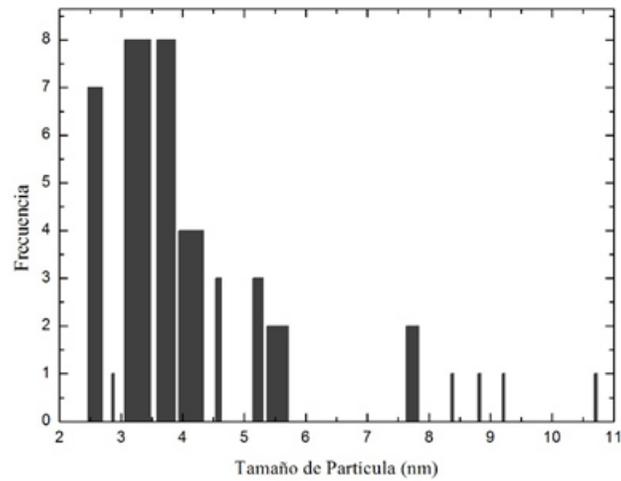


Figura 3.3: Histograma de frecuencias del conteo de 41 nanopartículas de Fe_2O_3 .

3.2 Caracterización magnética.

De acuerdo con la caracterización anterior y con la literatura revisada [11, 28] se asume que el PVB/ Fe_2O_3 está conformado por nanopartículas de óxido de hierro

de 3.3 nm de tamaño característico promedio. En la literatura se reportan nanopartículas magnéticas de Fe_2O_3 de tamaño similar que muestran un comportamiento superparamagnético [34]. Dentro del grupo de trabajo “Síntesis y Caracterización de Materiales”, se han utilizado métodos de síntesis de nanopartículas magnéticas de este tipo, embebidas en distintas matrices poliméricas, mostrando el fenómeno del superparamagnetismo en dichas nanopartículas [35]. La intención de realizar esta caracterización es corroborar el superparamagnetismo en las nanopartículas del material sintetizado. Para este propósito, se utilizó un magnetómetro de muestra vibrante Quantum Design MPMS tipo SQUID-VSM, en donde se realizaron las siguientes mediciones experimentales:

- Magnetización en función del campo magnético aplicado.
- Enfriamiento con campo magnético cero (*Zero Field Cooling, ZFC*) y enfriamiento con campo aplicado (*Field Cooling, FC*).
- Termorremanencia magnética (TRM).

Para poder explicar de manera adecuada esta sección se realiza una introducción al fenómeno del magnetismo.

3.3 Introducción al magnetismo.

La manifestación macroscópica más común del magnetismo se aprecia en materiales conocidos como imanes. Un imán está compuesto por dos polos magnéticos, el polo norte y el polo sur. Los polos diferentes se atraen y los polos iguales se repelen. Un sistema de dos polos magnéticos opuestos se conoce como dipolo magnético (ver figura 3.4). A escala atómica, los dipolos magnéticos provienen de dos tipos de movimiento de los electrones: el movimiento orbital de electrón alrededor del núcleo atómico y el espín del electrón. Entonces, el

momento magnético de un átomo es la suma de todos los momentos magnéticos de los electrones individuales, sin importar su origen (movimiento orbital o espín). Debido a sus propiedades vectoriales, los momentos magnéticos opuestos se cancelan entre ellos únicamente si sus vectores tienen igual magnitud. En el caso de un átomo con orbitales o suborbitales electrónicos llenos, el momento magnético se cancela y solo los átomos con orbitales electrónicos desapareados o semillenos generan un momento magnético. Por lo tanto, las propiedades magnéticas de cualquier material están definidas por la suma de los momentos magnéticos de los electrones que lo constituyen.

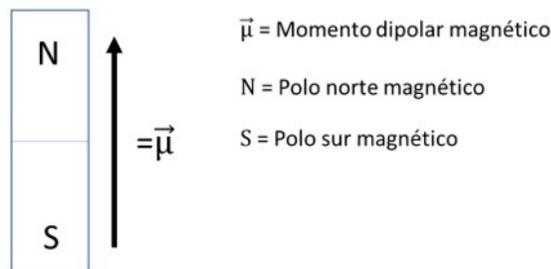


Figura 3.4: Dipolo magnético.

Bajo la influencia de un campo magnético externo, H , se pueden presentar distintos fenómenos del magnetismo. El comportamiento magnético de algunos tipos de materiales se representa en la figura 3.5 y se describe a continuación.

Al aplicar un campo magnético a un material diamagnético [36] (ver figura 3.6), este material no es atraído por dicho campo, sino que se magnetiza en sentido contrario a este. Cuando se retira el campo magnético, la magnetización disminuye por completo, según se aprecia en la curva correspondiente de la figura 3.5. El cobre, el helio, el bismuto, el germanio y el silicio son ejemplos de materiales diamagnéticos.

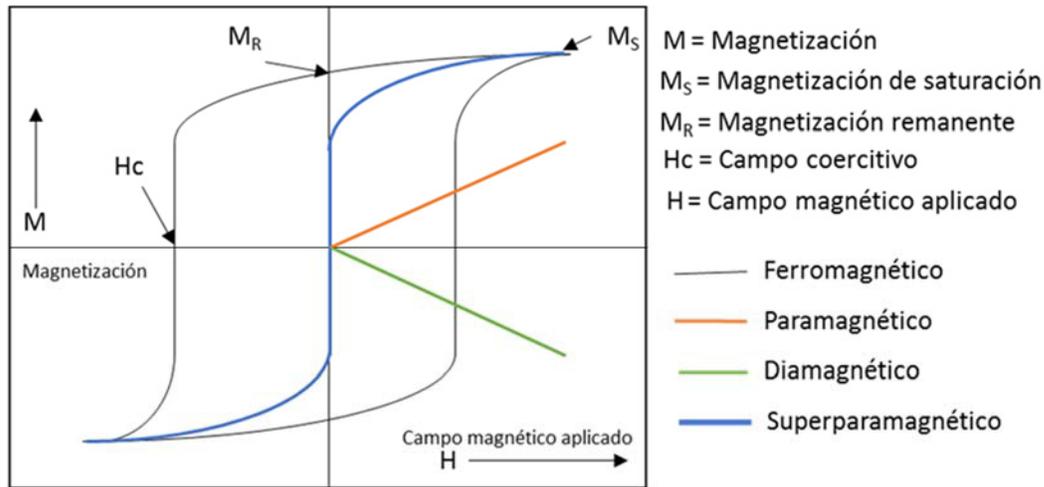


Figura 3.5: Curvas de magnetización en función del campo magnético aplicado para diferentes tipos de materiales: ferromagnético (línea negra), superparamagnético (línea azul), diamagnético (línea verde) y paramagnético (línea naranja).

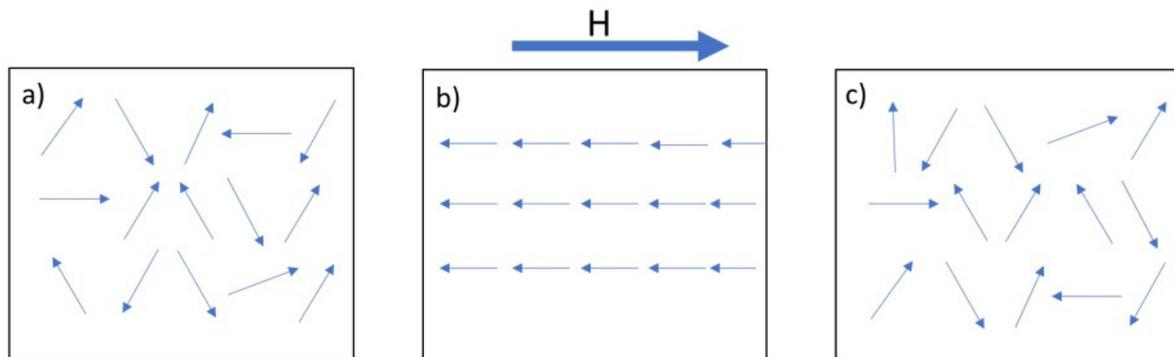


Figura 3.6: Momentos magnéticos para un material diamagnético: a) sin campo magnético externo aplicado, b) con campo magnético externo aplicado, c) al retirar el campo magnético.

En un material paramagnético [36] (ver figura 3.7), los electrones se encuentran desapareados; entonces, cada átomo actúa como un dipolo magnético y cada dipolo es independiente de otro. La orientación de estos dipolos es aleatoria, de tal forma que el efecto magnético global es nulo o casi nulo. Si un material paramagnético es sometido a un campo magnético externo, la mayoría de los momentos magnéticos de cada dipolo se alinea en sentido del campo magnético externo, induciendo un campo magnético global. Al estar sujeto a un campo magnético externo, este tipo de materiales tiene la misma respuesta (atracción y repulsión) que los imanes normales. Sin embargo, la magnetización disminuye

conforme el campo magnético disminuye. Entonces, la magnetización del material es proporcional al campo magnético aplicado, conforme se ilustra en la figura 3.5. Ejemplos de materiales paramagnéticos son: aire, magnesio, wolframio y titanio.

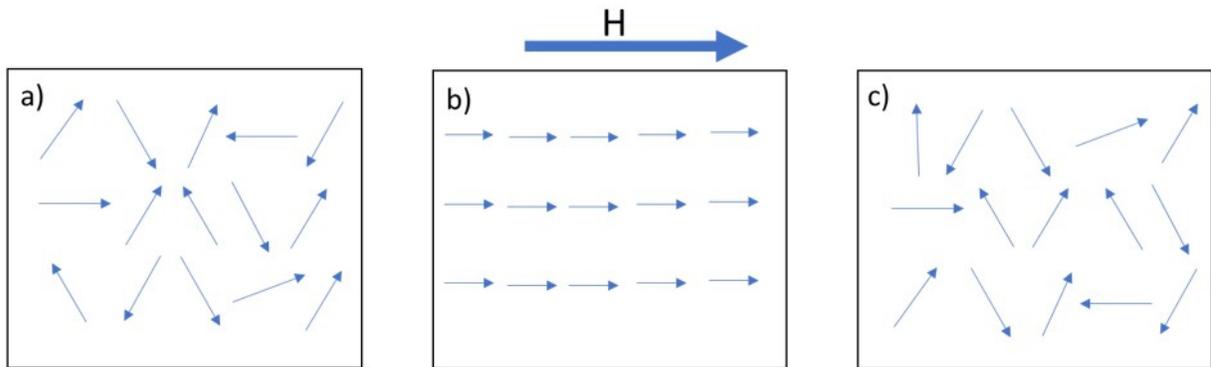


Figura 3.7: Momentos magnéticos en un material paramagnético: a) sin campo magnético externo aplicado, b) alineados con el vector del campo magnético externo aplicado, c) al retirar el campo magnético.

Al aplicar un campo magnético externo a un material ferromagnético (ver figura 3.5), se provocará que algunos de los momentos magnéticos de dicho material tengan una alineación hacia el campo magnético externo aplicado. Los momentos magnéticos alineados en la misma dirección contribuyen a la magnetización del material. Si el campo magnético aplicado es lo suficientemente grande ocasionará que la mayoría de los momentos magnéticos se alineen en dirección de dicho campo, llevando el material a un valor máximo de magnetización. Este valor se conoce como magnetización de saturación, M_s .

Cuando se aplica un campo magnético hasta alcanzar la saturación y, posteriormente, se retira dicho campo, el momento magnético persiste, es decir, algunos dominios magnéticos permanecen orientados, dando como resultado un momento magnético residual. A este fenómeno se le llama magnetización remanente, M_R . Para anular la M_R es necesario aplicar un campo magnético tal que reduzca la magnetización a cero. A este campo magnético se le conoce como campo coercitivo, H_c .

Antes de ser ferromagnético, el material tiene un estado magnético nulo. Los electrones se encuentran desapareados y cada átomo actúa como un dipolo magnético. Cuando por primera vez tiene contacto con un campo magnético, éste se magnetiza y se vuelve ferromagnético. La mayoría de estos dipolos se encuentran alineados magnéticamente en la misma dirección. Los dipolos magnéticos atómicos que presentan la misma alineación magnética se denominan “dominios magnéticos”. Estos dipolos contribuyen entre sí y el material presenta un momento magnético global, aunque no exista un campo magnético externo aplicado. Cuando se aplica un campo magnético externo, el tamaño de estos dominios aumenta hasta que la gran mayoría de dipolos magnéticos atómicos del material se orienta en la misma dirección (ver figura 3.8). Los materiales ferromagnéticos más comunes son el hierro, el cobalto y el níquel.

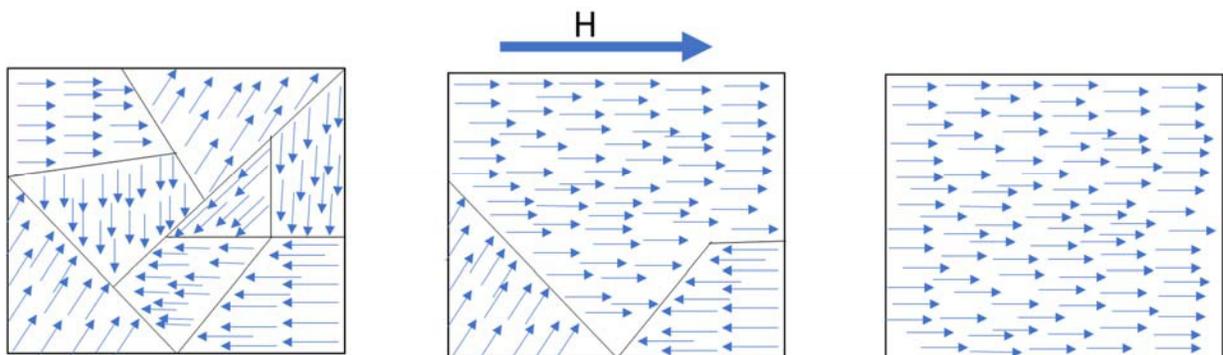


Figura 3.8: Momentos magnéticos para un material ferromagnético: a) multidominios magnéticos sin campo magnético externo aplicado, b) orientación de los dominios magnéticos en dirección del campo magnético externo aplicado, c) los momentos magnéticos permanecen orientados al retirar el campo magnético.

El superparamagnetismo es un fenómeno que se manifiesta en materiales magnéticos nanoestructurados. Este comportamiento se manifiesta cuando el tamaño de partícula de un material, por ejemplo, ferromagnético, se reduce a un tamaño crítico (inferior a 20 nm) [37, 38]. Además, se genera un cambio en la estructura electrónica del material, sin necesidad de cambios en la estructura atómica, de multidominios a monodominio; es decir, cada partícula corresponde a

un solo dominio el cual se considera como un momento magnético gigante único, producido por la suma de todos los momentos magnéticos individuales de los átomos de la nanopartícula (ver figura 3.9).

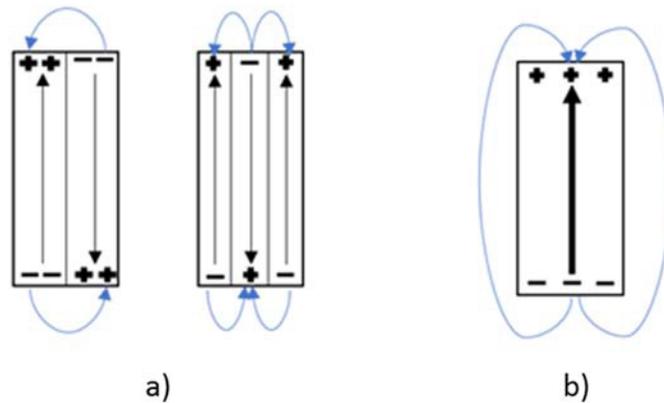


Figura 3.9: a) Multidominio magnético, b) monodominio magnético.

Un material superparamagnético no presenta magnetización propia debido a que sus momentos magnéticos se encuentran desorientados, de tal forma que se anulan entre sí. Cuando se le aplica un campo magnético a un material superparamagnético, los momentos magnéticos de dicho material tienden a orientarse hacia la dirección del campo magnético aplicado. La alineación de los momentos magnéticos contribuye a la magnetización del material. A medida que el campo magnético se retira, los momentos magnéticos del material dejan de estar influenciados por la acción del campo magnético y, como consecuencia, la magnetización disminuye conforme este campo magnético externo disminuye. Esto ocurre debido a que los momentos magnéticos del material pierden la alineación con el campo magnético aplicado (ver figura 3.10). Después de retirar un campo magnético aplicado, este tipo de materiales presenta magnitud remanente y coercitividad de ordenes de magnitud muy cercanos al cero, la cual se considera despreciable (ver figura 3.5).

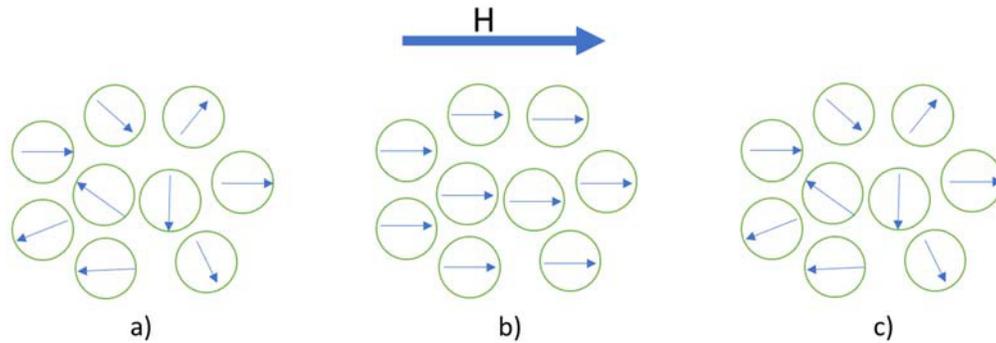


Figura 3.10: Representación de dipolos magnéticos con sus momentos magnéticos para un material superparamagnético: a) dipolos magnéticos sin campo magnético externo aplicado, b) orientación de los dipolos magnéticos en dirección del campo magnético externo aplicado, c) dipolos magnéticos desorientados al retirar el campo magnético.

Las propiedades superparamagnéticas de nanopartículas de este tipo de materiales son de gran interés para diversas aplicaciones tecnológicas debido a que, al aproximarles un campo magnético externo, se magnetizan rápidamente y, al retirarlo, pierden dicha magnetización de la misma manera. Este tipo de comportamiento las hace útiles en sistemas de microactuación donde el tiempo de respuesta es fundamental (del orden de unas cuantas milésimas de segundo). Además, esta propiedad facilita el control en aplicaciones de este tipo de materiales, comparados con los materiales ferromagnéticos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de las mediciones magnéticas experimentales realizadas al material híbrido magnético PVB/Fe₂O₃.

3.4 Mediciones experimentales de magnetización.

Las mediciones de magnetización M se realizaron a dos temperaturas diferentes, 300 K y 1.8 K, aplicando un campo magnético H de 7 T a -7 T (de 70 kOe a -70 kOe); la prueba comienza en 7 T y continúa con decrementos aproximados de 0.1 T.

En la figura 3.11 se presenta la curva de magnetización para la muestra de PVB/Fe₂O₃, realizada a temperatura ambiente (300 K), donde se aprecia una magnetización máxima obtenida de 0.515 emu/g. En esta curva se puede observar que tiene un comportamiento similar a la curva de superparamagnetismo presentada en la figura 3.5. En el inserto 1 de esta misma figura, se aprecia que las curvas no se sobreponen y que los valores de magnetización remanente M_R y campo coercitivo H_c son tan cercanos a cero que pueden despreciarse. Dado que las nanopartículas dispersas en la matriz polimérica tienen aproximadamente un tamaño característico promedio de 3 nm, inferior al diámetro crítico de nanopartículas magnéticas mencionado anteriormente (20 nm), se presenta este tipo de comportamiento [37, 38].

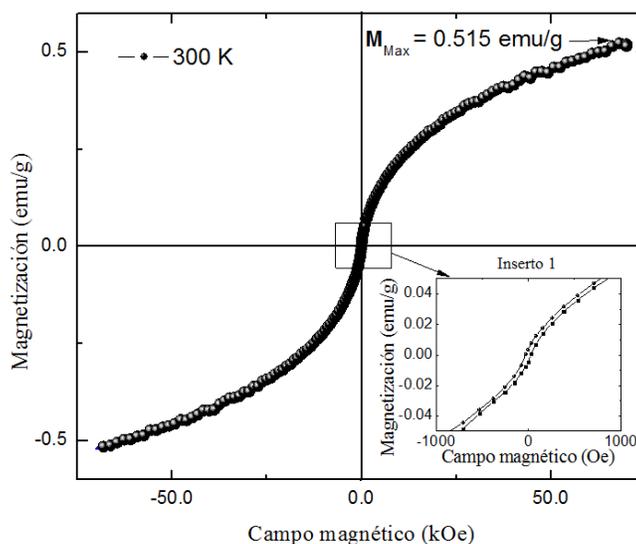


Figura 3.11: Curva de magnetización en función del campo magnético aplicado para el PVB/Fe₂O₃, realizada a 300 K. El inserto 1 muestra que la curva no se sobrepone.

En la figura 3.12 se muestra la curva de magnetización a 1.8 K. En ella se observa una magnetización máxima $M_{max} = 0.97 \text{ emu/g}$, una magnetización remanente $M_R = 0.25 \text{ emu/g}$ y un campo coercitivo $H_c = 4.31 \text{ kOe}$. Estos valores sugieren que, a esta temperatura, el material se comporta como un material ferromagnético. Esto se debe a que, al retirar el campo magnético, por influencia de la temperatura

(1.8 K), algunos momentos magnéticos del material permanecen alineados en la misma dirección ocasionando una magnetización remanente (M_R) y una magnetización máxima (M_{max}) mayor que en la curva obtenida a 300 K.

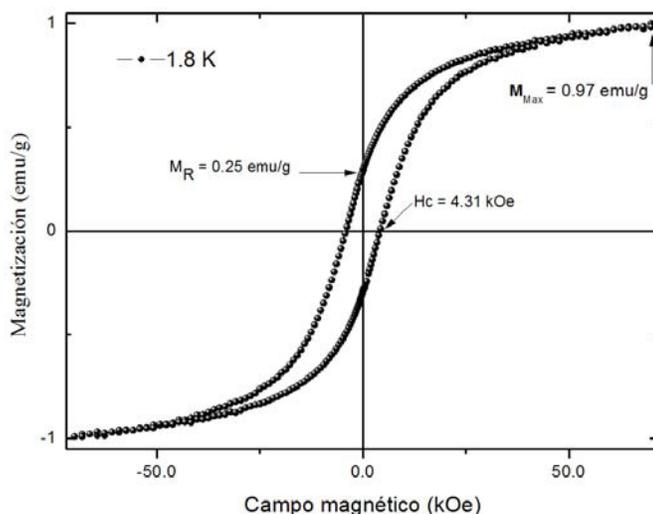


Figura 3.12: Curva de magnetización en función de campo magnético aplicado para el PVB/Fe₂O₃, realizada a 1.8 K.

3.5 Enfriamiento con campo cero (*Zero Field Cooling, ZFC*) y enfriamiento con campo aplicado (*Field Cooling, FC*).

En el proceso de Zero Field Cooling (ZFC), el PVB/Fe₂O₃ se encuentra a temperatura ambiente y es enfriado hasta alcanzar 1.8 K, sin aplicar un campo magnético externo. En este proceso, los momentos magnéticos de las nanopartículas permanecerán orientados aleatoriamente, lo que produce una magnetización nula. Al llegar a 1.8 K, se aplica un campo magnético externo de 100 Oe. Mientras se aumenta la temperatura en intervalos de 1 K hasta llegar a 300 K, se mide la magnetización producida. La curva resultante se aprecia en la figura 3.13. A medida que la temperatura se incrementa, es notorio un aumento de la magnetización debido a que los momentos magnéticos de las nanopartículas tienden a alinearse en dirección del campo magnético aplicado. Esto ocurre hasta

que la energía térmica adicionada al sistema induce la rotación de los momentos magnéticos de las nanopartículas fuera del sentido del vector del campo magnético aplicado, reduciendo la magnetización considerablemente, según se aprecia en la figura. La temperatura a la que ocurre este fenómeno es conocida como temperatura de bloqueo, T_B [39]; en este caso, su valor corresponde a 69 K.

Al alcanzar 300 K comienza el proceso para la prueba FC. La magnetización es medida mientras la muestra es enfriada hasta 1.8 K, conservando el mismo campo magnético aplicado (100 Oe). De acuerdo con la gráfica de la figura 3.13, la magnetización aumenta conforme la temperatura disminuye. Esto se atribuye a la orientación preferencial de los momentos magnéticos de las nanopartículas en dirección del campo magnético aplicado, ya que conforme la temperatura desciende, el efecto térmico que produce orientación aleatoria de los dipolos magnéticos disminuye considerablemente.

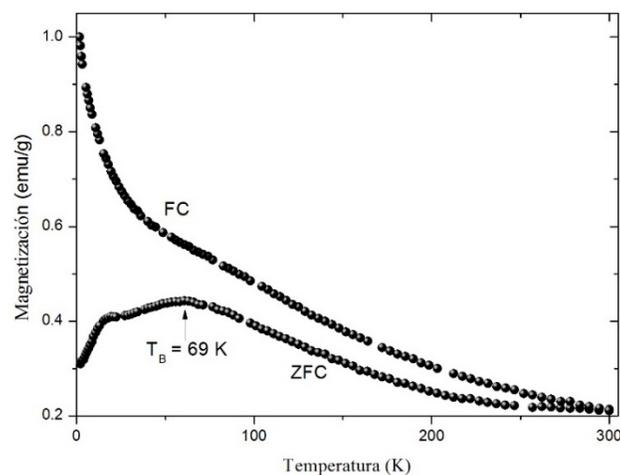


Figura 3.13: Curvas de magnetización de enfriamiento con campo cero (*Zero Field Cooling, ZFC*) y enfriamiento con campo aplicado (*Field Cooling, FC*), para el PVB/Fe₂O₃.

3.6 Mediciones experimentales de la termorremanencia.

En este tipo de caracterización, termorremanencia (TRM), la muestra es enfriada hasta una temperatura menor a su temperatura de bloqueo ($T_B = 69$ K),

sometiéndola a un campo magnético de saturación. Enseguida, este campo magnético es retirado y, aproximadamente después de 100 segundos, se mide la magnetización en la muestra. La curva es obtenida aumentando la temperatura y, para cada valor de temperatura, se ejecuta este mismo procedimiento: saturar la muestra, retirar el campo, medir la magnetización remanente.

Se obtuvo la figura 3.14, en la cual se nota claramente un decremento abrupto de la magnetización remanente entre 0 K y 69 K (temperatura de bloqueo). Este decremento se puede atribuir a la acción de la temperatura sobre los momentos magnéticos del material; es decir, el aumento de la temperatura ocasiona agitación térmica que desorienta los momentos magnéticos en direcciones aleatorias, disminuyendo la magnetización de manera considerable.

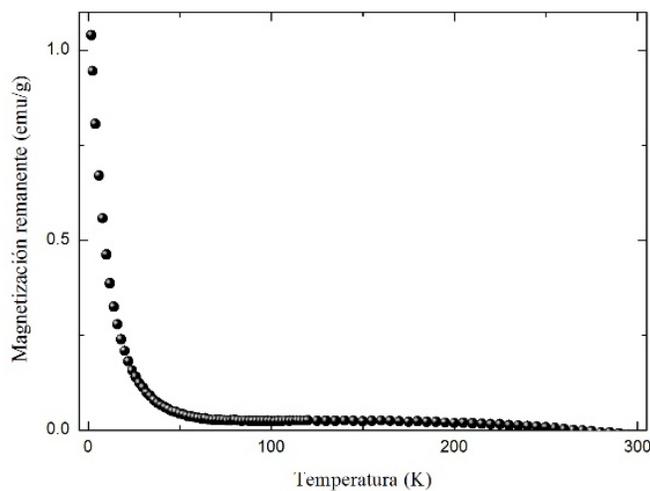


Figura 3.14: Curva de termorremanencia (magnetización remanente en función de la temperatura) para el PVB/Fe₂O₃.

Al concluir el análisis de las diferentes caracterizaciones presentadas en este capítulo se corrobora que las nanopartículas de Fe₂O₃ embebidas en el PVB tienen distribución poco heterogénea, tamaño nanométrico aproximado de 3 nm y propiedades superparamagnéticas a temperatura ambiente, lo que hace de este material un excelente candidato para el desarrollo de dispositivos de

microactuación, lo que constituye el objeto de estudio de este trabajo de tesis. En el siguiente capítulo se presenta el estudio del comportamiento del microactuador al aplicarle campos magnéticos cuasi-estáticos y estáticos.

CAPÍTULO IV

COMPORTAMIENTO DEL MICROACTUADOR EN FUNCIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS ESTÁTICOS Y CUASI-ESTÁTICOS

Este capítulo se enfoca en la evaluación experimental del comportamiento magneto-reológico del material híbrido bajo estudio, funcionando como microactuador tipo cantiléver. Con dicha evaluación, se busca determinar una relación entre el desplazamiento del extremo libre del microactuador y el campo magnético externo aplicado. Las dimensiones del microactuador construido a base de una película híbrida magnética de PVB/Fe₂O₃ fueron de 30.8 mm de longitud, 3.6 mm de ancho y 60 μm de espesor (ver figura 4.1). El campo magnético aplicado fue producido mediante un electroimán. Por lo tanto, previo al estudio del comportamiento del microactuador, se caracterizó el electroimán utilizado. Dichos experimentos, así como los resultados obtenidos, se describen en las secciones que a continuación se presentan.



Figura 4.1: Microactuador a base de material híbrido magnético PVB/Fe₂O₃.

4.1 Medición experimental del campo magnético aplicado.

El campo magnético que permitió accionar el microactuador fue producido mediante un electroimán, a través de una corriente eléctrica directa a partir de la aplicación de un determinado voltaje. Para medir el campo magnético generado, se utilizó el montaje experimental representado en la figura 4.2. El voltaje, y su respectiva corriente eléctrica, fueron proporcionados por una fuente de voltaje

BK PRECISION 9251. Dichos voltaje y corriente fueron controlados y registrados por una computadora conectada a la fuente de voltaje, a través de un programa en LabVIEW®. En tanto, los campos magnéticos se midieron con un gaussímetro KOSHAVA 5. La probeta se colocó a dos distancias diferentes de la superficie del electroimán: 1 mm y 2 mm. Los valores obtenidos se registraron en el programa KOSHAVA 4-Unit, propio del gaussímetro.

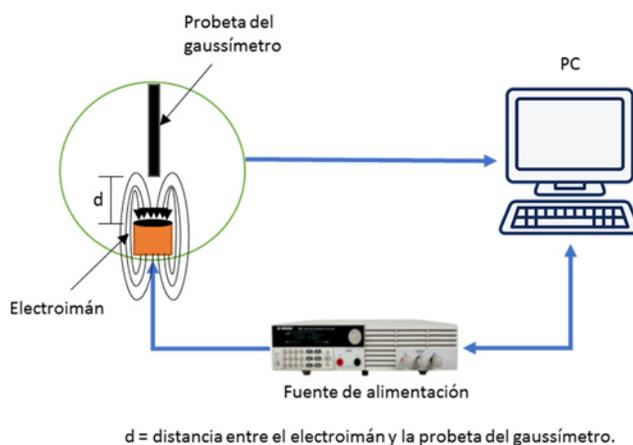


Figura 4.2: Esquema del montaje experimental para medir los campos magnéticos del electroimán, en función del voltaje y la corriente eléctrica aplicados.

La corriente eléctrica que genera el campo magnético fue producida por un voltaje aplicado en forma de escalera ascendente/descendente, mostrado en la figura 4.3. En esta escalera, que va de 0 a 18 V, se utilizó una tasa de incremento de 3 V/s (~10.5 A/s para la tasa de incremento de corriente eléctrica). Al llegar a 18 V, se utilizó la misma tasa (-3 V/s) para disminuir el voltaje hasta 0 V. En la tabla 4.1 se presentan los datos de voltaje, corriente y campo magnético registrados a partir de los programas correspondientes, considerando las dos distancias de separación entre el electroimán y la probeta del gaussímetro.

Al graficar estos valores (ver figura 4.4), se observa una relación lineal entre los valores de corriente y campo magnético. La relación matemática que asocia corriente eléctrica con la magnitud del campo magnético medido a 1 mm de

distancia del electroimán se describe en la ecuación (4.1), donde H es la magnitud del campo magnético (Oe), I es la corriente eléctrica (mA) y K_1 equivale a 9.57 Oe/mA.

$$H = K_1 I \quad (4.1)$$

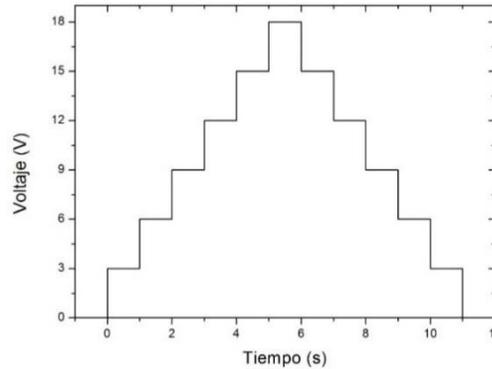


Figura 4.3: Representación del voltaje aplicado al electroimán en función del tiempo.

La ecuación (4.1) es válida solamente a 1 mm de distancia; para las mediciones a 2 mm de distancia se obtuvo la ecuación (4.2), donde $K_2 = 9.56$ Oe/mA:

$$H = K_2 I \quad (4.2)$$

Tabla 4.1 Resultados experimentales de las mediciones de voltaje, corriente y campos magnéticos a 1 mm y 2 mm de distancia entre el gaussímetro y el electroimán.

Mediciones a 1 mm			Mediciones a 2 mm		
Corriente eléctrica (A)	Campos magnéticos experimentales (Oe)	Campos magnéticos calculados (Oe)	Corriente eléctrica (A)	Campos magnéticos experimentales (Oe)	Campos magnéticos calculados (Oe)
0	0	0	0	0	0
10.6	101	101.4	10.2	97	97.5
20.9	200	200.0	20.8	199	198.8
31.5	302	301.4	31.4	301	300.3
41.4	397	396.2	41.8	400	399.8
52.8	506	505.3	52.6	504	502.8
63.3	607	605.8	62.4	598	596.5
52.1	499	498.6	51.8	496	495.2
45.1	432	431.6	40.9	392	391.0
30.6	293	292.8	30.5	293	291.5
20.3	194	194.2	20.4	195	195.0
10.6	101	101.4	9.9	94	94.6
0	0	0	0	0	0

En la figura 4.4 se muestra el campo magnético experimental y el calculado en función de la corriente eléctrica aplicada para ambas distancias (1 mm y 2 mm), utilizando la ecuación correspondiente según el caso.

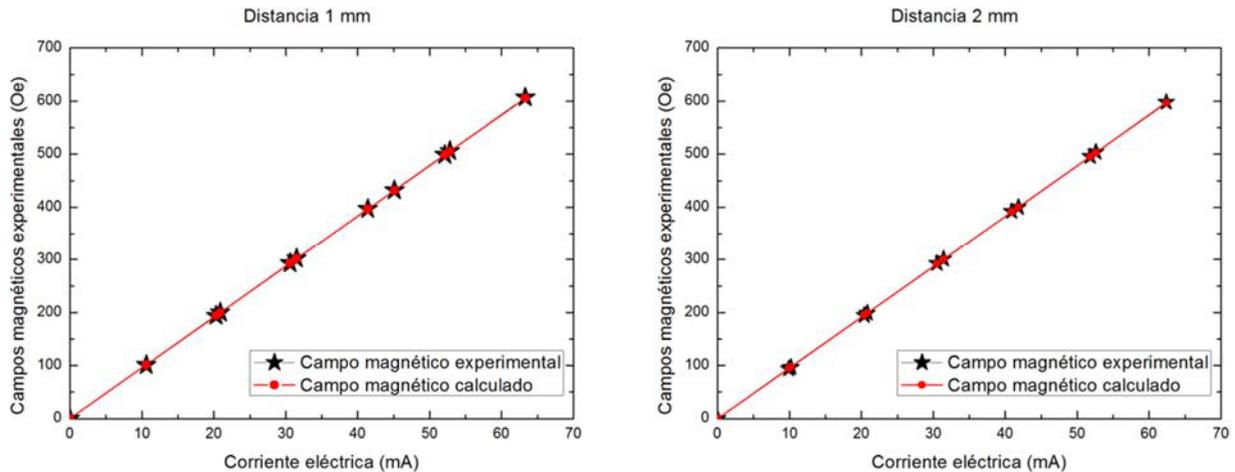


Figura 4.4: Campos magnéticos en función de la corriente eléctrica, considerando una distancia de 1 mm y 2 mm entre el electroimán y el gaussímetro.

Una vez cuantificados los campos magnéticos producidos el electroimán utilizado, se describe el montaje experimental desarrollado para observar el comportamiento estático y cuasi-estático del microactuador.

4.2 Montaje experimental para el estudio del comportamiento del microactuador.

Para evaluar el comportamiento magneto-reológico del microactuador, se utilizó la configuración que se presenta en la figura 4.5. La aplicación, el control y el registro del voltaje y la corriente que produce el estímulo (campo magnético) se realizó de la misma manera que en la figura 4.2. El extremo libre del microactuador en forma de cantiléver se colocó a una distancia de separación, d ,

de la superficie del electroimán. Así, se realizaron dos experimentos, el primero considerando una distancia $d = 1$ mm, y el segundo $d = 2$ mm.

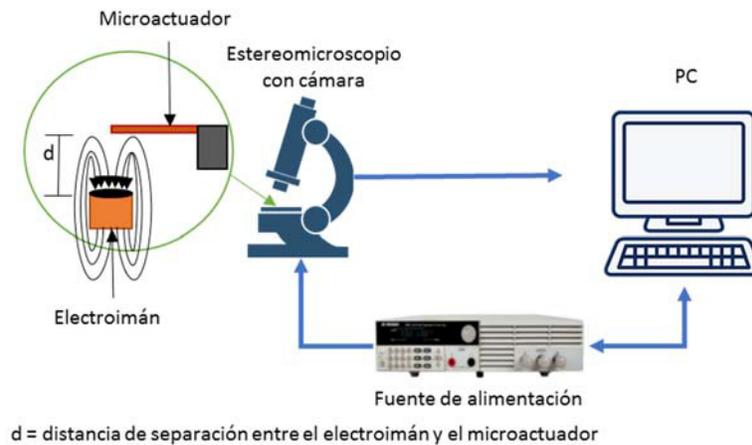


Figura 4.5: Esquema del montaje experimental para el estudio del comportamiento del microactuador en función del campo magnético aplicado.

El desplazamiento del microactuador fue registrado mediante una cámara LEICA IC80 HD conectada a un estereomicroscopio LEICA M80. El video obtenido con esta cámara se descompuso en imágenes y, con el programa ImageJ, se midió el desplazamiento producido en cada escalón de voltaje. El montaje experimental se muestra en la figura 4.6 a), y la figura 4.6 b) presenta un acercamiento al microactuador y al electroimán separados por una distancia $d = 1$ mm.

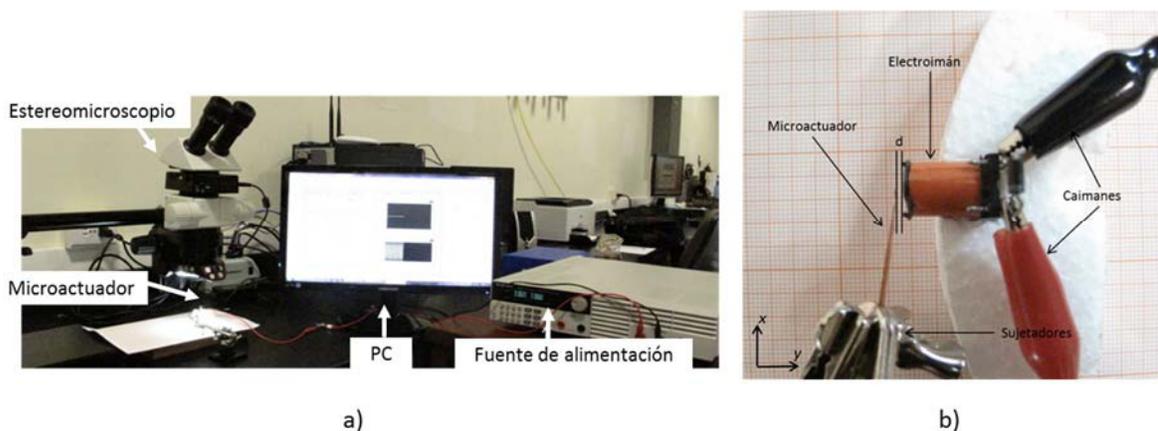
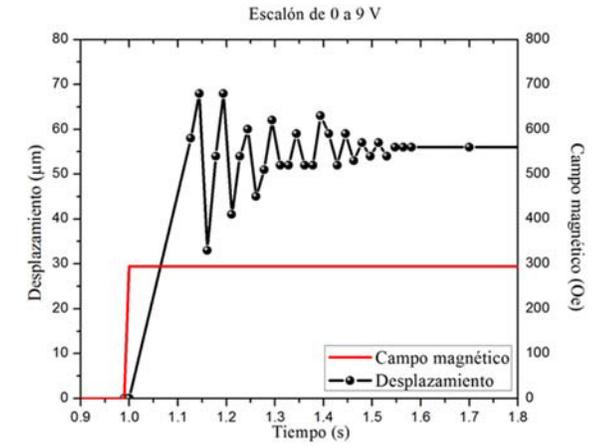


Figura 4.6: Montaje experimental para el estudio del comportamiento estático y cuasi-estático del microactuador: a) vista general, b) acercamiento del microactuador y el electroimán separados por una distancia $d = 1$ mm.

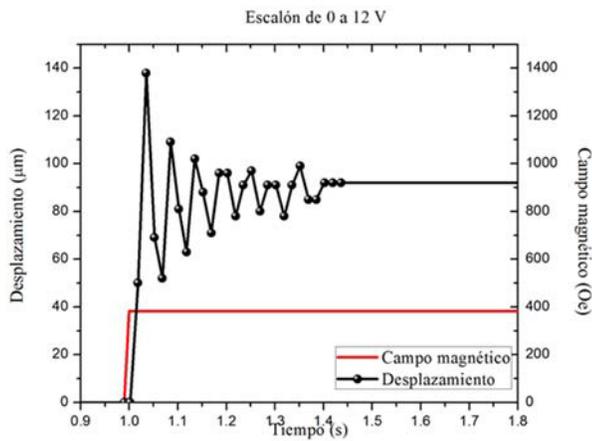
4.3 Comportamiento magneto-reológico del microactuador en función de campos magnéticos estáticos.

Se utilizó un campo magnético estático, en forma de función escalón, para accionar el microactuador. Se presentan tres experimentos, correspondientes a tres valores máximos experimentales del campo magnético: primero, de 0 a 294.7 Oe (en términos de campo magnético), 0 a 9 V (en términos de voltaje) y 0 a 30.8 A (en términos de corriente eléctrica); segundo, de 0 a 382.8 Oe (sea, 0 a 12 V y 0 a 40.0 A); tercero, de 0 a 478.5 Oe (0 a 15 V y 0 a 50.0 A). Se usó el montaje descrito en las figuras 4.5 y 4.6. El extremo libre del microactuador se colocó a 1 mm de distancia de la superficie del electroimán y la magnitud del campo magnético se calculó utilizando la ecuación (4.1).

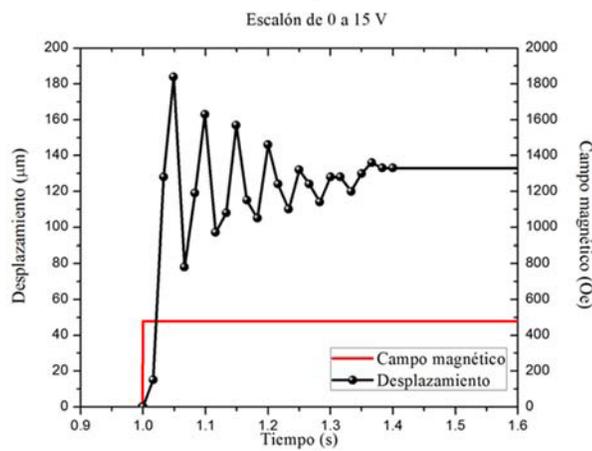
Los resultados obtenidos se muestran en forma de gráficas en la figura 4.7, donde se aprecia el desplazamiento del microactuador y el campo magnético aplicado, ambos en función del tiempo, para cada experimento realizado. En todos los casos, la respuesta del microactuador presenta un comportamiento oscilatorio subamortiguado [40]. Este tipo de comportamiento está asociado a su configuración en cantiléver, la viscoelasticidad del PVB y la acción del campo magnético sobre el extremo libre de la película. El proceso ocurre según se describe en los siguientes enunciados. El campo magnético externo induce la orientación de los momentos magnéticos de las nanopartículas en el sentido del vector de campo magnético externo aplicado. La orientación de los momentos magnéticos interacciona con la interfase entre las nanopartículas y la matriz de PVB, produciendo una fuerza de superficie sobre la interfase. Esta fuerza genera esfuerzos tangenciales y normales que, a su vez, se traducen de manera macroscópica en el desplazamiento del microactuador en cantiléver.



a)



b)



c)

Figura 4.7: Desplazamiento del microactuador en función del tiempo (línea negra), aplicando un campo magnético estático tipo escalón (línea roja): a) de 0 a 9 V (0 a 30.8 A, 0 a 294.7 Oe), b) de 0 a 12 V (0 a 40.0 A, 0 a 382.8 Oe), c) de 0 a 15 V (0 a 50.0 A, 0 a 478.5 Oe).

A partir de los gráficos de la figura 4.7 se determinaron los parámetros que se enlistan a continuación y que, para su facilidad de comprensión, son ilustrados en el esquema de la figura 4.8:

- D_M : Desplazamiento máximo; es el valor más alto de desplazamiento leído en la curva, el cual fue generado por el mayor movimiento alcanzado por el microactuador.
- T_R : Tiempo respuesta; es el tiempo en el que el desplazamiento llega al 90% de su valor final.
- T_A : Tiempo de asentamiento; es el tiempo requerido para que la amplitud de las oscilaciones en la curva de respuesta alcance un rango del 2% del valor final, y permanezca dentro de este rango.
- D_F : Desplazamiento final; es el valor obtenido después de alcanzar el T_A en la curva.

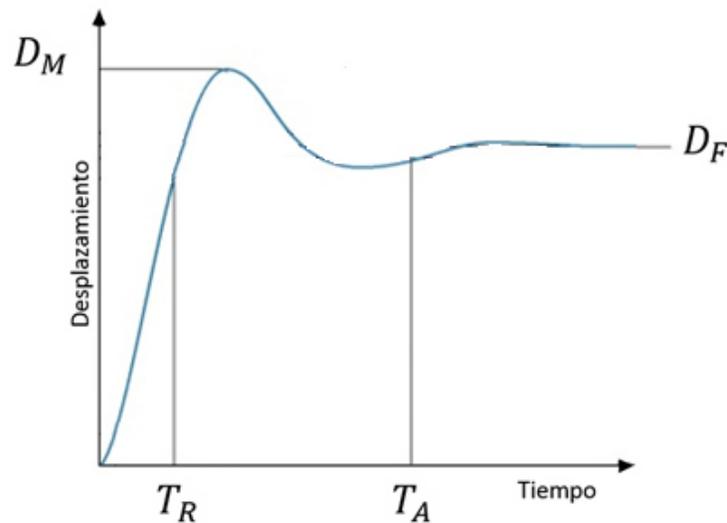


Figura 4.8: Parámetros del comportamiento del microactuador. D_M : desplazamiento máximo; T_R : tiempo respuesta; T_A : tiempo de asentamiento; D_F : desplazamiento final.

Los parámetros obtenidos de estos experimentos se enlistan en la tabla 4.2. Como era de esperarse, el desplazamiento máximo D_M y el final D_F aumentan conforme se incrementa el campo magnético aplicado. Las mayores magnitudes para D_M y

D_F fueron 184 μm y 133 μm , respectivamente, al aplicar un escalón de 0 a 478.5 Oe (0 a 15 V, 0 a 50.0 A) durante un segundo. Además, se observa que al aumentar 3 V la amplitud de un escalón respecto al anterior, se tiene un incremento en el desplazamiento de aproximadamente 60%. Esto se debe al aumento en la magnetización de las nanopartículas magnéticas, quienes inducen el desplazamiento de la matriz polimérica de PVB.

El menor T_R obtenido, 16 ms, se produjo también cuando se utilizó el escalón de 0 a 478.5 Oe (0 a 15 V, 0 a 50.0 A); mientras que el mayor T_R adquirido, 127 ms, fue al aplicar un escalón de 0 a 294.7 Oe (0 a 9 V, 0 a 30.8 A). Este comportamiento se asocia a la intensidad de campo magnético aplicado, es decir, entre mayor sea el campo magnético aplicado, mayor será la magnetización de los dipolos magnéticos que se orienten en la dirección de este campo, por lo tanto, se induce el desplazamiento del microactuador de una manera más rápida que al aplicar un campo magnético de menor intensidad. Por lo tanto, el microactuador alcanza su estabilización en menos tiempo, acortándose el T_A con el aumento de campo magnético aplicado; el T_A menor obtenido fue de 400 ms al aplicar un escalón de 0 a 478.5 Oe.

Tabla 4.2: Voltaje, campo magnético máximo calculado, desplazamiento máximo D_M , tiempo respuesta T_R , tiempo de asentamiento T_A y desplazamiento final D_F en función de campos magnéticos estáticos.

Voltaje (V)	Campo magnético máximo calculado (Oe)	D_M (μm)	T_R (ms)	T_A (ms)	D_F (μm)
0 a 9	294.7	68	127	560	56
0 a 12	382.8	138	21	424	92
0 a 15	478.5	184	16	400	133

Para continuar con el estudio del comportamiento del microactuador, se realizó un experimento de desplazamiento en función de campos magnéticos cuasi-estáticos, el cual se presenta a continuación.

4.4 Comportamiento del microactuador en función de campos magnéticos cuasi-estáticos.

Con el fin de realizar un estudio más completo del comportamiento magnetoreológico del microactuador, se aplicaron campos magnéticos cuasi-estáticos (tipo escalera), según se describe en la figura 4.3. De acuerdo con el estudio anterior (ver tabla 4.2), el tiempo entre cada escalón (1 s) es el suficiente para alcanzar la estabilización del desplazamiento del microactuador. Se realizaron dos experimentos, colocando el extremo libre del microactuador a dos distancias diferentes de la superficie del electroimán: $d = 1$ mm y $d = 2$ mm. Los campos magnéticos utilizados fueron calculados con las ecuaciones (4.1) y (4.2), de acuerdo a la distancia considerada. En la tabla 4.3 se presentan los valores de la magnitud del campo magnético calculado y del desplazamiento final medido para ambos experimentos ($d = 1$ y $d = 2$ mm). Estos valores están graficados en la figura 4.9.

En la figura 4.9 se puede identificar que el desplazamiento varía, nuevamente, en función del campo magnético aplicado. Esta relación campo magnético/desplazamiento es no lineal, debido que no solo depende del comportamiento superparamagnético (ver figura 3.5) de las nanopartículas en el microactuador, sino también de otros factores como la viscoelasticidad del PVB; sin embargo, estos factores no son objeto de estudio de este trabajo y se deja abierto para futuras investigaciones.

Se observa una curva tipo histéresis en el desplazamiento. Esta histéresis está asociada con el proceso de magnetización, el cual se desarrolla de la siguiente manera: al iniciar, se aplica cada escalón de campo magnético en forma de escalera ascendente; conforme esto sucede, se induce la orientación de los momentos magnéticos de las nanopartículas en dirección del vector del campo magnético;

esta orientación de momentos magnéticos interactúa con la interfase de las nanopartículas magnéticas del material híbrido con el PVB; esta interacción genera un arrastre en las macromoléculas del PVB generando en él un desplazamiento; una vez alcanzado el punto máximo de la escalera, se aplican campos magnéticos en forma de escalera descendente; al pasar de un escalón a otro, cierta cantidad de dipolos magnéticos se desmagnetiza conforme el campo magnético disminuye, provocando un desplazamiento en sentido contrario del obtenido al aplicar los campos magnéticos en forma de escalera ascendente. En esta curva es evidente la dependencia del desplazamiento del microactuador provocada por la magnitud de la magnetización de las nanopartículas magnéticas. El desplazamiento máximo registrado fue de 365 μm en el experimento realizado a $d = 1$ mm, con un campo magnético aplicado de 605.7 Oe. Cuando $d = 2$ mm, el desplazamiento máximo obtenido fue de 317 μm , al aplicar un campo magnético de 596.7 Oe. En el punto máximo de desplazamiento del segundo experimento, hubo una diferencia de aproximadamente 9 Oe en relación con el punto máximo de desplazamiento del primer experimento, y el desplazamiento disminuyó 14%. En el primer experimento ($d = 1$ mm), el microactuador se encuentra en una región donde la intensidad de campo magnético es mayor que en el segundo experimento ($d = 2$ mm). Por lo tanto, se logra la magnetización de una mayor cantidad de dipolos magnéticos de las nanopartículas a 1 mm, induciendo un mayor desplazamiento en el microactuador.

Tabla 4.3: Campos magnéticos calculados y desplazamientos finales medidos considerando 1 mm y 2 mm de distancia entre el electroimán y el extremo libre del microactuador.

Voltaje (V)	Mediciones a $d = 1$ mm		Mediciones a $d = 2$ mm	
	Campos magnéticos calculados (Oe)	Desplazamiento experimental (μm)	Campos magnéticos calculados (Oe)	Desplazamiento experimental (μm)
0	0	0	0	0
3	101.4	40	97.5	12
6	200.0	80	198.9	22
9	301.4	130	300.5	80
12	396.1	199	399.9	150
15	505.2	279	503.0	220
18	605.7	365	596.7	317
15	498.5	300	495.4	230
12	431.5	220	391.1	160
9	292.8	150	291.7	106
6	194.2	100	195.1	46
3	101.4	70	94.6	-7
0	0	20	0	-24

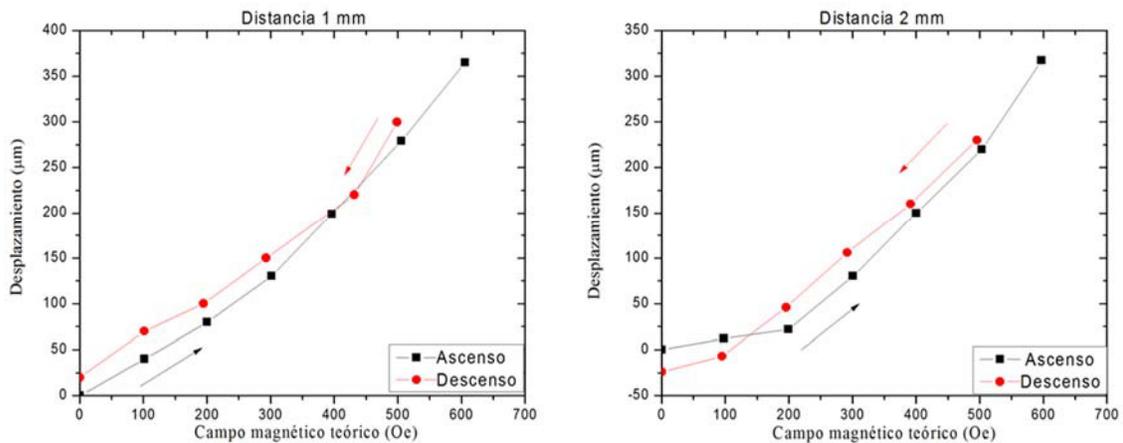


Figura 4.9: Desplazamiento del microactuador en función de campos magnéticos cuasi-estáticos aplicados a una distancia $d = 1$ mm y $d = 2$ mm entre el electroimán y el extremo libre del microactuador.

4.5 Comparativo de desplazamientos entre campos magnéticos estáticos y cuasi-estáticos.

Se comparó el desplazamiento final D_F de los microactuadores al aplicar campos magnéticos estáticos (escalón) y campos magnéticos cuasi-estáticos (escalera),

ambos considerando una distancia de 1 mm entre el microactuador y el electroimán. Los resultados de ambos experimentos se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Comparativo del desplazamiento D_F del microactuador de PVB/ Fe_2O_3 en función de campos magnéticos estáticos y campos magnéticos cuasi-estáticos para $d = 1$ mm.

Voltaje (V)	Desplazamiento final (μm)	
	Desplazamiento al aplicar campos magnéticos estáticos	Desplazamiento al aplicar campos magnéticos cuasi-estáticos
9	56	130
12	92	199
15	133	279

La magnitud de los desplazamientos obtenidos al aplicar campos magnéticos cuasi-estáticos son mucho mayores que los obtenidos al aplicar campos magnéticos estáticos. Un posible escenario de la causa de este incremento en la magnitud del desplazamiento, podría ser que la magnetización de las nanopartículas ocurre en etapas, una cantidad de ellas se magnetiza al aplicar el primer escalón de la escalera, continuando con la magnetización de una mayor cantidad de nanopartículas al aplicar el siguiente escalón y así sucesivamente hasta llegar al valor final. Por otro lado, al aplicar un campo magnético estático (escalón), únicamente cierta cantidad de nanopartículas se magnetizarán ocasionando este desplazamiento de menor proporción. Entonces, se considera que un campo magnético en escalera (ascendente) magnetiza más nanopartículas al aumentar un escalón en la escalera.

Con los resultados anteriores se pueden concluir que el material híbrido magnético puede utilizarse como un microactuador magnético funcional, ya que se puede controlar el desplazamiento del microactuador en función del campo magnético aplicado.

El comportamiento oscilatorio subamortiguado observado al aplicar campos magnéticos estáticos, no es deseable en sistemas de microactuación, ya que la

precisión es un factor fundamental, por ejemplo, para aplicaciones de microposicionamiento. De tal manera, es necesario realizar un experimento que permita conocer a mayor detalle este tipo de comportamiento y, a su vez, obtener un desplazamiento regulado del microactuador. Este experimento se presenta en el capítulo 5 de este trabajo de tesis.

CAPÍTULO V

COMPORTAMIENTO DE MICROACTUADORES BICAPA EN FUNCIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS ESTÁTICOS

En este capítulo se presenta el estudio del comportamiento (desplazamiento) de un nuevo estilo de microactuador tipo cantiléver, al aplicársele un campo magnético estático (tipo escalón). Los resultados experimentales obtenidos fueron comparados con los resultados teóricos de un modelo matemático y, a partir de este modelo, se utilizó un sistema de control *Input Shaping, IS*, que permitió regular el desplazamiento del microactuador. En este estudio se colaboró con en el instituto FEMTO-ST (*Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies*) de la *Université de Franche-Comté*, con el apoyo del Dr. Kanty Rabenorosoa y el Dr. Nicolas Andreff.

Esta parte del trabajo de tesis se desarrolló en el siguiente orden, y se describe en las secciones correspondientes:

1. Fabricación de microactuadores bicapa (MB), tipo cantiléver, compuestos de cobre y material híbrido magnético, Cu+PVB/Fe₂O₃.
2. Caracterización del electroimán utilizado en este nuevo experimento.
3. Montaje experimental para el estudio del comportamiento de los microactuadores bicapa.
4. Caracterización de los microactuadores bicapa.
5. Descripción del modelo matemático.
6. Aplicación del sistema de control *Input Shaping*.

5.1 Fabricación de microactuadores bicapa Cu+PVB/Fe₂O₃.

Se fabricaron dos microactuadores bicapa tipo cantiléver. Para la primera capa se utilizó una película comercial de cobre, Cu, con adhesivo (espesor: ~80 μm). Como segunda capa, en el extremo libre del cantiléver se colocó una sección de material híbrido magnético PVB/Fe₂O₃ (encima de la película de Cu), según se ilustra en la figura 5.1. Las dimensiones de ambos microactuadores se encuentran en la tabla 5.1. A partir de ellas, resulta evidente que la diferencia entre los dos microactuadores reside en la cantidad de PVB/Fe₂O₃, siendo el microactuador bicapa 1 (MB1) quien contiene una menor sección, comparada con el microactuador bicapa 2 (MB2). Se utilizó una película de cobre en los microactuadores, debido a que ésta permite reflejar el láser del sensor que mide el desplazamiento del microactuador (ver figura 5.5 a)). El cobre es un material diamagnético, por lo tanto, en este estudio se desprecia la influencia del campo magnético sobre este material. Al utilizar un sensor de este tipo, se logró caracterizar con mayor precisión el comportamiento (desplazamiento) del microactuador al aplicársele campos magnéticos externos estáticos, en forma de escalón.

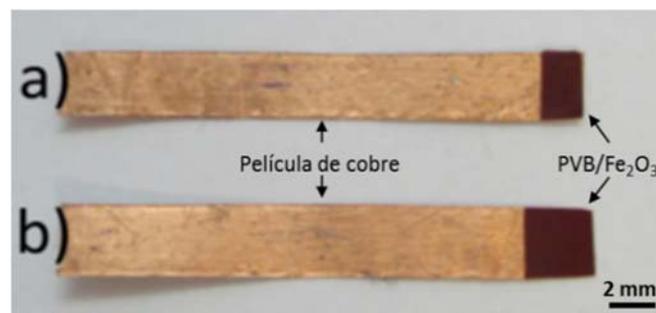


Figura 5.1: Microactuadores bicapa compuestos de película de cobre flexible con punta de material híbrido magnético (Cu+PVB/Fe₂O₃).

Tabla 5.1: Dimensiones de los microactuadores bicapa.

Nombre	Dimensiones de la película de Cu			Dimensiones de la película de PVB/Fe ₂ O ₃			
	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (μm)	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (μm)	Volumen (mm ³)
MB1	23	3	80	2	3	40	0.24
MB2	23	3	80	3	3	40	0.36

5.2 Caracterización del electroimán.

Para este experimento se utilizó un electroimán distinto al utilizado en el experimento presentado en el capítulo 4. Se realizaron mediciones del campo magnético generado por dicho electroimán, a fin de cuantificar el campo magnético que será aplicado al microactuador para inducir el movimiento de los cantiléver bicapa. En evaluaciones preliminares, se estimó que el campo magnético necesario para estimular los microactuadores bicapa debía ser mayor a 10 Oe.

Se implementó la configuración que se presenta la figura 5.2 a), la cual permite conocer la intensidad de los campos magnéticos generados desde la superficie del electroimán (0 mm) hasta 10 mm de distancia en la dirección z, definida en la figura 5.2 b). Esto permite observar el decaimiento del campo magnético en función de la separación del electroimán a lo largo de su eje.

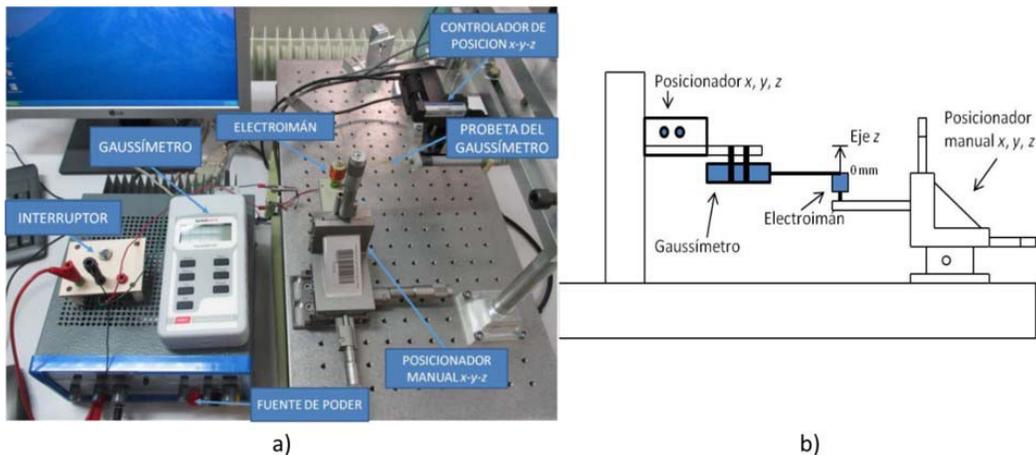


Figura 5.2: Montaje experimental para caracterizar el electroimán: a) vista general, b) representación donde se ilustra el eje z.

El campo magnético es registrado con un gaussímetro 7010 de SYPRIS Test Measurement Company, US. El sensor del gaussímetro es colocado en un posicionador *xyz* controlado por MATLAB®. La corriente aplicada al electroimán fue de 2 A (magnitud suficiente para generar al menos 10 Oe en el electroimán). Los campos magnéticos registrados se muestran en la figura 5.3.

El campo magnético máximo registrado fue de 14.3 Oe a 0 mm de la superficie del electroimán. El campo magnético comienza a decaer conforme la distancia en el eje *z* aumenta; al llegar a 10 mm, se vuelve despreciable. El campo magnético a un 1 mm es de 14.2 Oe, suficiente para inducir desplazamiento en el microactuador; por lo tanto, el microactuador se colocó a esta distancia.

Una vez caracterizado el electroimán, se instaló el montaje experimental para estudiar el comportamiento de los microactuadores bicapa, bajo un escenario en el que se aplica a la muestra un campo magnético estático.

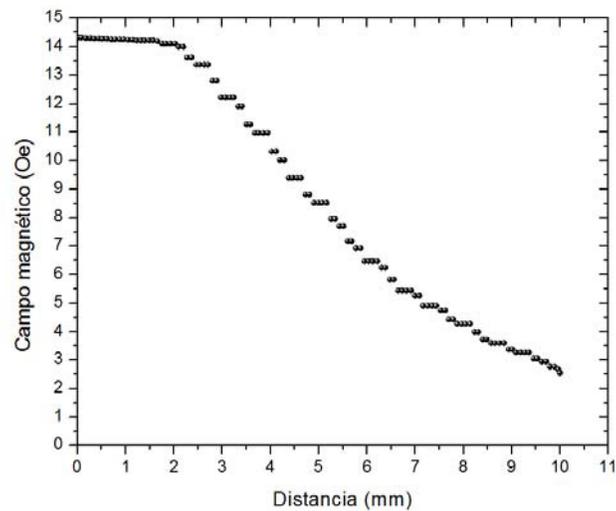


Figura 5.3: Magnitud del campo magnético en función de la distancia de separación del electroimán.

5.3 Montaje experimental para el estudio del comportamiento de los microactuadores bicapa.

El objetivo de este montaje experimental es caracterizar el comportamiento (desplazamiento) de los microactuadores bicapa en función del campo magnético aplicado. En esta configuración, el extremo libre del microactuador bicapa tipo cantiléver se posicionó a 1 mm de distancia de la superficie del electroimán, mientras que, en el otro extremo, el microactuador está sujeto a 3 mm de su longitud total, quedando 20 mm de extremo libre. Como se mencionó en la sección anterior, el campo magnético se produjo al aplicar a un electroimán una corriente eléctrica directa de 2 A, que produjo un campo magnético de 14.2 Oe, en forma de escalón (ver figura 5.4). Para registrar la magnitud de este vector de movimiento se usó un sensor láser Keyence que permite medir la posición del microactuador, con una resolución de 0.01 μm . Se incide este láser sobre la punta del extremo libre del microactuador, como se muestra en la figura 5.5 a).

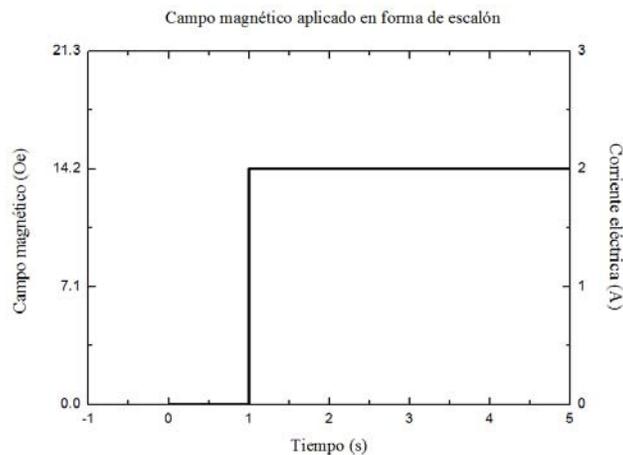


Figura 5.4: Campo magnético en forma de escalón utilizado en este experimento.

El lector del sensor láser es conectado a una tarjeta de adquisición de datos dSPACE, la cual se encarga de traducir los datos obtenidos por el mismo y enviarlos al programa Simulink®, de MATLAB®. La figura 5.5 b) muestra la

configuración utilizada para obtener las mediciones de desplazamiento de los microactuadores bicapa. Dichas mediciones y su análisis se presentan a continuación.

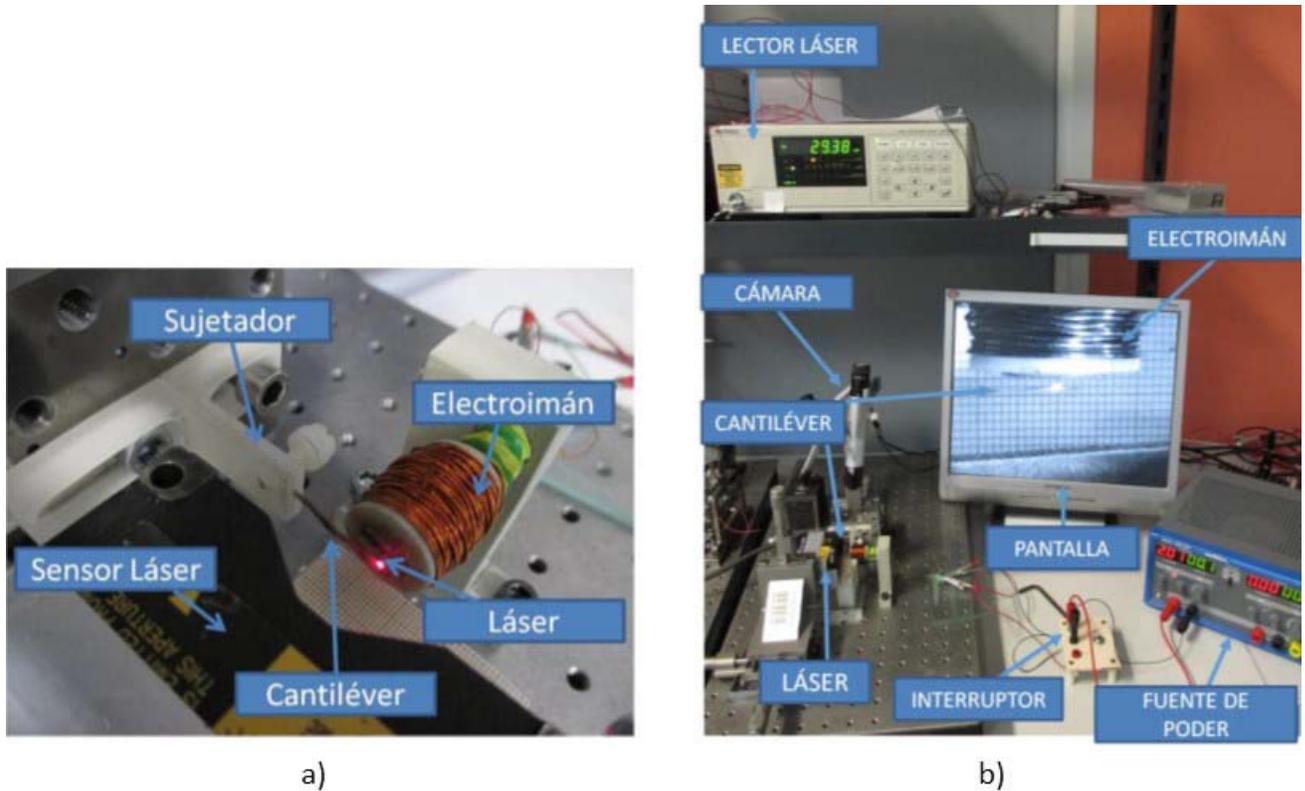


Figura 5.5: Configuración del experimento utilizado para medir el desplazamiento de los microactuadores bicapa: a) acercamiento sobre el microactuador y el sensor láser, b) vista general.

5.4 Caracterización del comportamiento de los microactuadores bicapa.

Como se ha mencionado, se caracterizó el comportamiento (desplazamiento) de los dos microactuador bicapa utilizando el montaje experimental descrito en la sección anterior. Para estos experimentos, se utilizó un campo magnético tipo escalón de 14.2 Oe, el cual fue generado a partir de una corriente eléctrica de 2 A (ver figura 5.4). Las gráficas temporales resultantes para el desplazamiento y el campo magnético se muestran en la figura 5.6. El microactuador tiene un

comportamiento típico de un sistema subamortiguado [40], similar al observado en la sección 4.3. Este comportamiento está asociado a la configuración en cantiléver de los microactuadores, a las constantes elásticas de las películas de cobre y al material híbrido magnético. De la misma manera descrita en el capítulo 4, se obtuvo el desplazamiento máximo D_M , tiempo respuesta T_R , desplazamiento final D_F y tiempo de asentamiento T_A . Estos valores se enlistan en la tabla 5.2.

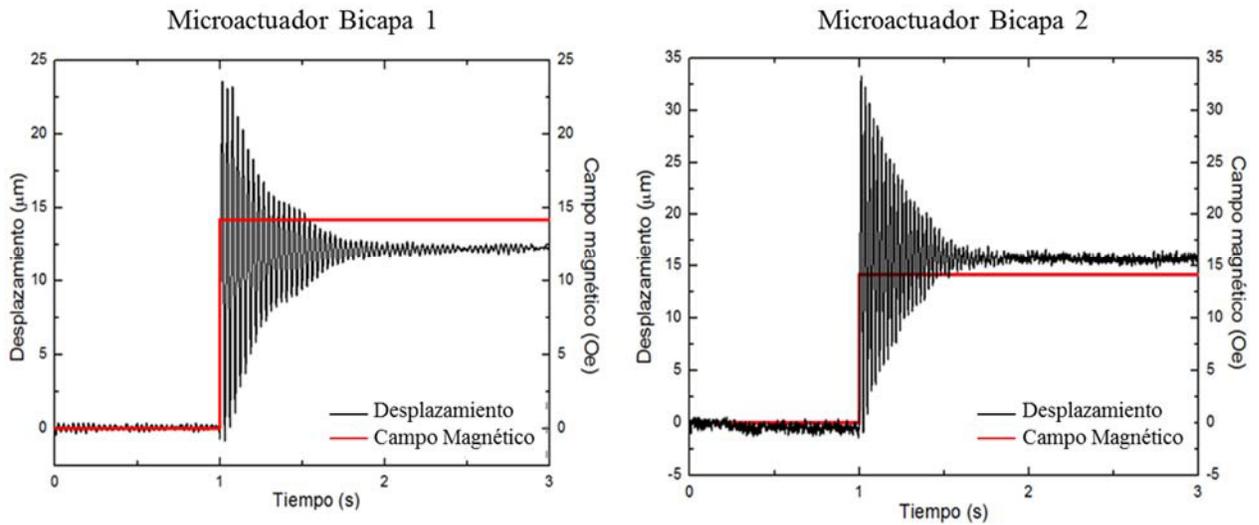


Figura 5.6: Desplazamiento (en negro) y campo magnético (en rojo) en función del tiempo para los microactuadores MB1 y MB2.

Tabla 5.2: Desplazamiento máximo D_M , tiempo respuesta T_R , desplazamiento final D_F y tiempo de asentamiento T_A , obtenidos de la figura 5.6.

Datos experimentales	D_M (μm)	T_R (ms)	T_A (ms)	D_F (μm)
MB1	23.55	71	1229	12.30
MB2	33.28	56	894	15.81

El MB2 presentó el mayor desplazamiento ($15.81 \mu\text{m}$). Este microactuador tiene aproximadamente 33% más material híbrido magnético que el MB1. Cuanto más material híbrido magnético se utiliza, mayor es el desplazamiento que se produce, ya que se tienen más nanopartículas magnéticas magnetizadas. Además, el T_R y el T_A disminuyen conforme la cantidad de material magnético aumenta.

Con el fin de reducir estas oscilaciones, se utilizó un modelo matemático que describe la respuesta de los microactuadores y, posteriormente, se utilizó para realizar un sistema de control en Simulink®, de MATLAB®.

5.5 Modelo matemático del comportamiento de los microactuadores.

Un modelo matemático que reproduce o describe la respuesta experimental subamortiguada de los microactuadores presentados en este documento, es el resultante de una combinación lineal de elementos mecánicos análogos que producen un sistema masa-resorte-amortiguador con una fuerza $F(t)$ actuando sobre éste (ver figura 5.7).

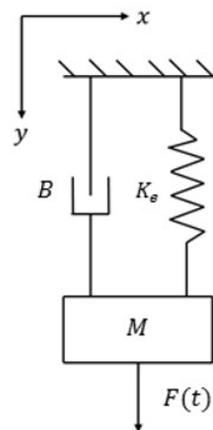


Figura 5.7: Sistema masa-resorte-amortiguador que reproduce el comportamiento subamortiguado de los microactuadores.

La ecuación diferencial lineal de segundo orden (5.1) describe el desplazamiento, y , del sistema en el mismo eje. En esta ecuación, t es el tiempo; K_e es la constante elástica del resorte; B está relacionada con la viscosidad del amortiguador; y M es la masa del sistema. Las variables de este sistema y las que se utilizaron posteriormente en el sistema de control se muestran en la tabla 5.3.

$$F(t) = M \frac{d^2y}{dt^2} + B \frac{dy}{dt} + K_e y \quad (5.1)$$

Tabla 5.3: Variables utilizadas en el modelo masa-resorte-amortiguador y el sistema de control.

Abreviatura	Variable	Unidades
y	Desplazamiento	m
F	Fuerza	N
K_e	Constante elástica	$\frac{N}{m}$
B	Constante de amortiguamiento	$\frac{Ns}{m}$
M	Masa	kg
t	Tiempo	s
K_p	Ganancia	μm
ζ	Coefficiente de rozamiento viscoso	Adimensional
ω_n	Frecuencia natural	1/s
T_ω	Inverso de la frecuencia natural	s

Para este sistema, las condiciones iniciales son: $y = 0$ cuando $t = 0$; en consecuencia, $\frac{dy}{dt}(t = 0) = 0$ y $\frac{d^2y}{dt^2}(t = 0) = 0$, es decir, no hay desplazamiento, velocidad ni aceleración al tiempo cero. Con el fin de obtener la función de transferencia del sistema, se aplica la transformada de Laplace a la ecuación (5.1):

$$F(s) = Ms^2Y(s) + BsY(s) + K_eY(s) \quad (5.2)$$

Ahora la ecuación (5.2) está definida en el espacio de la variable s . La función de transferencia, por definición, es la relación entre la función de salida y la función de entrada. Siendo la salida el desplazamiento $Y(s)$, y la entrada la fuerza $F(s)$, la función de transferencia $G(s)$ se escribe:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms^2 + Bs + K_e} \quad (5.3)$$

Se definen las siguientes relaciones entre las variables de la tabla 5.1, con el fin de describir de la ecuación (5.3) en los términos requeridos para el sistema de control:

$$K_e = \frac{1}{K_p} \quad (5.4)$$

$$M = \frac{K_e}{\omega_n^2} = \frac{1}{K_p \omega_n^2} \quad (5.5)$$

$$B = 2\zeta \sqrt{K_e M} = 2\zeta \frac{1}{K_p \omega_n} \quad (5.6)$$

Sustituyendo las ecuaciones (5.4), (5.5) y (5.6) en la ecuación (5.3) se obtiene:

$$G(s) = \frac{1}{\frac{1}{K_p \omega_n^2} s^2 + 2\zeta \frac{1}{K_p \omega_n} s + \frac{1}{K_p}} = \frac{K_p}{\omega_n^2 s^2 + 2\zeta \frac{1}{\omega_n} s + 1} \quad (5.7)$$

Adicionalmente, se define:

$$T_\omega = \frac{1}{\omega_n} \quad (5.8)$$

Sustituyendo la ecuación (5.8) en la ecuación (5.7), se deduce:

$$G(s) = \frac{K_p}{T_\omega^2 s^2 + 2\zeta T_\omega s + 1} \quad (5.9)$$

La ecuación (5.9) es utilizada en el “*System Identification Toolbox*TM” de MATLAB® con el fin de calcular la solución de la misma en el espacio temporal para así conocer el valor numérico de las constantes K_p , T_ω y ζ que intervienen en él. Esta herramienta estima la magnitud de los parámetros del modelo matemático preestablecido, a partir de los datos experimentales de entrada y salida del sistema a analizar (ver Anexo A). En este caso, los datos de entrada corresponden al campo magnético y los datos de salida al desplazamiento, los cuales se pueden apreciar en la figura 5.6. Las curvas de desplazamiento obtenidas por el modelo de la ecuación (5.9), así como las curvas experimentales (campo magnético y desplazamiento), para cada uno de los microactuadores MB1 y MB2, se observan en la figura 5.8.

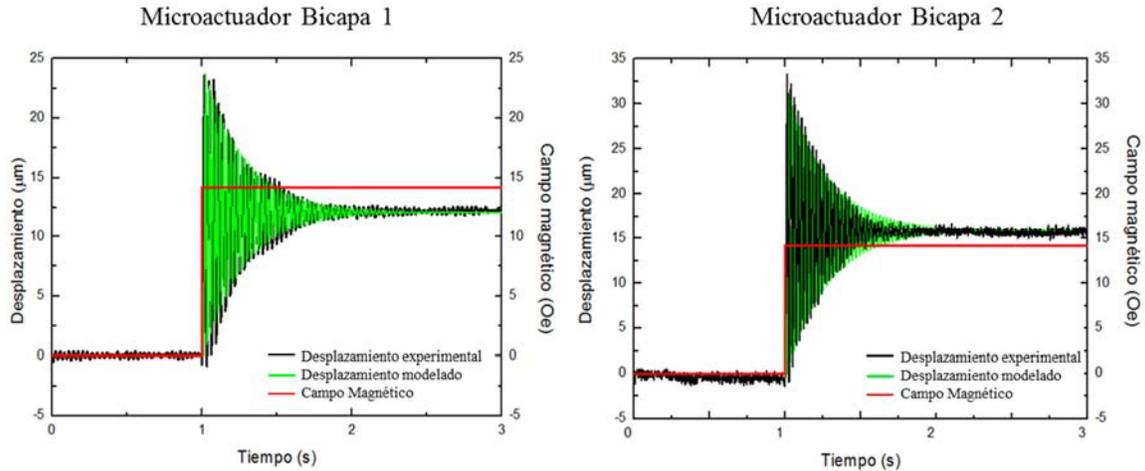


Figura 5.8: Desplazamientos experimentales (en negro) y modelados (en verde), y campo magnético (en rojo) para MB1 y MB2.

Los parámetros que definen el comportamiento (desplazamiento) experimental y modelado de los dos microactuadores se presentan en la tabla 5.4. Al compararlos, se confirma que las curvas experimentales y las curvas modeladas se aproximan entre ellas.

Tabla 5.4: Parámetros experimentales y modelados, y porcentajes de error entre ellos, para MB1 y MB2.

Parámetro	MB1			MB2		
	Experimental	Modelado	% error	Experimental	Modelado	% error
D_M (μm)	23.55	21.2	10	33.28	31.1	6.5
T_R (ms)	71	52	26	56	40	28.5
T_A (ms)	1229	1206	10	894	804	10
D_F (μm)	12.30	12.1	1.5	15.81	15.07	4.6

Los valores de las constantes K_p , T_ω y ζ de la ecuación (5.9) se presentan en la tabla 5.5 para cada microactuador, MB1 y MB2.

Tabla 5.5: Parámetros K_p , T_ω y ζ de la ecuación (5.9) para los microactuadores MB1 y MB2.

Microactuador	K_p (μm)	T_ω (ms)	ζ (adimensional)
MB1	12.11	49	0.0161
MB2	15.81	38	0.0138

Una vez validado el modelo que reproduce el comportamiento de los microactuadores bicapa, fue posible establecer un sistema de control de dicho comportamiento, el cual se describe a continuación.

5.6 Sistema de control *Input Shaping*.

En la sección anterior se desarrolló y validó un modelo matemático que reproduce el comportamiento de los microactuadores cuando son accionados por un campo magnético estático (escalón). Este modelo fue utilizado posteriormente para desarrollar y evaluar un sistema de control *Input Shaping (IS)*, con el objetivo de atenuar las vibraciones del microactuador, permitiéndole llegar a su posición final de manera más rápida y precisa.

El *Input Shaping* es un método de control prealimentado (*feedforward*), de lazo abierto, ampliamente utilizado para estructuras flexibles como los microactuadores empleados en este trabajo de tesis [41-52]. Este método se encarga, como se mencionó anteriormente, de reducir las vibraciones de un sistema oscilatorio subamortiguado cuando éste es accionado por una señal tipo escalón. En el *IS* tradicional, la señal de entrada (el escalón) es convulsionada en dos o más impulsos (*input shapers*) desfasados uno respecto al otro. La magnitud de los impulsos y el desfase están definidos por la dinámica del mismo sistema. De esta forma, se genera una señal de control que compensa las perturbaciones a partir de las señales de entrada y salida propias del mismo sistema. La figura 5.9 ilustra la secuencia de funcionamiento de un *IS* considerando únicamente dos impulsos. En la figura 5.9 a) se aplica la señal de entrada original y se obtiene la señal de salida original subamortiguada; en la figura 5.9 b) se aplican los dos

impulsos, en $t = 0$ y en $t = \Delta$; en la figura 5.9 c) se aplica la señal de control y se obtiene la nueva señal de salida.

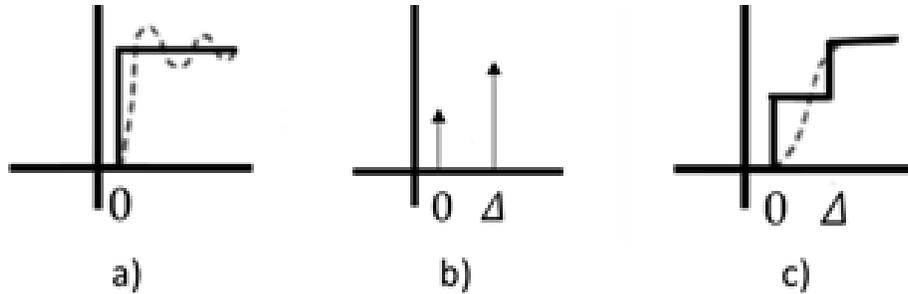


Figura 5.9: Secuencia de funcionamiento de un IS con dos impulsos: a) señales de entrada y salida originales, escalón unitario (línea sólida) y respuesta oscilatoria (línea punteada), respectivamente; b) aplicación del IS (dos impulsos desfasados de un tiempo Δ); c) señales de control (línea sólida) y salida (línea punteada) del sistema una vez aplicado el IS.

Para diseñar un sistema de control IS sin vibraciones, *Zero vibration (ZV)*, con dos impulsos, se utiliza la ecuación (5.10), donde A_i es la amplitud del impulso, t_i el tiempo de aplicación de dichos impulsos y el subíndice i es la posición que ocupa cada variable en la matriz [53, 54]:

$$ZV = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+K} & \frac{K}{1+K} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega_d} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Dado que $K = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$ y $\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$, los parámetros del ZV sólo dependen del coeficiente de rozamiento ζ de la ecuación (5.9). Los impulsos aplicados para la técnica ZV se representan en la figura 5.10 a).

Para darle mayor robustez a la técnica ZV (eliminando su sensibilidad a las incertidumbres propias del modelo), es posible utilizar la técnica conocida como *Zero Vibration and Derivative (ZVD)*, la cual consta de tres impulsos y cuya desventaja se centra en el tiempo de respuesta de la salida. Las amplitudes y tiempos de aplicación de los tres impulsos del ZVD se definen en la ecuación (5.11) [53, 54] y se ilustran en la figura 5.10 b).

$$ZVD = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+2K+K^2} & \frac{2K}{1+2K+K^2} & \frac{K^2}{1+2K+K^2} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega_d} & \frac{2\pi}{\omega_d} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

A fin de mejorar las técnicas anteriores, se añade una nueva derivación, que se traduce en un cuarto impulso. Esta técnica se conoce como *Zero Vibration and Double Derivative* (ZVDD). Las amplitudes y los tiempos de aplicación de sus cuatro impulsos se definen en la ecuación (5.12) [53, 54] y se describen en la figura 5.10 c).

$$ZVDD = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+3K+3K^2+K^3} & \frac{3K}{1+3K+3K^2+K^3} & \frac{3K^2}{1+3K+3K^2+K^3} & \frac{K^3}{1+3K+3K^2+K^3} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega_d} & \frac{2\pi}{\omega_d} & \frac{3\pi}{\omega_d} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

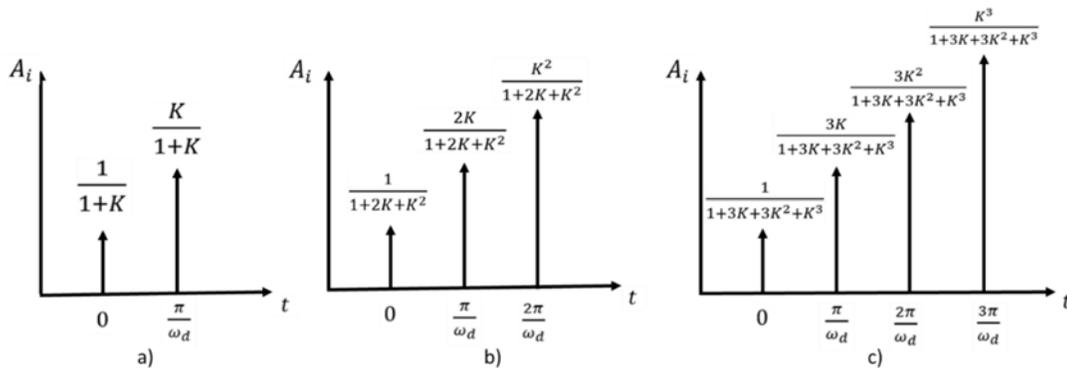


Figura 5.10: Impulsos en un sistema de control *IS* con las técnicas: a) *ZV*, b) *ZVD*, c) *ZVDD*.

Las tres técnicas de *IS* (*ZV*, *ZVD* y *ZVDD*) fueron utilizadas para controlar el comportamiento de los microactuadores MB1 y MB2 a través de sus respectivos modelos, obtenidos a partir de la ecuación (5.9) y la tabla 5.3. Esto se logró con ayuda del programa Simulink®, de MATLAB®. La figura 5.11 esquematiza el proceso utilizado (ver anexo B).

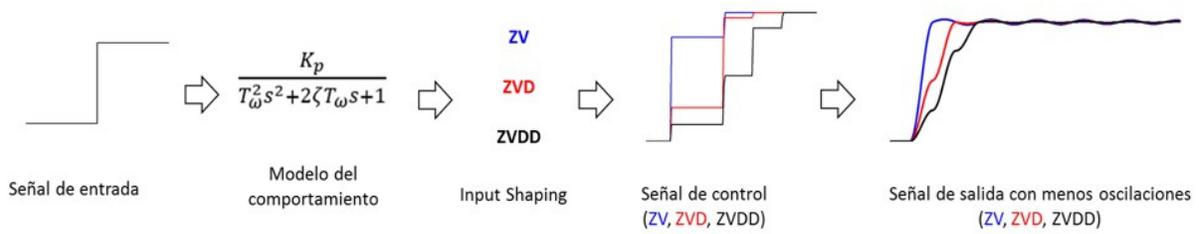


Figura 5.11: Proceso del sistema de control *IS* utilizando las técnicas *ZV*, *ZVD* y *ZVDD*.

Las señales de control generadas para los microactuadores MB1 y MB2, empleando las tres técnicas de *IS* (*ZV*, *ZVD* y *ZVDD*) se muestran en la figura 5.12.

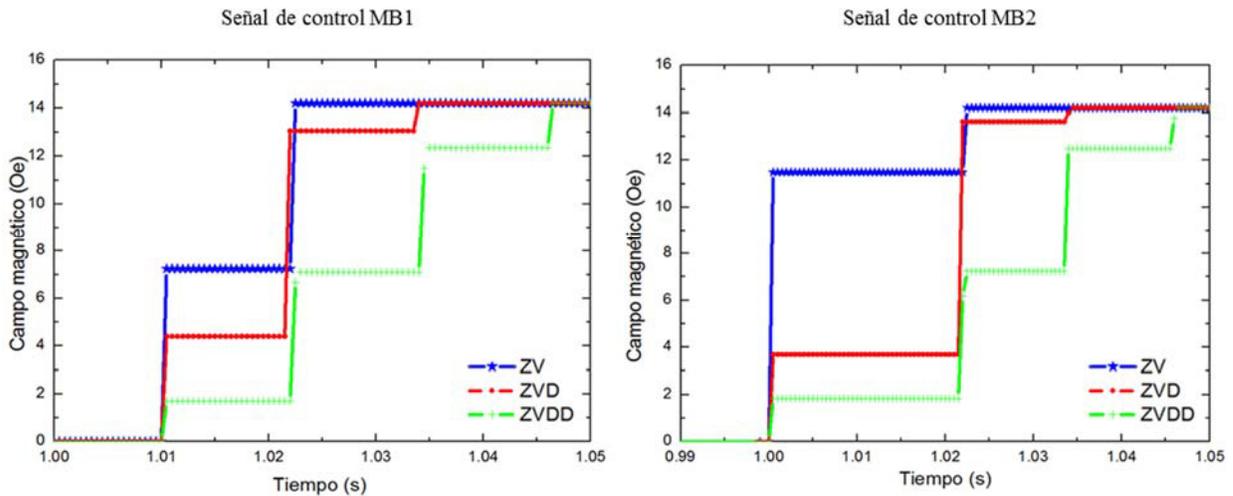


Figura 5.12: Señales de control para las tres técnicas de *IS* (*ZV*, *ZVD* y *ZVDD*) aplicadas a los dos microactuadores bicapa.

Las curvas de desplazamiento después de aplicar las técnicas *ZV*, *ZVD* y *ZVDD* a cada microactuador, MB1 y MB2, se muestran en la figura 5.13. Los parámetros obtenidos mediante cada técnica, o *shaper*, se enlistan en la tabla 5.6. Para los dos microactuadores se observa que, conforme aumenta el número de impulsos, las oscilaciones disminuyen. Por la misma razón, D_M es mayor para *ZV* en ambos casos. Igualmente, se aprecia que el valor de D_F es el mismo sea cual sea la técnica *IS* empleada. Esto es, en los tres casos se obtuvieron $D_F = 12.11 \mu\text{m}$ para el MB1 y $D_F = 15.86 \mu\text{m}$ para el MB2. Al utilizar *ZVD* y *ZVDD*, en los dos casos, el D_M

está dentro de un rango del 2% del D_F , por lo tanto, las respuestas de MB1 y MB2 se encuentran estabilizadas al alcanzar su máximo. En MB1 el T_R y el T_A aumentan conforme aumenta el número de impulsos. En MB2, al utilizar ZV y ZVD, el T_R y el T_A aumentan, pero al utilizar ZVDD el T_R y el T_A disminuyen considerablemente.

Una vez aplicado el método de control, se observa que la respuesta depende del tipo de sistema y aumentar el número de impulsos no significa a obtener un mejor resultado.

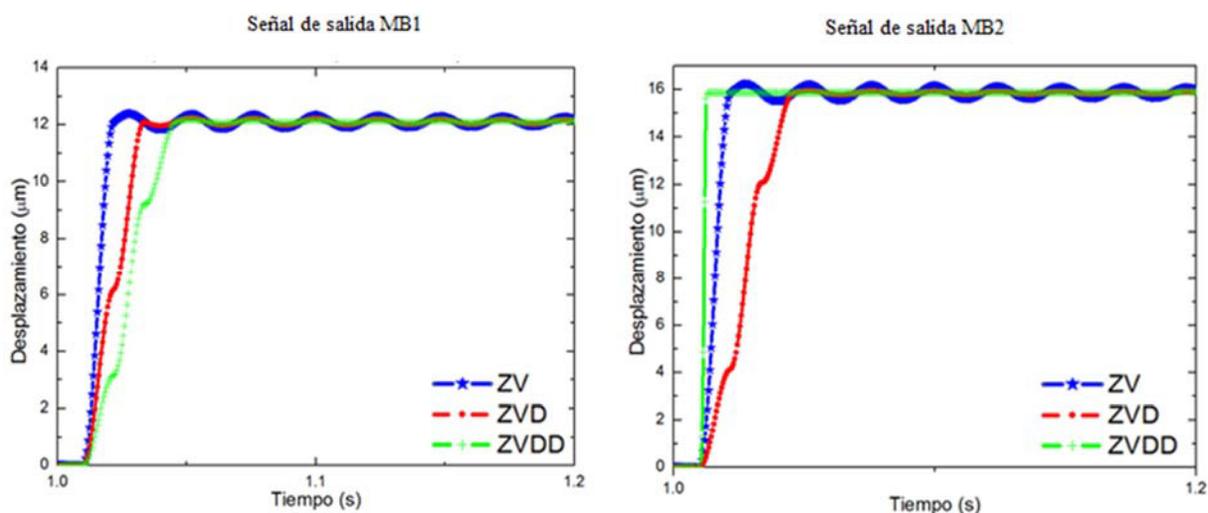


Figura 5.13: Curvas de desplazamiento del MB1 y el MB2 al aplicar las tres técnicas del sistema de control *IS*.

Tabla 5.6: Datos de tiempo y desplazamiento obtenidos una vez aplicadas las técnicas de control ZV, ZVD y ZVDD.

Técnica <i>IS</i>	Datos del modelo MB1				Datos del modelo MB2			
	D_M (μm)	T_R (ms)	T_A (ms)	D_F (μm)	D_M (μm)	T_R (ms)	T_A (ms)	D_F (μm)
ZV	12.23	27	51	12.11	16.22	17.8	19	15.07
ZVD	12.24	30	34	12.11	15.94	41	44	15.07
ZVDD	12.18	40	45	12.11	15.9	12	13	15.07

Así, en este capítulo, se evaluó el comportamiento (desplazamiento) de dos microactuadores bicapa al ser accionados por un campo magnético estático (escalón). La cantidad de material híbrido magnético PVB/ Fe_2O_3 que compone

cada microactuador es suficiente para transferir su movimiento a la película de cobre. El desplazamiento del MB1 fue de 12.30 μm y el de MB2 fue de 15.81 μm , aplicando un campo magnético de 14.8 Oe. El comportamiento subamortiguado de los MB ha sido regulado satisfactoriamente al utilizar el sistema de control *Input Shaping*. Se utilizaron las técnicas ZV, ZVD y ZVDD. En MB1 se observó que la técnica más conveniente a utilizar es ZVD debido a que presenta menor T_R y T_A , comparada con la técnica ZV; además, llega a su T_A al alcanzar su máximo en la curva. De tal manera, no es necesario utilizar la técnica ZVDD si se obtiene un menor tiempo respuesta T_R y tiempo de asentamiento T_A al utilizar la técnica ZVD. En MB2, la técnica más conveniente a utilizar es ZVDD dado que es la que presentó menor T_R y T_A al compararse con ZV y ZVD.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

El material híbrido magnético utilizado en esta tesis resulta de un proceso de síntesis de coprecipitación química en dos etapas, el cual permite la preparación *in situ* de nanopartículas magnéticas Fe_2O_3 embebidas en una matriz polimérica de PVB.

Se realizó la caracterización morfológica y magnética de este material. Por medio de TEM, se observaron aglomerados de nanopartículas y nanopartículas dispersas en la matriz de PVB con un tamaño característico de 3.3 nm. En la caracterización magnética se determinó la magnetización en función de un campo magnético externo, FC, ZFC, y termorremanencia. Se corroboró que este material tiene propiedades superparamagnéticas a temperatura ambiente, acorde a lo encontrado en la literatura para nanopartículas de óxido de hierro con esas dimensiones.

El PVB/ Fe_2O_3 se utilizó en forma de película delgada (~60 μm de espesor) para fabricar dos tipos de microactuadores en configuración de cantiléver. El primer tipo es una película delgada de este material en forma rectangular, y el segundo tipo son dos microactuadores bicapa (MB1 y MB2) compuestos por una película flexible de cobre diamagnético en forma rectangular y el material híbrido magnético adherido a la punta, Cu+PVB/ Fe_2O_3 .

El comportamiento del primer tipo de microactuador fue evaluado en función de campos magnéticos estáticos. Se observó una respuesta oscilatoria subamortiguada en el tiempo la cual se relaciona con la orientación de los dipolos magnéticos en las nanopartículas de Fe_2O_3 hacia el campo magnético aplicado, en conjunto con la viscoelasticidad del PVB y su geometría en cantiléver. Se obtuvo un desplazamiento máximo de 184 μm al aplicar un escalón de 0 a 478.5 Oe.

El mismo microactuador fue evaluado en función de campos magnéticos cuasi-estáticos (escalera); el desplazamiento máximo fue de 365 μm al aplicar 605.7 Oe. De este experimento cuasi-estático se dedujo que es posible controlar el desplazamiento del microactuador en función del campo magnético aplicado en forma de escalera ascendente/descendente.

El segundo tipo de microactuadores, MB1 y MB2, se evaluaron únicamente en función de campos magnéticos estáticos. Los desplazamientos finales de MB1 y de MB2 fueron de 12.3 μm y de 15.81 μm , respectivamente, en función de un campo magnético de 14.8 Oe. También se observó una respuesta oscilatoria subamortiguada en el tiempo, la cual se representó con un modelo matemático de segundo orden en MATLAB®. Se le aplicó un sistema de control *Input Shaping*, en Simulink, que permite regular las oscilaciones en las respuestas de estos microactuadores. En el sistema de control se aplicaron las técnicas, ZV, ZVD y ZVDD, las cuales disminuyeron las oscilaciones en las respuestas considerablemente. La técnica ZVD es la técnica preferible en este sistema debido a que las oscilaciones disminuyen en gran proporción y se alcanza la estabilidad en T_A al llegar a su máximo en la curva.

Se demostró que la película híbrida magnética de PVB/ Fe_2O_3 , puede desempeñar la función de un microactuador magnético funcional; además, esta aplicación permite utilizar un sistema de control *IS* que regula su respuesta mecánica.

Como trabajo a futuro, se propone aplicar y mejorar el sistema de control *IS* a un microactuador basado en una película híbrida magnética de PVB/ Fe_2O_3 . A su vez, la aplicación de este tipo de microactuadores híbridos magnéticos podría ser en dispositivos mecatrónicos para cirugía robótica asistida magnéticamente, como catéteres, cápsulas endoscópicas y microrobots liberadores de fármacos. También sería interesante estudiar las posibilidades de este material como microrobot nadador en aplicaciones biomédicas [55-63].

REFERENCIAS

1. G. Kickelbick, 2007, Introduction to hybrid materials en *Hybrid Materials: Synthesis, Characterization and Applications*, 1, 1-48.
2. G. A. Abraham, M. F. González, T. R. Cuadrado, 2001, Hacia nuevos biomateriales: aportes desde el campo de la química macromolecular en *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, 2, 22-32.
3. A. Echavarría, 2003, Una perspectiva de los biomateriales vista desde un diseño específico: la prótesis total de cadera en *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 30, 95-108.
4. D. Klee, H. Höcker, 1999, Polymers for Biomedical Applications: Improvement of the Interface Compatibility en *Advances in Polymer Science: Biomedical Applications/Polymer Blends*, 149, 4-53.
5. C. W. Hoogendam, A. de Keizer, M. A. Cohen Stuart, B. H. Bijsterbosch, 1998, Adsorption mechanisms of carboxymethyl cellulose en *Mineral Surfaces*, 14, 3825-3839.
6. S. Kamila, 2013, Introduction, classification and applications of smart materials: An overview en *American Journal of Applied Sciences*, 10, 876-880.
7. M. R. Jolly, J. W. Bender, J. D. Carlson, 1999, Properties and applications of commercial magnetorheological fluids en *Journal of Intelligent Material System and Structures*, 10, 5-13.
8. M. Kciuk, R. Turczyn, 2006, Properties and application of magnetorheological fluids en *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 18, 127-130.
9. H. Brand, P. Martinoty, H. Pleiner, 2012, Physical properties of magnetic gel en *Cheminform*, 43, 530-558.
10. W. H. Li, X. Z. Zhang, H. Y. Du, 2013, Magnetorheological elastomers and their applications en *Advances in Elastomers I: Blends and Interpenetrating Networks*, 1, 357- 374.
11. J. G. Puente Córdova, 2013, Síntesis y caracterización de un material híbrido de matriz polimérica de polivinil butiral, Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
12. J. W. Gooch, 2011, PVB en *Encyclopedic Dictionary of Polymers*, 2, 482.
13. X. Zhang, H. Hao, Y. Shi, J. Cui, 2015, The mechanical properties of polyvinyl butyral (PVB) at high strain rate en *Construction and Building Materials*, 93, 404-4015.
14. F. Yener, B. Yalcinkaya, 2014, Electrospinning of polyvinyl butyral in different solvents en *E-Polymers*, 13, 1-15.
15. Z. Yildiz, H. A. Onen, A. Gungor, Y. Wang, K. Jacob, 2017, Synthesis and application of dual-curable PVB based adhesive formulations for cord/rubber applications en *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31, 1900-1911.
16. A. Ali, H. Zafar, M. Zia, I. Haq, A. R. Phull, J. S. Ali, A. Hussain, 2016, Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles en *Nanotechnology, Science and Applications*, 9, 49-67.
17. O. V. Salata, 2004, Applications of nanoparticles in biology and medicine en *Journal of Nanobiotechnology*, 2, 1-6.
18. M. Mahmoudi, S. Sant, B. Wang, S. Laurente, T. Sen, 2011, Superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs): development, surface modification and applications in chemotherapy en *Advanced Drug Delivery Reviews*, 63, 24-46.
19. S. Laurent, A. A. Saei, S. Behzadi, A. Panahifar, M. Mahmoudi, 2014, Superparamagnetic iron oxide nanoparticles for delivery of therapeutic agents: opportunities and challenges en *Expert Opinion on Drug Delivery*, 11, 1449-1470.

20. F. Xiong, H. Wang, Y. Feng, Y. Li, X. Hua, X. Pang, S. Zhang, L. Song, Y. Zhang, N. Gu, 2015, Cardioprotective activity of iron oxide nanoparticles en *Nature: Scientific Reports*, 5, 8579.
21. S. Y. Liu, L. Lian, J. Pan, J. G. Lu, H. P. D. Shieh, 2018, Highly sensitive and optically transparent resistive pressure sensors based on a graphene/polyaniline-embedded PVB film en *IEEE Transactions on Electron Devices*, 65, 1939-1945.
22. G. A. Yaxue, L. G. Fang, 2017, Thermal and electrical characterization of polymer/ceramic composites with polyvinyl butyral matrix en *Materials Chemistry and Physics*, 205, 401-415.
23. L. He, Y. Zhao, J. Wang, P. Wang, H. Xie, C. Zhang, 2018, Synthesis and enhanced microwave absorption properties of BaM-P/BaM-T/PVB ternary composite with ordered inter-filled structure en *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 7730-7738.
24. J. Sungwoo, K. Youngmin, J. Byeong Kwon, K. Jong Woong, 2018, Extremely flexible, transparent, and strain-sensitive electroluminescent device based on ZnS:Cu-polyvinyl butyral composite and silver nanowires en *Applied Surface Science*, 429, 144-150.
25. X. Huang, Y. Lin, G. Fang, 2018, Thermal properties of polyvinyl butyral/graphene composites as encapsulation materials for solar cells en *Solar Energy*, 161, 187-193.
26. U. Siemann. 2005. Solvent cast technology – a versatile tool for thin film production en *Progress in Colloid and Polymer Science*, 130, 1-14.
27. J. G. Castaño, C. Arroyaveve, 1998, La funcionalidad de los óxidos de hierro en *Revista de Metalurgia*, 34, 274-280.
28. B. C. López Walle, E. M. Reyes Melo, 2013, Characterization and dynamics of polymer microactuators en *Smart Materials-based Actuators at the Micro/Nano-Scale: Characterization, Control, and Applications*, 1, 15-39.
29. F. Suárez Sandoval, B. C. López Walle, 2013, Microinterruptor magnético con material híbrido en *Ingenierías*, XVI, 27 - 34.
30. S. Yaol, S. Gotol, J. Sakurai, T. Shinshi, M. Uehara, H. Yamamoto, 2009, SiN-based micro cantilever actuators using NdFeB/Ta permanent magnetic thin film en *Proceedings of 4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 1, 416-419.
31. M. Khoo, C. Liu, 2001, Micro magnetic silicone elastomer membrane actuator en *Sensors and Actuators A*, 89, 259-266.
32. C. Yokota, A. Yamazaki, M. Sendoh; S. Agatsuma, K. Ishiyama, K. Arai, 2007, Study of a cantilevered actuator driven by magnetostriction in low magnetic field en *IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG)*, 678.
33. L. K. Lagorce, O. Brand, 1999, Magnetic microactuators based on polymer magnets en *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, 8, 2-9.
34. A. R. Muxworthy, W. Williams, 2008, Critical superparamagnetic/single-domain grain sizes in interacting magnetite particles: implications for magnetosome crystals en *Journal of the Royal Society Interface*, 6, 1207-1212.
35. J. F. Luna Martínez, 2011, Síntesis y caracterización de materiales nanoestructurados a base de una matriz polimérica de carboximetilcelulosa, Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
36. R. E. Hummel, 2011, Magnetic phenomena and their interpretation—classical approach en *Electronic Properties of Materials*, 4, 374-368.
37. E. X. Wu, H. Tang, J. H. Jensen, 2004, Applications of ultrasmall superparamagnetic iron oxide contrast agents in the MR study of animal models en *NMR in Biomedicine*, 17, 478-483.
38. V. Marghussian, 2015, Magnetic properties of nano-glass ceramics en *Nano-Glass Ceramics: Processing, Properties and Applications*, 1, 182-190.

39. S. P. Gubin, Y. A. Koksharov, G. B. Khomutov, G. Y. Yurkov, 2005, Magnetic nanoparticles: preparation, structure and properties en *Russian Chemical Reviews*, 74, 539–574.
40. T. L. Schmitz, K. S. Smith, 2002, *Mechanical vibrations: modeling and measurement*, Springer, 1, 50-60.
41. D. Feliu Talegon, V. Feliu Batlle, C. F. Castillo Berrio, 2016, Control de una antena sensora mediante la técnica de input shaping no lineal en *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 13, 162-73.
42. S. Ayasun, G. Karbeyaz, 2007, DC motor speed control methods using MATLAB/Simulink and their integration into undergraduate electric machinery courses en *Computer Applications in Engineering Education*, 15, 347-354.
43. T. Hirano, 2003, Vibration control of a microactuator for servo application by active damping en *The Japan Society of Applied Physics*, 42, 1486-1490.
44. D. Habineza, M. Rakotondrabe, Y. L. Gorrec, 2015, Simultaneous suppression of badly-damped vibrations and cross-couplings in a 2-DoF piezoelectric actuator, by using feedforward standard H-inf approach en *SPIE - Sensing Technology + Applications; Sensors for Next Generation Robots Conference*.
45. G. Kovacs, P. Lochmatter, M. Wissler, 2007, An arm-wrestling robot driven by dielectric elastomer actuators en *Smart Materials and Structures*, 16, S306.
46. F. Carpi, D. de Rossi, 2006, Biomimetic dielectric elastomer actuators en *International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 1, 1073-1078.
47. A. de Luca, W. Book, 2008, Robots with flexible elements en *Springer Handbook of Robotics*, 1, 287-319.
48. T. Solatges, S. Rubrecht, M. Rognant, P. Bidaud, 2017, Adaptive input shaper design for flexible robot manipulators en *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 17, 444-449.
49. M. Bodson, 1996, Experimental comparison of two input shaping methods for the control of resonant systems en *13th Triennial World Congress*, 351, 946-949.
50. P. Benes, M. Valasek, 2008, Input shaping control with reentry commands of prescribed duration en *Applied and Computational Mechanics*, 2, 227-234.
51. T. Vyhlídal; M. Hromčík; V. Kučera, M. Anderle, 2016, Feedback architectures with zero-vibration signal shapers en *IEEE Transactions on Automatic Control*, 61, 2049-2064.
52. C. Çağlar, Y. Hakan, B. Hasan, 2016, A review of command shaping techniques for elimination of residual vibrations en flexible-joint manipulators en *Journal of Vibroengineering*, 18, 2947-2958.
53. M. T. Ha, C. G. Kang, 2013, Experimental analysis of natural frequency error to residual vibration in ZV, ZVD, and ZVDD shapers en *10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, 10, 195-199.
54. H. Q. T. Ngo, Q. C. Nguyen, W. H. Kim, 2015, Implementation of input shaping control to reduce residual vibration in industrial network motion system en *15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 1693-1698.
55. Y. Kim, H. Yuk, R. Zhao, S. A. Chester, X. Zhao, 2018, Printing ferromagnetic domains for untethered fast transforming soft materials en *Nature*. 558, 274-279.
56. I. S. M. Khalil, A. F. Tabak, A. Klingner, M. Sitti, 2016, Magnetic propulsion of robotic sperms at low-Reynolds number en *Applied Physics Letters*, 109, 033701.
57. U. K. Cheang, K. Lee, A. A. Julius, M. J. Kim, 2014, Multiple-robot drug delivery strategy through coordinated teams of microswimmers en *Applied Physics Letters*, 105, 083705.

58. I. S. M. Khalil, A. F. Tabak, Y. Hamed, M. Tawakol, A. Klingner, N. E. Gohary, B. Mizaikoff, M. Sitti, 2018, Independent actuation of two-tailed microrobots en IEEE Robotics and Automation Letters, 3, 1703-1710.
59. N. Kim, S. Lee, W. Lee, G. Jang, 2018, Development of a magnetic catheter with rotating multi-magnets to achieve unclogging motions with enhanced steering capability en AIP Advances, 8, 056708.
60. P. T. Bahnamiri, S. B. Khoulejani, 2017, Biodegradable microrobots for targeting cell delivery en Medical Hypotheses, 102, 56-60.
61. H. Nourmohammadi, J. Keighobadi, 2014, Design, modelling and control of a manoeuvrable swimming micro-robot en Proceedings of the 19th World Congress the International Federation of Automatic Control Cape Town, South Africa, 47, 2673-2678.
62. P. R. Slawinski, K. L. Obstein, P. Valdastri, 2015, Emerging issues and future developments in capsule endoscopy en Techniques in Gastrointestinal Endoscopy, 17, 40- 46.
63. A. W. Mahoney, J. J. Abbott, 2015, Five-degree-of-freedom manipulation of an untethered magnetic device in fluid using a single permanent magnet with application in stomach capsule endoscopy en International Journal of Robotics Research, 35, 129–147.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama del proceso de síntesis de las películas de PVB/Fe ₂ O ₃ . Etapa I: síntesis del material híbrido precursor. Etapa II: tratamiento químico del material precursor, a fin de producir el material híbrido magnético.	15
Figura 2.2: Análisis cualitativo del comportamiento magnético de una película delgada de PVB/Fe ₂ O ₃ (~60 μm de espesor), sin campo magnético aplicado (izquierda) y con campo magnético aplicado (derecha).	16
Figura 2.3: Configuración de un microactuador compuesto por un substrato de Si, sobre el cual se apoya un cantiléver de SiN y, en su extremo, una película delgada multicapa de imán permanente de NdFeB/Ta [30].	17
Figura 2.4: Representación del principio de actuación del microactuador magnético compuesto por una membrana de PDMS y elementos micromagnéticos de Ni ₈₀ Fe ₂₀ [31].	18
Figura 2.5: Microactuador bicapa en cantiléver de FeSiB y poliamida: a) sin campo magnético aplicado; b) con campo magnético [32].	19
Figura 2.6: Vista esquemática del microactuador en cantiléver compuesto de polvo de ferrita embebido en una resina epoxi [33].	19
Figura 3.1: Imagen de TEM en campo oscuro del material híbrido magnético PVB/Fe ₂ O ₃ . El óxido de hierro se aprecia en tonos claros.	22
Figura 3.2: Imagen de HRTEM en campo claro: a) nanopartículas de PVB/Fe ₂ O ₃ embebidas en la matriz polimérica de PVB (escala: 5 nm), b) acercamiento a una región de la muestra (escala: 1 nm) para observar los efectos del proceso de cristalización de las nanopartículas.	23
Figura 3.3: Histograma de frecuencias del conteo de 41 nanopartículas de Fe ₂ O ₃ .	23
Figura 3.4: Dipolo magnético.	25
Figura 3.5: Curvas de magnetización en función del campo magnético aplicado para diferentes tipos de materiales: ferromagnético (línea negra), superparamagnético (línea azul), diamagnético (línea verde) y paramagnético (línea naranja).	26
Figura 3.6: Momentos magnéticos para un material diamagnético: a) sin campo magnético externo aplicado, b) con campo magnético externo aplicado, c) al retirar el campo magnético.	26
Figura 3.7: Momentos magnéticos en un material paramagnético: a) sin campo magnético externo aplicado, b) alineados con el vector del campo magnético externo aplicado, c) al retirar el campo magnético.	27
Figura 3.8: Momentos magnéticos para un material ferromagnético: a) multidominios magnéticos sin campo magnético externo aplicado, b) orientación de los dominios magnéticos en dirección del campo magnético externo aplicado, c) los momentos magnéticos permanecen orientados al retirar el campo magnético.	28
Figura 3.9: a) Multidominio magnético, b) monodominio magnético.	29

Figura 3.10: Representación de dipolos magnéticos con sus momentos magnéticos para un material superparamagnético: a) dipolos magnéticos sin campo magnético externo aplicado, b) orientación de los dipolos magnéticos en dirección del campo magnético externo aplicado, c) dipolos magnéticos desorientados al retirar el campo magnético.	30
Figura 3.11: Curva de magnetización en función del campo magnético aplicado para el PVB/Fe ₂ O ₃ , realizada a 300 K. El inserto 1 muestra que la curva no se sobrepone.	31
Figura 3.12: Curva de magnetización en función de campo magnético aplicado para el PVB/Fe ₂ O ₃ , realizada a 1.8 K.	32
Figura 3.13: Curvas de magnetización de enfriamiento con campo cero (<i>Zero Field Cooling, ZFC</i>) y enfriamiento con campo aplicado (<i>Field Cooling, FC</i>), para el PVB/Fe ₂ O ₃ .	33
Figura 3.14: Curva de termorremanencia (magnetización remanente en función de la temperatura) para el PVB/Fe ₂ O ₃ .	34
Figura 4.1: Microactuador a base de material híbrido magnético PVB/Fe ₂ O ₃ .	36
Figura 4.2: Esquema del montaje experimental para medir los campos magnéticos del electroimán, en función del voltaje y la corriente eléctrica aplicados.	37
Figura 4.3: Representación del voltaje aplicado al electroimán en función del tiempo.	38
Figura 4.4: Campos magnéticos en función de la corriente eléctrica, considerando una distancia de 1 mm y 2 mm entre el electroimán y el gaussímetro.	39
Figura 4.5: Esquema del montaje experimental para el estudio del comportamiento del microactuador en función del campo magnético aplicado.	40
Figura 4.6: Montaje experimental para el estudio del comportamiento estático y cuasi-estático del microactuador: a) vista general, b) acercamiento del microactuador y el electroimán a una distancia $d = 1$ mm.	40
Figura 4.7: Desplazamiento del microactuador en función del tiempo (línea negra), aplicando un campo magnético estático tipo escalón (línea roja): a) de 0 a 9 V (0 a 30.8 A, 0 a 294.7 Oe), b) de 0 a 12 V (0 a 40.0 A, 0 a 382.8 Oe), c) de 0 a 15 V (0 a 50.0 A, 0 a 478.5 Oe).	42
Figura 4.8: Parámetros del comportamiento del microactuador. D_M : desplazamiento máximo; T_R : tiempo respuesta; T_A : tiempo de asentamiento y D_F : desplazamiento final.	43
Figura 4.9: Desplazamiento del microactuador en función de campos magnéticos cuasi-estáticos aplicados a una distancia $d = 1$ mm y $d = 2$ mm entre el electroimán y el extremo libre del microactuador.	47
Figura 5.1: Microactuadores bicapa compuestos de película de cobre flexible con punta de material híbrido magnético (Cu+PVB/Fe ₂ O ₃).	51

Figura 5.2: Montaje experimental para caracterizar el electroimán: a) vista general, b) representación donde se ilustra el eje z.	52
Figura 5.3: Magnitud del campo magnético en función de la distancia de separación del electroimán.	53
Figura 5.4: Campo magnético en forma de escalón utilizado en este experimento.	54
Figura 5.5: Configuración del experimento utilizado para medir el desplazamiento de los microactuadores bicapa: a) acercamiento sobre el microactuador y el sensor láser, b) vista general.	55
Figura 5.6: Desplazamiento (en negro) y campo magnético (en rojo) en función del tiempo para los microactuadores MB1 y MB2.	56
Figura 5.7: Sistema masa-resorte-amortiguador que reproduce el comportamiento subamortiguado de los microactuadores.	57
Figura 5.8: Desplazamientos experimentales (en negro) y modelados (en verde), y campo magnético (en rojo) para MB1 y MB2.	60
Figura 5.9: Secuencia de funcionamiento de un <i>IS</i> con dos impulsos: a) señales de entrada y salida originales, escalón unitario (línea sólida) y respuesta oscilatoria (línea punteada), respectivamente; b) aplicación del <i>IS</i> (dos impulsos desfasados de un tiempo Δ); c) señales de control (línea sólida) y salida (línea punteada) del sistema una vez aplicado el <i>IS</i> .	62
Figura 5.10: Impulsos en un sistema de control <i>IS</i> con las técnicas: a) ZV, b) ZVD, c) ZVDD.	63
Figura 5.11: Proceso del sistema de control <i>IS</i> utilizando las técnicas ZV, ZVD y ZVDD.	64
Figura 5.12: Señales de control para las tres técnicas de <i>IS</i> (ZV, ZVD y ZVDD) aplicados a los dos microactuadores bicapa.	64
Figura 5.13: Curvas de desplazamiento del MB1 y el MB2 al aplicar las tres técnicas del sistema de control <i>IS</i> .	65
Figura A.1: Paso 1 del <i>System Identification Toolbox</i> de Matlab, definición de datos experimentales.	78
Figura A.2: Paso 2 del <i>System Identification Toolbox</i> de Matlab, aplicación del escalón unitario.	78
Figura A.3: Paso 3 del <i>System Identification Toolbox</i> de Matlab, obtención de la gráfica y la ventana <i>System Identification</i> .	79
Figura A.4: a) Gráfica del desplazamiento del microactuador en función del tiempo; b) pantalla del <i>System Identification Toolbox</i> .	79
Figura A.5: Ventanas de <i>System Identification</i> e <i>Import Data</i> para construir el modelo que describe el comportamiento del microactuador.	80

Figura A.6: 1) <i>Import Data</i> relacionando los datos con el código en 2).	80
Figura A.7: Importación de datos al <i>System Identification</i> .	81
Figura A.8: Proceso para obtener el modelo que representa el comportamiento del microactuador con su respectiva función de transferencia.	81
Figura A.9: Identificación de Kp , ζ y $T\omega$ del modelo en la ventana <i>Process Models</i> y transferencia del mismo al <i>System Identification</i> .	82
Figura A.10: Ventana del <i>System Identification</i> para obtener la salida del modelo (círculo verde) y la ventana <i>Model Output</i> mostrando la respuesta experimental (en negro) y la modelada (en azul).	82
Figura A.11: Ventana <i>System Identification</i> señalando donde dar doble clic para obtener el <i>Data/model info</i> MB1.	83
Figura B.1: Código del sistema de control <i>Input shaping</i> en SIMULINK.	84
Figura B.2: Sistema de control <i>Input shaping</i> en SIMULINK.	85
Figura B.3: Señales de salida obtenidas del sistema de control <i>Input Shaping</i> con las técnicas ZV, ZVD y ZVDD.	85

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1: Resultados experimentales de las mediciones de voltaje, corriente y campos magnéticos a 1 mm y 2 mm de distancia entre el gaussímetro y el electroimán.	38
Tabla 4.2: Voltaje, campo magnético máximo calculado, desplazamiento máximo D_M , tiempo respuesta T_R , tiempo de asentamiento T_A y desplazamiento final D_F en función de campos magnéticos estáticos.	44
Tabla 4.3: Campos magnéticos calculados y desplazamientos finales medidos considerando 1 mm y 2 mm de distancia entre el electroimán y el extremo libre del microactuador.	47
Tabla 4.4: Comparativo del desplazamiento D_F del microactuador de PVB/ Fe_2O_3 en función de campos magnéticos estáticos y campos magnéticos cuasi-estáticos para $d = 1$ mm.	48
Tabla 5.1: Dimensiones de los microactuadores bicapa.	52
Tabla 5.2: Desplazamiento máximo D_M , tiempo respuesta T_R , desplazamiento final D_F y tiempo de asentamiento T_A , obtenidos de la figura 5.6.	56
Tabla 5.3: Variables utilizadas en el modelo masa-resorte-amortiguador y el sistema de control.	58
Tabla 5.4: Parámetros experimentales y modelados, y porcentajes de error entre ellos, para MB1 y MB2.	60
Tabla 5.5: Parámetros Kp , $T\omega$ y ζ de la ecuación (5.9) para los microactuadores MB1 y MB2.	60
Tabla 5.6: Datos de tiempo y desplazamiento obtenidos de las técnicas de control ZV, ZVD y ZVDD.	65

ANEXO A

A.1 Instrucciones y código para la aplicación del *System Identification Toolbox* de MATLAB.

En un archivo nuevo de MATLAB se diseña el código a utilizar.

Paso 1: Se definen los datos del experimento (ver figura A.1).

t = tiempo.

d = valor del desplazamiento experimental del microactuador.

x_red = selección del rango de datos de t.

y_red = selección del rango de datos de d.

te = orden de datos de x_red.

y_mes = y_red: se renombra la variable para especificar que se trata de los valores experimentales de desplazamiento.

```
%PASO 1
data = csvread('c1.csv')
t = data(:,2)
d = data(:,3)
hold off
x_red = t(3328:6328)-0.33;
y_red = d(3328:6328)+79.34;
te = x_red-3;
y_mes = y_red;
```

Figura A.1: Paso 1 del *System Identification Toolbox* de Matlab, definición de datos experimentales.

Paso 2: Se aplica el escalón unitario (ver figura A.2).

u = escalón unitario.

i = magnitud del escalón (sea, 1) en el tiempo (te) correspondiente de este experimento.

```
%PASO 2
u=[];
for i=1:length(te)
    if i<1004
        u(i)=0;
    else
        u(i)=1;
    end
end
u=u';
```

Figura A.2: Paso 2 del *System Identification Toolbox* de Matlab, aplicación del escalón unitario.

Paso 3: Se realiza la gráfica del experimento (desplazamiento en función del tiempo al aplicar un campo magnético de escalón unitario) y se llama al *System Identification Toolbox* (ver figura A.3).

plot = gráfica del experimento.

ident = System Identification Toolbox.

```
%PASO 3
plot (te, ymes, 'k');
ident
```

Figura A.3: Paso 3 del *System Identification Toolbox* de Matlab, obtención de la gráfica y la ventana *System Identification*.

La figura A.4 a) muestra la gráfica experimental y la figura A.4 b) muestra la pantalla del *System Identification*.

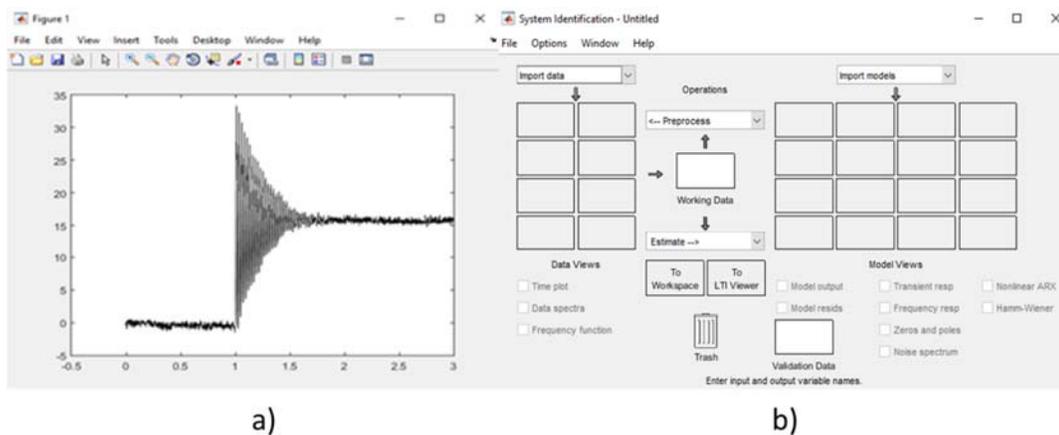


Figura A.4: a) Gráfica del desplazamiento del microactuador en función del tiempo; b) pantalla del *System Identification Toolbox*.

Paso 4: Se importan los datos experimentales al *System Identification* seleccionando *Time domain data*. Al dar clic, aparece la ventana *Import Data*. En *Workspace Variable* se importan los datos de entrada (*input*) y salida (*output*) del modelo. En *Data Information* se introduce el nombre del sistema (*Data name*), el tiempo de inicio (*Starting time*) y el número de instantes de muestreo (*Sample time*), ver figura A.5.

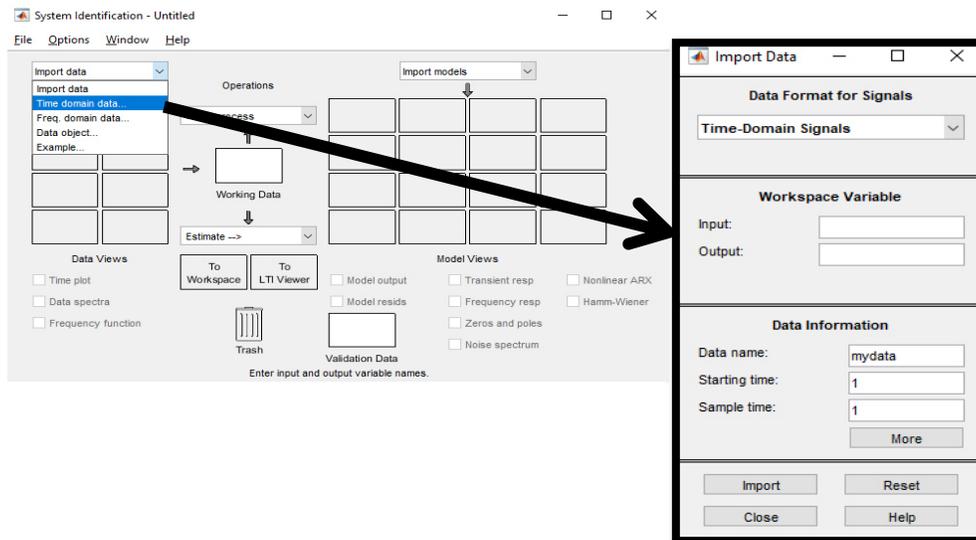


Figura A.5: Ventanas de *System Identification* e *Import Data* para construir el modelo que describe el comportamiento del microactuador.

Paso 5: Se introducen los datos del modelo como se muestra en la figura A.6.

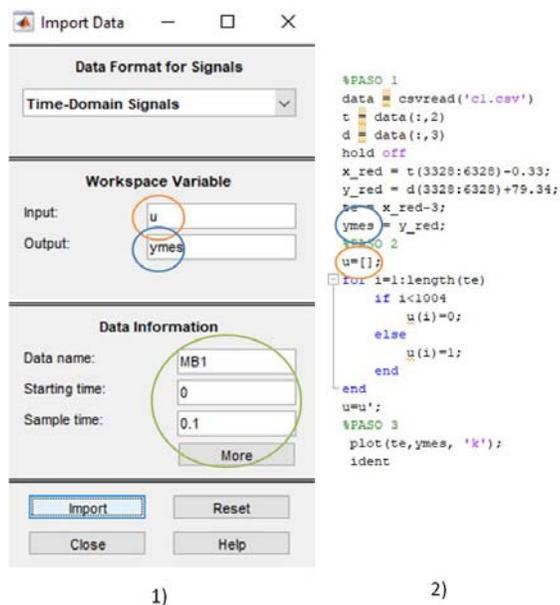


Figura A.6: 1) *Import Data* relacionando los datos con el código en 2).

Paso 6: Se da clic en *Import* y se importan los datos al *System Identification* como se muestra en la figura A.7.

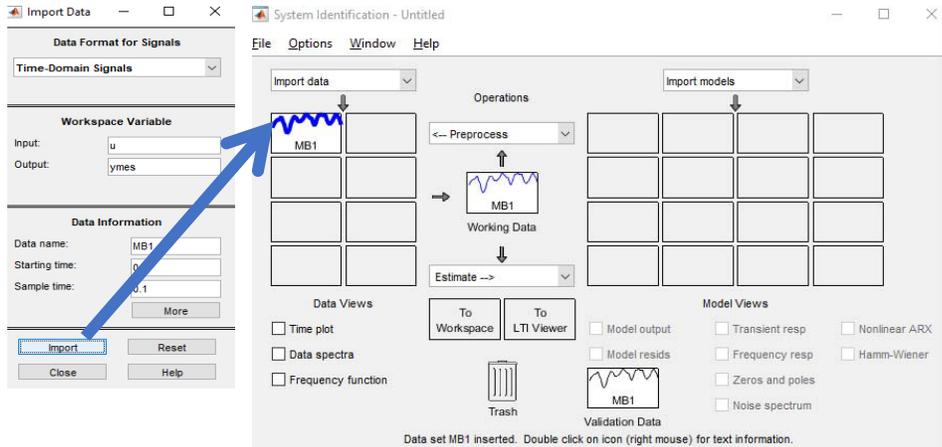


Figura A.7: Importación de datos al *System Identification*.

Paso 7: En la ventana *System Identification* se selecciona *Estimate ---> Process Models*. Al dar clic aquí, se abre la ventana *Process Models* donde se utiliza la función de transferencia $\frac{K_p}{T_\omega^2 s^2 + 2\zeta T_\omega s + 1}$ para procesar los datos experimentales (ver figura A.8). Esta herramienta se encarga de resolver la función de transferencia en el espacio temporal y así calcular los parámetros que definen el modelo del comportamiento experimental del microactuador.

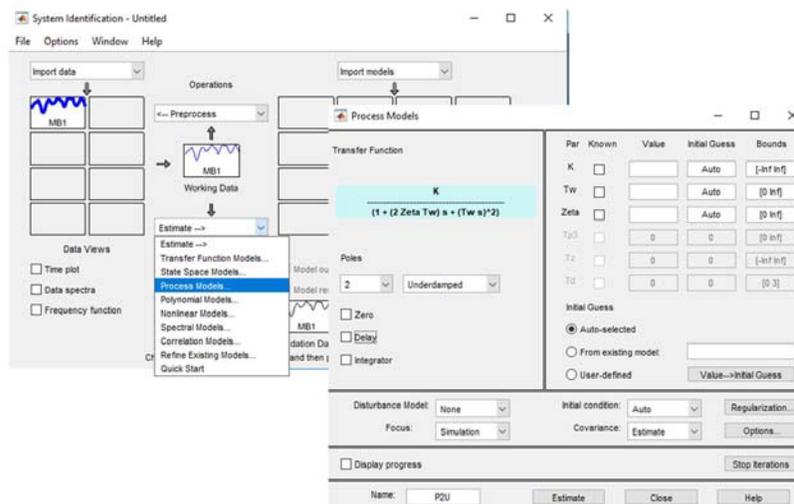


Figura A.8: Proceso para obtener el modelo que representa el comportamiento del microactuador con su respectiva función de transferencia.

Paso 8: Se obtienen los parámetros K_p , ζ y T_ω que permiten modelar los datos experimentales previamente cargados, dando clic en *Estimate* en la ventana

Process Models. Al procesar los datos, el modelo se transfiere al *System Identification* como se puede ver en la figura A.9 (círculo rojo).

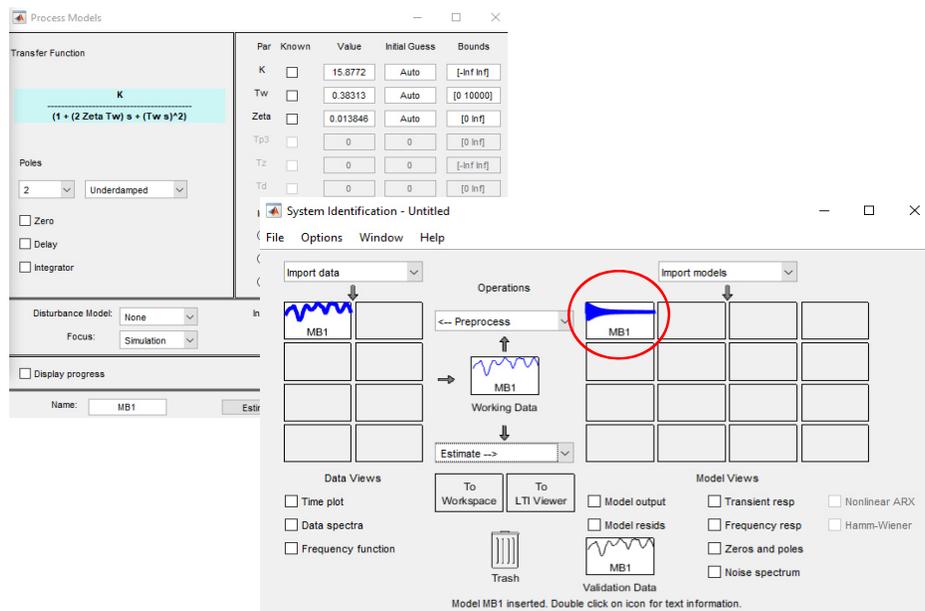


Figura A.9: Identificación de K_p , ζ y T_w del modelo en la ventana *Process Models* y transferencia del mismo al *System Identification*.

Paso 9: Al dar clic en *Model output* (círculo verde) en la ventana del *System Identification* emerge la ventana *Model Output* en la cual se muestran los datos experimentales (negro) y los modelados (azul) con un ajuste del 93.22% (ver figura A.10).

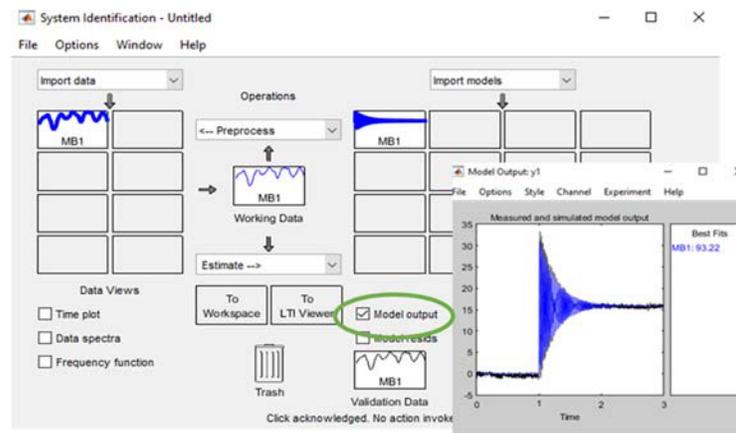


Figura A.10: Ventana del *System Identification* para obtener la salida del modelo (círculo verde) y la ventana *Model Output* mostrando la respuesta experimental (en negro) y la modelada (en azul).

Paso 10: Al dar doble clic en la ventana *System Identification* (círculo negro en la figura A.11), se pueden observar los datos del modelo.

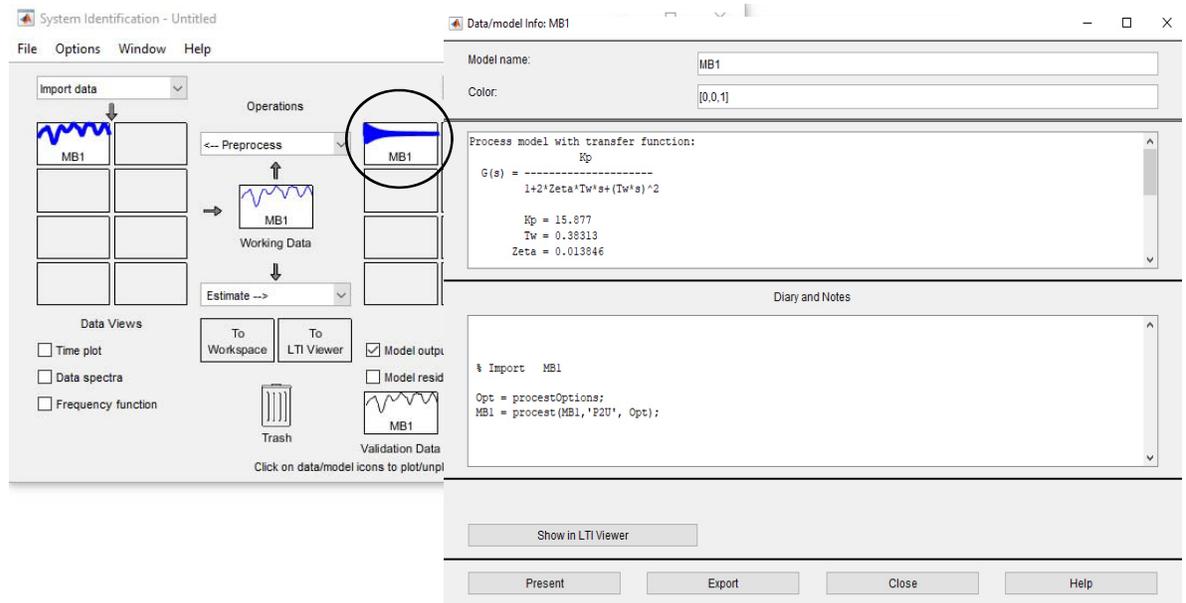


Figura A.11: Ventana *System Identification* señalando donde dar doble clic para obtener el *Data/model info MB1*.

ANEXO B

B.1 Instrucciones y código para la aplicación del sistema de control *Input Shaping*.

Paso 1: Se realiza el código con las variables obtenidas en el *System Identification Toolbox* del Anexo A y con las ecuaciones de las técnicas ZV, ZVD y ZVDD utilizadas en el *Input Shaping* (ver figura B.1).

```
% Parámetros del Input Shaping
kp = 15.87 % Ganancia.
z = 0.0138; % Coeficiente de rozamiento viscoso.
Tw = 0.38 % Inverso de la frecuencia natural.
w = 1/Tw % Frecuencia natural.
% Ecuaciones que componen el Input Shaping
K = exp(-z*pi/sqrt(1-z*z));
dT = pi/w/sqrt(1-z*z);
R = sqrt(1-z*z);
Wd=w*R;
% Técnica ZV
A21 = 1/(1+K);
A22 = K/(1+K);
% Técnica ZVD
D1 = 1+2*K+K*K;
A31 = 1/D1;
A32 = 2*K/D1;
A33 = K*K/D1;
% Técnica ZVDD
D2 = 1+3*K+3*K*K+K*K*K;
A41 = 1/D2;
A42 = 3*K/D2;
A43 = 3*K*K/D2;
A44 = K*K*K/D2;
```

Figura B.1: Código del sistema de control *Input shaping* en SIMULINK.

Paso 2: Se diseña el sistema de control en SIMULINK. La figura B.2 muestra la entrada, la salida, el sistema sin ser modificado y el sistema de control *Input Shaping* (cuadro verde). Este sistema permite ver todas las señales de salidas al mismo tiempo, como se aprecia en la figura B.3.

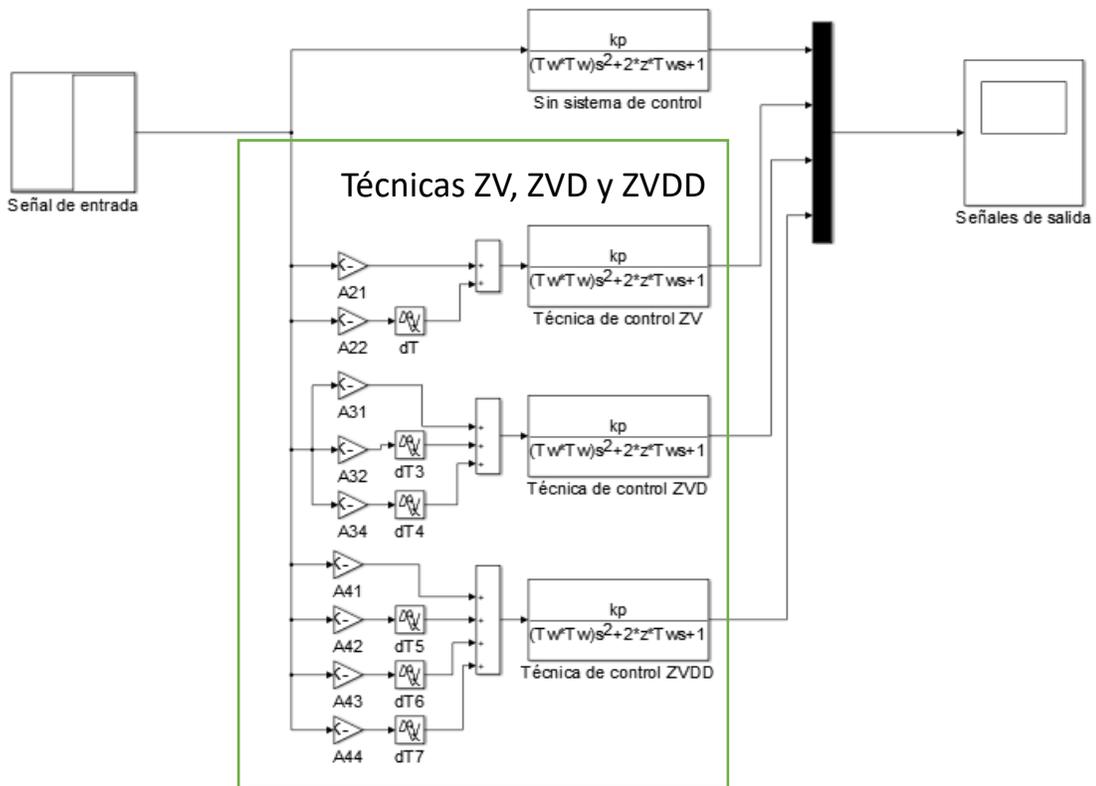


Figura B.2: Sistema de control *Input shaping* en SIMULINK.

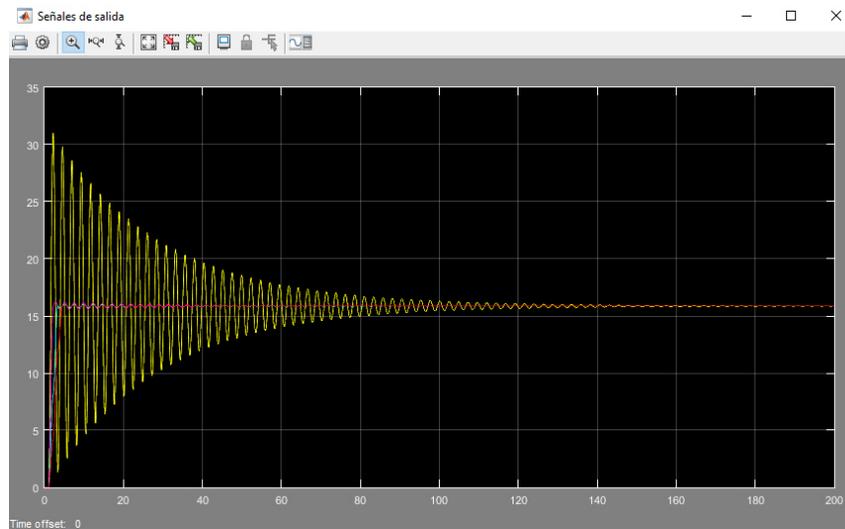


Figura B.3: Señales de salida obtenidas del sistema de control *Input Shaping* con las técnicas ZV, ZVD y ZVDD.