



**SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ**



# **INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL**

**INGENIERÍA MECÁNICA**

**PRESENTA:**

**ESDUARDO RAFAEL SILVESTRE DE LEON**

**NOMBRE DEL PROYECTO:**

**FABRICACIÓN DE UN MICROCLASIFICADOR A  
BASE DE MATERIAL HÍBRIDO MAGNÉTICO**

**PERIODO DE REALIZACIÓN:**

**AGOSTO-DICIEMBRE 2014**

# ÍNDICE

<b>1. Justificación</b>	<b>3</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>4</b>
<b>3. Problemas a resolver</b>	<b>4</b>
<b>4. Marco teórico</b>	<b>4</b>
4.1. Microactuadores	4
4.2. Polímeros	5
4.3. Materiales magnéticos	6
4.3.1. Materiales diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos	7
4.4. Materiales híbridos	8
4.4.1. Clasificación de los materiales híbridos	9
4.4.2. Los materiales híbridos en el desarrollo de los sistemas mecatrónica	12
4.4.3. La polifuncionalidad de los materiales híbridos	13
<b>5. Procedimiento y descripción de las actividades realizadas</b>	<b>17</b>
5.1. Síntesis de material híbrido magnético PVB/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17
5.2. Experimentación con la película obtenida	19
5.3. Diseño y construcción de los componentes del microclasificador	21
5.4. Prueba del funcionamiento del dispositivo microclasificador	21
<b>6. Resultados y discusión</b>	<b>22</b>
<b>7. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>32</b>
<b>8. Competencias desarrolladas y/o aplicadas</b>	<b>33</b>
<b>9. Referencias bibliográficas y virtuales</b>	<b>33</b>

## 1. Justificación

La clasificación por tamaño es el medio de separar o dividir materiales a granel, consistentes en una mezcla de partículas de diversos tamaños en dos o más fracciones de una determinada banda de dimensiones. En general, la separación se puede efectuar con base en el volumen, es decir, en base a las dimensiones geométricas de la partícula (Labahn y Kohlhaas, 1985).

La clasificación de partículas grandes no ofrece mayor dificultades, los problemas empiezan cuando el tamaño de partícula disminuye hasta el orden de los milímetros o micrómetros. Existen muchas aplicaciones donde este tipo de clasificación es un paso importante en la optimización del proceso, tales como productos para catálisis, pigmentos, cementos, polvos metálicos, entre otros.

Una de las aplicaciones del uso de clasificadores es en la industria farmacéutica, cuando se necesitan clasificar esferas de 1 mm de diámetro o menos que deben ir dentro de capsulas de algunas medicinas. Dentro de este tipo de usos de los clasificadores, una de las mayores desventajas es el tamaño de los equipos y por consiguiente, el gasto de energía.

Debido a lo anterior, se utilizara el conocimiento teórico y técnico aprendido durante la carrera de ingeniería mecánica para diseñar un dispositivo microclasificador haciendo uso de una película híbrida magnética, dicha película es usada debido a su flexibilidad y a sus propiedades magnéticas.

## **2. Objetivos**

- Análisis experimental de la película híbrida magnética.
- Utilizar la película híbrida magnética como un microactuador.
- Rediseñar el dispositivo microclasificador con un software.
- Crear el prototipo del microclasificador.
- Comprobar la funcionalidad del dispositivo.

## **3. Problemas a resolver**

Reducir la energía del proceso de clasificación al reducir el tamaño del clasificador a usar.

Cambiar los materiales convencionales de diseño de dispositivos clasificadores al usar un material híbrido magnético.

Evitar que las partículas sean afectadas por el funcionamiento del dispositivo, ya que el uso del campo magnético solo afectaría a la película híbrida.

## **4. Marco teórico**

### **4.1. Microactuadores**

Un microactuador es un dispositivo en el que sus dimensiones se encuentren en la escala micrométrica, capaz de transformar energía hidráulica, neumática o

eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado (Mezu, 2012).

Ejemplos de tipos de actuadores son:

- Térmicos
- Electrostáticos
- Con memoria de forma
- Magnéticos
- Hidráulicos
- Neumáticos

## **4.2. Polímeros**

A lo largo de cientos de años se han utilizado polímeros naturales procedentes de plantas y animales. Estos materiales incluyen madera, caucho, lana, cuero y seda. Otros materiales polímeros tales como las proteínas, las enzimas, los almidones y la celulosa tienen importancia en los procesos bioquímicos y fisiológicos de plantas y animales. Desde principios del siglo XX, la investigación científica moderna ha determinado la estructura molecular de este grupo de materiales y ha desarrollado numerosos polímeros, sintetizados a partir de pequeñas moléculas orgánicas.

Muchos plásticos, cauchos y materiales fibrosos son polímeros sintéticos. Desde el fin de la segunda guerra mundial, el campo de los materiales se ha visto

revolucionado por la llegada de los polímeros sintéticos. La síntesis suele ser barata y las propiedades conseguidas comparables, y a veces superiores, a las de los análogos naturales. En algunas aplicaciones, los metales y la madera se sustituyen por polímeros, que tienen propiedades idóneas y se pueden fabricar a bajo costo.

Las propiedades de los polímeros, como en el caso de los materiales metálicos y cerámicos, están relacionadas con la estructura elemental del material. Las propiedades mecánicas de los polímeros se especifican en los mismos parámetros utilizados para los metales: modulo elástico y resistencias a la tracción, al impacto y a la fatiga. El ensayo esfuerzo-deformación se emplea para caracterizar parámetros mecánicos de muchos materiales poliméricos. La mayoría de las características mecánicas de los polímeros son muy sensibles a la velocidad de deformación, a la temperatura y a la naturaleza química del medio (presencia de agua, oxígeno, disolventes orgánicos, etc.) (Callister, 2007).

### **4.3. Materiales magnéticos**

El magnetismo, fenómeno mediante el cual los materiales ejercen fuerzas atractivas o repulsivas sobre otros materiales, es conocido desde hace miles de años. Sin embargo, los principios básicos y los mecanismos que explican el fenómeno magnético son complejos y sutiles y su conocimiento ha eludido a los científicos hasta los tiempos recientes. Muchos de los dispositivos tecnológicos modernos se basan en el magnetismo y en los materiales magnéticos; estos

incluyen a los generadores de electricidad y los transformadores, motores eléctricos, radio, televisión, teléfonos, ordenadores y componentes de sistemas de audio y video.

El hierro, algunos aceros y el mineral magnetita que se encuentra en la naturaleza, son ejemplos bien conocidos de materiales que tienen propiedades magnéticas. No tan familiar, sin embargo, es el hecho de que todas son influenciadas en mayor o menor grado por la presencia de un campo magnético (Callister, 2007).

El comportamiento macroscópico de los materiales magnéticos puede ser clasificado usando unos pocos parámetros magnéticos. Podemos ver lo más significativo de estos, dar algunas definiciones y mostrar las clases más importantes de materiales magnéticos, el ferromagnetismo, puede ser clasificado dentro de los básicos. A continuación examinaremos los principales usos del ferromagnetismo e indicar como las propiedades macroscópicas determinan el uso idóneo del material para una aplicación dada (Jiles, 1998).

#### **4.3.1. Materiales diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos**

Los diversos tipos de materiales magnéticos son tradicionalmente clasificados de acuerdo a su susceptibilidad magnética ( $X$ ). El primer grupo de materiales para los cuales  $X$  es pequeña y negativa  $X \approx -10^{-5}$ . Estos materiales son llamados diamagnéticos, su respuesta magnética es opuesta el campo magnético aplicado. Ejemplos de materiales diamagnéticos son cobre, plata, oro de bismuto y berilio. Superconductores forman otro grupo especial de materiales diamagnéticos para el cual  $X \approx 1$ .

Un segundo grupo de materiales para los cuales  $X$  es pequeña y positiva, típicamente  $X \approx 10^{-3} - 10^{-5}$  son paramagnéticos. La magnetización de paramagnéticos es débil pero alineada paralelamente con la dirección del campo magnético. Ejemplos de paramagnéticos son aluminio, platino y manganeso.

Los materiales magnéticos más ampliamente reconocidos son los sólidos ferromagnéticos para los cuales la susceptibilidad es positiva, mucho más grande que 1, y típicamente pueden tener valores de  $X \approx 50$  a 10 000. Ejemplo de estos materiales son el hierro, cobalto, níquel y varios metales en transición, y sus aleaciones (Jiles, 1998).

#### **4.4. Materiales híbridos**

El término material híbrido es utilizado en diferentes sistemas que abarca un área muy extensa de materiales, como polímeros de coordinación cristalina altamente ordenada, compuestos amorfos sol-gel, materiales con o sin interacciones entre la parte orgánica e inorgánica. La definición más amplia es la que dice: un material híbrido es un material que incluye dos fracciones distintas mezcladas a escala molecular (Kickelbick, 2007).

Los materiales híbridos artificiales están diseñados para tener mejores propiedades o combinaciones de propiedades concretas. Por ejemplo: la fibra de vidrio es resistente como el vidrio filamentoso y es flexible como el polímero que lo sustenta. Otros ejemplos son el adobe<sup>1</sup> y los nuevos materiales híbridos usados

---

<sup>1</sup> El adobe, mezcla de arcilla y paja (hasta concentraciones de un 30%) ha sido usado a lo largo de la historia para construir edificaciones primitivas y ladrillos.



en la industria aeroespacial<sup>2</sup>. Ambos constituyen dos elementos tecnológicos de los materiales híbridos.

También están diseñados teniendo en cuenta objetivos típicos de la ingeniería de materiales. Tomando como ejemplo la industria aeroespacial los objetivos fundamentales son: en primer lugar, bajar los costes de operación, es decir, básicamente reducir la masa de las estructuras para poder aumentar la carga útil, así como aumentar paralelamente la velocidad y el alcance de la operación. En segundo lugar, se debe aumentar la resistencia a la fatiga, la rigidez, la tenacidad, así como la resistencia al choque térmico. Es prácticamente imposible conciliar ambos objetivos con materiales simples y se debe recurrir a los híbridos (Gonzales y Cancini, 2003).

#### **4.4.1. Clasificación de los materiales híbridos**

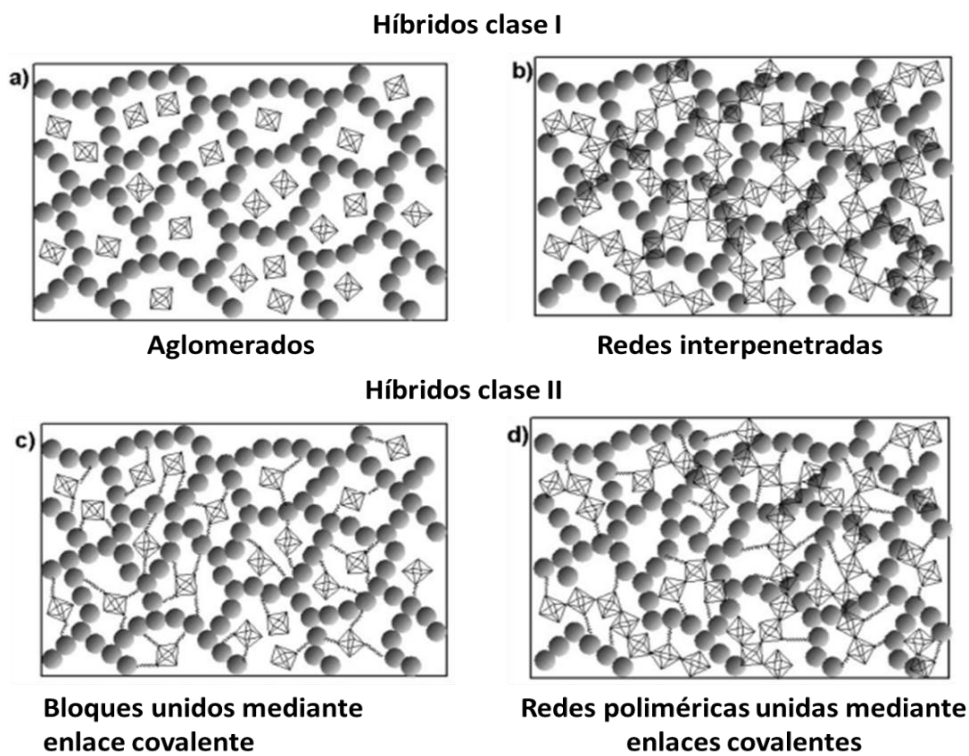
Tomando en cuenta los tipos de interacciones físicas y químicas que definen las interfaces en los materiales híbridos, estos se clasifican en dos grupos: materiales híbridos de clase I y materiales híbridos clase II. En los de clase I, las interacciones en las interfaces son exclusivamente del tipo puente de hidrogeno o de Van der Waals, mientras en los de clase II, las interacciones son de más alta energía, pudiéndose también presentarse enlaces débiles (Kickelbick, 2007; Nanko, 2009).

---

<sup>2</sup> En éstos, se consigue que las propiedades mecánicas y fisicoquímicas de estos híbridos sean muy superiores a las de los materiales homogéneos.

Tal como se puede observar en los esquemas de la figura 1, dependiendo de la naturaleza o del tamaño molecular de la fase dispersa, podemos tener dos casos para los materiales híbridos de clase I: (i) cuando la fase dispersa es de bajo peso molecular, esta puede llegar a dispersarse en la matriz en forma de aglomerados de tamaño inferior a los micrómetros (mezcla íntima de dos materiales, figura 1(a)); (ii) cuando la fase dispersa es de tipo macromolecular, esta se dispersa de una manera tal que se obtiene una morfología de redes interpenetradas (figura 1(b)).

Para los materiales de clase II también es posible diferenciar dos casos similares a los de clase I, con la diferencia de que las interfaces están definidas también por enlaces de alta energía (ver figuras 1(c) y 1(d)).



**Figura 1:** Esquemas de los materiales híbridos clase I y clase II.

La naturaleza tanto de la fase dispersa, como de la matriz, además del proceso de síntesis utilizado para la obtención del material híbrido define si un material híbrido es de clase I o de clase II.

Entre los procesos de síntesis más utilizados para la obtención de materiales híbridos se tienen los siguientes: sol-gel, coprecipitación, erosión iónica, etc. (Kickelbick, 2007; Nanko, 2009). La comunidad científica ha estado intentando mimetizar materiales biológicos que combinan fuerza y resistencia, como el nácar, o madreperla.

Para mimetizar la concha nácar primero se construye una suspensión acuosa de óxido de aluminio (Pastor y Elices, 2001), la cual se enfría de manera muy controlada permitiendo obtener micro-estructuras largas y delgadas, parecidas a ladrillos, tras la evaporación del agua mediante calor. Al repetir este proceso, se crea una estructura porosa de capas de óxido de aluminio que se conectan entre sí, semejante a la encontrada en el nácar natural. Después, para imitar la proteína que funciona como pegamento, se propone utilizar un polímero que rellene los huecos entre las distintas capas. Aunque los resultados obtenidos son muy alentadores, aún quedan muchas interrogantes por resolver, por lo que el proceso de mimetización de materiales se considera fundamental para el desarrollo de los nuevos materiales híbridos (López *et al.*, 2011).

Por otra parte, el gran avance que se tiene hoy en día en lo referente a la síntesis de novedosos materiales con propiedades especiales como fotoluminiscencia, electroluminiscencia, memoria de forma, magneto-orgánico, semiconducción, etc.,

abre aún más la posibilidad de síntesis de nuevos materiales híbridos polifuncionales (Kickelbick, 2007; Liang *et al.*, 2010; Petre *et al.*, 2010; Luna *et al.*, 2010; López *et al.*, 2009; Catauro *et al.*, 2010).

#### **4.4.2. Los materiales híbridos en el desarrollo de los sistemas mecatrónica**

Un sistema mecatrónico se compone, entre otros elementos, de sensores y actuadores. Los sensores permiten detectar variables físicas del medio circundante, convirtiéndolas en señales eléctricas; en tanto, los actuadores generan movimientos o acciones específicas de acuerdo a la señal eléctrica aplicada.

La creciente complejidad de los sistemas mecatrónicos demanda el desarrollo de sensores y actuadores cuyos materiales de fabricación sean capaces de realizar más de una sola función (multifuncionales). Para el desarrollo o síntesis de materiales bifuncionales (dos funciones) se suele combinar dos materiales con propiedades diferentes. El producto resultante se conoce como material compuesto o compósito. Cuando uno de estos materiales es orgánico, y el otro inorgánico, el sistema resultante se conoce como material híbrido (López *et al.*, 2011).

Es de suma importancia para el diseño de sistemas mecatrónicos, tomar en cuenta que los materiales híbridos más estables son los de clase II, por lo que bajo este contexto la utilización de los de clase I será muy limitada.

#### **4.4.3 La polifuncionalidad de los materiales híbridos**

Las propiedades individuales que presentan por separado tanto la fase dispersa (inorgánica), como la matriz (orgánica), nos dan una idea de las propiedades o funciones que podría llegar a ofrecer un material híbrido, considerando que éste debe ser bi o polifuncional. Kickelbick (2007) resume de una manera muy clara (ver tabla 1) las propiedades típicas de materiales orgánicos y materiales inorgánicos, las cuales deben ser tomadas en cuenta en el momento de llevar a cabo el proceso de síntesis de los materiales híbridos (López *et al.*, 2011).

Aunado a lo anterior, debemos tomar en cuenta los avances que se tiene hoy en día en lo referente al desarrollo de los denominados materiales avanzados, los cuales pudiesen utilizarse como fase dispersa en el desarrollo de nuevos materiales híbridos, y que tendrían aplicaciones importantes en el desarrollo de los nuevos sistemas mecatrónicos.

La tabla 2 muestra diferentes posibles aplicaciones de algunos materiales que se obtendrían combinando una matriz polimérica con diferentes alternativas de materiales avanzados que podemos encontrar en el mercado hoy en día. Diversas aplicaciones enunciadas en dicha tabla pueden ser elementos constitutivos de un sistema mecatrónico, tales como los motores, los fotodiodos, las microbombas, los diodos emisores de luz, los microelevadores o las microválvulas, entre otros. Algunos otros casos, la aplicación ya constituye, por sí misma, un sistema

mecatrónico; por ejemplo, los micro-espejos con reflejo variante y controlable o los aparatos de ultrasonido intravascular (IVUS).

**Tabla 1:** Comparación de las propiedades generales o típicas de materiales orgánicos y materiales inorgánicos que comúnmente se utilizan como materia prima en la síntesis de materiales híbridos.

<b>Propiedades</b>	<b>Materiales Orgánicos (polímeros)</b>	<b>Materiales Inorgánicos (SiO<sub>2</sub>, Óxidos metálicos de transición)</b>
<b>Naturaleza de enlaces</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Covalentes</li> <li>• Van der Waals</li> <li>• Puente de H</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Iónico</li> <li>• Covalente</li> </ul>
<b>Temperatura de transición vítrea (Tg)</b>	Baja (-120 a 200 °C)	Alta (>>200 °C)
<b>Estabilidad térmica</b>	Baja (<350 -450 °C)	Alta (>>100 °C)
<b>Densidad relativa</b>	0.9 - 1.2	2.0 – 4.0
<b>Índice de refracción</b>	1.2 – 1.6	1.15 – 2.7
<b>Propiedades mecánicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elasticidad</li> <li>• Plasticidad</li> <li>• Pueden presentar comportamiento cauchótico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dureza</li> <li>• Tenacidad</li> <li>• Fragilidad</li> </ul>
<b>Hidrofobicidad</b>	Hidrofóbico	Hidrofílico
<b>Permeabilidad</b>	Permeabilidad a los gases	Baja permeabilidad a los gases
<b>Propiedades electrónicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aislante eléctrico</li> <li>• Propiedades redox</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entre aislante eléctrico y semiconductor</li> <li>• Propiedades redox</li> <li>• Propiedades magnéticas</li> </ul>
<b>Procesabilidad</b>	Alta (molde, fundido, formación de película, control de viscosidad)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja para polvos</li> <li>• Alta para recubrimientos de tipo sol-gel</li> </ul>

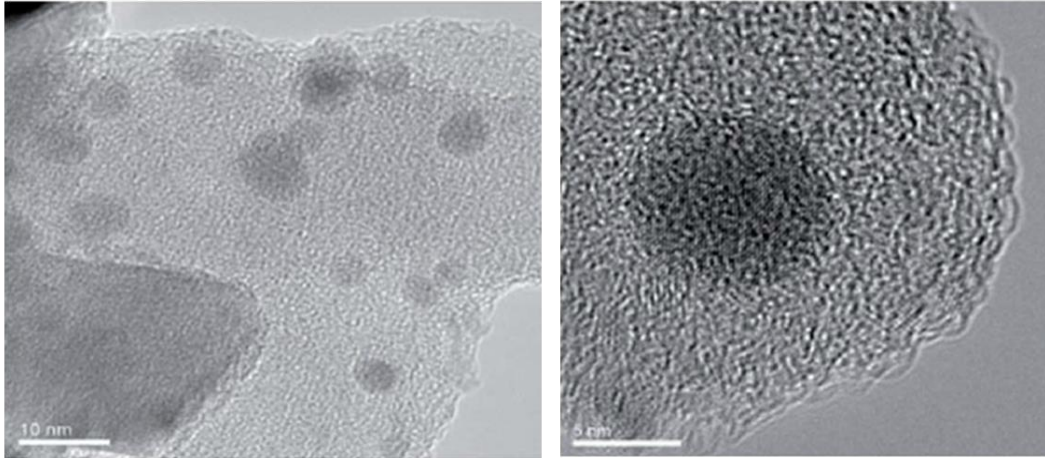
**Tabla 2:** Ejemplos de aplicaciones para diferentes alternativas de fase dispersa en los materiales híbridos.

Matriz	Fase dispersa	Aplicación del material híbrido obtenido
<b>Polimérica</b>	Aleaciones metálicas con memoria de forma	Micropinzas, sensores de fuerza, motores DC.
	Materiales con propiedades magnéticas	Microelevadores, microválvulas, motores AC-DC, microbombas.
	Materiales conductores de electricidad	Diodos emisores de luz, transistores a efecto de campo, fotodiodos, celdas solares, sensores de gas.
	Materiales cerámicos	Micro espejos con reflejo variable y controlable, bioreactores, liberadores de medicamento, microdiscos laser.
	Materiales piezoeléctricos	Aparatos de ultrasonido intravascular (IVUS), monitoreo cardiaco, sensores táctiles.

La información presentada en las tablas 1 y 2 muestra el enorme potencial que tiene el desarrollo de nuevos materiales híbridos. Sin embargo, el reto a vencer para la obtención de estos nuevos materiales se centra en el proceso de síntesis, ya que en la mayoría de los casos requiere combinar materiales que no son compatibles mediante procesos de mezclado tradicional. En este sentido, los avances científicos en la ingeniería de materiales permiten la disponibilidad de técnicas experimentales que permiten que dos componentes inherentemente incompatibles (por ejemplo, polímeros orgánicos y óxidos inorgánicos), se hagan compatibles por pre-mezcla de ambos a escala molecular antes de su conversión en un nuevo material.

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 de síntesis y caracterización de materiales, se han sintetizado materiales híbridos magnéticos utilizando como matriz polímeros biocompatibles como la caboximetilcelulosa (CMC) o el quitosán, y como fase dispersa se han utilizado nanopartículas de óxido de hierro (Luna *et al.*, 2010) y nanopartículas de cobalto elemental (Co) (Luna, 2008). La figura 2 muestra imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés) del material híbrido constituido de nanopartículas cuasiesféricas de cobalto elemental en CMC. Los dos tipos de materiales híbridos desarrollados presentan propiedades de superparamagnetismo, por lo que las películas delgadas de estos materiales sin duda tendrán aplicaciones muy interesantes en el futuro desarrollo de sistemas mecatrónicos.



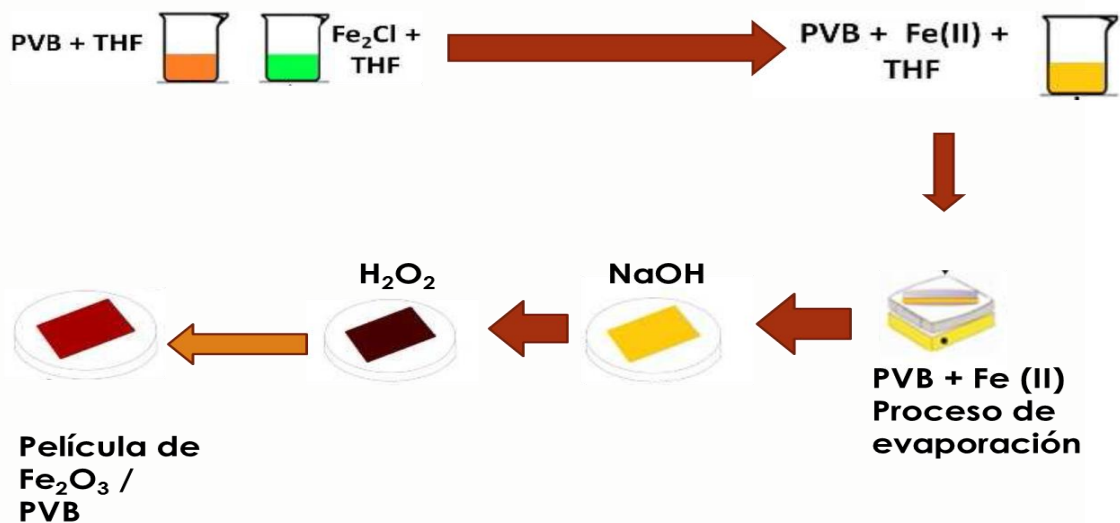


**Figura 2:** Nanopartículas de Co dispersas en CMC (imagen SEM).

## 5. Procedimiento y descripción de las actividades realizadas

### 5.1. Síntesis de material híbrido magnético PVB/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

La elaboración del material del cual está hecha la película híbrida magnética de PVB/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> consiste en dos etapas (ver figura 3), las cuales se describe a continuación:



**Figura 3:** Esquema de la síntesis de la película híbrida magnética.

### Etapa 1.-

Se prepara una disolución de 10% wt de PVB, peso molecular medio BM, en tetrahidrofurano (THF). Para asegura la homogeneidad de la disolución, se llevó a cabo un proceso de agitación a 700 RPM, a 45 °C, durante 45 minutos. Del mismo modo, la sal precursora, cloruro de hierro tetrahidratado ( $\text{Fe}_2\text{Cl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), se disuelve en 15 ml de THF, en las cantidades que se muestran en la tabla 3. Esto se llevó a cabo mediante agitación (700 RPM) durante 45 minutos, a una temperatura de 45 °C. Posteriormente, se mezcla con las disoluciones obtenidas de Fe (II) con la disolución polimérica de PVB, sometiéndose la mezcla final a un proceso de agitación a 700 RPM, durante 45 minutos, a una temperatura de 45 °C. Posteriormente se prepararon películas por "dip coating"<sup>3</sup>, separándose el disolvente THF por convección natural a temperatura ambiente durante 1 hora. Las películas obtenidas constituyen el material híbrido precursor.

**Tabla 3:** Concentración de sal  $\text{FeCl}_2$  en PVB

Disolución	PVB (g)	$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (g)
PVB-F1	1.6	0.16
PVB-F2	1.6	0.8
PVB-F3	1.6	1.6

### Etapa 2.-

Las películas delgadas obtenidas en la etapa 1, el material híbrido precursor PVB-Fe (II), fueron sometidas a un tratamiento químico, sumergiéndolas en una

---

<sup>3</sup> Dip coating (recubrimiento por inmersión) es la inmersión controlada de manera precisa con la subsiguiente retirada de algún sustrato dentro de un reservorio líquido con el propósito de depositar una capa de material. Muchos proyectos de investigación en ingeniería química y de nanomateriales en centros de investigación e industrias hacen uso de ésta técnica.

solución acuosa de NaOH a una temperatura de 55 °C (ver tabla 4), producto de esto último se observó un cambio de tonalidad en el color de amarillo a café oscuro. Después de esto, se adicionaron por goteo 30 ml de peróxido de hidrogeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), observándose un cambio de tonalidad en la película de café oscuro a rojo cobrizo. Durante este último paso se deja la película en el medio acuoso durante 10 minutos. El material híbrido obtenido fue lavado varias veces con agua desionizada para eliminar residuos del proceso de síntesis.

**Tabla 4.** Relación molar de NaOH.

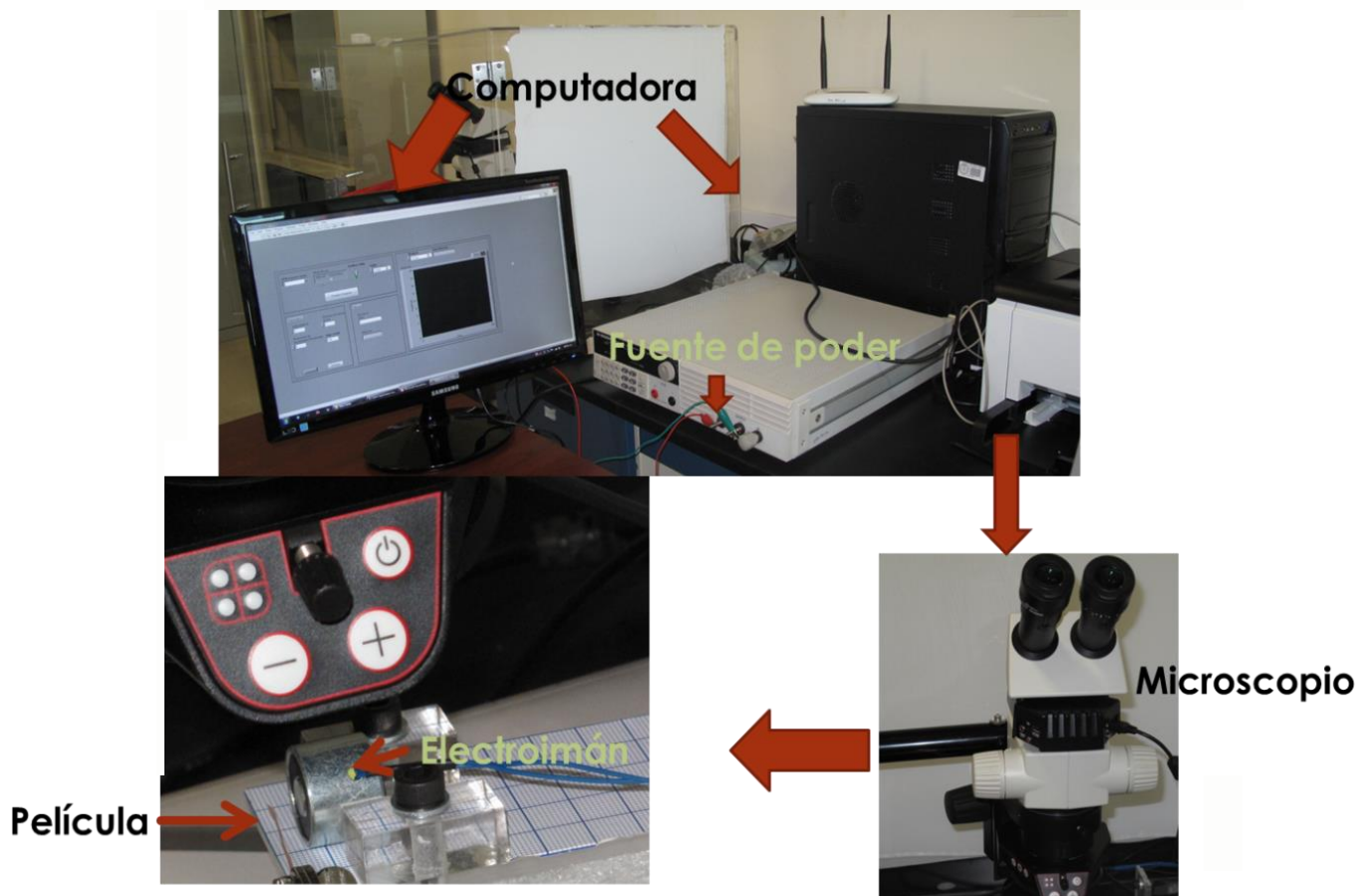
<b>Película</b>	<b>FeCl<sub>2</sub>•4H<sub>2</sub>O (g)</b>	<b>NaOH (M)</b>
<b>PVB-F1</b>	0.16	1.8
<b>PVB-F2</b>	0.8	6.7
<b>PVB-F3</b>	1.8	6.7

## 5.2. Experimentación con la película obtenida

Se hicieron distintos experimentos para medir los desplazamientos de la película híbrida magnética cuando se le somete a un campo magnético. El montaje experimental (Figura 4) consiste en lo siguiente:

- La computadora, que con un programa desarrollado en el software Labview 2013, nos ayudó a obtener los datos necesarios para el experimento.

- La fuente de poder, que es un alimentador programable ya que tiene un puerto de USB para poder establecer el vínculo con la computadora.
- El microscopio para poder grabar videos y obtener fotografías de los pequeños desplazamientos de la película híbrida magnética.
- Por medio de un meza de desplazamiento XYZ, sostenemos tanto el electroimán como la película híbrida magnética para tener un mejor control del desplazamiento de estos.



**Figura 4:** Diagrama del montaje necesario para experimentar con la película híbrida magnética.

Antes de realizar los experimento del desplazamiento de la película se realizó una simulación mecánica del desplazamiento de la película híbrida magnética en Comsol 4.2, donde el proceso se modeló a como una viga de PVB con 532 esferas en su interior, las cuales representan a las nanopartículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (esferas con un radio de  $30 \mu\text{m}$ ). En esta simulación se representa a la fuerza magnética como una fuerza que actúa en la viga y en cada una de las esferas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , que dará como resultado un desplazamiento en la película además de la dirección de la fuerza producida por el campo magnético supuesto.

### **5.3. Diseño y construcción de los componentes del microclasificador**

De acuerdo a los resultados obtenidos en los experimentos realizados con las diferentes películas híbridas magnéticas se diseñó el dispositivo clasificador con el software Solidworks 2013, y los distintos componentes del dispositivo clasificador fueron construidos usando la impresora 3D de la empresa Stratasys modelo  $\mu\text{Print SE}$ .

### **5.4. Prueba del funcionamiento del dispositivo microclasificador**

Usando el dispositivo clasificador en el paso 3 y tomando la película que genero un mayor desplazamiento, se montó el dispositivo clasificador y se puso a funcionar usando un campo magnético de aproximadamente 600 Oe para

clasificar esferas que se encuentran dentro de algunos medicamentos encapsulados.

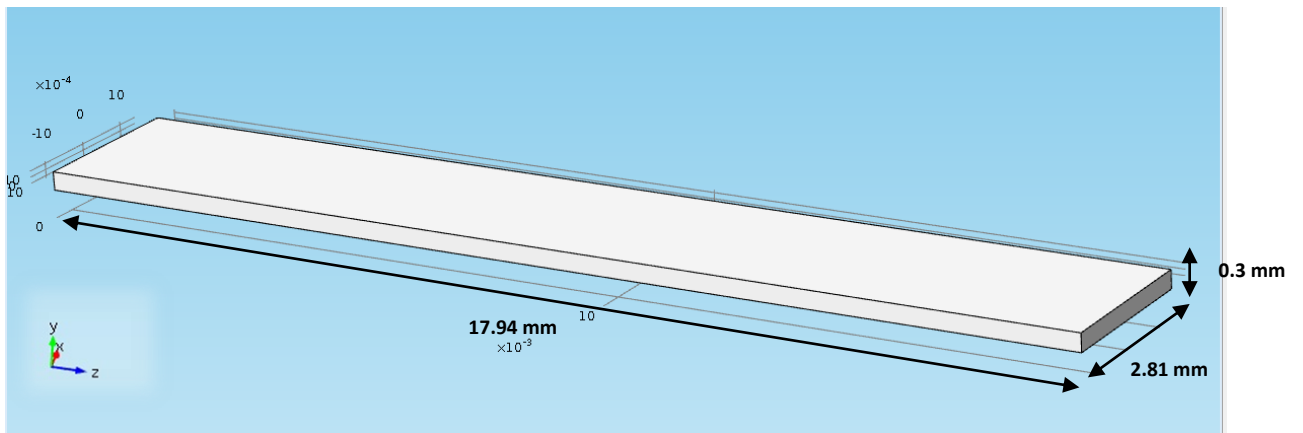
## 6. Resultados y discusión

En la simulación mecánica de los desplazamientos de la película híbrida magnética se capturaron los parámetros (tabla 5) y las variables necesarios para crear las geometrías (viga y esferas), los puntos de referencia del origen del “campo magnético”, la magnitud de la fuerza magnética, el área de las esferas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , las fórmulas para obtener la fuerza generada por el campo magnético y otras fórmulas que nos servirán para la realización de los cálculos de la simulación.

**Tabla 5:** Parámetros para la realización de la simulación.

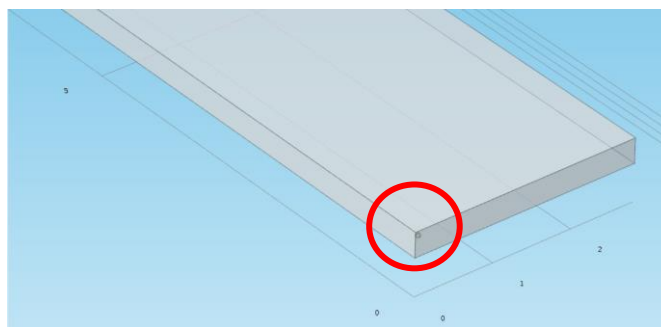
Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
rad	0.003	mm	Radio de las esferas de $\text{Fe}_2\text{O}_3$
length	17.94	mm	Largo de la película
width	2.81	mm	Ancho de la película
height	0.3	mm	Espesor de la película
px	width/2	mm	posición x del origen del campo magnético (mitad del ancho de la película)
py	0	mm	posición y del origen del campo magnético (explicar por qué cero)
pz	-10	mm	posición z del origen del campo magnético (10 mm por debajo del centro del extremo libre)
field_H	400-800	Oe	Campo magnético que actuará sobre la viga de CMC y las partículas de $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Habiendo definido los valores requeridos tanto de los parámetros, como de las variables, se creó la geometría necesaria para la realización de la simulación. Primero se crea la geometría de la viga, la cual representa a la película de CMC. Se tiene como resultado la viga de PVB con las medidas deseadas (Figura 5): 2.81 mm de base, 0.3 mm de altura y 17.94 mm de profundidad.



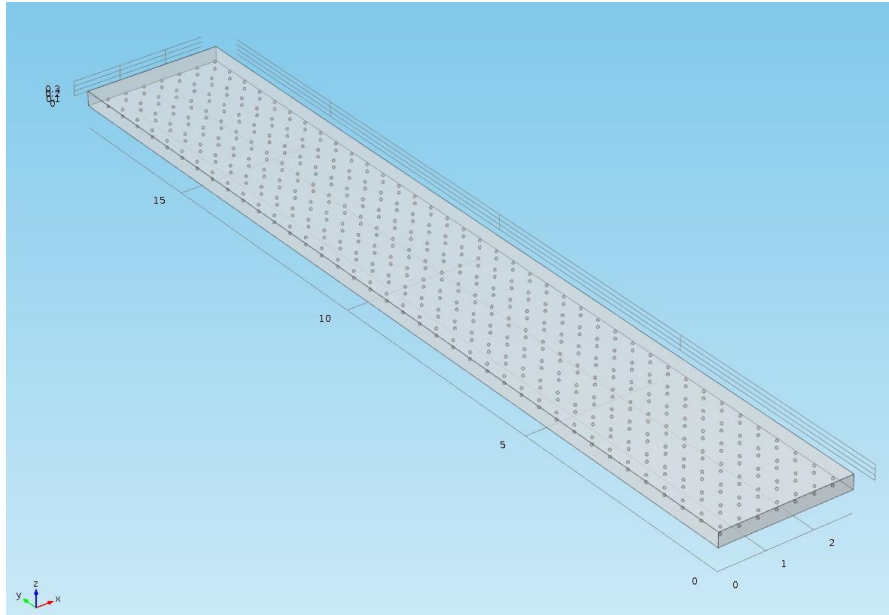
**Figura 5:** Modelo de la viga creada con las medidas deseadas.

El siguiente paso fue modelar una de las esferas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en el interior de la viga creada, indicando su radio y su posicionamiento, como se muestra En la Figura 6 se observa la esfera creada en una esquina de la viga.



**Figura 6:** Esfera de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  creada en la viga.

Para crear las 532 esferas, las cuales representarán a las nanopartículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , se creó una matriz de repetición de la esfera creada. El tamaño de la matriz es de 7 x 38 x 2 que generaron las 532 esferas, que representarán a las nanopartículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  presentes en la película de PVB. En la Figura 7 se observa la geometría de la viga con las 532 nanopartículas creadas en su interior.



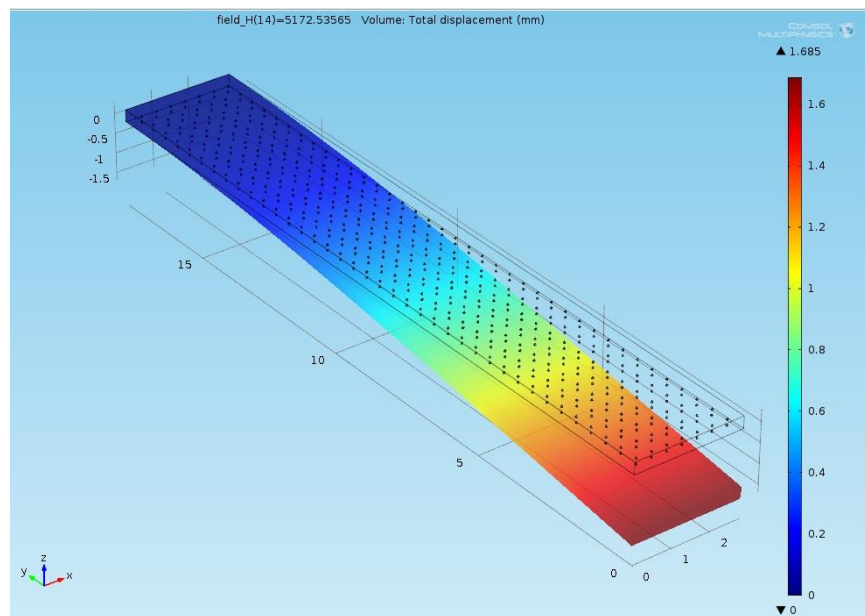
**Figura 7:** Geometría de viga y nanopartículas creada.

El siguiente paso después de haber creado las geometrías en la película, fue elegir los materiales de los que iban a estar constituidos la viga y las esferas, así como sus propiedades. Teniendo las geometrías y los materiales de cada una de ellas definidos, se establecieron las condiciones para simular la viga en voladizo. Primeramente seleccionamos una de las caras laterales y la fijamos, después se agrega la carga (fuerza) a la que estarán sometidas las nanopartículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Una vez que se tuvo listo el modelo, se realizó el mallado del mismo para realizar



los cálculos por elementos finitos .El mallado está formado por 93655 elementos tetraédricos y 5452 triangulares.

Con lo anterior se realizó un estudio de barrido paramétrico, en el que el campo magnético generado aumentó de 400 a 800 Oe con variaciones de 5 Oe. Posterior a esto se generaron los gráficos deseados, en los que se observa el desplazamiento que existen en la viga al aplicar una fuerza magnética originada a una distancia de 10 mm por debajo del punto medio del extremo libre de la viga (figura 8). En la figura 8 se nos indica por medio de escala de color el desplazamiento ocurrido en la viga. Obtenemos un desplazamiento máximo en el extremo libre de la viga de 1.685 mm.

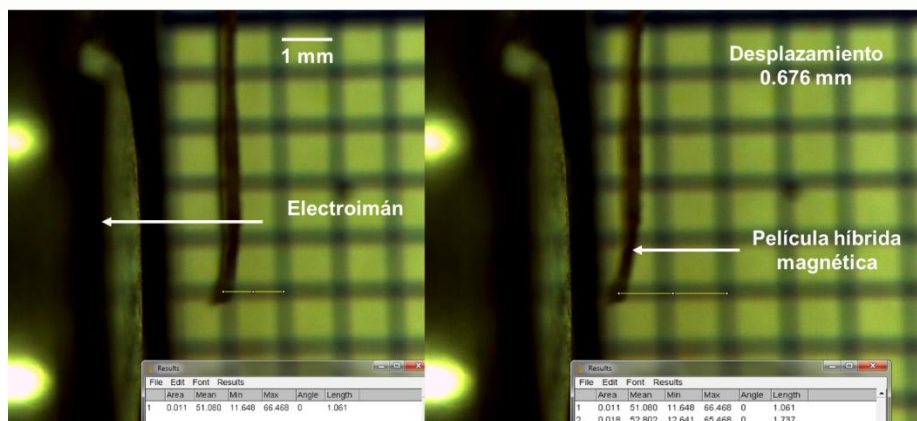


**Figura 8:** Gráfico que muestra la simulación de desplazamiento de la viga.

Ahora, una vez realizada la simulación se procedió a realizar los experimentos. De todas las películas que se sintetizaron, para el dispositivo clasificador se usó aquella que poseía 1.6 g de PVB y 1.6 g de  $\text{FeCl}_2$  como material precursor, esta se utilizó debido a una mayor concentración de partículas de óxido de hierro lo que confería mayores propiedades magnéticas.

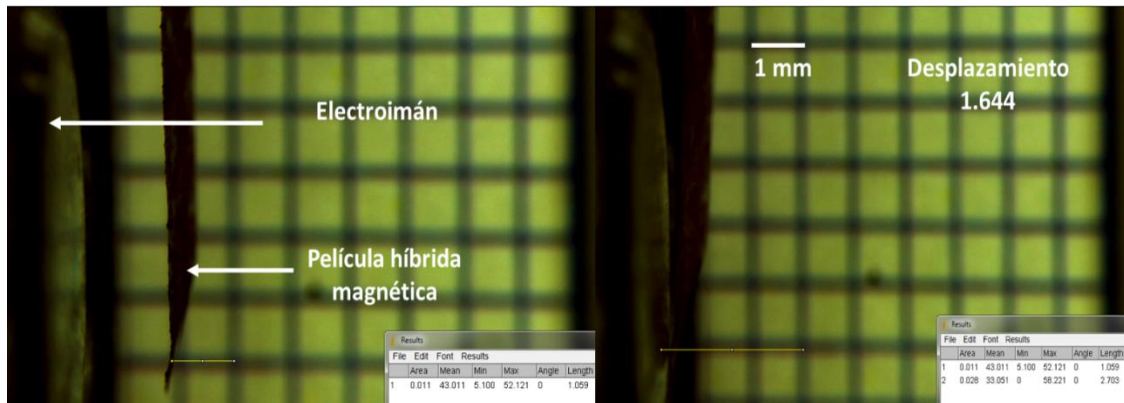
Una sintetizada la película híbrida magnética, esta se dividió en películas más pequeñas de diferentes dimensiones para realizar las pruebas de su desplazamiento frente a un campo magnético. A continuación se describen los resultados de los experimentos realizados:

**Película 1:** Esta es una película híbrida de 27 mm de largo, 2 mm de ancho y 0.07 mm de espesor. Se le aplicó 12 V, generando así un campo magnético de aproximadamente 450 Oe que logró un desplazamiento de 0.676 mm de la película. En la figura 9 se observa claramente que hubo un desplazamiento.



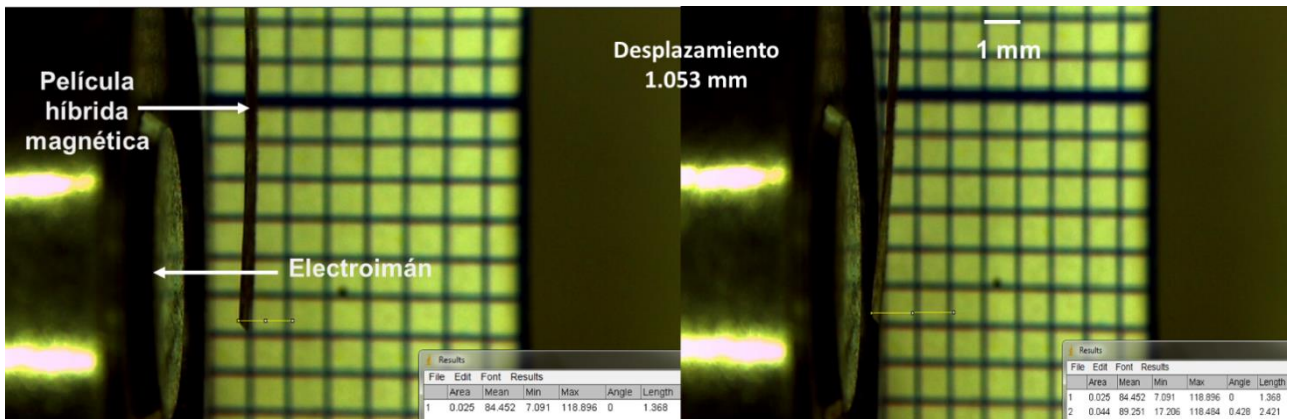
**Figura 9:** Desplazamiento de la película híbrida magnética 1.

**Película 2:** Al igual que la película 1, esta película tiene las siguientes dimensiones: 27 mm de largo, 2 mm de ancho y 0.07 mm de espesor. Se generaron 450 Oe aplicando 12 V y como resultado de ello se tiene un desplazamiento de 1.644 mm (ver figura 10).



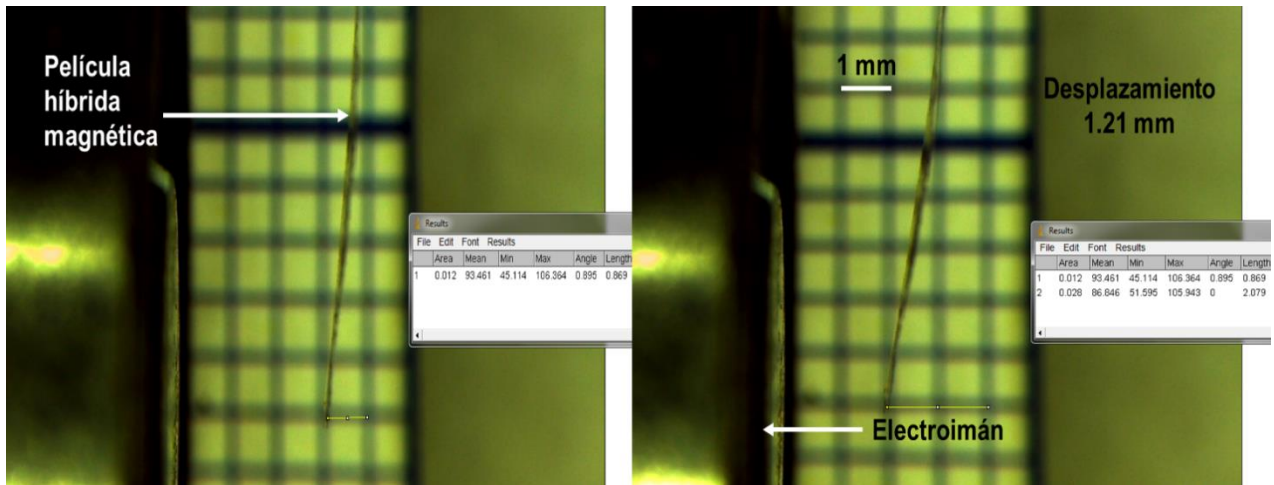
**Figura 10:** Desplazamiento de la película híbrida magnética 2.

**Película 3:** En este caso la película híbrida magnética fue de 30 mm de largo, 2 mm de ancho y 0.07 mm de espesor, y se aplicaron 15 V para generar un campo magnético de aproximadamente 500 Oe. Aquí el desplazamiento fue de 1.053 mm (figura 11).



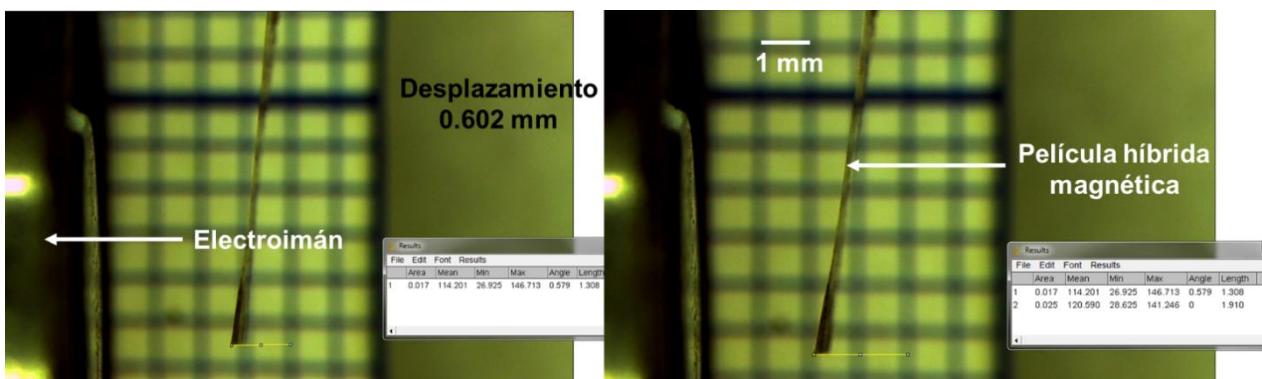
**Figura 11:** Desplazamiento de la película híbrida magnética 3.

**Película 4.** Esta película tiene las mismas dimensiones de la película 3, pero se aplican 18 V para generar un campo magnético de aproximadamente 600 Oe que produjo un desplazamiento de 1.21 mm (Figura 11).



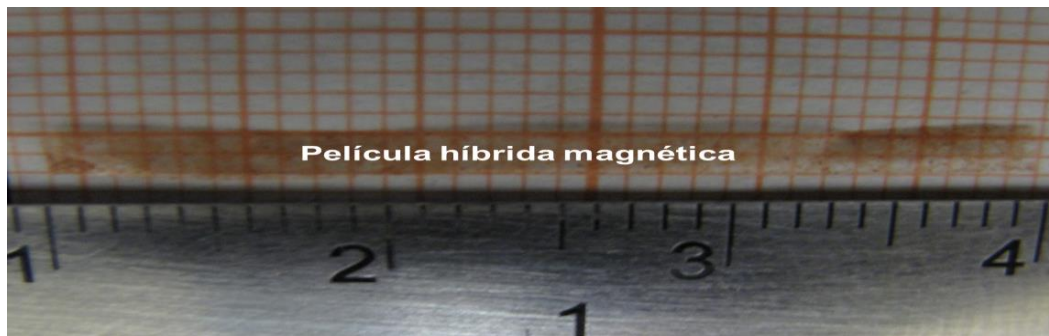
**Figura 12:** Desplazamiento de la película híbrida magnética 4.

**Película 5:** Al igual que la película 4, esta película tiene las mismas dimensiones y se le aplico el mismo campo magnético (600 Oe), sin embargo en este caso el desplazamiento producido fue de 0.602 mm (figura 13).



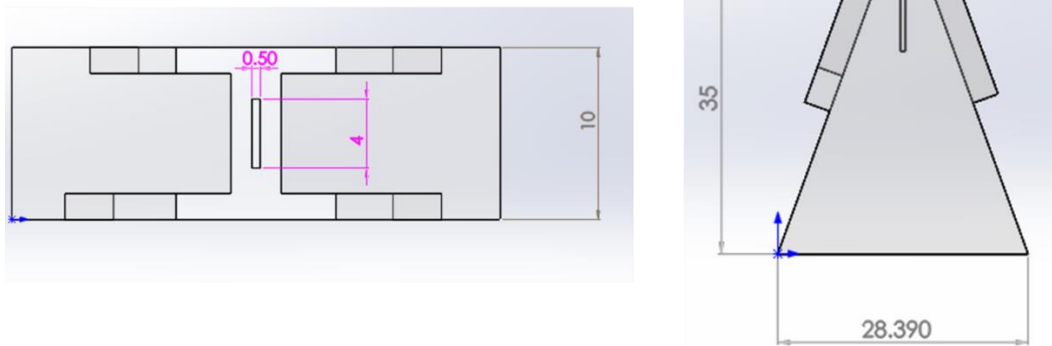
**Figura 13:** Desplazamiento de la película híbrida magnética 5.

Analizando los resultados anteriores se observa que bajo las mismas condiciones las películas pueden presentar diferentes desplazamientos debido a que cada película fue obtenida de diferentes posiciones en una película más grande en donde las partículas magnéticas se distribuían de manera no uniforme. De todas las películas con las que se experimentaron los desplazamientos se eligió aquella que otorgaba un desplazamiento mayor, de tal manera que para montar el dispositivo clasificador se usó una película híbrida magnética de 30 mm de largo, 2 mm de ancho y 0.07 mm de espesor (ver figura 14), que generaba un desplazamiento de 1.21 mm con un campo de 600 Oe a una distancia de 3mm del origen del campo magnético.

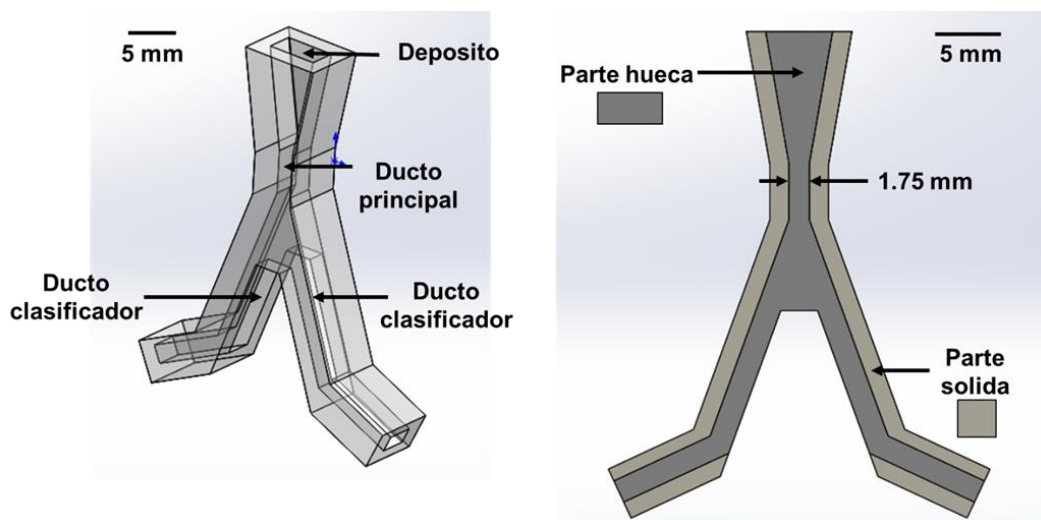


**Figura 14:** Dimensiones de la película híbrida magnética usada para montar el dispositivo clasificador.

Además de la película híbrida magnética, se necesita una base para montar la película y también los ductos clasificadores, para así tener el dispositivo clasificador completo. La base tiene una altura de 35 mm y un ancho de 28.39 mm, la ranura donde se coloca la película tiene dimensiones de 0.5 x 4 mm (ver figura 15). La forma de los ductos clasificadores así como sus dimensiones se observan claramente en la figura 16.



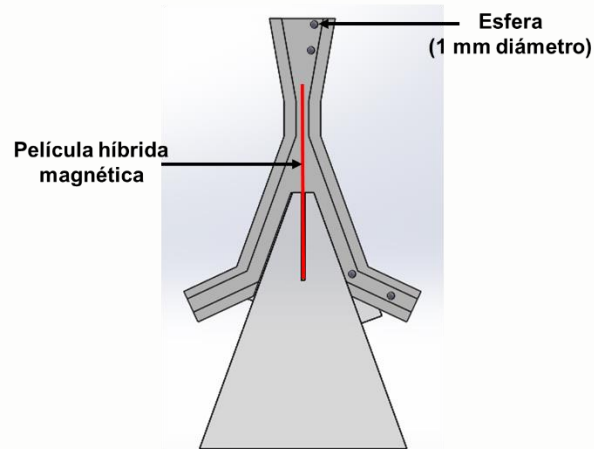
**Figura 15:** Dimensiones de la base (mm). A la izquierda se muestra la vista superior para poder ver la ranura y a la derecha se observa la vista frontal para visualizar su altura total.



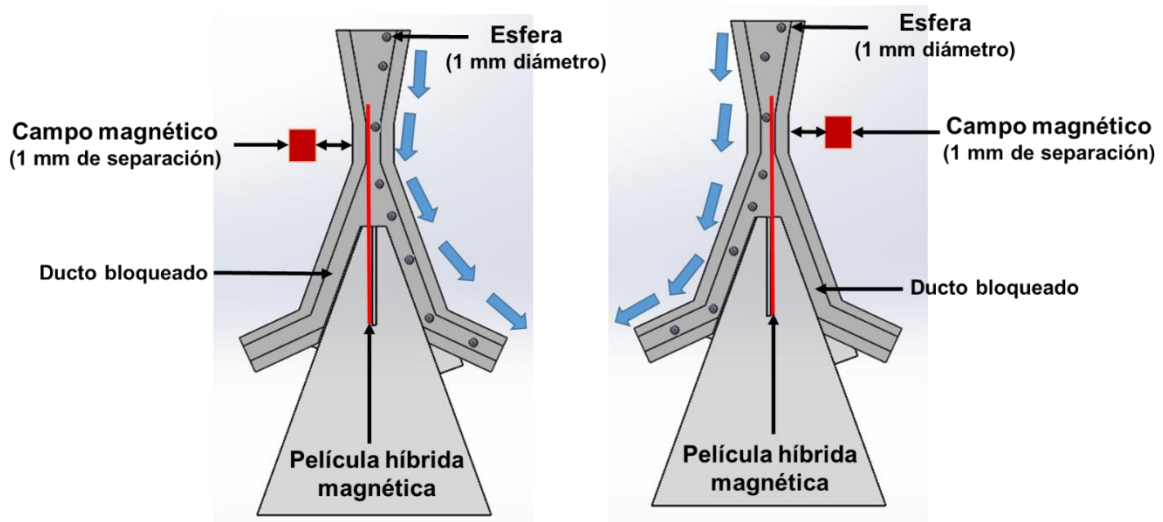
**Figura 16:** Estructura y dimensiones de los ductos clasificadores.

Después de construir las partes del dispositivo clasificador, este es montado y se realiza la prueba su funcionamiento. Al aplicar un campo magnético y colocar diferentes partículas a clasificar se observó que el dispositivo funcionaba correctamente; el dispositivo clasificador funciona de la siguiente manera: la película híbrida magnética se encuentra en la posición inicial en la ausencia de un

campo magnético (figura 17); después, cuando aplicamos un campo magnético en el lado izquierdo del ducto principal, la película híbrida magnética se moverá hacia dicho campo magnético permitiendo así el paso de la esfera a clasificar en el ducto derecho (figura 18, lado izquierdo). Si se aplica un campo magnético en la parte derecha del ducto principal se permite el paso de la esfera en el ducto izquierdo (figura 18, lado derecho).



**Figura 17:** Comportamiento del dispositivos clasificador en ausencia del campo magnético.



**Figura 18:** Comportamiento del dispositivo clasificador al aplicar el campo magnético.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

Se sintetizaron películas de PVB/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> usando PVB como matriz polimérica y FeCl<sub>2</sub> como el material que aportaría las propiedades magnéticas.

Las películas presentan diferentes desplazamientos cuando se le aplican diferentes intensidades de campo magnético. También se tienen diferentes desplazamientos con la misma intensidad del campo magnético si la película se obtiene de distintos lugares en la película madre porque las partículas magnéticas no se distribuyen de manera uniforme.

Para montar el dispositivo clasificador se usó una película híbrida magnética de 30 mm de largo, 2 mm de ancho y 0.07 mm de espesor, que generaba un desplazamiento de 1.21 mm con una intensidad de campo magnético de 600 Oe.

El dispositivo clasificador consta de la película híbrida magnética, de una base para montar la película y de los ductos clasificadores. La base tiene una altura de 35 mm y una anchura máxima de 28.39 mm, la ranura donde se coloca la película tiene dimensiones de 0.5 x 4 mm (ver figura 11). Los ductos clasificadores tiene una forma de “Y” invertida y se colocan sobre la base, de tal manera que en la parte de arriba de los ductos clasificadores entren las partículas, lleguen a donde se encuentra la película y esta se moverá por la acción del campo magnético permitiendo el paso de las partículas hacia un lado.



## **8. Competencias desarrolladas y/o aplicadas**

Se aprendió a utilizar el programa para simulaciones llamado Comsol 4.2, este programa se utilizó para simular la intensidad del campo magnético y el desplazamiento de la película híbrida magnética.

Se aplicaron los conceptos aprendidos durante el transcurso de la carrera, tales como mecánica de materiales, química general, electricidad y magnetismo, ingeniería de los materiales metálico, ingeniería de los materiales no metálicos, diseño asistido por computadora.

Se aprendió a utilizar la impresora 3D para poder hacer los prototipos y poder hacer modificaciones si fuera necesario, se aprendió a sintetizar el material con la técnica de dip coating, técnica muy novedosa utilizada por algunos investigadores para elaborar nuevos materiales.

Se aprendió a utilizar un microscopio estereoscópico para realizar los experimentos.

## **9. Referencias bibliográficas y virtuales**

Labahn, O. y Kohlhaas, B. (1985). Prontuario del cemento (5ª edición). Barcelona: Editorial Reverté.

Mezu, J.V. (2012). Diseño del lazo de control de combustión para la regulación del vapor vivo en una caldera industrial. Tesis no publicada de la Universidad de Occidente, Santiago de Cali.

Kockelbick, G. (2007). *Hybrid Materials: Synthesis, Characterization and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.

Nanko, M. (2009). Definitions and categories of hybrid materials. *Journal of Materials Online*: 2-9.

Pastor, J.Y. y Elices, M. (2001). Comportamiento mecánico de la madreperla. *Anales de mecánica de la Fractura*, 18: 237-243.

López, B.W., Reyes, E.M. y López, E.C. (2011). Los materiales híbridos en el desarrollo de sistemas mecatrónicos. *Ingenierías*, 14 (53): 35-43.

Liang, Y., Wang, H., Sanchez, C.H., Chen S., y Dai, H. TiO<sub>2</sub> nanocrystal grown on graphene as advanced photocatalytic hybrid materials. *Nanp Res.* 3(10): 701-705.

Petre, A., Diaham, S., Reyes, E.M., Saini, V., Li, Z., Dervishi, E., Xu, Y., y Biris A.S. (2010). Dielectric behavior of poly (3-hexylthiophene)/carbon nanotube composites by broadband dielectric spectroscopy. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(2): 627-633.

Luna, J. F. M., Reyes, M.E., Gonzáles, V.G., Torres, A.C., Guerrero. C.S., y Sepúlveda, S.G. (2010). Iron oxide nanoparticles obtained from Fe (II) – chitosan polymer film. *Materials science Forum*, 644: 51-55.

Luna, J.F.M., Reye, E.M., Gonzáles, V.G., Garcia, A.L., y Ortíz, U.M. (2008). Obtención de nanopartículas de cobalto a partir de una solución polimérica sólida de Carboximetilcelulosa-CoCl<sub>2</sub>. XI Simposio Latinoamericano y IX Congreso Latinoamericano de Polímeros.

Catauro, M., Verardi, D., Melisi, D., Belotti, F., y Mustarelli, P. Novel sol-gel organic-inorganic hybrid material for drug delivery. *Jopurnal of Applied Biomaterials & Biomechanics (serial on the Internet)*, 8 (1): 42-51.