



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN NANOCIENCIAS Y MATERIALES**

**“Tintas Magnéticas Impresas en Textiles para la  
Generación de Band Gaps Fotónicos en el Rango  
de Microondas”**

Tesis que presenta

**Fis. Daniela Fernández Sánchez**

Para obtener el grado de

**Maestro(a) en Nanociencias y Materiales**

**Director de la Tesis:**

**Dr. Armando Encinas Oropesa**

San Luis Potosí, S.L.P., junio de 2025



## **Constancia de aprobación de la tesis**

La tesis “**Tintas Magnéticas Impresas en Textiles para la Generación de Band Gaps Fotónicos en el Rango de Microondas**” presentada para obtener el Grado de Maestro(a) en Nanociencias y Materiales fue elaborada por **Daniela Fernández Sánchez** y aprobada el **día de junio de 2025** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Materiales Avanzados del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

---

**Dr. Armando Encinas Oropesa**  
Director de la tesis

---

**Dr. Román López Sandoval**  
Miembro del Comité Tutorial

---

**Dr. Horacio Flores Zúñiga**  
Miembro del Comité Tutorial



## **Créditos Institucionales**

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Materiales Magneto Activos de la División de Materiales Avanzados del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. Armando Encinas Oropesa.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (1321460) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

Página en Blanco que se va a utilizar para colocar la copia del acta de examen.

## Dedicatoria

A mis padres, por ser un constante ejemplo de resiliencia y fortaleza, y por brindarme siempre su amor incondicional y su apoyo sin medida.

A mis amigos, cuya compañía, palabras de aliento y motivación iluminaron mi camino en los momentos más desafiantes.

A mi asesor, por su tiempo, guía y compromiso, que fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

## Agradecimientos

Le agradezco a mi asesor de tesis el Dr. Armando Encinas Oropesa por su tiempo, paciencia y dedicación para realizar este trabajo.

Al personal técnico, Maestra Beatriz Adriana Rivera Escoto, Dr. Ignacio Becerril Juárez y a la Maestra Ana Iris Peña Maldonado; por su paciencia y apoyo.

Al Laboratorio de Investigación en Nanociencias y Nanotecnología (LINAN), por permitir el uso de sus equipos para la elaboración del presente trabajo.

Al laboratorio “Eloro” por permitirme usar su máquina de prueba de doblados.

También agradezco al Dr. José Luis Sánchez Llamazares por su apoyo con las mediciones realizadas en el sistema VSM.

Agradezco al Dr. Joaquín De La Torre Medina, del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM campus Morelia por su valiosa colaboración en las mediciones de absorción de microondas.

A los miembros del comité tutorial Dr. Román López Sandoval y Dr. Horacio Flores Zúñiga por haber dado seguimiento a mi trabajo de tesis, y por haber leído detenidamente ésta.

# Contenido

<b>Constancia de aprobación de la tesis</b> .....	<b>ii</b>
<b>Créditos institucionales</b> .....	<b>iii</b>
<b>Acta de examen</b> .....	<b>iv</b>
<b>Dedicatorias</b> .....	<b>v</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>vi</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>x</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>xi</b>
<b>1.Introducción</b> .....	<b>12</b>
<b>2.Justificación</b> .....	<b>15</b>
<b>3.Motivación</b> .....	<b>16</b>
<b>4.Hipotesis y objetivos</b> .....	<b>17</b>
4.1. Hipótesis.....	17
4.2. Objetivo general.....	17
4.2.1. Objetivos específicos.....	17
<b>5.Marco teórico</b> .....	<b>18</b>
5.1. Materiales magnéticos.....	18
5.2. Textiles inteligentes .....	22
5.2.1. Metamateriales.....	24
5.2.2. Materiales funcionales aplicables a textiles .....	24
5.3. Fundamentos electromagnéticos.....	25
5.4. Ondas electromagnéticas(microondas).....	30
5.4.1. Ondas estacionarias .....	31
5.5. Band Gap Fotónico .....	32
<b>6.Materiales y Métodos</b> .....	<b>36</b>
6.1. Síntesis de magnetita por el método de coprecipitación química .....	36
6.1.1. Adaptación del método de coprecipitación en textil .....	38
6.2. Batik.....	39
6.3. Serigrafía.....	40
6.3.1. Tintas comerciales .....	41
6.3.2. Elaboración de tintas a base de elastómero y dispersión de polvos.....	31

<b>7. Caracterización</b> .....	<b>43</b>
7.1. Microscopía Electrónica de Barrido .....	43
7.2. Difracción de Rayos X .....	44
7.3. Propiedades magnéticas.....	44
7.4. Máquina de pruebas de doblados.....	44
7.5. Analizador de Redes Vectoriales .....	44
<b>8. Resultados</b> .....	<b>47</b>
8.1. Síntesis y caracterización de patrones magnéticos obtenidos por coprecipitación y técnica de Batik .....	47
8.1.1. Microscopía Electrónica de Barrido .....	49
8.1.2. Difracción de Rayos X.....	51
8.1.3. Propiedades magnéticas .....	53
8.2. Serigrafía en tela usando tintas comerciales.....	54
8.2.1. Primer magnético .....	54
8.2.1.1. Microscopia Electrónica de Barrido .....	54
8.2.1.2. Difracción de Rayos X.....	55
8.2.1.3. Propiedades magnéticas .....	56
8.2.2. Pintura de Níquel en aerosol .....	57
8.2.2.1. Microscopia Electrónica de Barrido .....	57
8.2.2.2. Difracción de Rayos X.....	60
8.3. Serigrafía en tela usando tintas a base de Ecoflex <sup>TM</sup> 00-30 .....	61
8.3.1. Tinta a base de Ecoflex <sup>TM</sup> 00-30 y magnetita mineral .....	61
8.3.1.1. Microscopia Electrónica de Barrido .....	62
8.3.1.2. Difracción de Rayos X.....	65
8.3.1.3. Propiedades magnéticas .....	67
8.3.2. Tinta a base de Ecoflex <sup>TM</sup> 00-30 y magnetita (Sigma-Aldrich) .....	68
8.3.2.1. Microscopia Electrónica de Barrido .....	68
8.3.2.2. Difracción de Rayos X.....	70
8.3.2.3. Propiedades magnéticas .....	72
8.3.3. Tinta a base de Ecoflex <sup>TM</sup> 00-30 y níquel (Sigma-Aldrich) .....	73
8.3.3.1. Microscopia Electrónica de Barrido .....	74
8.3.3.2. Difracción de Rayos X.....	76
8.3.3.3. Propiedades magnéticas .....	78
8.4. Pruebas de dobleces .....	79

<b>9. Absorción de microondas y efecto de Band Gap Fotónico en patrones periódicos lineales</b> .....	<b>81</b>
9.1. Pinturas comerciales .....	81
9.2. Tintas a base de EcoflexTM 00-30 sobre tela .....	82
9.2.1. Tinta a base de EcoflexTM 00-30 y magnetita mineral .....	82
9.2.2. Tinta a base de EcoflexTM 00-30 y magnetita (Sigma-Aldrich).....	83
9.2.3. Tinta a base de EcoflexTM 00-30 y níquel (Sigma-Aldrich) .....	84
<b>10. Conclusiones</b> .....	<b>87</b>
<b>11. Perspectivas del trabajo</b> .....	<b>90</b>
<b>12. Bibliografía</b> .....	<b>91</b>

## Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de tintas magnéticas basadas en un elastómero de silicona cargado con micropartículas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) o níquel (Ni), diseñadas para ser impresas mediante serigrafía sobre textiles y generar patrones periódicos de regiones rectangulares magnéticas alternadas con zonas no magnéticas. El objetivo fue crear materiales textiles con efectos de band gap fotónico (PBG) en el rango de microondas (1–40 GHz), relevantes para aplicaciones en e-textiles y dispositivos de camuflaje electromagnético. Las partículas y las tintas fueron caracterizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (XRD) y magnetometría (VSM). Por su parte, los patrones impresos en textiles fueron analizados mediante un analizador de redes vectoriales (VNA) empleando una guía de onda del tipo *stripline*. Los resultados demostraron que patrones periódicos con dimensiones cercanas a 2 mm inducen un PBG detectable en microondas, observable tanto en las tintas con  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  como en las de Ni. La amplitud del PBG mostró dependencia con la concentración de partículas magnéticas, sugiriendo un mecanismo de acoplamiento entre la permitividad efectiva del material compuesto y la geometría del patrón impreso. Aunque ambas tintas exhibieron comportamientos similares en la generación del PBG, se identificaron diferencias en la amplitud de las bandas de reflexión, atribuibles a la distinta permeabilidad magnética de los materiales y a posibles efectos de aglomeración de partículas. La técnica de serigrafía demostró ser escalable para la fabricación de textiles funcionales, aunque se requiere optimizar la homogeneidad de la dispersión para mejorar la reproducibilidad. La durabilidad de las tintas fue validada mediante pruebas de 1000 ciclos de flexión, observando pérdidas despreciables de masa. Este estudio establece un marco para el diseño de textiles inteligentes con propiedades electromagnéticas sintonizables, evitando el uso de estructuras nanométricas complejas. Futuras investigaciones explorarán la integración de campos magnéticos externos para modular dinámicamente el PBG y evaluarán la durabilidad de las tintas bajo condiciones de ciclos de lavado.

Palabras clave: tintas magnéticas, band gap fotónico, microondas, e-textiles, serigrafía, magnetita, níquel.

## Abstract

This work presents the development of magnetic inks based on a silicone elastomer loaded with magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) or nickel (Ni) microparticles, designed for screen printing onto textiles to generate periodic patterns of alternating magnetic and non-magnetic rectangular regions. The objective was to create textile materials with photonic band gap (PBG) effects in the microwave range (1–40 GHz), relevant for applications in e-textiles and electromagnetic camouflage devices. The particles and inks were characterized using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and magnetometry (VSM). Meanwhile, the printed patterns on textiles were analyzed using a vector network analyzer (VNA) with a stripline-type waveguide. The results demonstrated that periodic patterns with dimensions close to 2 mm induce a detectable PBG in microwaves, observed in both  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - and Ni-based inks. The PBG amplitude showed dependence on the concentration of magnetic particles, suggesting a coupling mechanism between the effective permittivity of the composite material and the geometry of the printed pattern.

Although both inks exhibited similar PBG generation behavior, differences in reflection band amplitude were identified, attributable to the distinct magnetic permeability of the materials and possible particle agglomeration effects. The screen-printing technique proved scalable for the fabrication of functional textiles, though further optimization of dispersion homogeneity is required to improve reproducibility. Ink durability was validated through 1000 bending cycles, with negligible mass loss. This study establishes a framework for designing smart textiles with tunable electromagnetic properties, avoiding the need for complex nanostructures. Future research will explore the integration of external magnetic fields to dynamically modulate the PBG and assess ink durability under washing cycles conditions.

Keywords: Magnetic inks, photonic band gap, microwaves, e-textiles, screen printing, magnetite, nickel.

# 1. Introducción

El desarrollo de textiles inteligentes (e-textiles) ha generado un creciente interés en diversos campos como la medicina, la tecnología, comunicaciones, la ciencia militar, etc., debido a su capacidad para integrar ciertas propiedades, además de ser flexibles, durables, de bajo costo y con la capacidad de ser incorporados fácilmente. Entre las aplicaciones más prometedoras, se encuentran la protección contra los rayos ultravioletas [1], la mejora de propiedades térmicas mediante textiles que actúan como aislantes [2], la integración de sensores para monitoreo de salud o actividad física [3,4], la protección contra ondas electromagnéticas [5], y la generación de energía a través de la conversión de movimiento o radiación solar [6], etc.

Estas aplicaciones abren un abanico de posibilidades que no sólo optimizan la funcionalidad de la ropa, sino que también ofrecen soluciones a distintas problemáticas, además se debe considerar que en el desarrollo de textiles inteligentes es fundamental que estos materiales sean capaces de resistir ciclos de lavado, tensiones mecánicas y la exposición prolongada al desgaste sin comprometer su funcionalidad y propiedades.

Para lograr los efectos deseados en los textiles, se ha explorado diversas metodologías para incorporar diferentes compuestos o materiales. Estas técnicas van desde la síntesis directa de nanopartículas sobre la tela o fibras sintéticas o de algodón mejorando las propiedades de las telas y con ello sus posibles aplicaciones [4,5,7,8, 9].

En particular para este trabajo es de interés poder integrar a los textiles ciertas propiedades magnéticas y/o conductoras, de acuerdo con la bibliografía los compuestos más comunes son: óxidos de hierro, metales, polímeros conductores, materiales de carbono y otros compuestos funcionales [10-14], aunque cabe mencionar que algunos compuestos entran dentro de la categoría de los

metamateriales, estos al ser materiales artificiales pueden mejorar u optimizar las propiedades del textil. Entonces se pueden fabricar un material con un cierto arreglo tal que se permita la manipulación de ondas electromagnéticas en donde se tengan ciertos dominios de frecuencias que no puedan propagarse en el rango de las microondas y a su vez implementarla en textiles [15].

Esta tecnología se conoce como Band Gap Fotónico (PBG) con potencial aplicación como guía de onda, acopladores, reflectores y antenas. Diversos estudios previos han reportado distintas configuraciones y materiales. Por ejemplo, se han reportado arreglos de red cuadrada de cilindros dieléctricos de alúmina que presentan bandas prohibidas (gaps) en los rangos de 24-38 GHz, 52-58 GHz y 71 GHz [16].

Asimismo, se han desarrollado estructuras periódicas unidimensionales (1D) combinado PTFE-aire (politetrafluoroetileno) obteniendo gaps entre 10.38-14.3 GHz, además al introducir un defecto en la estructura se tiene un gap localizado en 11.6 GHz [17]. En estructuras ferroeléctricas con arreglos de aire-MgO-Ba<sub>0.55</sub>Sr<sub>0.45</sub>TiO<sub>3</sub>-aire el Gap depende tiene una dependencia del grosor de la capa ferroeléctrica [18].

Por otro lado, también se ha demostrado la existencia de PBG isotrópicos en arreglos bidimensionales (2D) de cilindros compuestos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con una estructura dieléctrica desordenada en la región de microondas [19]. Suneet et al. demostraron que, en compuestos ternarios de cuarzo, plasma frío magnetizado y aire, es posible tener un filtro de rechazo omnidireccional en la región de microondas por la presencia de PBG [20].

En redes hexagonales 2D de varillas de alúmina, se ha observado la formación de PBG completos en el rango de 57 y 61 GHz, como resultado de la superposición de bandas prohibidas, además de un diseño compacto [21]. También se ha demostrado que estructuras formadas por esferas metálicas o recubiertas generan PBG a frecuencias altas, alcanzando atenuaciones de hasta 30 dB [22].

Zichen et al. estudiaron cómo la alternancia (o alteridad) de partículas afecta el ancho y la posición del gap [23]. Por su parte, Vovchenko et al. analizaron estructuras fotónicas multicapa compuestas por nanotubos de carbono y

nanoplaquetas de grafito, mostrando que el comportamiento de los PBG en la región microondas pueden ser controlados ajustando la permitividad y el espesor de las capas [24].

Otros trabajos han explorado el uso de polímeros conductores como la polianilina debido a su capacidad de absorber microondas. Perymanfar et al. evidenciaron que mediante el uso de agentes dopantes se puede ajustar el band gap, así como la eficiencia del apantallamiento electromagnético en la región de microondas [25].

Considerando los resultados previamente reportados, se espera que, al generar un patrón periódico con estructuras dieléctricas se pueda inducir un Band Gap Fotónico, evitando así la propagación de ondas electromagnéticas en la región de microondas. Para ello, es posible modificar los parámetros como la permitividad dieléctrica, la permeabilidad magnética y, en consecuencia, el índice de refracción e impedancia, así como el número de capas (arreglos 2D Y 3D) [17-19, 24,26-28]. Si bien los estudios anteriores han demostrado la eficacia de distintas configuraciones para generar band gaps en microondas, aún existen desafíos relacionados con la flexibilidad de los materiales y su integración en textiles. Por esta razón, en el presente trabajo se propone un diseño simple unidimensional (1D), basado en el estudio de Saib et al., quienes utilizaron un composito magnético formando por nanobarras variando así la permeabilidad. Por otro lado, también se retoma la propuesta de Hamidi et al., que empelaron un arreglo similar, pero utilizando nanobarras de níquel como elemento conductor.

En este contexto el enfoque de este trabajo se centra en fabricación de un material con propiedades magnéticas y/o conductoras, empelando partículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y níquel dispersas en una matriz de elastómero, simulando una tinta a diferentes concentraciones cuyas propiedades electromagnéticas pueden variar [27, 29].

Asimismo, se utilizó la técnica de serigrafía como método de deposición, ya que permite una fácil integración de estas tintas sobre los textiles, generando patrones periódicos bien definidos mediante la alternancia de bandas con y sin recubrimiento.

## 2. Justificación

La necesidad de desarrollar materiales textiles capaces de manipular microondas en el rango de 1 a 40 GHz es de gran interés ya que los enfoques tradicionales se basan en estructuras metálicas rígidas o nanomateriales complejos, los cuales presentan limitaciones en flexibilidad, escalabilidad y costo. Además, la mayoría de los e-textiles actuales se enfocan en las propiedades conductoras, dejando de lado el aprovechamiento de las propiedades magnéticas para el control de ondas electromagnéticas.

En este contexto, la presente investigación aborda dicho desafío mediante el desarrollo de tintas magnéticas formuladas con micropartículas de magnetita y níquel, aplicadas sobre textiles mediante serigrafía. Esta estrategia no sólo permite generar estructuras periódicas capaces de formar band gaps fotónicos (PBGs), sino que también abre una perspectiva original en el estudio de la interacción entre e-textiles y ondas electromagnéticas en el rango de microondas, relevante para aplicaciones en comunicaciones inalámbricas.

### 3. Motivación

La motivación central de este trabajo radica en tres aspectos clave. Primero, la oportunidad de explorar el efecto de la permeabilidad magnética ( $\mu$ ) en la formación de PBGs en estructuras macroscópicas, un fenómeno poco estudiado en comparación con los enfoques centrados exclusivamente en la permitividad eléctrica. Segundo, la solución de problemas prácticos mediante técnicas como la serigrafía que han demostrado ser eficientes para generar patrones periódicos de  $\approx 2$  mm, suficientes para inducir efectos fotónicos en el rango de microondas sin necesidad de recurrir a nanotecnología costosa. Finalmente, el potencial de aplicaciones, que va desde textiles con camuflaje electromagnético sintonizable hasta sensores vestibles que aprovechen la modulación del PBG por deformación mecánica. Al integrar por primera vez materiales magnéticos en matrices elastoméricas impresas sobre textiles, no sólo contribuye al avance en ciencia fundamental de materiales, sino que también establece un puente entre la fotónica, el magnetismo y la industria textil inteligente.

El enfoque propuesto se basa en desarrollar sistemas periódicos unidimensionales que presenten un gap fotónico en el rango de las microondas (1-40 GHz). La propuesta se basa en estudios previos de sistemas fotónicos 1D fabricados con patrones periódicos de tamaño milimétrico. En particular, las estructuras de Gap fotónico compuestas por círculos grabados en el plano de tierra de líneas de microcinta basados en la variación periódica de la permitividad [72] y las redes de rectángulos de nanoalambres magnéticos, donde se introduce una variación periódica de la permeabilidad [71]. Inspirados por este segundo enfoque, se ha propuesto usar partículas magnéticas para producir patrones geométricos de dimensiones milimétricas en textiles que resulten en una variación periódica de la permeabilidad magnética, produciendo así un gap fotónico.

## **4. Hipótesis y objetivos**

### **4.1. Hipótesis**

La impresión de patrones periódicos con tintas magnéticas ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  o Ni) sobre textiles genera un band gap fotónico (PBG) en el rango de microondas (1–40 GHz), cuya frecuencia central y amplitud pueden controlarse mediante la concentración de partículas magnéticas y la geometría del patrón. Este efecto surge del acoplamiento entre la permitividad efectiva y la permeabilidad magnética del material compuesto

### **4.2. Objetivo general**

Desarrollar y caracterizar textiles funcionales con band gaps fotónicos sintonizables en microondas, mediante el uso de tintas magnéticas cargadas con micropartículas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) o níquel (Ni), impresas en patrones periódicos. Se evaluará la relación entre la composición de las tintas (concentración de partículas) y las propiedades de los PBGs.

#### **4.2.1. Objetivos específicos**

1. Implementar y optimizar la síntesis de nanopartículas de magnetita localizada en textiles con patrones geométricos definidos con parafina.
2. Implementar y optimizar la incorporación de materiales magnéticos en polvo a partir de dispersiones en diferentes medios, empleando técnicas de serigrafía para obtener patrones geométricos bien definidos.
3. Implementar y optimizar las técnicas de impregnación con parafina y de serigrafía que permitan obtener los depósitos de material en patrones geométricos bien definidos
4. Realizar la caracterización elemental mediante SEM, XRD y magnetometría de los diferentes materiales empleados, así como de los textiles obtenidos.
5. Validar la aparición del gap fotónico en la región de microondas en patrones de bandas paralelas de dimensiones milimétricas.

## 5. Marco teórico

### 5.1. Materiales magnéticos

Todos los materiales en la naturaleza responden a la acción de un campo magnético ( $H$ ). Esta respuesta corresponde a la polarización del material generalmente denominada magnetización,  $M$ . La teoría clásica del electromagnetismo escribe la relación entre el campo magnético y la polarización del material como,

$$M = \chi H \quad (1)$$

Donde  $\chi$  es la susceptibilidad magnética del material. La susceptibilidad magnética es una propiedad de la materia que describe cómo un material se comporta frente a un campo magnético externo. Específicamente indica qué tan fácilmente puede ser magnetizado un material [30].

Según su valor y signo, se acostumbra a clasificar a los materiales como paramagnéticos, diamagnéticos, ferromagnéticos y antiferromagnéticos. La Fig. 1 muestra una gráfica de la susceptibilidad magnética (molar) para elementos químicos puros.

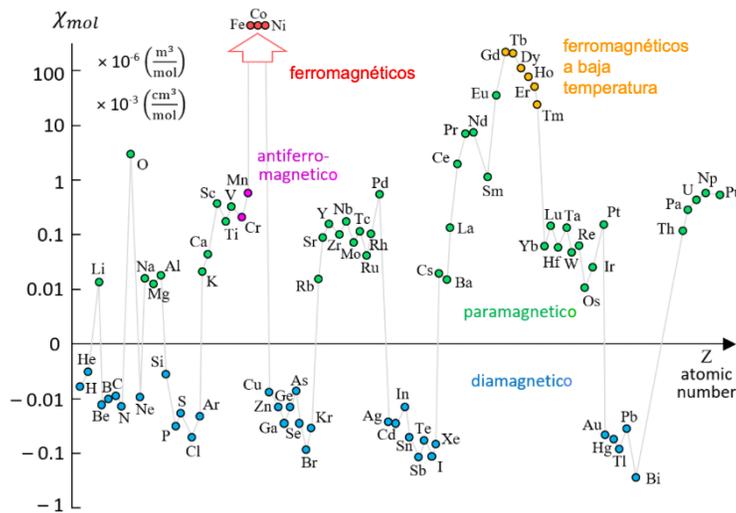


Fig.1 Susceptibilidad molar en función del número atómico imagen adaptada de [31].

Esta clasificación permite separar aquellos materiales cuya susceptibilidad es débil y por lo tanto responden débilmente al campo magnético, diamagnéticos, paramagnéticos y antiferromagnéticos, de aquellos que presentan una respuesta fuerte o elevada al campo magnético aplicado, como es el caso de los ferromagnéticos y ferrimagnéticos. En función del campo magnético aplicado los materiales tienen una curva típica de magnetización, ver Fig. 2.

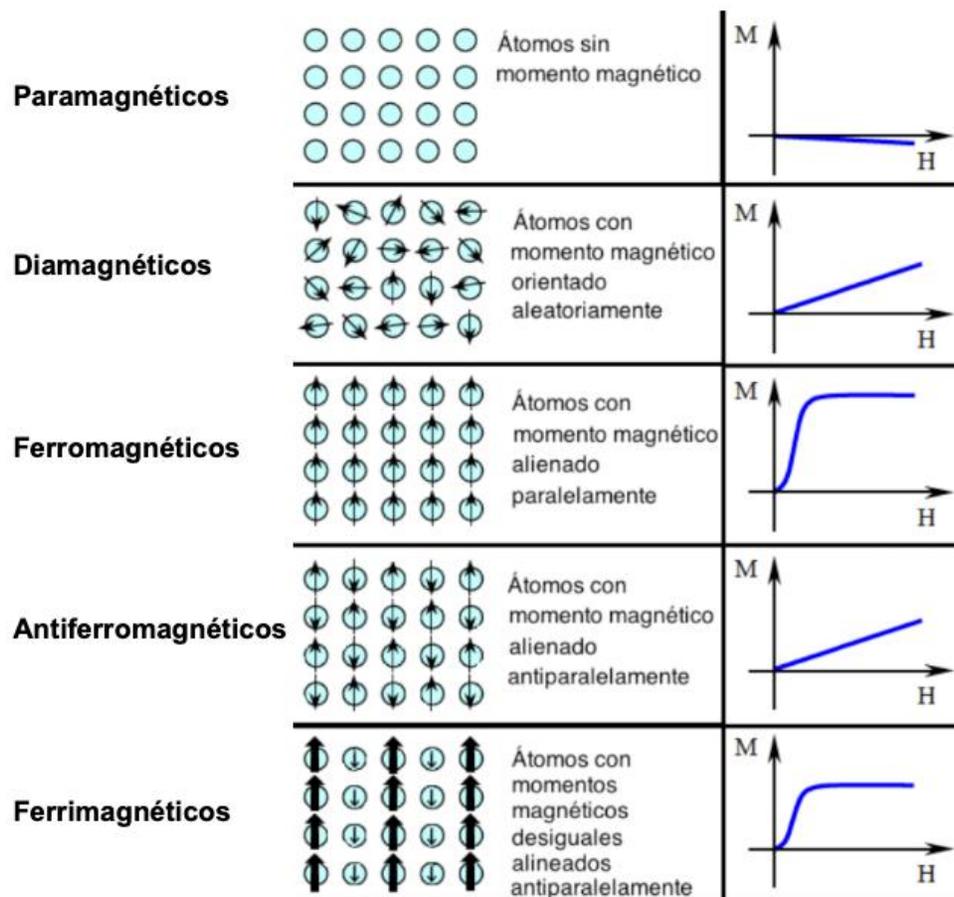


Fig. 2 Diferentes tipos de materiales según su comportamiento magnético adaptada de [32].

### Materiales Diamagnéticos

Los materiales diamagnéticos son aquellos que presentan una débil repulsión ante campos magnéticos externos, generando una magnetización opuesta al campo aplicado. Esta propiedad surge porque los electrones de sus átomos, al interactuar

con el campo magnético, modifican ligeramente su movimiento orbital, induciendo momentos magnéticos antiparalelos. El diamagnetismo es universal (todos los materiales lo exhiben en alguna medida), pero sólo es observable en sustancias sin electrones desapareados, como el agua, el cobre o el bismuto. Su susceptibilidad magnética ( $\chi$ ) es pequeña y negativa (típicamente del orden de  $10^{-5}$ ), lo que significa que no retienen magnetización una vez se retira el campo externo. Su curva de magnetización en función del campo es una recta con pendiente negativa, ver Fig. 2.

### **Materiales Paramagnéticos**

Los materiales paramagnéticos se caracterizan por una atracción débil hacia campos magnéticos externos, debido a la presencia de electrones desapareados en sus átomos o moléculas. A diferencia de los diamagnéticos, estos electrones generan momentos magnéticos intrínsecos que se alinean con el campo aplicado, produciendo una magnetización paralela. Sin embargo, esta alineación es termodinámicamente desordenada a temperatura ambiente (por agitación térmica), lo que resulta en una susceptibilidad magnética positiva pero pequeña ( $\chi \sim 10^{-3}$  a  $10^{-5}$ ). Ejemplos incluyen el aluminio, el oxígeno molecular ( $O_2$ ) y complejos de metales de transición como el sulfato de manganeso. Al eliminar el campo externo, estos materiales pierden su magnetización. Su curva de magnetización en función del campo es una recta con pendiente positiva, ver Fig. 2.

### **Materiales Ferromagnéticos**

Los materiales ferromagnéticos exhiben una fuerte atracción a campos magnéticos externos y pueden retener magnetización permanente incluso después de que el campo se elimina. Esta propiedad surge de la alineación paralela y cooperativa de momentos magnéticos atómicos (dominios magnéticos) debido a interacciones de intercambio cuántico entre electrones desapareados. Hierro (Fe), níquel (Ni), cobalto (Co) y sus aleaciones son ejemplos clásicos, con susceptibilidades

magnéticas positivas y muy altas ( $\chi \gg 1$ ). Presentan temperatura de Curie (TC), por encima de la cual pierden su ferromagnetismo y se vuelven paramagnéticos. En su caso, la curva de magnetización en función del campo es no lineal y creciente hasta un valor máximo, ver Fig.2.

### **Materiales Antiferromagnéticos**

Los materiales antiferromagnéticos presentan una ordenación magnética donde los momentos magnéticos de átomos vecinos se alinean en direcciones opuestas (antiparalelas), cancelándose mutuamente y resultando en una magnetización neta aparentemente nula. Esta estructura surge debido a un acoplamiento de intercambio negativo entre electrones desapareados de átomos adyacentes, típicamente mediado por interacciones superintercambio en óxidos. Ejemplos clásicos incluyen el óxido de manganeso (MnO) y el óxido de níquel (NiO). A temperaturas por encima de la temperatura de Néel (TN), estos materiales se vuelven paramagnéticos, perdiendo el orden antiferromagnético. En este caso, la curva de caracterización en función del campo es una recta con pendiente positiva, ver Fig.2.

### **Materiales Ferrimagnéticos**

Los materiales ferrimagnéticos son una clase especial de materiales magnéticos donde los momentos magnéticos de átomos diferentes en la red cristalina se alinean antiparalelamente, pero debido a diferencias en la magnitud de estos momentos, existe una magnetización neta no nula. Este comportamiento es característico de ferritas como la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) o las ferritas de bario/estroncio. La compensación incompleta de momentos surge típicamente en estructuras cristalinas complejas con subredes magnéticas desbalanceadas (ej: sitios tetraédricos y octaédricos en espinelas). Al igual que los ferromagnéticos, presentan una temperatura crítica (de Curie, TC), por encima de la cual se vuelven paramagnéticos. En este caso, la curva característica de magnetización en función del campo es no lineal y creciente hasta un valor máximo, similar al de los materiales ferromagnéticos, ver Fig. 2.

En el presente trabajo se han utilizado dos materiales magnéticos: (a) la magnetita  $F_3O_4$ , que es ferrimagnético y aislante y, (b) el Níquel, que es ferromagnético y conductor eléctrico.

El interés para este trabajo es la permeabilidad de estos materiales más que su susceptibilidad. Estas propiedades están relacionadas. En efecto, usando las ecuaciones del electromagnetismo clásico como,

$$\mu = \mu_0(1 + \chi) \quad (2)$$

donde:  $\mu$  es la permeabilidad magnética del material en (H/m),  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m) y  $\chi$  la susceptibilidad magnética.

## 5.2. Textiles inteligentes

Los textiles inteligentes son sistemas inteligentes portátiles que incorporan tecnologías capaces de recibir y/o emitir señales, responder a estímulos internos y/o externos y adaptarse a diversas condiciones ambientales o del usuario [33].

Gracias a estas capacidades, se han desarrollado diferentes textiles para su integración inteligente, multifuncionalidad, mejoras de rendimiento y en algunos casos con enfoque sostenible, permitiendo su aplicación en áreas como la nanotecnología, el aprendizaje automático, la recolección de energía, la biomedicina, etc. [33, 34]. Según su grado de funcionalidad, los textiles inteligentes se clasifican en tres categorías [35,36]:

- Pasivos: Detectan cambios o estímulos a través de sensores integrados, pero no sufren modificaciones.
- Activos: Además de detectar estímulos del ambiente o del usuario pueden reaccionar modificando sus propiedades y estructuras o transmitiendo señales.

- Ultra inteligentes: Son capaces de detectar, reaccionar y se adaptarse de manera inmediata a condiciones externas o estímulos.

Se pueden añadir ciertas características a través de la composición, la estructura, acabado o adicionando otros elementos, para ello se han empleado diferentes metodologías que van desde la integración de hilos conductores durante o después de la fabricación del textil, integración de dispositivos electrónicos como LEDs, sensores y baterías, también se pueden añadir compuestos o elementos por medio de deposición química de vapor (CVD), deposición física de vapor (PVD), coprecipitación química, impresión por inyección de tinta, serigrafía, etc.

Por ejemplo, se han desarrollado diferentes tecnologías que se incorporan a textiles usando composites poliméricos conductores para monitorear electrocardiogramas [37], sensores para la detección de signos vitales como el pulso, la presión, temperatura etc. [38-40], también se han introducido materiales que permiten la conductividad eléctrica para su aplicación como blindaje electromagnético ya sea durante la fabricación integrando hilos conductores monofilamentos, etc., o posteriormente añadiendo partículas metálicas y/o magnéticas por métodos físicos y químicos o como recubrimiento usando polímeros conductores [41-45]. Por otro lado, han surgido investigaciones usando piezoeléctricos integrados en las telas debido a su capacidad de generar energía, actuar como sensores de movimiento, absorber impacto, etc. [46, 47].

Asimismo, existe el reto de no sólo integrar ciertas propiedades a los textiles, sino también el hacerlos durables, lavables y capaces de resistir ciclos de tensión [48], tomando en cuenta que durante el lavado hay interacciones mecánicas, cambios térmicos, interacción con detergentes, etc., que pueden modificar su conductividad, resistencia, dañar o reducir su funcionalidad [39, 49], por otro lado, también se han propuesto estrategias para integrar a los textiles inteligentes en un modelo de economía circular sustentable [50, 51].

### **5.2.1. Metamateriales**

Los metamateriales son estructuras homogéneas con composiciones inusuales y arreglos estructurales sintéticos [52], con ciertas características físicas como índices de refracción negativos, cambios de la polaridad de la onda incidente, valores de la permeabilidad y permitividad negativos a ciertas frecuencias [53, 54] que les dan propiedades electromagnéticas, acústicas o mecánicas [55]. Para ello se han empleado diferentes técnicas para su fabricación como la fotolitografía, litografía con máscara de sombra y blanda, la superred de pilares verticales, la polimerización multifotónica, la galvanoplastia en múltiples capas, la impresión por inyección de tinta, etc., [56].

Ya que generar superficies con formas o regiones periódicas y una composición de materiales metálicos, no metálicos, dieléctricos, etc., permite la manipulación de ondas electromagnéticas [53] evitando su propagación en ciertas direcciones o impedir su transmisión [57], debido a esto se tiene un especial interés en aquellos materiales que de acuerdo con su estructura artificial periódica se pueda generar una banda prohibida electromagnética (EBG) también denominada banda prohibida fotónica (PBG).

### **5.2.2. Materiales funcionales aplicables a textiles**

La idea de generar un metamaterial para su potencial uso como PBG requiere de una disposición donde las áreas generen un alto contraste en las propiedades electromagnéticas [58]; además, las dimensiones deben ser de una fracción de la longitud de onda [53]. Por ello, se optó por utilizar tintas comerciales y caseras. Ambas fueron seleccionadas por su capacidad de adherirse al textil, mantener sus propiedades físicas, ser flexibles, resistir a la deformación y formar capas uniformes sobre el sustrato [59].

Como base de una tinta el uso de elastómeros es una alternativa práctica y de bajo costo, además al ser un material elástico y viscoso compuesto por cadenas

poliméricas unidas por fuerzas intermoleculares débiles, poseen características como la capacidad de expandirse sin deformarse, aunque poseen una resistencia débil [60], por otro lado, al ser materiales estables pueden usarse para encapsular materiales sin modificar sus propiedades.

### **5.3. Fundamentos electromagnéticos**

Los efectos de gap fotónico siguen de la interacción de las ondas electromagnéticas con la materia, por lo que a continuación se hace una revisión de los puntos más relevantes.

En los cristales fotónicos, tanto la impedancia de onda como el índice de refracción desempeñan roles cruciales que determinan las propiedades ópticas del cristal, particularmente en la formación de bandas prohibidas fotónicas (band gaps) y en el comportamiento de la propagación de la luz. El índice de refracción dicta cómo se refracta y refleja la luz en las interfaces entre materiales, influyendo en la capacidad general de la estructura para controlar la luz. Por otro lado, la impedancia de onda gobierna la reflexión y transmisión de la luz en estas interfaces, afectando la intensidad de los modos defectuosos y el ancho de las bandas prohibidas fotónicas.

Cuando una onda electromagnética incide en un material ocurren tres fenómenos: Reflexión, Absorción y Transmisión, la relación entre las cantidades se expresa como  $A + R + T = 1$ , donde cada variable representa la fracción de la energía total incidente de un medio 1 a un medio 2 [61]. Por otro lado, la energía de la onda incidente se distribuye en tres componentes: energía reflejada, energía absorbida y energía transmitida, ver Fig.3.

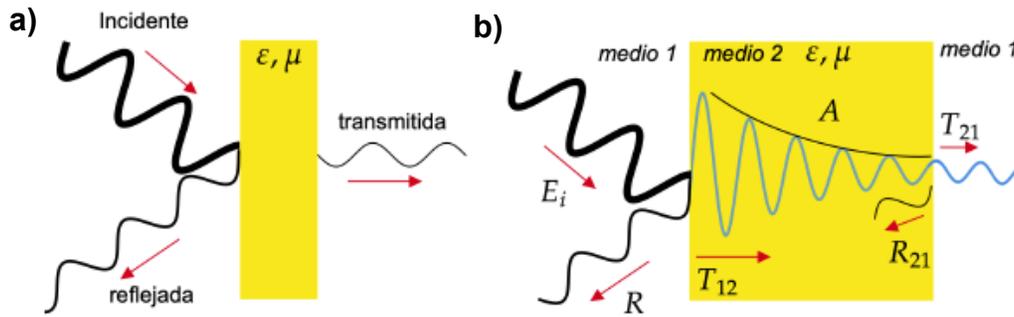


Fig. 3 Fenómenos de (a) reflexión y transmisión de una onda incidente, (b) reflexión ( $R$ ), absorción ( $A$ ), Reflexión interna ( $R_{21}$ ) y Transmisión ( $T$ ) de un medio 1 a un medio 2 ( $T_{12}$ ) y viceversa ( $T_{21}$ ) de una onda electromagnética.

Conforme la onda viaja en el material, los diferentes procesos de pérdidas de energía dan lugar a la energía absorbida, lo cual resulta en una disminución progresiva de la energía que transporta la onda teniendo una disminución de su amplitud, ver Fig. 3 (b). Finalmente, la energía restante, es decir, no absorbida, es transmitida del medio 2 al medio 1 ( $T_{21}$ ). Adicionalmente, parte de la energía no absorbida será también reflejada hacia el interior del material (reflexión interna) ( $R_{21}$ ).

Estos efectos de reflexión, absorción y transmisión y las propiedades del material dependen de las propiedades del material, específicamente de su permitividad ( $\epsilon$ ) y permeabilidad ( $\mu$ ) que determinan como es la respuesta del material a los campos eléctrico ( $E$ ) y magnético ( $H$ ).

La teoría electromagnética clásica establece que, en respuesta a la acción de un campo eléctrico ( $E$ ) o magnético ( $H$ ), el material se polariza. Para un dieléctrico, esta polarización es  $P$  y para el caso magnético es  $M$  (también llamada magnetización) y el grado de polarización que alcanza el material está dado por,

$$P = \epsilon_0 \chi_e E \quad (3)$$

$$M = \chi_m H \quad (4)$$

Donde  $\varepsilon_0$  es la permitividad del vacío mientras que  $\chi_e$  y  $\chi_m$  son las susceptibilidades eléctrica y magnética, respectivamente. Las susceptibilidades,  $\chi_e$  y  $\chi_m$  son propiedades intrínsecas y características del material, por lo tanto, éstas son las que determinan como es la respuesta del material a un campo aplicado ( $E$  o  $B$ ). El material polarizado produce un campo, el cual se superpone con el aplicado, por lo que el campo total en el espacio es la suma de ambos, esto lleva a las siguientes ecuaciones macroscópicas del electromagnetismo,

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0(1 + \chi_e)E = \varepsilon E \quad (5)$$

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + \chi_m)H = \mu H \quad (6)$$

donde  $D$  es el vector de desplazamiento eléctrico,  $B$  es la inducción magnética y  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del vacío. Estas ecuaciones describen los campos totales (desplazamiento e inducción) que incluyen la contribución de la polarización del material, cuyas propiedades intrínsecas (y específicas) están dadas por su permitividad ( $\varepsilon$ ) y permeabilidad ( $\mu$ ).

Los campos pueden ser DC o campos cuasiestáticos, cuando el material se polariza y está en fase con el campo, y campos AC cuando son variables en el tiempo, es decir, la polarización del material varía tratando de seguir al campo. Esta variación continua de la polarización por procesos disipativos, es decir, pérdidas de energía debido diversos procesos de relajación, así como de interacción con el entorno, dipolos vecinos, así como la red cristalográfica. Como resultado, se produce un desfaseamiento entre la polarización y el campo aplicado.

En un material, se presentan varios procesos mediante los cuales se disipa la energía de la onda en forma de calor y a estos se les llama pérdidas. Por lo que la descripción de los efectos de polarización y de pérdidas de energía se hace escribiendo la permitividad y la permeabilidad como cantidades complejas:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (7)$$

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (8)$$

En ambos casos, la parte real ( $\epsilon'$ ,  $\mu'$ ) corresponde a la capacidad del material para polarizarse en respuesta al campo externo, los cuales son procesos conservativos. La parte imaginaria ( $\epsilon''$ ,  $\mu''$ ) está asociada con las pérdidas en el material debido a la absorción y la dispersión de la energía de la onda electromagnética. Cuanto mayor sea la parte imaginaria, mayor será la pérdida de energía y, por lo tanto, menor será la eficiencia del material para transmitir la onda electromagnética.

Además de las pérdidas dieléctricas y magnéticas relacionadas con procesos de polarización, existen también las pérdidas eléctricas relacionadas con la conductividad (resistividad) del material. Estas están relacionadas con pérdidas en forma de calor debido a corrientes eléctricas (efecto Joule). Recordando que la densidad de  $J$  está dada en función de la conductividad del material ( $\sigma$ ) y el campo eléctrico tal que  $J = \sigma E$ . Para tomar en cuenta las pérdidas eléctricas, se agrega un término a la permitividad compleja, Ec. (5), de manera que la permitividad total se escribe como,

$$\epsilon_t = \epsilon + \frac{j\sigma}{\omega} \quad (9)$$

donde  $\omega = 2\pi f$  es la frecuencia angular.

Para determinar qué tan disipativo es un medio, se utiliza la tangente del ángulo de desfase  $\delta$  entre el campo aplicado ( $E$ ,  $H$ ) y el vector de polarización ( $P$ ,  $M$  o  $D$ ,  $B$ ) y se define como el cociente entre la parte imaginaria (disipativa) y la parte real (reactiva), de la permitividad  $\delta_\epsilon$  y de la permeabilidad  $\delta_\mu$ , donde

$$\tan \delta_\epsilon = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (10)$$

$$\tan \delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (11)$$

En un material dado se pueden presentar efectos dieléctricos y magnéticos o alguno de los dos, de manera que las pérdidas pueden ser de ambos tipos, por lo que las pérdidas totales se pueden escribir como,

$$\tan \delta = \tan \delta_\epsilon + \tan \delta_\mu \quad (12)$$

A partir de la definición, vemos que si  $\tan \delta_i \approx 0$ , ( $\epsilon'' \ll \epsilon'$ ) el material es casi ideal o presenta pérdidas mínimas. Al contrario, si  $\tan \delta_i \gg 0$ , el material presenta pérdidas significativas. Así mismo, si  $\delta_i$  es pequeño, implica que el vector de polarización está en fase con el campo aplicado y cuando  $\delta_i$  es grande, el desfaseamiento entre la polarización y el campo aplicado es grande debido a la disipación de energía.

Por su parte, la energía asociada con la amplitud se describe usando los coeficientes de reflexión, absorción y transmisión. Estos coeficientes a su vez se expresan comúnmente en términos de la impedancia. La impedancia característica ( $Z$ ) de un medio (para ondas planas) está dada por,

$$Z = \sqrt{\frac{E}{B}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (13)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377\Omega \quad (14)$$

$Z_0$  es la impedancia en el vacío. Para una onda que viaja de un medio 1 con hacia un medio 2 con impedancias características  $Z_1$  y  $Z_2$ , respectivamente, los coeficientes de reflexión  $R$  y transmisión  $T$  con  $T = 1 - R$  están dados por las siguientes expresiones,

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (15)$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (16)$$

De aquí vemos que la cantidad de energía reflejada y transmitida depende de la diferencia de impedancias de los dos medios. En particular, para un material absorbente ideal, la reflexión debe ser cero, lo cual ocurre cuando las impedancias de los dos medios son iguales,  $Z_2 = Z_1$ , y por lo tanto  $R = 0$  y  $T = 1$ . En cualquier otro caso ( $Z_2 \neq Z_1$ ) se tiene que  $R \neq 0$ . A partir de estas ecuaciones y conociendo

la amplitud de la onda incidente,  $E_0$ , la amplitud de la señal reflejada es  $E_r = RE_0$  y la correspondiente a la señal transmitida es  $E_t = TE_0$ .

En cuanto a la onda electromagnética transmitida, su propagación a través del medio está condicionada por las propiedades del material, en este caso, la permitividad y permeabilidad complejas. En un medio absorbente, la energía es disipada en forma de calor mediante diferentes procesos de pérdidas, lo cual resulta en la atenuación de la onda conforme ésta se propaga en el material.

La constante de propagación ( $\gamma$ ) es un parámetro fundamental que describe cómo una onda electromagnética se propaga en un material, teniendo en cuenta tanto su atenuación como su fase. Esta constante aparece en la función de onda,

$$E = E_0 e^{j(\omega t - \gamma z)} \quad (17)$$

La constante de propagación compleja se escribe de manera general como,

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (18)$$

donde  $\alpha$  es la constante de atenuación y representa la pérdida de energía de la onda debido a la conductividad u otros mecanismos de disipación. Por su parte  $\beta$  es la constante de fase y determina cómo cambia la fase de la onda a medida que se propaga. En la práctica, la cantidad que se analiza es la constante de atenuación,

$$\alpha = \frac{\sqrt{2}\pi f}{c} \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon') + \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon')^2 + (\mu'\epsilon'' - \mu''\epsilon')^2}} \quad (19)$$

De acuerdo con lo anterior, las propiedades de absorción de un material se basan en el análisis de la parte real e imaginaria de la permitividad y la permeabilidad, así como en la  $\tan \delta$ , Ec. 12, para identificar diferentes procesos de pérdidas en función de la frecuencia. Por otra parte, las propiedades de absorción se caracterizan mediante las pérdidas de retorno y la constante de atenuación, Ec. 19.

## 5.4. Ondas electromagnéticas (microondas)

Dentro del espectro electromagnético, las microondas se localizan entre el infrarrojo y las ondas de radio, ver Fig. 4, con frecuencias en la región de  $10^9$  Hz hasta  $3 \times 10^{11}$  Hz y a longitudes de onda de 100 cm a 1 mm [62, 63].

Las microondas son ondas electromagnéticas transversales, en donde los vectores de campo eléctrico y magnético son ortogonales entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación. Al igual que otras ondas electromagnéticas, al interactuar con el medio experimenta fenómenos de transmisión, reflexión, difracción, interferencia y polarización. Además, puede ser atenuada por efectos de absorción y dispersión.

Debido a sus propiedades, las microondas tienen diferentes aplicaciones como su uso en: radares, controles remotos, señales telefónicas, hornos de microondas, comunicaciones, dispositivos inalámbricos, etc. [64, 65].

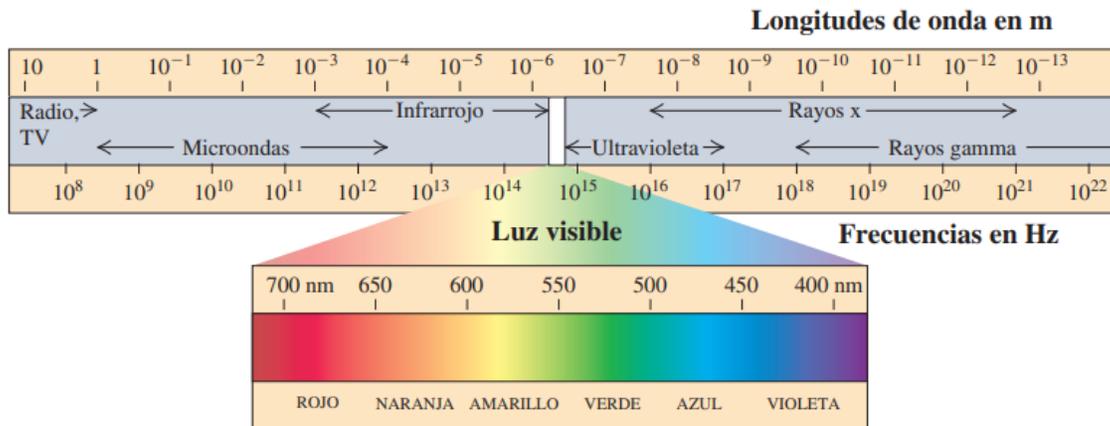
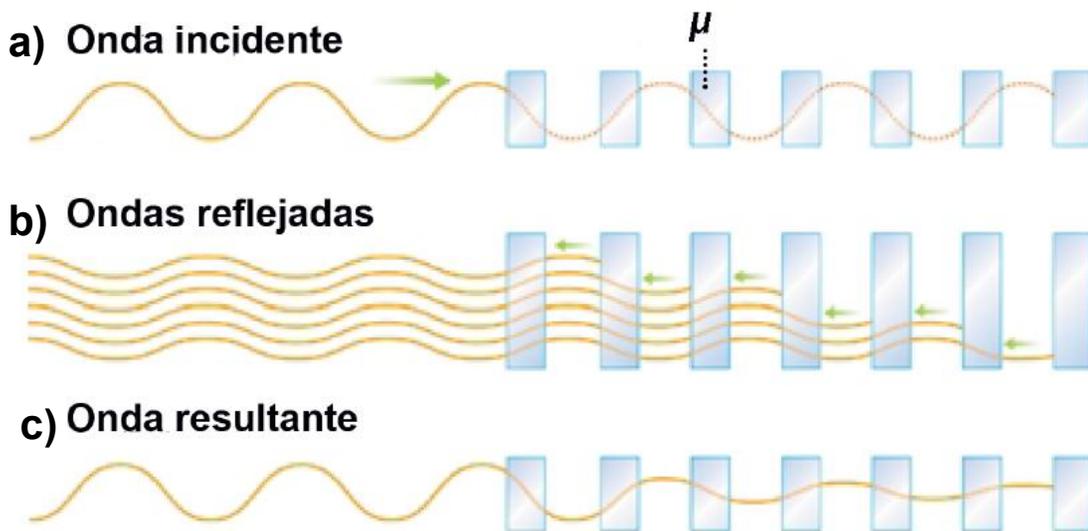


Fig.4 Espectro electromagnético [28].

### 5.4.1. Ondas estacionarias

Una onda estacionaria es un caso particular de interferencia de tipo constructiva entre una onda incidente y una onda reflejada. Cuando una onda incide en un medio como se muestra en la Fig. 5 (a) parte de la onda es reflejada y la otra es transmitida, (b) si las onda incidente y reflejada tienen la misma frecuencia y fase, pero en dirección de propagación opuesta ocurre una superposición coherente, (c) dando lugar a una onda estacionaria que no se propaga a través del material.

Cuando este fenómeno ocurre en un medio periódico con interfases de distinta permeabilidad magnética, se puede formar una banda prohibida de frecuencias, es decir, una región del espectro en la que las ondas no pueden propagarse. Este comportamiento es análogo al de los semiconductores, donde existen bandas de energía prohibida que impiden el paso de ciertos niveles energéticos para los electrones.



*Fig. 5. (a) Onda incidente en un medio periódico, (b) Parte de la onda es reflejada y está en fase con la onda incidente generando una interferencia constructiva, (c) Generación de una onda estacionaria [66].*

## 5.5. Band Gap Fotónico

Un band gap fotónico (PBG), es un rango de frecuencias de ondas electromagnéticas que no pueden propagarse en ninguna dirección. En 2003 Siglas et al. demostraron que este efecto se debe a un cambio en la permeabilidad magnética ( $\mu$ ) y la permitividad eléctrica ( $\varepsilon$ ) y cuando ambas son máximas en un mismo material el PBG tiene a desaparecer [67], por otro lado, Kee et al. experimentalmente demostraron que el PGB aparece al haber variaciones periódicas de la impedancia  $\left(Z = \sqrt{\mu/\varepsilon}\right)$  [68].

Se había mencionado que cuando una onda electromagnética incide en un material hay reflexión, absorción y transmisión, en particular nos interesa la reflexión en las interfases. Considerando el caso en donde hay una variación de la impedancia en un sistema de  $N$  secciones [69], ver Fig.6, el coeficiente de reflexión está dado por:

$$\Gamma_0 = \frac{Z_f - 50}{Z_f + 50} \quad (20)$$

$$\Gamma_1 = \frac{Z_p - Z_f}{Z_p + Z_f} \quad (21)$$

Donde  $Z_p$  es la impedancia del sustrato,  $Z_f$  es la impedancia del sustrato-materia, se infiere que  $\Gamma_{ipar} = -\Gamma_1, \Gamma_{i\text{ impar}} = \Gamma_1$  y  $\Gamma_N = \Gamma_0$ . Si consideramos todas las secciones impares, entonces la reflexión total estará dada por:

$$\Gamma = \Gamma_0 + \Gamma_1 e^{-2j\theta} + \dots + \Gamma_N e^{-2j\theta} \quad (22)$$

Donde  $\theta$  es la longitud de la celda, si se mantiene constante y se desprecia la parte imaginaria se obtiene una expresión analítica de la impedancia,

$$|\Gamma| = \left| 2\Gamma_0 \sin(N\theta) + \Gamma_1 \frac{\sin((N-1)\theta)}{\cos\theta} \right| \quad (23)$$

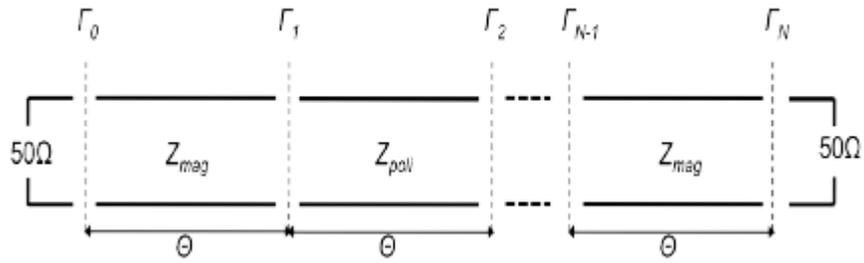


Fig. 6 Variación de la impedancia en un sistema de N secciones de longitud  $\theta$ , con una impedancia de entrada de  $50\Omega$  y  $\Gamma_i$  coeficiente de reflexión en las interfases [69].

De acuerdo con la bibliografía se ha demostrado que los materiales con periodicidad tienen un comportamiento como PBG [70], este estudio se ha realizado para estructuras con nanoalambres para variar la impedancia usando materiales ferromagnéticos teniendo una resonancia ferromagnética en las frecuencias de microondas [71]. El modelo se basa en la similitud de la respuesta en frecuencia entre una rendija de Bragg y una estructura PBG unidimensional, ver Fig.7, alrededor de sus frecuencias centrales.

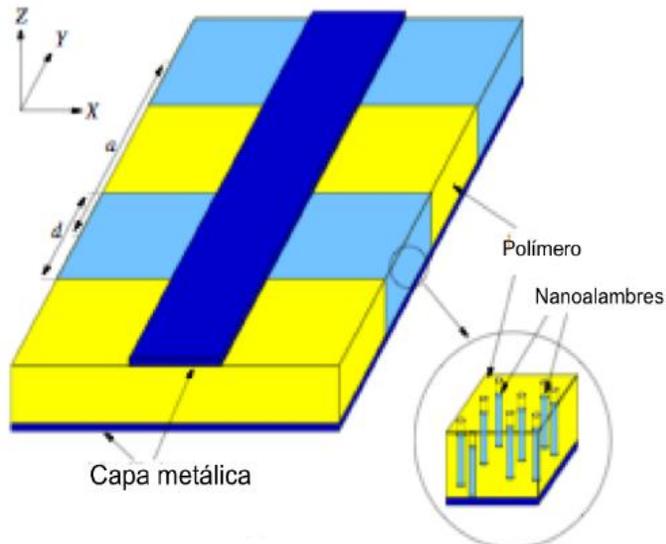


Fig. 7 Línea de transmisión microstrip sobre estructura PBG, imagen adaptada de [71].

$$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{c}{2[n_p(a-d)+n_f d]} \quad (24)$$

Donde  $\lambda_c$  es la longitud de onda en el centro de absorción,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $n_i = \sqrt{\epsilon_i \mu_i}$  es el índice de refracción de los materiales alternados  $i = p, f$ , siendo  $\epsilon_i$  y  $\mu_i$  la permitividad y la permeabilidad relativas de los materiales,  $a$  la longitud de del periodo y  $d$  es el ancho de las secciones magnéticas.

Laso et al. [72] retomando a Zhang et al. plantean que cuando se tiene dos materiales con  $n_p$  y  $n_f$  y espesores  $a - d$  y  $d$  respectivamente, el índice de refracción efectivo sobre el periodo  $a$  es:

$$n_{eff} = \frac{n_p(a-d)+n_f d}{a} \quad (25)$$

Corresponde al valor geométrico de en la dirección de propagación, De la condición de Bragg

$$\lambda_c = 2an_{eff} \quad (4)$$

Usando la relación entre frecuencia y longitud de onda  $f_c = \frac{c}{2an_{eff}}$ , en el caso particular cuando el espesor de los materiales es igual, es decir  $a = 2d$ , entonces se tiene que,

$$f_c = \frac{c}{a(n_p+n_f)} \quad (26)$$

De este análisis vemos que el índice de refracción determina principalmente cómo se refracta y refleja la luz en las interfaces entre materiales, mientras que la impedancia de onda gobierna el grado de reflexión y transmisión en estas interfaces. Ambas propiedades son esenciales para comprender y diseñar cristales fotónicos, particularmente para controlar la formación de bandas prohibidas fotónicas y el comportamiento de la luz dentro de estas estructuras. Así mismo dado que ambas propiedades son función de la permitividad y la permeabilidad, el diseño de materiales con band gap fotónico es realizable mediante estos parámetros. En el presente trabajo, se ha empleado la permeabilidad magnética como parámetro para inducir el gap fotónico.

## 6. Materiales y Métodos

Para la fabricación de muestras se usaron dos metodologías, la síntesis directa e incorporación de tintas en los textiles:

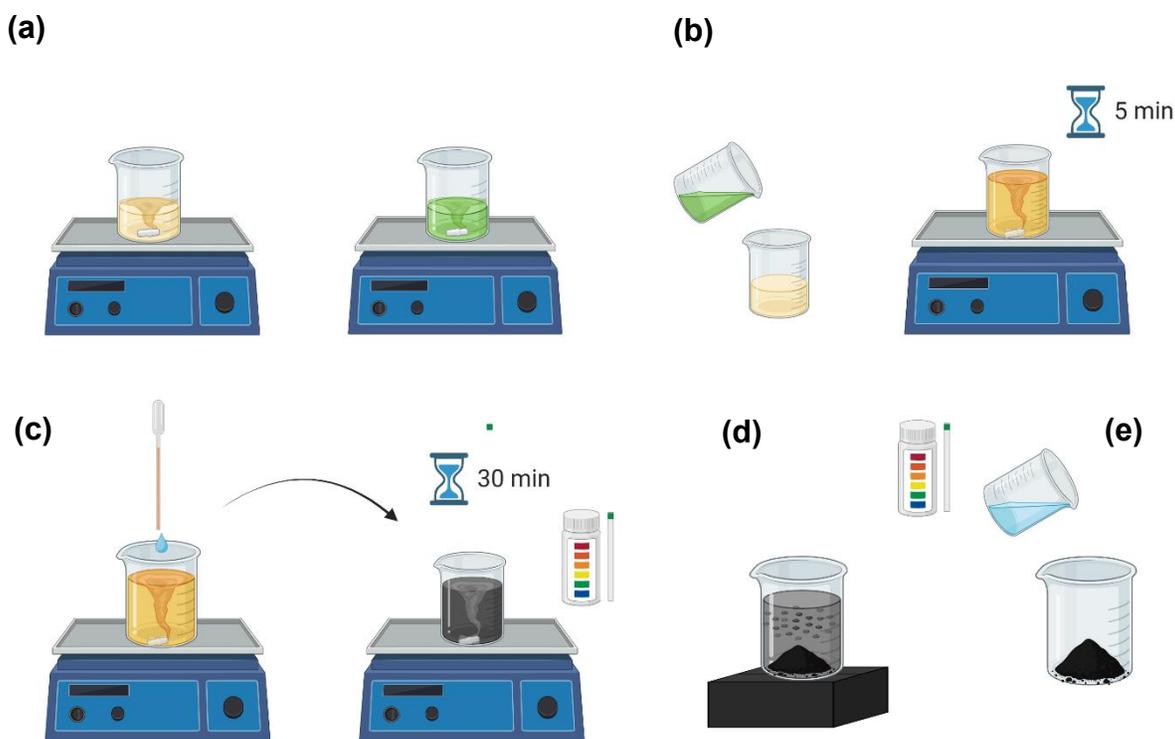
- Síntesis por el método de coprecipitación química: Para la síntesis de magnetita se ocuparon los reactivos: cloruro férrico hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), hidróxido amonio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) 28-30% de Sigma-Aldrich, cloruro ferroso tetrahidratado  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  de Baker Analyzed Reagent, agua destilada, etanol, cera de abeja, parafina y como sustrato tela 100% algodón.
- Tintas: Se usó un primer magnético de Sayer, pintura conductora de níquel (MG-Chemical super shield #841AR-340G), magnetita mineral, polvos de níquel  $<50 \mu\text{m}$ , 99.7% (Sigma-Aldrich CAS 266981), óxido de hierro (II, III)  $<5 \mu\text{m}$ , 95% (Sigma-Aldrich CAS 1317-61-9), elastómero Ecoflex<sup>TM</sup> 00-30 (Smooth-On) y tela 100% algodón.

### 6.1. Síntesis de magnetita por el método de coprecipitación química

El método de coprecipitación química consiste disolver sales metálicas en relación molar 2:1 y un agente precipitante en una solución [73], siendo un método eficaz para la obtención de nanopartículas cuya distribución de tamaño depende de factores cinéticos [74], sin embargo, se puede controlar otros factores como el pH, flujo de gas, precursores, la temperatura etc., durante la síntesis para modular el tamaño [75].

Para este trabajo, se disolvió simultáneamente en 50 ml de agua destilada 5.9 g de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.1 M y 1.988 g de  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  0.1 M, ver Fig.8 (a), después ambas

soluciones fueron mezcladas en agitación constante a 350 rev/min por 5 minutos, ver Fig.8 (b); posteriormente, se anexó por goteo  $\text{NH}_4\text{OH}$  hasta alcanzar un  $\text{pH}=10$  y se continuó agitando por 30 min, ver Fig.8 (c), pasado ese tiempo se colocó un imán debajo del vaso de precipitado para que decantaran las partículas magnéticas, ver Fig.8 (d). Se realizaron lavados a fin de retirar los subproductos de la síntesis, para ello, se retiró el excedente de agua con una pipeta, después se anexó 50 ml de agua destilada y se agitó con una varilla de vidrio, este proceso se lleva a cabo hasta obtener un  $\text{pH}$  neutro, ver Fig. 8 (e). Las partículas obtenidas fueron suspendidas en etanol en un frasco ámbar.

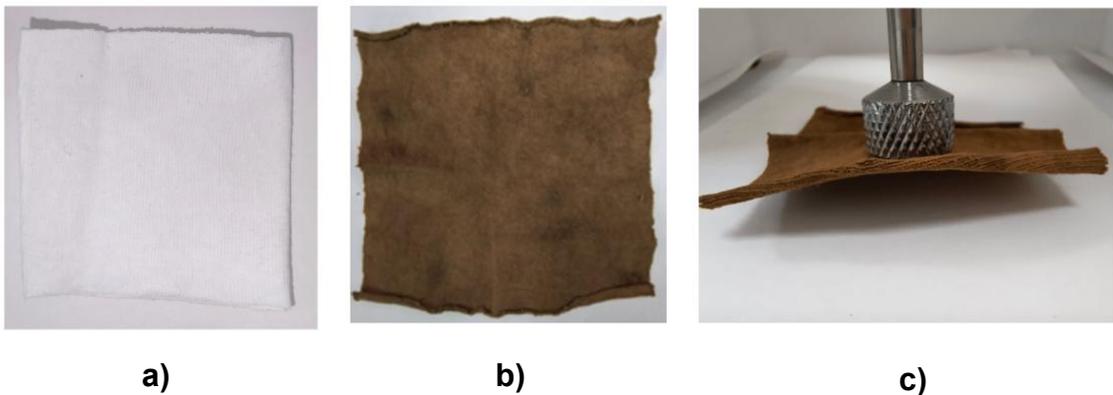


*Fig. 8 Síntesis de magnetita por el método de coprecipitación química.*

### 6.1.1. Adaptación del método de coprecipitación en textil

El método de coprecipitación fue adaptado para su depósito en textiles, para ello se usó tela 100% algodón, la cual fue lavada con agua destilada y jabón, después de seco en un horno a 70°C por una hora, para la síntesis se siguió la misma metodología descrita anteriormente, pero incrementando la concentración molar de las sales de hierro para tener una solución sobresaturada garantizando la absorción en todas las fibras de la tela.

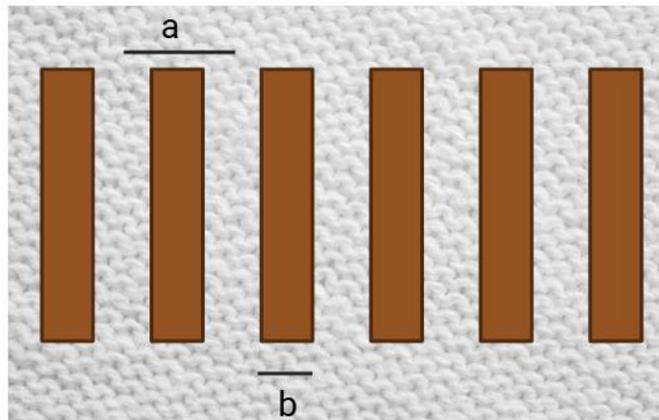
Se ocuparon 3.37 g de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.5 M y 1.24 g de  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  0.25 M, se cortó un cuadro de tela de dimensiones 7.3x7.3 cm aproximadamente 1 g de tela (7.3x7.3 cm), ver Fig. 9 (a), fue agreda en la solución y se dejó remojar por 72 horas para que quedara impregnado de los precursores, una vez realizados los lavados se retiró la tela y fue enjuagada bajo un flujo constante de agua destilada hasta retirar el excedente de partículas de magnetita y se dejó secar a temperatura ambiente, ver Fig. 9 (b), posteriormente se pasó un imán sobre la tela para comprobar la obtención de un textil magnético, ver Fig. 9 (c).



*Fig. 9 (a) Tela 100% algodón previamente lavado, (b) obtención de tela magnética por el método de coprecipitación química y (c) comprobación rápida con un imán de crecimiento de cristales de magnetita sobre tela de algodón.*

## 6.2. Batik

El Batik es una técnica que consiste en la aplicación de cera caliente en tela antes de ponerla en contacto con tinturas, debido a la incorporación de la cera en ciertas zonas, éstas no pueden teñirse logrando generar patrones controlando el teñido de la tela [76]. Uno de los objetivos de este trabajo es poder generar patrones periódicos con regiones alternas de magnetita y solo tela, además de variar el ancho de banda, ver Fig. 10.

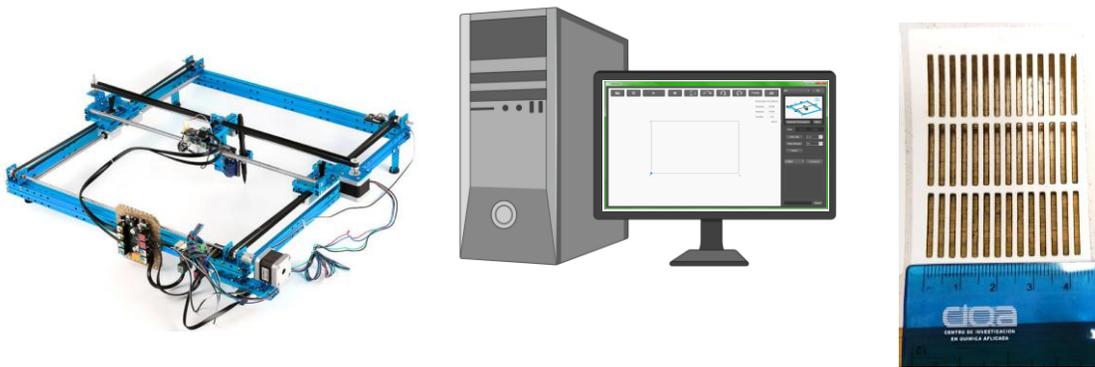


*Fig. 10 Patrón periódico alternando zonas con y sin material magnético.*

Para las primeras pruebas se preparó una mezcla de 70% cera de abeja y 30% parafina, que se colocaron para formar bandas periódicas de 1 cm de ancho y 0.5 cm, una vez endurecida la tela se llevó a cabo el proceso de síntesis de magnetita siguiendo el proceso descrito previamente. El excedente de cera de abeja se retiró usando papel absorbente y con ayuda de una plancha a temperatura baja, se hicieron varias pasadas hasta retirar por completo y posteriormente se lavó con agua destilada y se dejó secar a temperatura ambiente.

### 6.3. Serigrafía

La serigrafía es una técnica que consiste en transferir imágenes trazadas en una plantilla sobre una malla con tinta a una superficie [77]. La idea de usar esta técnica surge de poder controlar la deposición de tintas sobre la tela manteniendo bordes uniformes, para ello se hizo una adaptación y se trazó el diseño de plantillas con un patrón periódico en el software mDraw y se cortaron sobre etiquetas autoadhesivas con ayuda de una cortadora láser XY Plotter V2.02, ver Fig. 11. La tela previamente lavada, fue colocada sobre una superficie plana y se colocó la etiqueta, para su posterior aplicación de las diferentes tintas.



*Fig. 11 Fabricación de moldes para serigrafía con cortadora láser sobre etiquetas autoadheribles.*

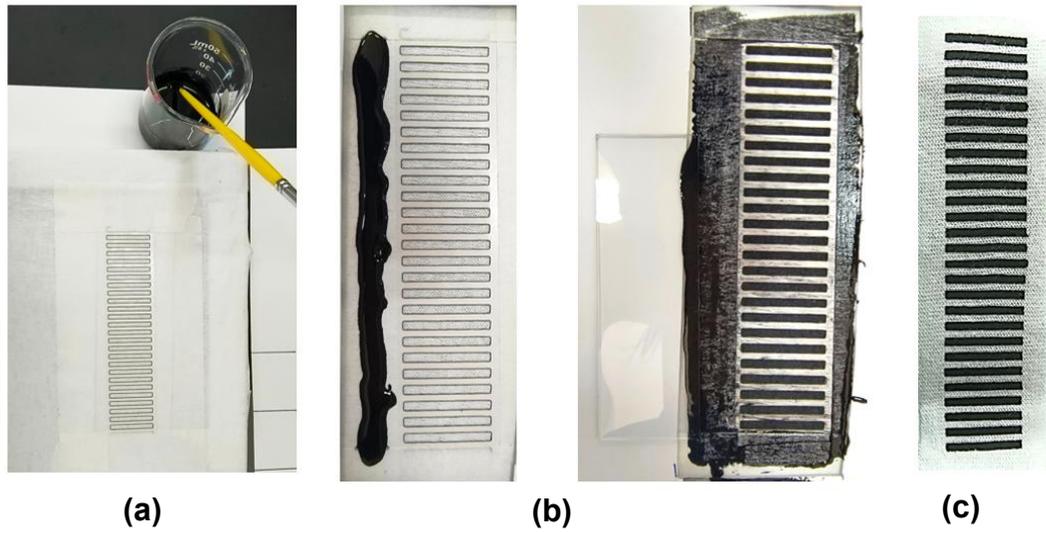
### **6.3.1. Tintas comerciales**

Se usaron tintas comerciales: primer magnético (Sayer) y una pintura conductora de níquel (MG Chemicals) en aerosol, las cuales cuentan con propiedades magnéticas y/o conductoras que son fáciles de aplicar sobre la tela sin degradarla. Para su aplicación sobre la tela, se colocó una cantidad de la tinta sobre la etiqueta y con ayuda de un portaobjetos de vidrio se distribuyó sobre toda la superficie y se retiró el excedente, posteriormente se dejó secar y se retiró la etiqueta.

Para la pintura en aerosol de igual manera, se colocó la etiqueta sobre la tela y siguiendo las indicaciones del fabricante a una distancia de 30 cm de separación entre la boquilla y la superficie de la tela, se aplicaron dos capas después se dejó secar al aire libre.

### **6.3.2. Elaboración de tintas a base de elastómero y dispersión de polvos**

Se ocuparon polvos de níquel y óxido de hierro (II, III) que fueron mezclados por separado en una silicona catalizada con platino comercial (Ecoflex™00-30) [78], se prepararon 3 concentraciones de 20%, 40% y 60% para cada tinta, mezclando 0.5 g, 1.33 g y 3 g respectivamente en 2 g de Ecoflex™00-30, el cual se preparó siguiendo las indicaciones del fabricante, por otro lado, las etiquetas se colocaron sobre la tela de algodón y se cubrió con un poco de cinta alrededor de la misma para evitar el paso de la tinta en otras zonas, ver Fig. 12 (a), para la aplicación de la tinta se colocó un poco de tinta sobre la cinta y con ayuda de un portaobjetos de vidrio y se distribuyó sobre la sección de tela, ver Fig. 12 (b), se hicieron de dos a tres pasadas hasta cubrir todas las rendijas y retirar el excedente, posteriormente se dejó secar la a temperatura ambiente y se retiraron las etiquetas, ver Fig. 12 (c).



*Fig. 12 Preparación de muestras usando la técnica de serigrafía sobre tela de algodón (a) Preparación de la tela, (b) aplicación y distribución de la tinta sobre la superficie del molde y (c) secado de la muestra a temperatura ambiente.*

## 7. Caracterización

La caracterización de las muestras se realizó en dos partes, primero la caracterización elemental de los materiales usados y posteriormente se buscó la presencia del efecto de Band Gap Fotónico.

### 7.1. Microscopía Electrónica de Barrido

La técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) se usó para observar la distribución del material sobre la tela de algodón y verificar la homogeneidad en la interfase material-tela, además se realizó Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS). El microscopio que se utilizó fue el FEI-ESEM Quanta FED-250.

Para la preparación de las muestras, se colocaron sobre un pin de aluminio con cinta de carbono, para las muestras no conductoras en la superficie, se realizó un recubrimiento de oro ( $t=30$  s,  $I=40$  mA), ver Fig. 13.



*Fig. 13. Recubrimiento de muestras con oro.*

## **7.2. Difracción de Rayos X**

Se realizó Difracción de rayos X (DRX) para la identificación de las fases presentes en los materiales utilizando un difractómetro de rayos X Rigaku SmartLab, con radiación Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 0,154$  nm) a una velocidad de barrido de 1°/min en el rango angular de 10 a 90 2 $\Theta$  grados. Las posiciones de los picos de las estructuras cristalinas se identificaron a partir de la base de datos ICDD-PDF-4 + 2015.

## **7.3. Propiedades magnéticas**

Para obtener los ciclos de histéresis del comportamiento magnético de las muestras se hizo uso el Sistema de Medición de Propiedades Físicas (PPMS) de la firma Quantum Design Inc. tipo “cryogen-free” modelo DynaCool, se usó un rango de campo magnético de +/- 2 Tesla a temperatura ambiente (300 K).

## **7.4. Máquina de pruebas de doblados**

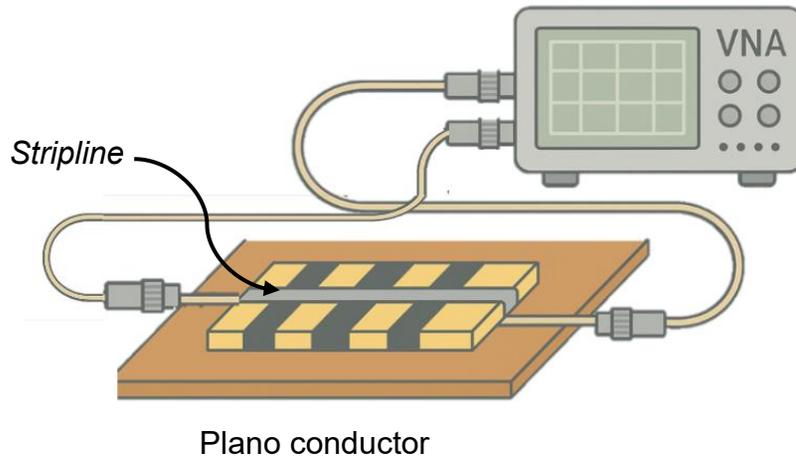
Se realizaron dobleces a la tela usando la máquina de pruebas de doblados del laboratorio “El oro” del IPICYT, 1000 veces en un tiempo de 24.39 minutos.

## **7.5. Analizador de Redes Vectoriales**

Para la medición de absorción de microondas se utilizó un analizador de redes vectoriales (VNA) marca LeCroy SPARQ LCRY2902N06414, con un rango de frecuencia de 10 MHz a 40 GHz.

En la medición de espectros de absorción se usa una guía de onda tipo *stripline*, éste consiste en un plano conductor, llamado plano de tierra, sobre el cual se coloca la muestra (en este caso la tela con material magnético, y sobre ésta se coloca una

banda delgada conductora (*stripline*). El plano de tierra y la *stripline* se conectan al VNA con conectores coaxiales, como se muestra en la Fig. 14.



*Fig.14 Arreglo experimental para la medición de espectros de absorción en textiles con un arreglo periódico.*

El VNA lanza una señal electromagnética hacia la muestra (DUT del inglés Device Under Test) a una frecuencia constante y realiza dos operaciones: primero en el modo hacia adelante (*forward*) en el que mide la potencia reflejada y transmitida cuando la señal va del puerto 1 al puerto 2. El segundo paso, modo retroceso (*return*) hace lo mismo, pero cuando la señal viaja desde el puerto 2 al puerto 1. Esta operación se repite para cada frecuencia y en nuestro caso, las frecuencias empleadas van desde 10 MHz hasta 40 GHz a pasos de 25 MHz.

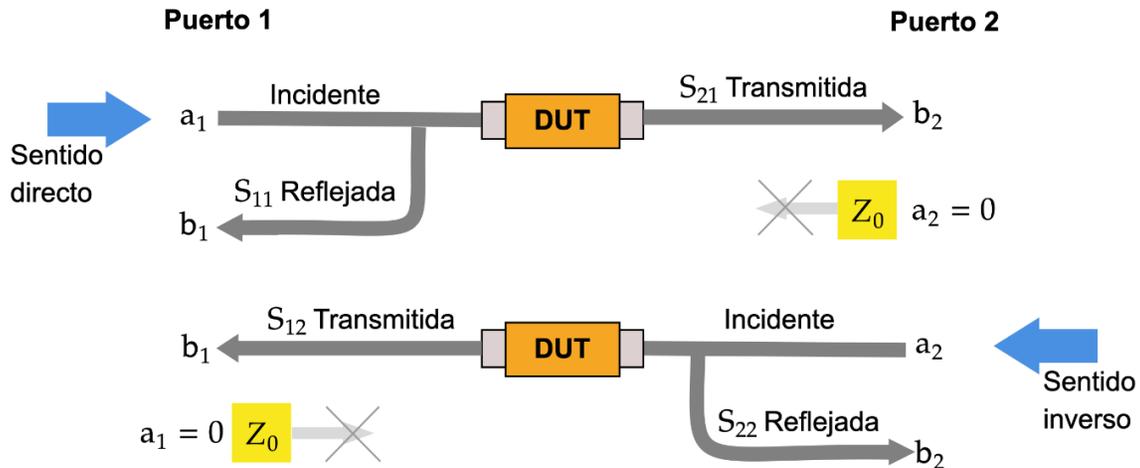


Fig. 15 Esquema de funcionamiento de VNA

Las mediciones que arroja el sistema son los coeficientes de reflexión y transmisión para los modos hacia adelante y retroceso. Estos coeficientes se conocen como los parámetros S. Su correspondencia con el modo de medición usado para obtenerlas se muestra en la Fig. 15. En este caso, se tienen cuatro coeficientes S, que son el  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  y  $S_{22}$ . El primer subíndice indica el puerto del cual se emitió la señal y el segundo corresponde al puerto donde se midió la señal proveniente de la muestra. Así, el  $S_{11}$  corresponde a la señal emitida del puerto 1 y que midió la señal proveniente de la muestra en el mismo puerto 1, lo que corresponde a la reflexión de la onda. El puerto  $S_{12}$  corresponde a la señal emitida en el puerto 1 y que mide la señal proveniente de la muestra en el puerto 2, es decir, corresponde a la transmisión. Para el caso de las señales emitidas desde el puerto 2,  $S_{21}$  y  $S_{22}$ , el significado es el mismo. Por lo que subíndices diferentes corresponden a la señal transmitida y subíndices iguales corresponden a la señal reflejada. En nuestro caso, nos interesamos en la transmisión de la señal a través de la muestra.

## 8. Resultados

### 8.1. Síntesis y caracterización de patrones magnéticos obtenidos por coprecipitación y técnica de Batik.

Uno de los primeros objetivos era sintetizar nanopartículas de magnetita localizada teniendo zonas alternadas con y sin material magnético, por ello surgió la idea de usar cera de abeja para poder generar una barrera tipo hidrofóbica en ciertas regiones en donde las fibras no interaccionarían con la solución de sales y con el agente precipitante, en las zonas sin cera de abeja los cristales de magnetita crecerían sobre las fibras manteniendo sus propiedades magnéticas, ver Fig. 16. Sin embargo, se observó que no se lograron obtener franjas periódicas bien delimitadas en los bordes, ver Fig. 17.



Fig. 16 *Comprobación rápida con un imán de crecimiento de cristales de magnetita sobre tela de algodón.*



Fig. 17 Muestras sintetizadas sobre tela de algodón por el método de coprecipitación química, alternando zonas con y sin material magnético con anchos de 1 cm y 5 mm.

Si bien se realizaron varios intentos para evitar los defectos en las interfases no se logró generar patrones periodicos como se preñia en toda la tela, aunque se identificaron algunas zonas en dondó el recubriento con cera fue eficiente.

### **8.1.1. Microscopía Electrónica de Barrido**

De las muestras obtenidas por el método de síntesis, se observó que en algunas regiones en la interfase se tenía un crecimiento controlado de la magnetita, sin embargo, las micrografías de SEM mostraron que en las interfases y zonas con cera se tenía la formación de cristales de magnetita, ver Fig. 18 (a) En la zona A se tiene la región donde se deseaba tener el material magnético y al hacer un análisis EDS, ver Fig. 18 (b), se encontraron los elementos de Fe y O correspondientes a la magnetita, por otro lado, el C se le puede atribuir como una contribución de la fibra de algodón. Por otro lado, en la zona B, ver Fig. 18 (c), se observan puntos brillantes que se le atribuyeron al Fe, sin embargo, al hacer el análisis EDS el pico de intensidad de Fe no está presente lo que indica que la proporción en peso de este elemento es muy baja respecto a los otros elementos como C y O.

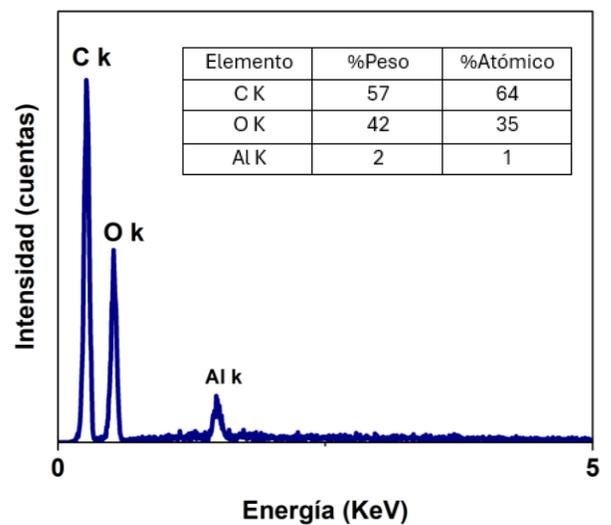
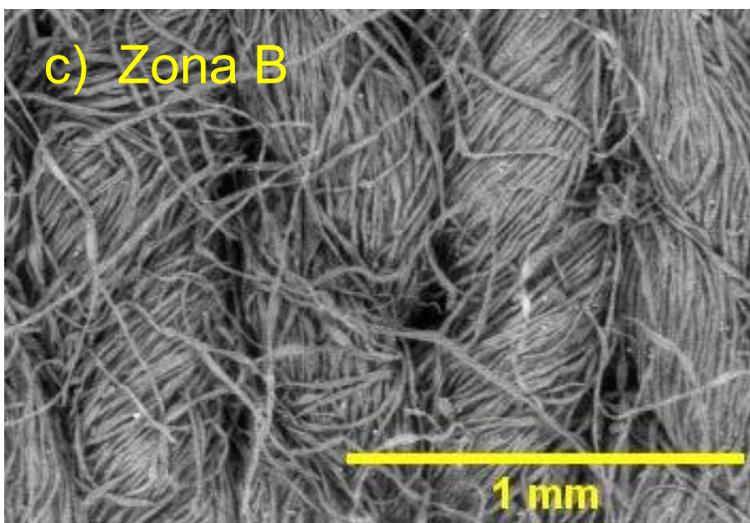
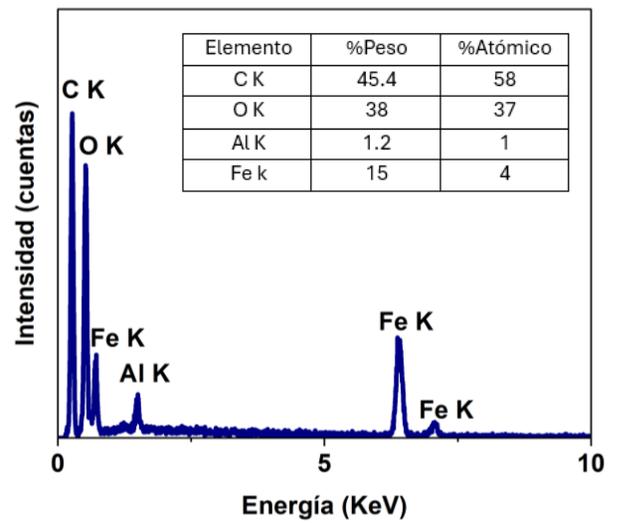
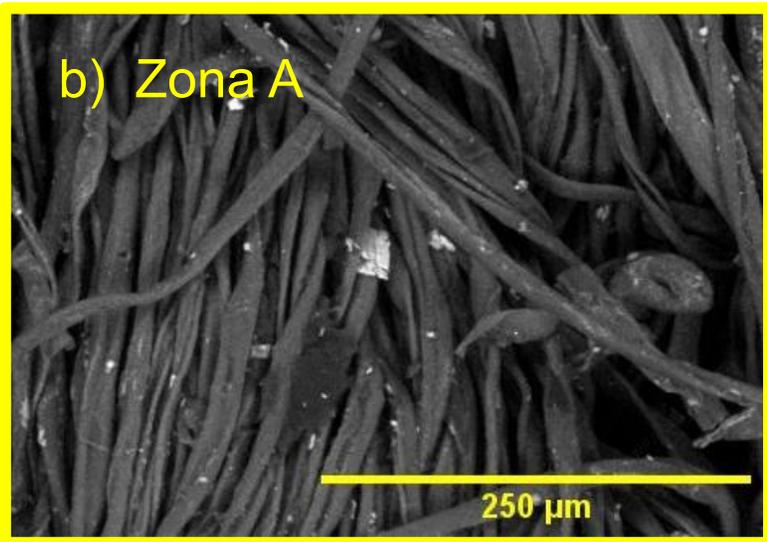
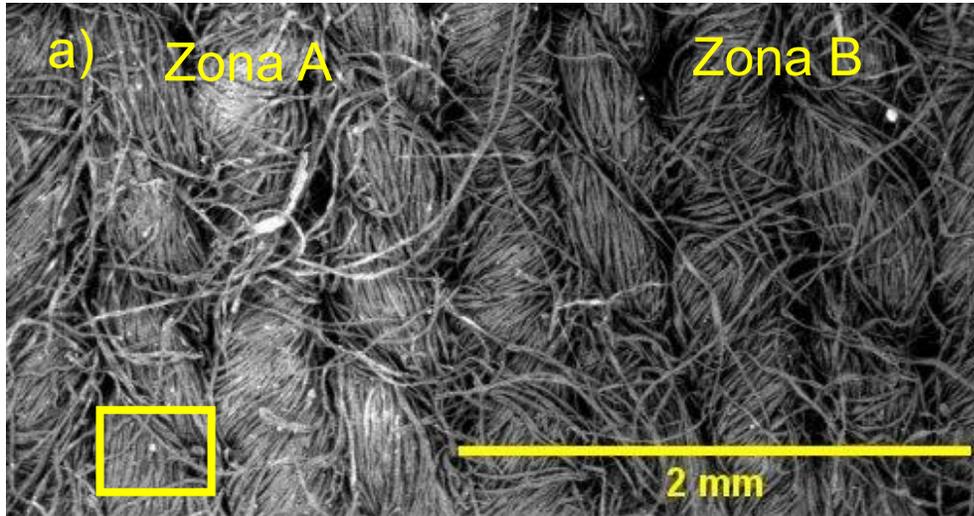
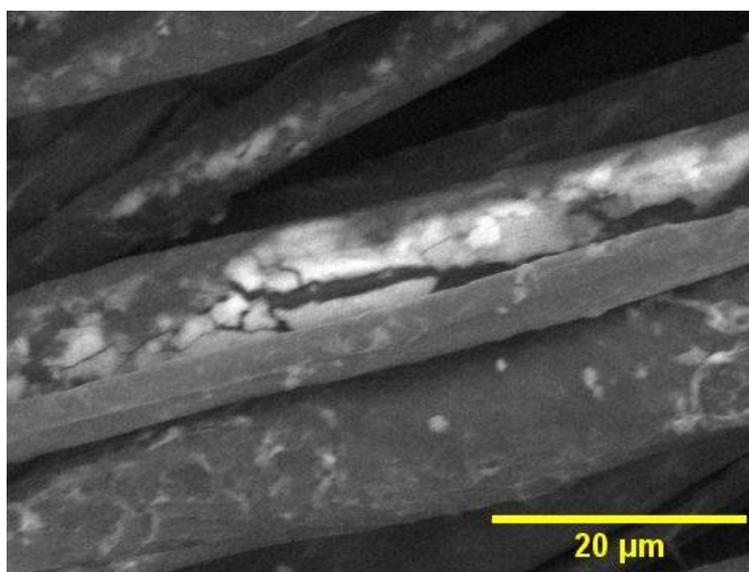


Fig. 18 Micrografías de electrones retrodispersados a) Interfase de Zona A y Zona B, b) Zona A y espectro EDS y c) Zona B y espectro EDS y análisis químico

*elemental.*

También se observó que el crecimiento de cristales de magnetita tenía una disposición y tamaños no homogéneos, esto puede deberse a que al anexar el agente precipitante ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), no caía uniformemente sobre todas las fibras dejando regiones con una menor concentración de éste y por fuerzas electromagnéticas y de Van Der Waals los núcleos tendieron a aglomerarse [79] formando cristales más grandes en algunas fibras, ver Fig. 19.



*Fig. 19 Micrografía de electrones retrodispersados donde se observan los cristales de magnetita (zonas brillantes) sobre fibra de algodón.*

### **8.1.2. Difracción de Rayos X**

El análisis DRX resultó fundamental para confirmar que el proceso de síntesis se llevó a cabo correctamente y que se obtuvo el material cristalino bajo condiciones estándar de presión y temperatura, además de un material con una alta pureza de partículas de magnetita [80].

Para llevar a cabo el análisis fueron usadas las partículas del material que no se adhirieron a la tela de algodón, las cuales se secaron en una parrilla a  $T = 60^{\circ}\text{C}$  por 1 hora. De acuerdo con los resultados, se encontró que se tenían picos de difracción simétricos, bien definidos e intensos correspondientes a la magnetita (JCPDS file, No. 00-011-0614) [81] que tiene una estructura cristalina tipo espinela cúbica centrada en las caras [82, 83], los planos (1 1 1), (2 2 0), (3 1 1), (4 0 0), (4 2 2), (5 1 1), (4 4 0), (5 3 3) y (6 2 2), ver Fig. 20, están asociados a una fase de magnetita [70, 84].

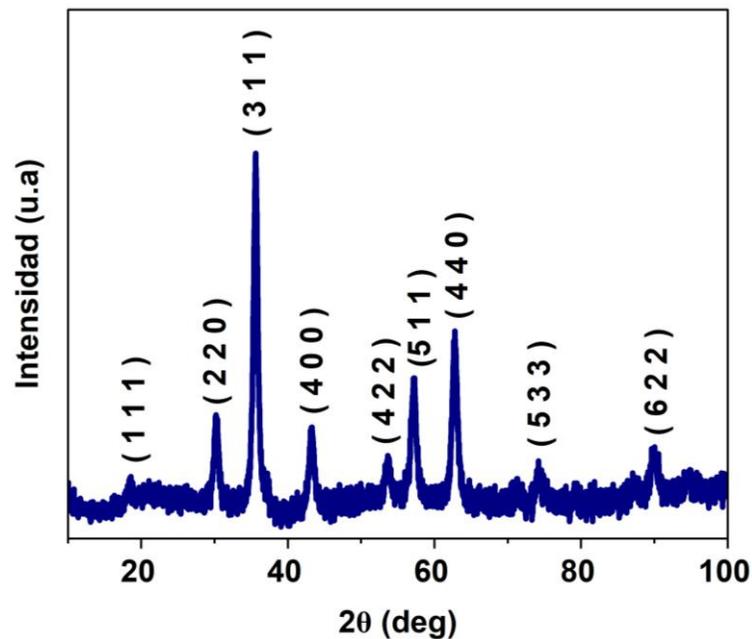
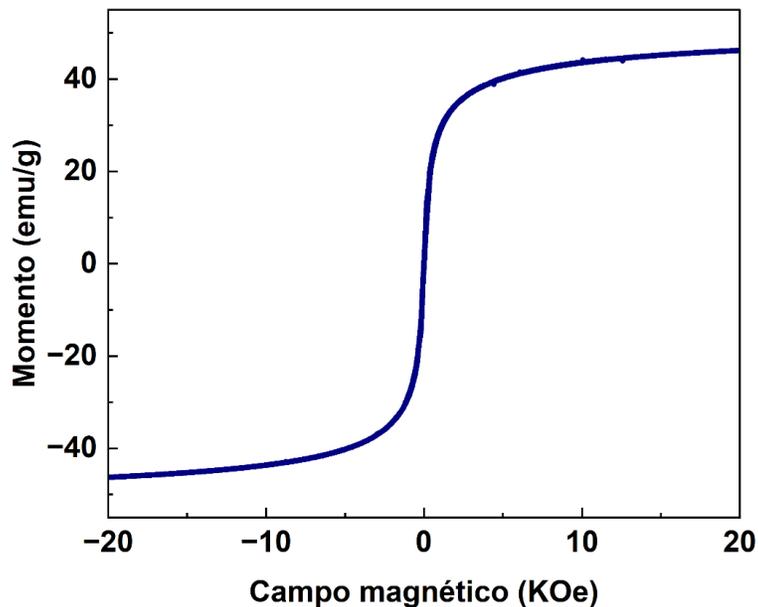


Fig. 20 Patrón de difracción de la magnetita sintetizada por coprecipitación química (JCPDS file, No. 00-011-0614).

Cabe resaltar que en la síntesis de la magnetita no se tenía como un objetivo controlar el tamaño del cristal y la dispersión de partículas para evitar la aglomeración de estas, por lo que no se variaron parámetros como el tiempo de reacción, la temperatura, pH, etc., los cuales, de acuerdo la bibliografía, pueden cambiar el tamaño del cristal, morfología o modificar algunas de sus propiedades físicas [74,80].

### 8.1.3. Propiedades magnéticas

El ciclo de histéresis de las partículas de magnetita sintetizada es un ciclo bien definido característico de un material magnético suave, ver Fig. 21, con una baja coercitividad 2 Oe y una remanencia de 5% y una magnetización de saturación es de 46 emu/g, este valor está en el rango típico reportado para nanopartículas [85].



*Fig. 21 Ciclo de Histéresis de la magnetita sintetizada por el método de coprecipitación química.*

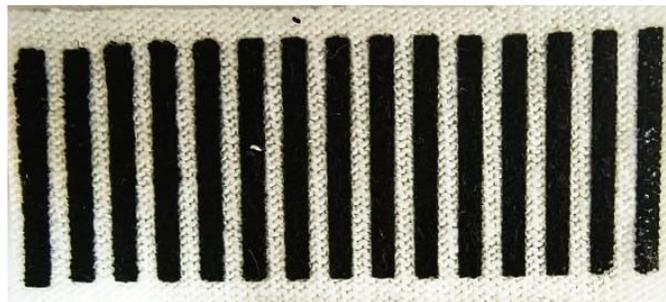
Esta metodología para generar patrones periódicos en la tela de algodón fue descartada si bien se logró la síntesis de partículas de magnetita en la tela, se tuvieron dificultades para generar interfases homogéneas entre las secciones con y sin material magnético, por ello se optó usar otra técnica.

## 8.2. Serigrafía en tela usando tintas comerciales

Con el método de serigrafía se lograron obtener muestras con dimensiones menores a los 2 mm a diferencia de las muestras con la técnica de Batik en donde el ancho de bandas mínimo era de 5 mm, además con esta técnica se lograron obtener bodes homogéneos en las interfases del material magnético.

### 8.2.1. Primer magnético comercial

Para las primeras muestras se tomó como referencia la longitud del periodo reportado por Saib A et al., en donde  $a=2d$ , con  $d_1=1.538$  mm y  $d_2=1.818$  mm, ver Fig. 22.

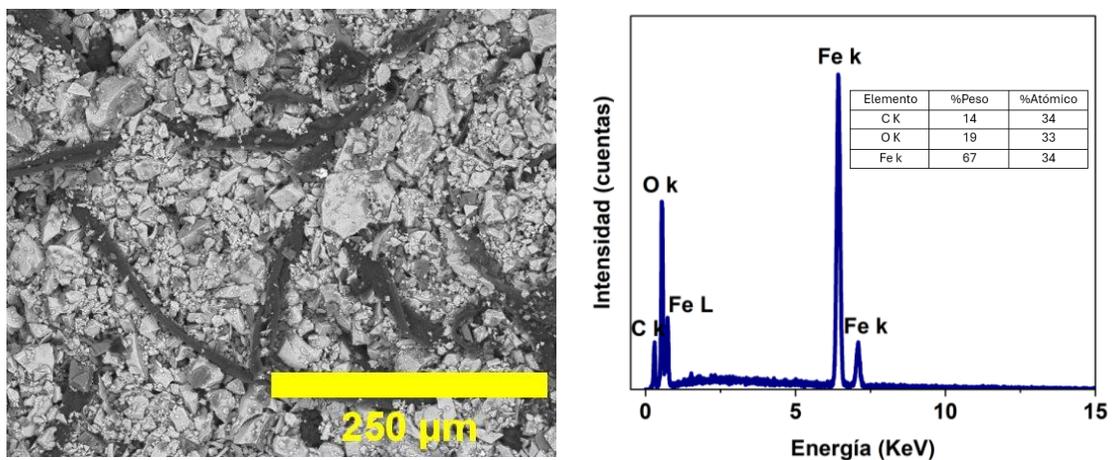


*Fig. 22 Primer magnético depositado por el método de serigrafía sobre tela de algodón con  $d=1.538$  mm*

#### 8.2.1.1. Microscopia Electrónica de Barrido

El primer magnético tiene un contenido de algunos compuestos como aglutinantes, estos son fácilmente retirados con una serie de lavados de agua destilada dejando

solo las partículas magnéticas, las cuales se precipitaron usando un imán debajo del vaso de precipitado, posteriormente se dejaron secar a temperatura ambiente. De acuerdo con las micrografías de SEM, se observó que la morfología del material correspondía a prismas irregulares dispuestos sobre toda la superficie de la tela, ver Fig.23, a diferencia de la síntesis directa en tela, en ésta se observan cristales de mayor tamaño distribuidos sobre las fibras en una capa gruesa no homogénea, donde algunas fibras no quedaron del todo cubiertas. Al realizar el análisis EDS se obtuvo que los elementos presentes eran Fe y O.



*Fig. 23 Micrografía de electrones retrodispersados del primer magnético marca Sayer sobre tela de algodón obtenida por SEM, espectro EDS y análisis químico elemental.*

### 8.2.1.2. Difracción de Rayos X

De acuerdo con del análisis EDS se sospechaba que el material magnético presente correspondía a un óxido de hierro, magnetita o la presencia de más de una fase como la hematita y maghemita por lo cual el análisis de DRX fue necesario. Del espectro obtenido, ver Fig. 24, se tienen picos bien definidos, simétricos e intensos lo que indica que se trata de un material cristalino, además al hacer la

comparación con la base de datos se encontró que el material correspondía a la magnetita (JCPDS file, No. 96-900-6922), y que sólo tiene una fase cristalina [86].

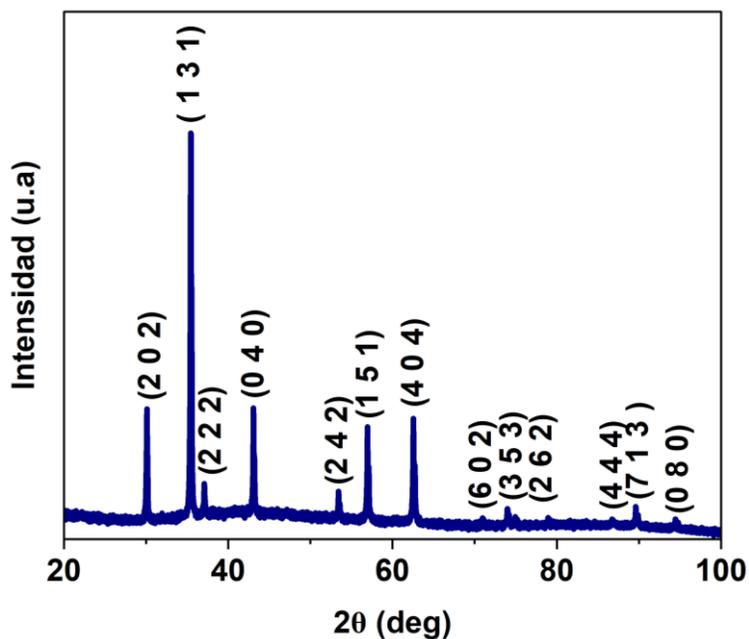


Fig. 24 Patrón de difracción del primer magnético marca Sayer (JCPDS file, No. 96-900-6922).

### 8.2.1.3. Propiedades magnéticas

El ciclo de histéresis de las partículas de primer magnético, es un ciclo bien definido característico de un material magnético suave, ver Fig. 25, con una baja coercitividad 63 Oe y una remanencia de 4%, la magnetización de saturación es de 92 emu/g, un valor cercano a lo reportado para la magnetita en bulto de 93 emu/g [87, 88].

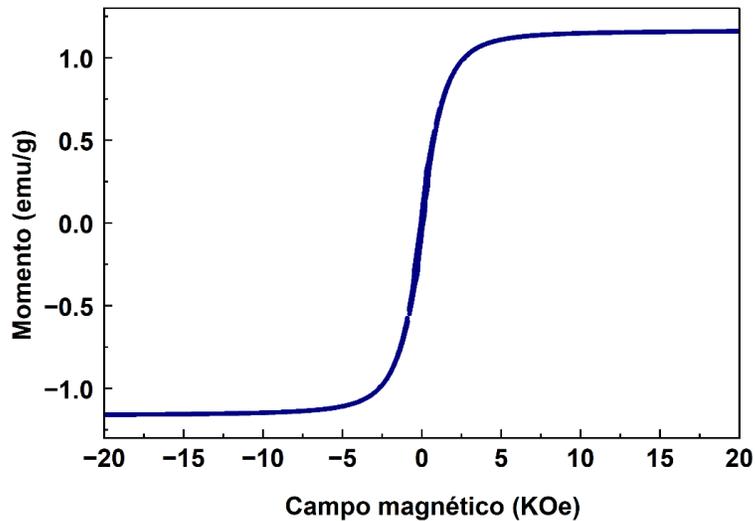


Fig. 25 Ciclo de Histéresis del primer magnético marca Sayer.

### 8.2.2. Pintura de Níquel en aerosol

Esta pintura está compuesta por una laca acrílica pigmentada con una lámina de níquel altamente conductora usada para protección EMI/RFI [89] es practica para generar un recubrimiento conductivo, además el níquel al ser un material ferromagnético protege de ambas competentes de la onda electromagnética de manera eficaz y económica, además ha sido usado anteriormente como recubrimiento de antenas, electrodos desechables en sensores o baterías [90-96], en cuanto a su aplicación sobre tela tiene una buena adhesión, ver Fig. 26.



Fig. 26 Recubrimiento con pintura en aerosol de níquel (MGChemicals) por el método de serigrafía sobre tela de algodón con  $d=1.818\text{ mm}$

### **8.2.2.1. Microscopia Electrónica de Barrido**

En las micrográficas de SEM se observó que se formó una capa no homogénea adherida sobre las fibras de algodón, con una mayor densidad de material depositado en la región central, ver Fig. 27 (a), mientras que en las interfases va disminuyendo, dejando fibras parcialmente recubiertas, ver Fig. 27 (b), esto se debe a que, al tratarse de una pintura de aerosol el acabado depende de la distancia entre boquilla-tela, número de capas, etc.

Se desconoce el método de síntesis llevada a cabo, sin embargo, en las micrográficas se observó que se tienen dos tipos de formaciones que coinciden con lo reportado en la literatura, ver Fig. 27 (c), en forma de flor y hojuelas planas de mayor tamaño [95 y 96], por otro lado, en los EDS se encontró la presencia de Ni, Mg, Si, Al, C y O, existe una mayor intensidad en los picos de Ni lo que indica un alto contenido de este elemento, los otros elementos se le pueden atribuir al aglutinante que normalmente se usan en acrílicos base agua [97].

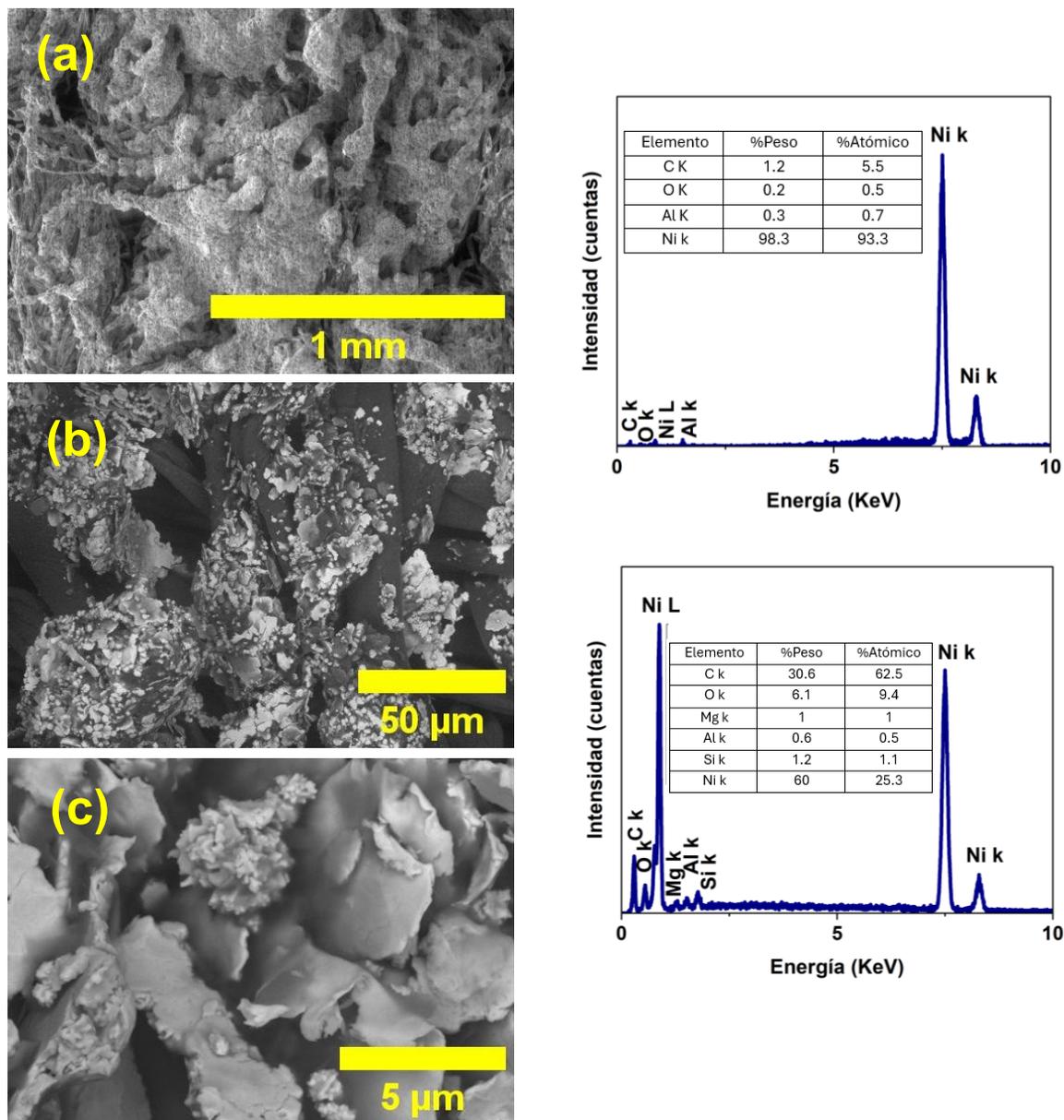


Fig. 27 Micrografía de la pintura de Ni comercial sobre tela de algodón obtenida por SEM, espectro EDS y análisis químico elemental. (a) y (b) Recubrimiento de las fibras de algodón, (c) Morfología de la muestra. (a) electrones secundarios, (b) y (c) electrones retrodispersados.

### 8.2.2.2. Difracción de Rayos X

En el análisis DRX, ver Fig. 28, se obtuvieron los picos característicos del Ni (JCPDS file, No. 96-210-0662), sin embargo, no se identificó un pico en 25.11, se sospecha que éste puede corresponder a un silicato ( $Mg_2(SiO_4)$ ) (RRUFF ID, R040018) tomando en cuenta los resultados del análisis EDS.

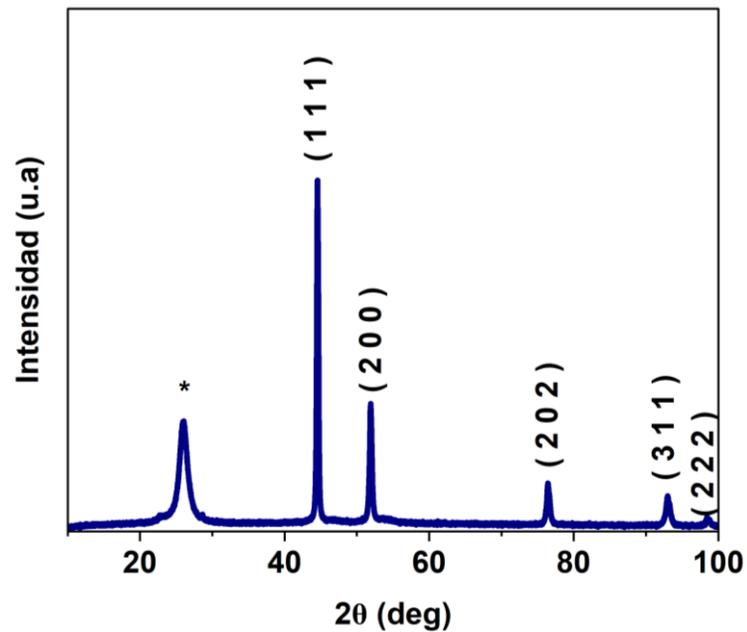


Fig. 28 Patrón de difracción de la pintura de níquel en aerosol (JCPDS file, No. 96-210-0662).

En los primeros modelos de bandas en tela de algodón, se presentaron algunas dificultades. En primer lugar, las pinturas comerciales empleadas son solubles en agua, lo que limitó su estabilidad. En segundo lugar, la aplicación de la pintura en aerosol no era uniforme sobre la superficie, lo cual implica dificultades para producir patrones homogéneos sobre la tela.

### **8.3. Serigrafía en tela usando tintas a base de Ecoflex™ 00-30**

Como alternativa, se optó por desarrollar tintas propias, para ello, se hizo una dispersión de polvos en un elastómero como base para una pintura, debido a que este material no es soluble en agua, no es tóxico y además es fácil de manejar. Se consideraron tres tipos de partículas magnéticas: magnetita mineral, magnetita y níquel comerciales, los dos últimos son polvos de grado reactivo comercializados por Sigma-Aldrich.

#### **8.3.1. Tinta a base de Ecoflex™ 00-30 y magnetita mineral**

La magnetita mineral fue extraída de una mina de Peña colorada del estado de Colima, tiene un contenido del 93% de magnetita y un 7% de impurezas no magnéticas. Cabe mencionar que no se le dio ningún tratamiento para eliminar dichas impurezas debido a su bajo contenido, aunque previamente se le dio una molienda en un mortero y posteriormente se dispersó en el elastómero y aplicación sobre la tela de algodón, ver Fig. 29. Se desarrollaron tres tintas con

concentraciones diferentes, a continuación, se presenta la caracterización realizada sobre el polvo y las tintas impresas en la tela.

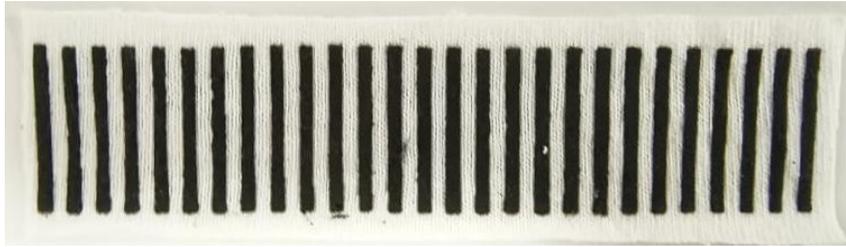
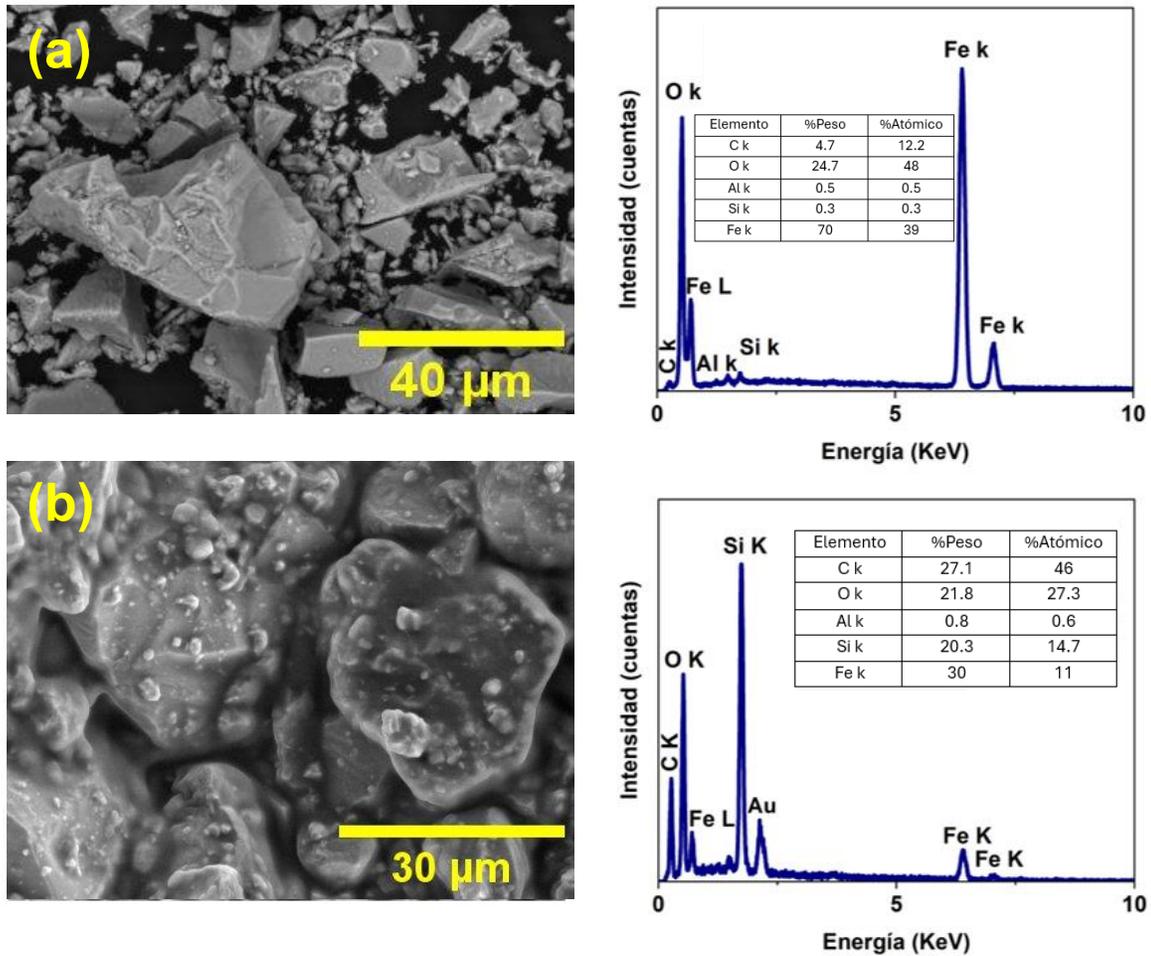


Fig. 29 *Tinta a base de ecoflex y magnetita mineral impresa sobre tela por el método de serigrafía, con  $d=1.538$  mm.*

### **8.3.1.1. Microscopia Electrónica de Barrido**

El polvo de magnetita mineral tiene una morfología de prismas irregulares con una distribución de tamaño no homogénea, ver Fig. 30 (a). Con respecto al análisis EDS se tiene elementos adicionales como el Si y Al debido a que este mineral, tiene una estructura cristalina que permite la sustitución total o parcial de iones de hierro con elementos de radios iónicos similares [98, 99]. Por otro lado, al mezclar la magnetita mineral con el Ecoflex™ la señal del Si y C incrementa debido a su contenido en la silicona catalizada [100 y 101], en cuanto a la dispersión del material, se observó que se formaba una capa asimétrica debido a la variación de tamaño del polvo, ver Fig. 30 (b).



*Fig. 30 Micrografía obtenida por SEM, espectro EDS y análisis químico elemental (a) de polvo de magnetita mineral utilizando electrones retrodispersados (b) Tinta de magnetita minera utilizando electrones secundarios.*

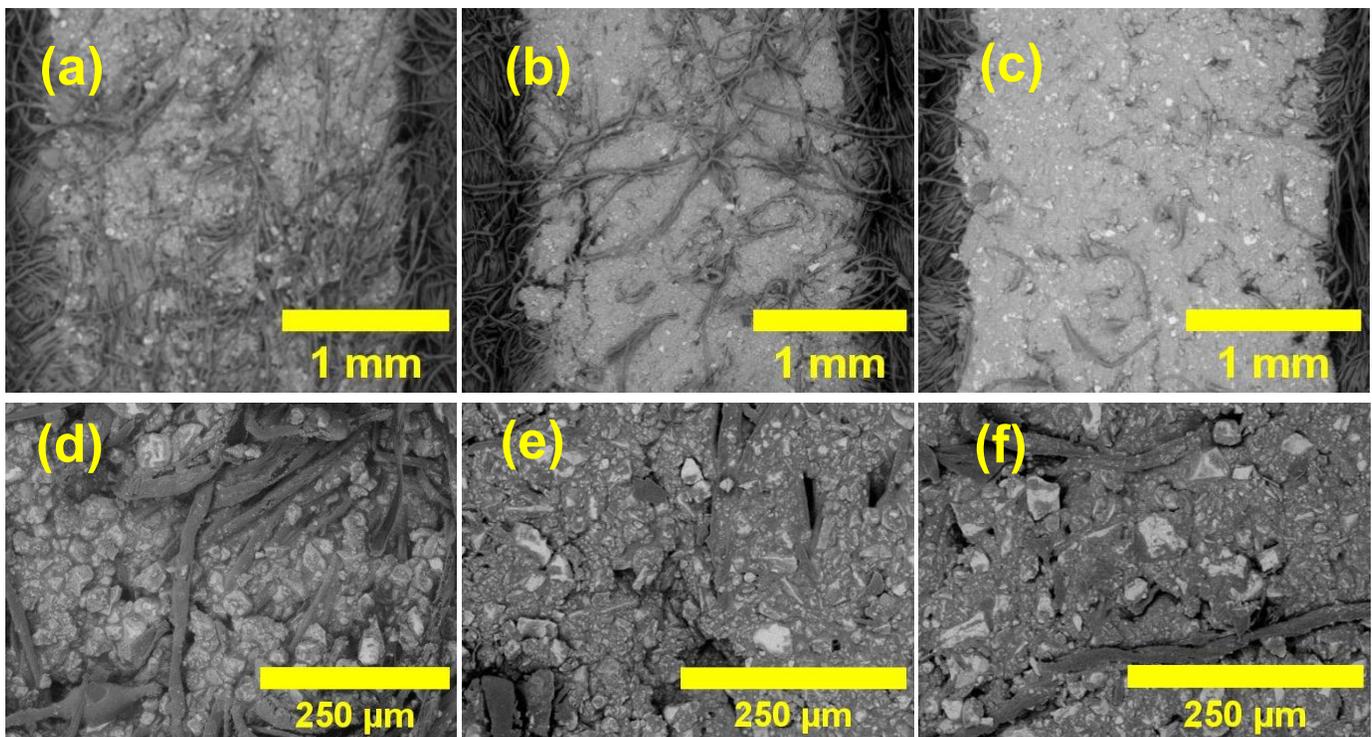
Con la técnica de serigrafía se logró mejorar el contorno de las franjas con tamaños menores a los 2 mm, obteniendo bordes más homogéneos garantizando la periodicidad deseada, ver Fig. 31 (a), (b) y (c). En cuanto a la concentración de magnetita en la mezcla, se observó una mejor cobertura sobre las fibras de algodón conforme ésta incrementa.

En la muestra con una concentración de 15%, ver Fig. 31 (a), la cobertura es heterogénea sobre la superficie dejando fibras expuestas, no obstante, se aprecia

que los cristales de magnetita quedaron embebidos en el elastómero, ver Fig. 31 (d).

Para la muestra con una concentración de 30%, la dispersión de la mezcla es más uniforme en la superficie, sin embargo, se observan segmentos fragmentados, ver Fig. 31 (b), además, el encapsulado no es uniforme, dejando partes de los cristales expuestos en la superficie, ver Fig. 31 (e).

En contraparte, cuando se tiene una concentración del 45% la dispersión de la mezcla es más homogénea y se logra una mejor cobertura sobre las fibras de algodón, aun así, al igual que la concentración de 30% se tienen zonas fragmentadas, ver Fig. 31 (c), y un encapsulado no homogéneo, ver Fig. 31 (f).



*Fig. 31 Micrografías obtenidas por SEM usando electrones retrodispersados donde pueden notarse los bordes de franjas con una magnificación de 280X usando concentraciones de magnetita mineral en la tinta de (a) y (d) 15 %, (b) y (e) 30 %, (c) y (f) 45 %.*

### 8.3.1.2. Difracción de Rayos X

En el espectro DRX, se identificaron los picos característicos de una fase de magnetita en  $18.27^\circ$ ,  $30.07^\circ$ ,  $35.38^\circ$ ,  $37.03^\circ$ ,  $43.04^\circ$ ,  $53.38^\circ$ ,  $56.96^\circ$ ,  $62.55^\circ$ ,  $70.87^\circ$  y  $73.92^\circ$  correspondientes a los planos (1 1 1), (2 0 2), (1 3 1), (2 2 2), (0 4 0), (2 4 2), (1 5 1), (4 0 4), (6 0 2) y (3 5 3) (JCPDS file, No. 96-900-6921), ver Fig. 32 (a), por otro lado, no se encontraron los picos característicos de sílice, por lo que se le puede atribuir a una baja concentración de su fase en comparación con la magnetita.

En cuanto al polvo con el elastómero, se tiene un pico ancho centrado en  $12.35^\circ$  y un halo amorfo entre  $20^\circ$  y  $40^\circ$ , ver Fig. 32 (b), lo que indica una estructura amorfa debido a los enlaces Si-H, Si-C, Si-O-Si y Si-Si [101], esta parte amorfa corresponde al elastómero, ver Fig. 32 (c).

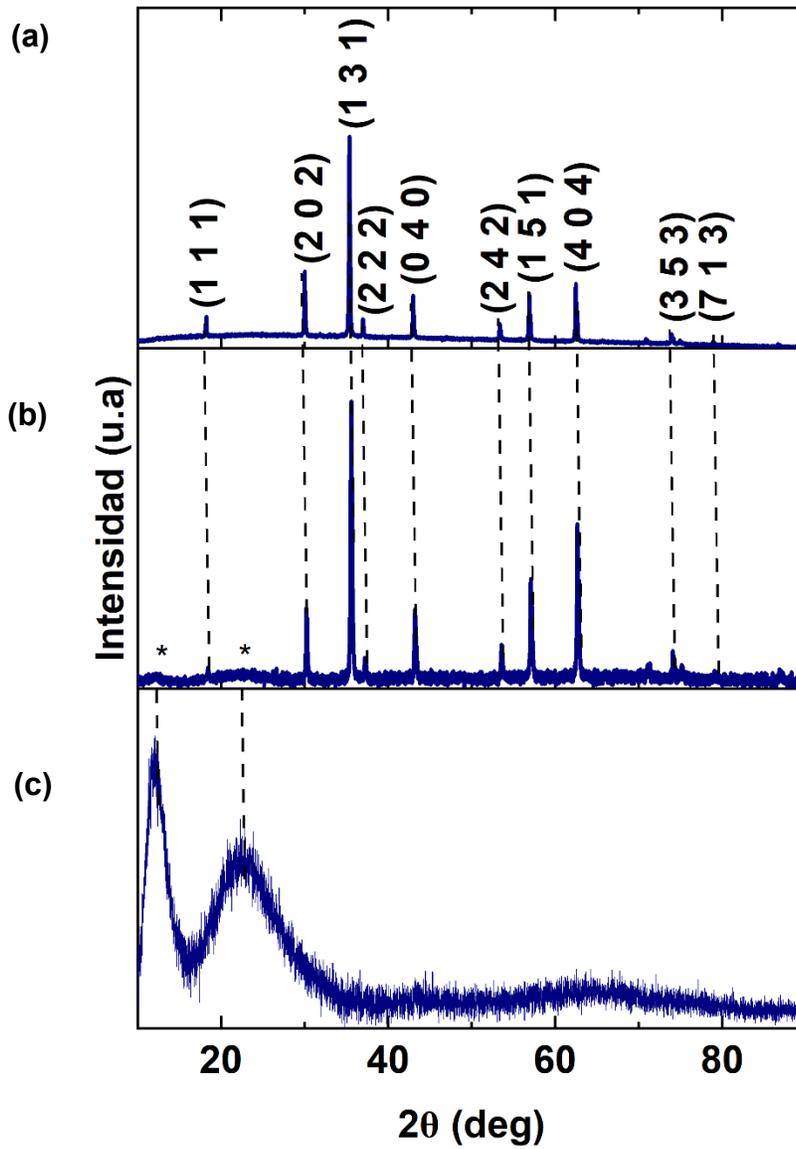
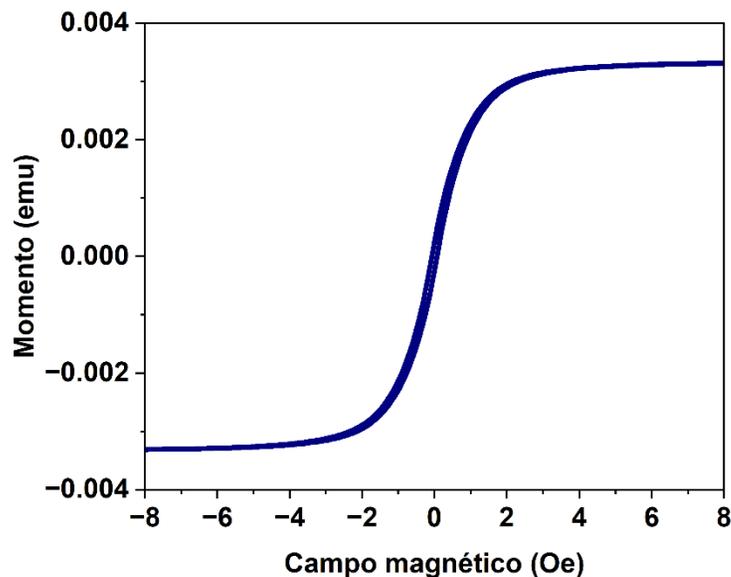


Fig. 32 Comparación de los patrones de difracción de (a) polvo de magnetita mineral, (b) Tinta a base de elastómero-Magnetita mineral (JCPDS file, No. 96-900-6921) y (c) fase amorfa del elastómero.

### 8.3.1.3. Propiedades magnéticas

El ciclo de histéresis de las partículas de primer magnético, es un ciclo estrecho característico de un material magnético suave, ver Fig. 33, con una baja coercitividad y remanencia.



*Fig. 33 Ciclo de Histéresis de la magnetita mineral en polvo.*

Si bien la tinta con las diferentes concentraciones mantiene bordes homogéneos se tiene el problema de la distribución irregular de tamaños de la magnetita mineral, además de que conforme incrementa la concentración de esta en el elastómero se forma un encapsulado débil dando como resultado una fijación baja al textil favoreciendo que con el tiempo se desprenda el material. Por ello se optó por sustituir la magnetita mineral por una de grado reactivo con una distribución de tamaño más homogénea además de una mayor pureza.

### 8.3.2. Tinta a base de Ecoflex 00-30 y magnetita (Sigma-Aldrich)

Esta magnetita también es conocida como óxido de hierro (II, III) con una distribución de tamaño menor a las 5  $\mu\text{m}$ . Para estas muestras se trabajó con una longitud del periodo de  $a=4$  mm con  $d=2$  mm. Además, también se usaron tres diferentes concentraciones para su dispersión en el elastómero, en este caso se inició con una mayor concentración debido a que la tinta presentaba una baja viscosidad, las muestras obtenidas cumplen con la característica de bordes bien definidos y una buena dispersión en el elastómero, ver Fig. 34.

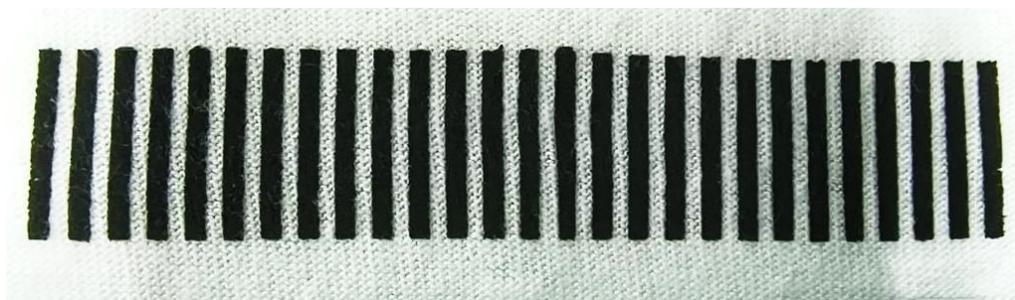
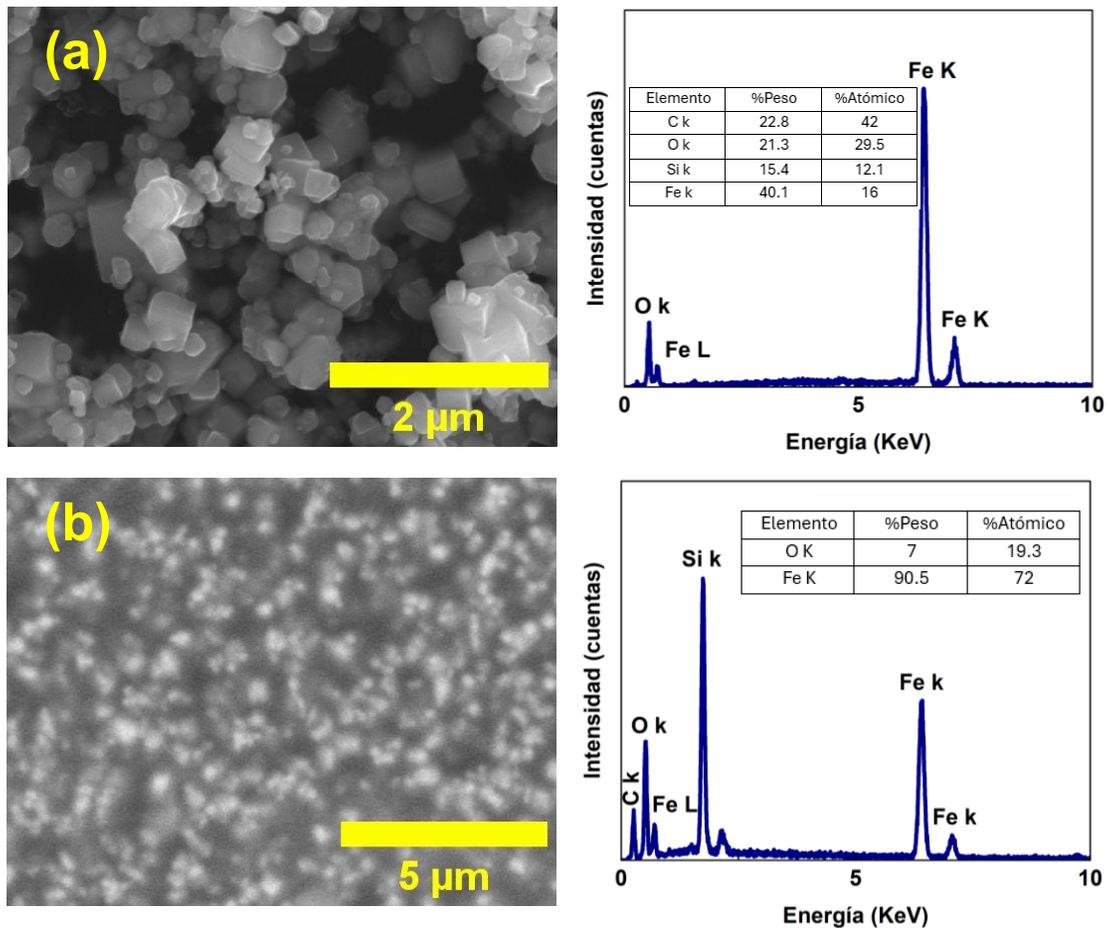


Fig. 34 *Tinta a base de ecoflex y magnetita impresa sobre tela por el método de serigrafía, con  $d=2$  mm.*

#### 8.3.2.1. Microscopía Electrónica de Barrido

El óxido de hierro presenta una morfología de prismas irregulares de tamaño menor a las 5  $\mu\text{m}$ , ver Fig. 35 (a), en el análisis EDS se tienen los elementos de Fe y O correspondientes al compuesto, de igual manera, al mezclar el polvo de óxido de hierro con el elastómero, también se detectaron los elementos de Si y C asociados al elastómero, además, gracias al tamaño y morfología del material se logró incorporar de manera homogénea el polvo en el elastómero obtenido un mejor encapsulado, ver Fig. 35 (b).



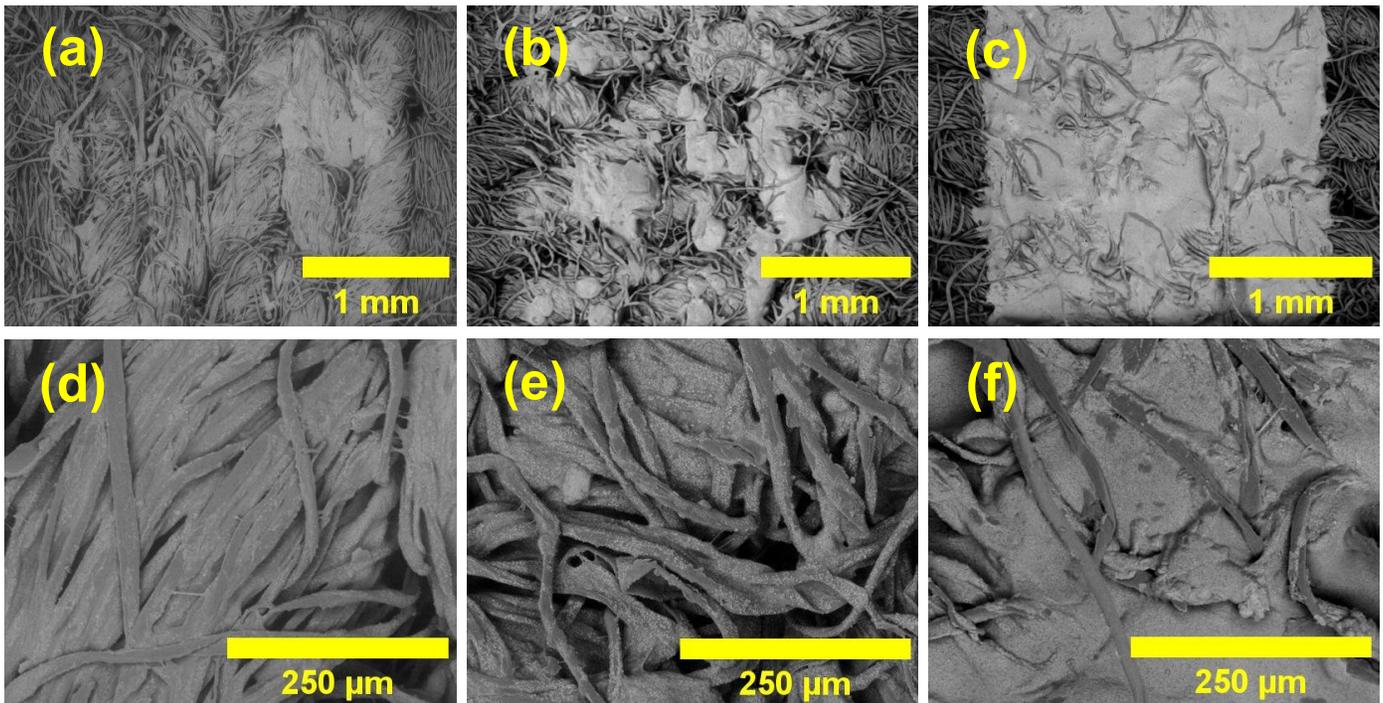
*Fig. 35 Micrografías obtenidas con SEM, espectro EDS y análisis químico elemental de (a) polvo de óxido de hierro usando electrones secundarios y (b) tinta a base de elastómero-magnetita usando electrones retrodispersados.*

Se observó que conforme incrementa la concentración de polvo en el elastómero se tiene una mejor distribución del material sobre la tela. En la concentración de 20%, ver Fig. 36 (a), se tuvo una distribución heterogénea del material teniendo como resultado zonas con un escaso recubrimiento y otras con mayor acumulación del material, además, se observó que la mezcla se adhirió sobre los contornos de las fibras, ver Fig. 36 (d).

En contraste, con una concentración de 40% se uvo un recubrimiento más uniforme; sin embargo, aún se observaron zonas con mayor densidad de la mezcla, ver Fig.

36 (b). De igual manera, el material se depositó sobre el contorno de las fibras, ver Fig. 36 (e).

Finalmente, con una concentración de 60% se observó una capa más homogénea, sin zonas de mayor acumulación y contornos bien definidos, ver Fig. 36 (c). No obstante, algunas fibras no fueron recubiertas por completo y sobresalen de la capa del material, ver Fig. 36 (f).



*Fig. 36 Micrografías obtenidas por SEM utilizado electrones retrodispersados, donde puede notarse los bordes de franjas con una magnificación de 500X, a distintas concentraciones en la tinta de (a) y (d) 20 %, (b) y (e) 40 %, (c) y (f) 60 %.*

### 8.3.2.2. Difracción de Rayos X

En la Fig. 37 se comparan los espectros DRX (a) polvo de magnetita (óxido de hierro) y (b) de la tinta, en ambos se identificaron los picos característicos de una

fase de magnetita en  $18.26^\circ$ ,  $30.11^\circ$ ,  $35.45^\circ$ ,  $37.14^\circ$ ,  $43.10^\circ$ ,  $53.36^\circ$ ,  $57^\circ$ ,  $62.59^\circ$ ,  $73.93^\circ$ ,  $89.79^\circ$  y  $94.51^\circ$ , correspondientes a los planos (1 1 1), (2 0 2), (1 3 1), (2 2 2), (0 4 0), (2 4 2), (1 5 1), (4 0 4), (3 5 3), (7 1 3) y (0 8 0) (JCPDS file, No. 96-900-6921), En cuanto a la dispersión de la magnetita en el elastómero, como se vio en los picos anchos Fig. 28 (c) se deben a la estructura amorfa del EcoflexTM.

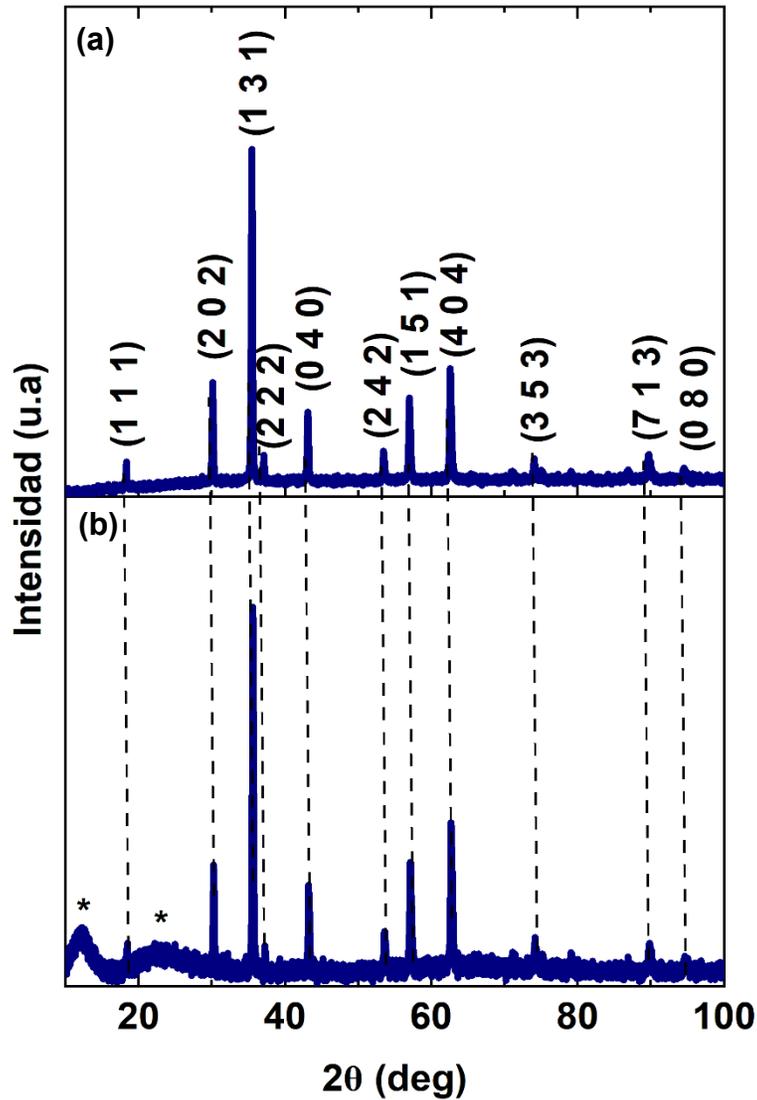


Fig. 37 Comparación de los patrones de difracción de (a) polvo de magnetita y (b) tinta de magnetita.

### 8.3.2.3. Propiedades magnéticas

El ciclo de histéresis corresponde a un material magnético suave, en la tabla 1 se muestran los valores obtenidos de campo coercitivo ( $H_c$ ), magnetización de saturación ( $M_s$ ) y magnetización remanente ( $M_r$ ) medidos a partir de las curvas de histéresis tanto para el polvo como para las muestras con elastómero, ver Fig. 38. La  $M_s$  del polvo de óxido de hierro tiene un valor acorde a lo reportado para la magnetita [87, 88 y 102]. Al variar la concentración en peso del polvo en el elastómero los valores de  $M_r$  y  $M_s$  incrementan, este comportamiento ya ha sido reportado en compuestos a base de resinas con poliéster [103]. El  $H_c$  no tiene cambios significativos siendo independiente del porcentaje en peso de la muestra, esto se debe al tamaño de las partículas.

*Tabla 1. Valores obtenidos de ciclos de histéresis a concentraciones de 20%, 40% y 60% de la tinta de magnetita.*

Muestra	$H_c$ (Oe)	$M_r$ (emu/g)	$M_s$ (Oe)	%remanencia
Polvo	123	5	86	4
20%	92	2	16	11
40%	95	3	33	11
60%	89	6	50	12

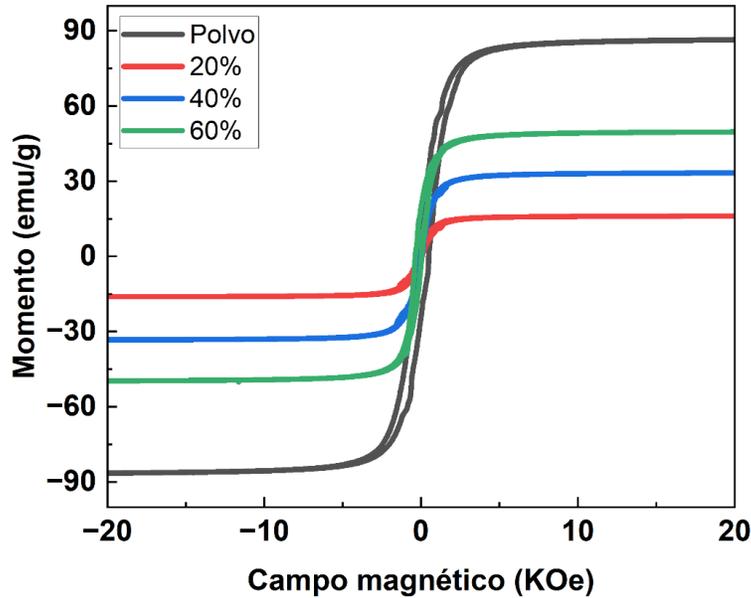


Fig. 38 Comparación de los ciclos de histéresis de la tinta de magnetita (óxido de hierro (II, III)) a concentraciones de 20, 40 y 60 %, con el polvo como referencia.

### 8.3.3. Tinta a base de Ecoflex 00-30 y níquel (Sigma-Aldrich)

Hamidi et al. demostró que usando un modelo similar al propuesto por Said et al. pero empleando nanobarras de níquel y con una longitud de periodo de 3 mm era posible inducir PBG [104]. Tomando esto como antecedente, se optó por dispersar polvo de níquel manteniendo la longitud de periodo de  $a=2d$  con  $d = 2$  mm. Asimismo, se evaluaron tres concentraciones distintas de partículas para su dispersión en la matriz de elastómero. Las muestras obtenidas presentaron bordes bien definidos y una adecuada dispersión de las partículas en el elastómero, como se muestra en la Fig. 39.

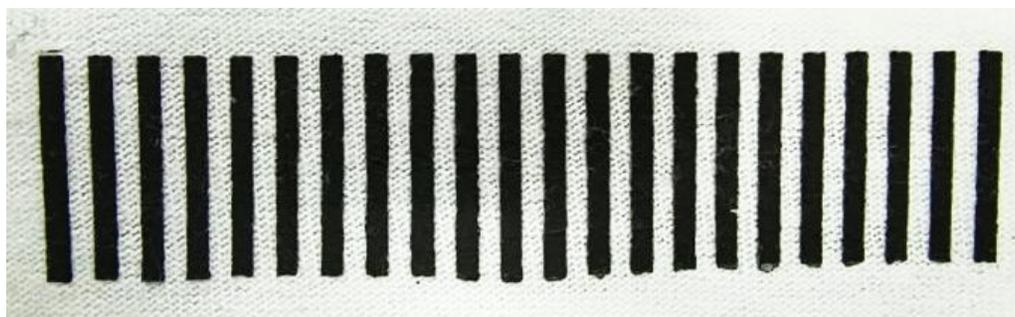
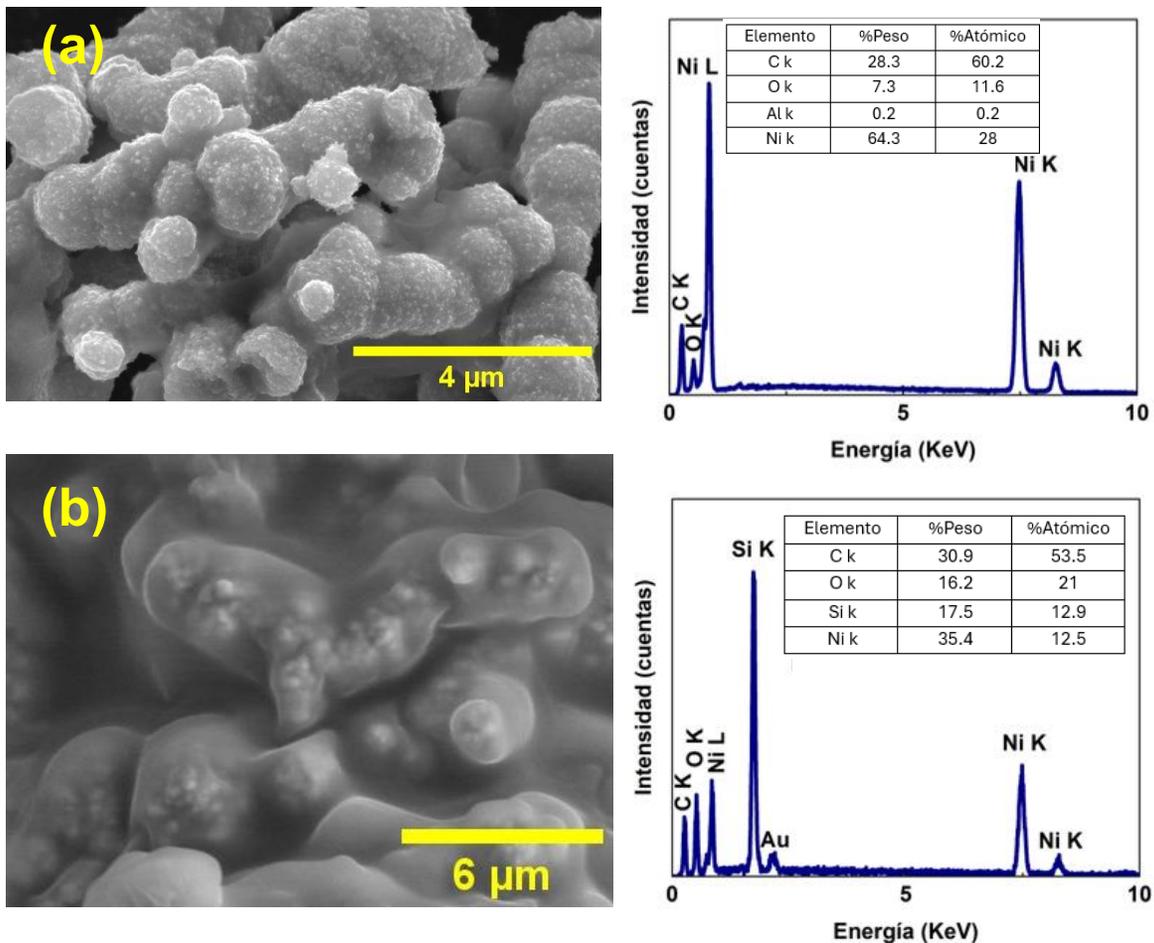


Fig. 39 *Tinta a base de ecoflex y níquel impresa sobre tela por el método de serigrafía, con  $d=2$  mm.*

### 8.3.3.1. Microscopía Electrónica de Barrido

El polvo de níquel tiene una morfología de semi esferas de un tamaño menor a  $3 \mu\text{m}$  que tiende a aglomerarse, ver Fig. 40 (a), con respecto al análisis EDS, se tienen la presencia de Ni, C y O, la señal de C no es una contribución propia del polvo de Ni, sin embargo, el O puede estar asociado a una oxidación por la exposición del polvo al aire a temperatura ambiente [105].

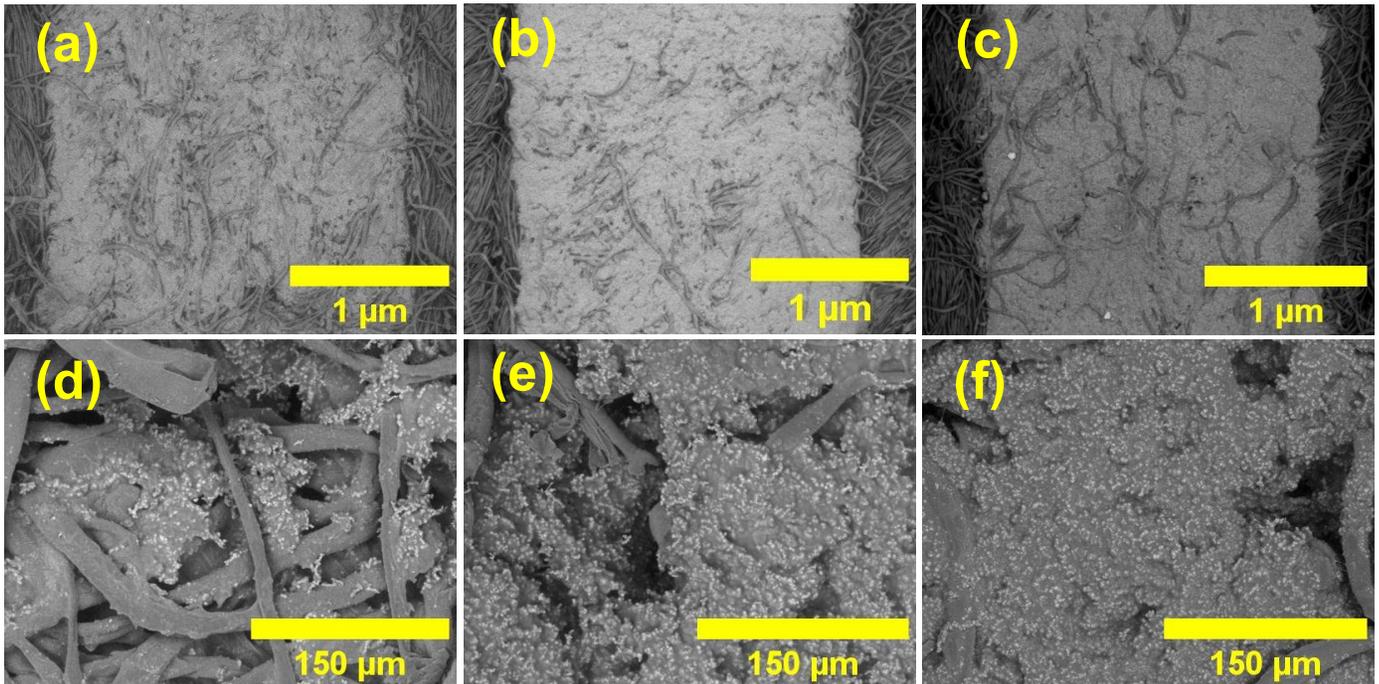
De igual manera al mezclar el polvo con el Ecoflex<sup>TM</sup> se observa la presencia del Si, Además, al tener una distribución homogénea en el tamaño de las partículas, el polvo se integra de manera uniforme en el elastómero, garantizando su encapsulación, ver Fig. 40 (b).



*Fig.40 Micrografías obtenidas con SEM usando electrones secundarios, espectro EDS y análisis químico elemental del (a) polvo de níquel y (b) tinta de níquel.*

De igual manera, se mantuvo la homogeneidad en los bordes donde se observó una distribución homogénea del material sobre la sección de tela, ver Fig.41 (a), (b) y (c). A su vez, conforme se incrementó la concentración de la mezcla, se logró una mejor cobertura sobre las fibras de la tela, ver Fig. 41 (d), (e) y (f). Cabe mencionar que, se formaron aglomerados de la mezcla los cuales se adhirieron sobre las fibras y en algunas sobre los contornos, además de rellenar los espacios entre las fibras, esto se le puede atribuir a la viscosidad que va adquiriendo la mezcla en función de la concentración del polvo de níquel.

Aunque no se obtuvo una cobertura total de las fibras, el encapsulado favoreció la adherencia de la mezcla al sustrato, evitando la formación de segmentos fragmentados susceptibles al desprendimiento.



*Fig. 41 Micrografías obtenidas por SEM usando electrones retrodispersados donde puede notarse los bordes de franjas con una magnificación de 500X a distintas concentraciones en la tinta con (a) y (d) 20 %, (b) y (e) 40 %, (c) y (f) concentración 60 %.*

### **8.3.3.2. Difracción de Rayos X**

En el espectro DRX, ver Fig. 42 (a), se identificaron los picos característicos de níquel en  $44.9^\circ$ ,  $52.18^\circ$ ,  $76.64^\circ$ ,  $93.13^\circ$  y  $98.71^\circ$  correspondientes a los planos (1 1 1), (2 0 0), (2 0 2), (3 1 1) y (2 2 2) (JCPDS file, No. 96-432-0487). De igual manera cuando se tiene la mezcla con el elastómero aparece un pico ancho centrado en

12.63° y un halo amorfo entre 16° y 36°, ver Fig. 42 (b), correspondiente a la fase amorfa del elastómero.

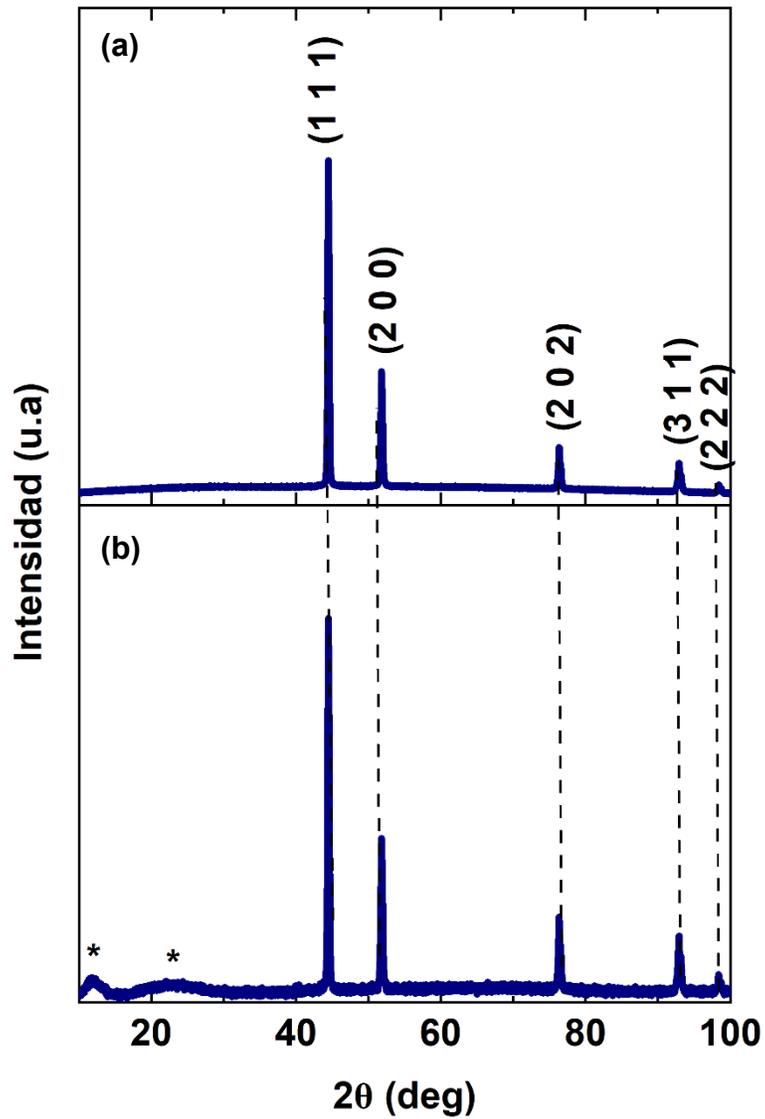


Fig. 42 Comparación de los patrones de difracción de (a) polvo de níquel, (b) tinta de níquel.

### 8.3.3.3. Propiedades magnéticas

En la tabla 2 se muestran los valores obtenidos de Hc, Ms y Mr medidos en las curvas de histéresis para el polvo y con la variación de la concentración en el elastómero, ver Fig. 43.

*Tabla 2. Valores obtenidos de ciclos de histéresis a concentraciones de 20%, 40% y 60% de la tinta de níquel.*

Muestra	Hc (Oe)	Mr (emu/g)	Ms (Oe)	%remanencia
Polvo	39	23	54	5
20%	35	1	10	6
40%	45	2	21	8
60%	41	2	32	7

Se notó que conforme aumenta la concentración de níquel en el elastómero, se tiene un incremento en la Ms, de acuerdo con la bibliografía se sabe que esta variable depende del tamaño de partícula [106], aunque en este trabajo no se está variando ese parámetro, se le podría atribuir a como se está encapsulando el polvo dentro del elastómero, ya que a menor concentración se tiene una mezcla fluida a diferencia de concentración mayor donde se forma una pasta espesa.

Por otro lado, el campo coercitivo no tiene cambios significativos y el % de remanencia tiene un pequeño incremento de 20% a 40%, sin embargo, en 60% se mantiene con un valor similar a 40%, lo cual indica que no se tiene una relación proporcional con el incremento de la concentración.

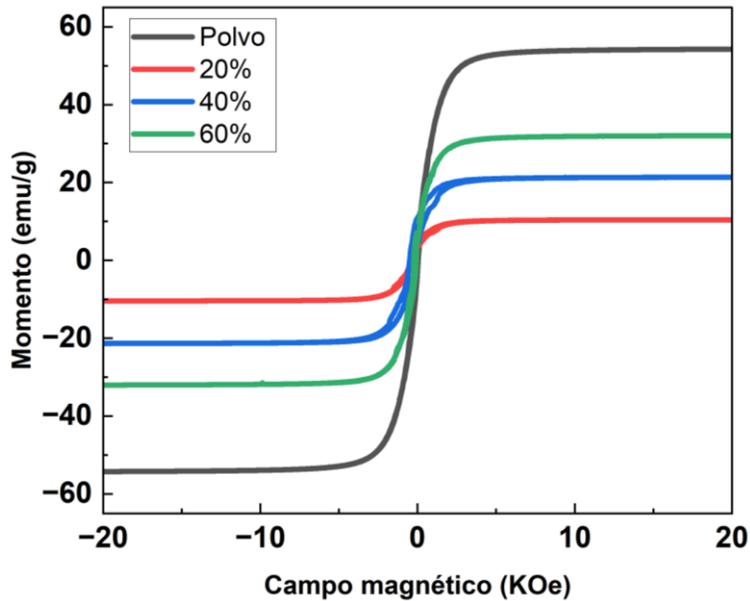


Fig. 43 Comparación de los ciclos de histéresis de la tinta de níquel a concentraciones de 20, 40 y 60 %, con el polvo como referencia

### 8.4. Prueba de dobleces

Esta prueba consistió en realizar 1000 dobleces en una máquina de pruebas de doblado, ya que el material adherido debe resistir ciclos de tensión sin desprenderse fácilmente. Para ello, se prepararon secciones de tela con la mezcla polvo-elastómero de magnetita, óxido de hierro y níquel, ver Fig. 44.

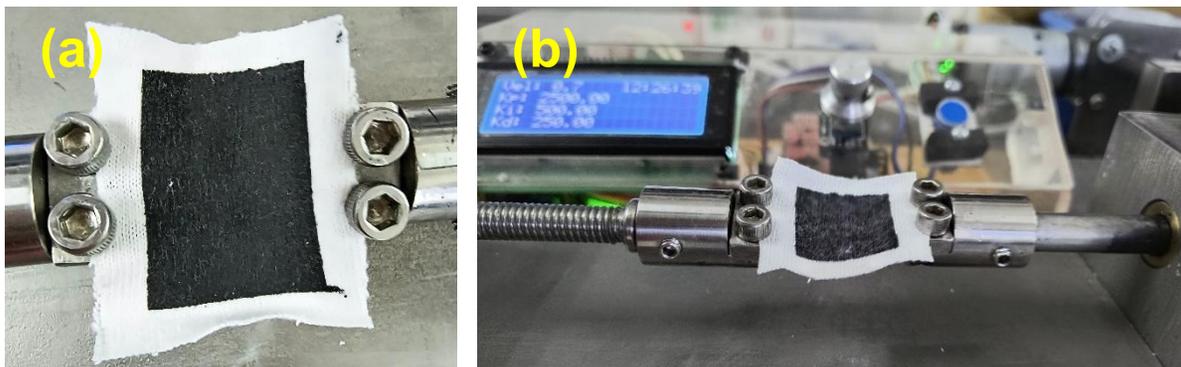


Fig. 44 (a) Muestra de mezcla polvo-elastómero (b) arreglo experimental para la máquina de pruebas de doblado.

Cada muestra fue pesada antes y después de realizar los dobleces. De acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 3 de la ecuación (27) donde  $w_i$  es el peso inicial,  $w_f$  es el peso final. No se observó una pérdida significativa de peso en las tres muestras. Las pérdidas registradas se podrían atribuir al desprendimiento de la fibra en la zona de agarre de la máquina; además, la superficie no mostro cambios ni agrietamientos.

$$\%P = \frac{w_i + w_f}{w_i} \times 100 \quad (27)$$

*Tabla 3. Porcentaje de peso de perdida para las muestras de magnetita mineral, óxido de hierro y níquel.*

Muestra	%P
Magnetita 15%	0.08
Magnetita 30%	0.04
Magnetita 45%	0.05
Ni 20%	0.29
Ni 40%	0.23
Ni 60%	0.09
F <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 20%	0.47
F <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 40%	0.08
F <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 60%	0.04

## 9. Absorción de microondas y efecto de Band Gap Fotónico en patrones periódicos lineales

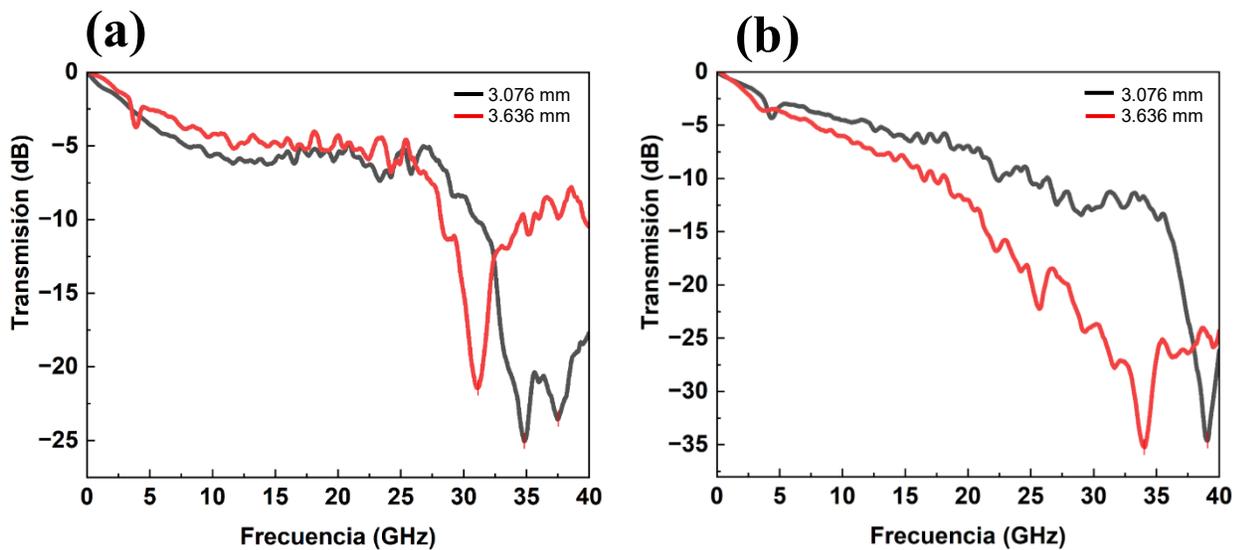
Se analizaron las muestras con pinturas comerciales (Ni en aerosol y primer magnético) y las mezclas de polvo con elastómero (magnetita mineral, níquel y óxido de hierro (II, III)) en el VNA para confirmar el efecto de PBG.

### 9.1. Pinturas comerciales

Para las muestras con pinturas comerciales se obtuvieron los primeros resultados de absorción de microonda, ver Fig. 45, que confirman la presencia del efecto de band gap fotónico en la región de microondas, en donde se observó que al incrementar la longitud del periodo de  $a= 1.538 \text{ mm}$  a  $a=1.818 \text{ mm}$ , la frecuencia central de la banda se desplazaba a valores menores como se puede ver en la Tabla 4.

*Tabla 4. Frecuencias centrales obtenidas de las muestras de pinturas comerciales incorporadas a la tela de algodón por la técnica de serigrafía.*

Material	3.076 mm	3.636 mm
	Frecuencia central (GHz)	
Primer magnético	37.57	31.14
Pintura de níquel en aerosol	39.08	34.96



*Fig. 45 Espectro de transmisión con anchos de banda de  $a=3.076$  mm y  $a=3.636$  mm (a) del primer magnético y (b) pintura de níquel en aerosol.*

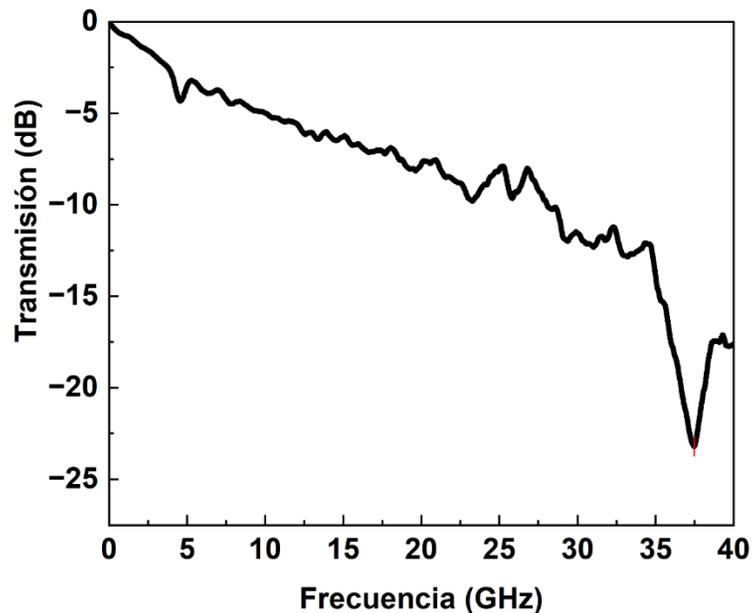
Sin embargo, como se explicó anteriormente este tipo de tintas comerciales al ser solubles en agua fueron descartadas pero los resultados fueron un antecedente para modificar la longitud del periodo y desplazar la frecuencia central a valores menores.

## **9.2. Tintas a base de Ecoflex™ sobre tela**

### **9.2.1. Tinta a base de Ecoflex™ 00-30 y magnetita mineral**

Del espectro de transmisión para la magnetita mineral de una estructura 1D, se comprobó que también se tiene la presencia de un band gap fotónico en la región de microondas, con una frecuencia central de 37.48 GHz. Se observa una transmisión de -23 dB indicando una fuerte atenuación de la señal incidente, ver Fig.46, de acuerdo con la literatura se ha reportado para nano barras de composites ferromagnéticos en una matriz de policarbonato una frecuencia central de 26 GHz

[101], en el mismo mencionan que se tiene una resonancia ferromagnética en las vecindades, sin embargo, para este caso no se observó la formación de otra banda.



*Fig. 46 Espectro de transmisión de la tinta de magnetita con un ancho de franja de  $d=1.538$  mm.*

### **9.2.2. Tinta a base de Ecoflex 00-30 y magnetita (Sigma-Aldrich)**

Del espectro de transmisión de una estructura 1D, se comprobó que también se tiene la presencia de un band gap fotónico en la región de microondas. La frecuencia central varía con la concentración de óxido de hierro en el elastómero como se puede ver en la Tabla 5, por otro lado, en una concentración de 60% se observa otro pico de transmisión en 9.67 GHz, sin embargo, no se puede afirmar que se tiene una resonancia ferromagnética [107] ya que las otras muestras no presentan indicios, ver Fig. 47.

Tabla 5. Valores de frecuencia central y transmisión de la tinta de magnetita a concentraciones de 20%, 40% y 60%.

Concentración	Frecuencia central (GHz)	Transmisión (dB)
20%	29.23	18.54
40%	30.52	24.09
60%	27.88	33.89

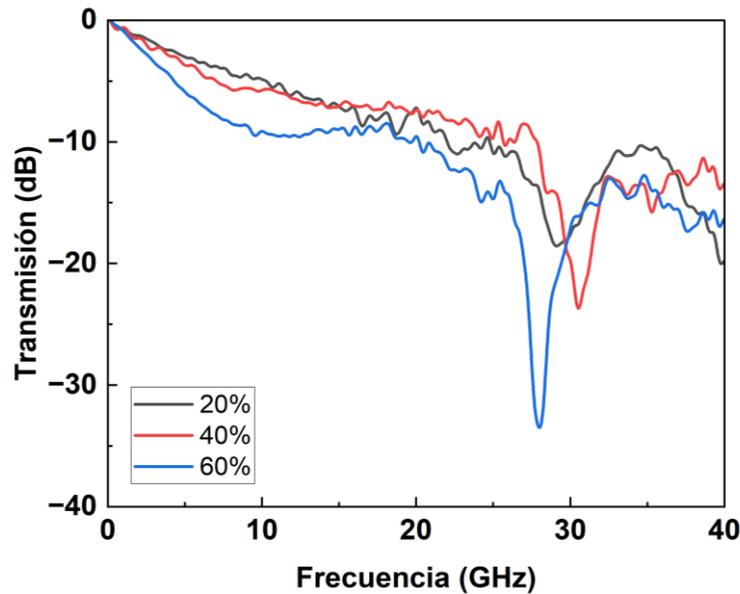


Fig. 47 Espectro de transmisión de tinta de magnetita a distintas concentraciones de 20%, 40% y 60% con  $d=2\text{mm}$ .

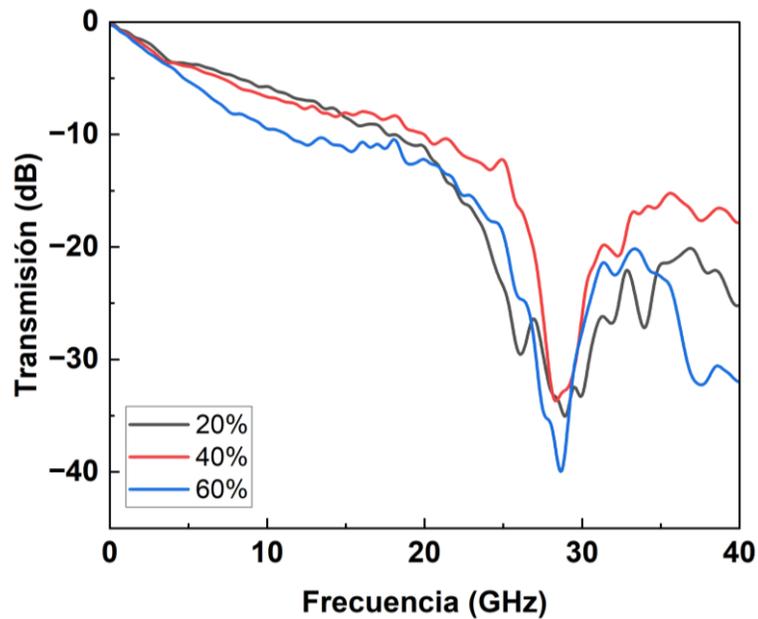
### 9.2.3. Tinta a base de Ecoflex 00-30 y níquel (Sigma-Aldrich)

Del espectro de transmisión de una estructura 1D, ver Fig. 48, se comprobó que también se tiene la presencia de un band gap fotónico en la región de microondas. La frecuencia central no varía con la concentración de níquel en el elastómero como se puede ver en la Tabla 6, aunque en la concentración de 60% se observa otra banda de absorción en 37.57 pero con una atenuación en la transmisión, se ha

reportado valores similares para nano barras teniendo valores de frecuencia de 26.2 GHz cuando  $a=1.5$  mm [104].

*Tabla 6. Valores de frecuencia central y transmisión de la tinta de níquel a concentraciones de 20%, 40% y 60%.*

Concentración	Frecuencia central (GHz)	Transmisión (dB)
20%	28.9	37.30
40%	28.25	35.31
60%	28.8	40.79



*Fig. 48 Espectro de transmisión de la tinta de níquel variando la concentración a 20%, 40% y 60% con  $d=2$  mm.*

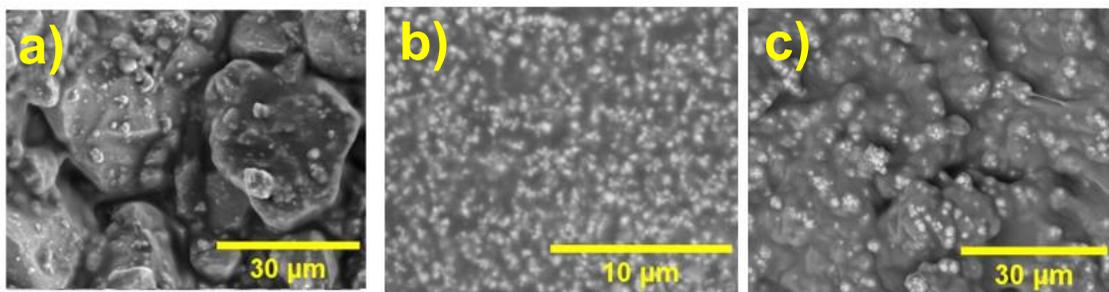
La formación del band gap fotónico depende del periodo y de la permeabilidad magnética. Un cambio en la permeabilidad implica una variación en la impedancia entre medios adyacentes, como es el caso de la transición de tela a tinta magnética. La discontinuidad en la impedancia favorece la aparición del band gap, al reflejar parcialmente las ondas electromagnéticas e impedir su propagación en determinadas frecuencias.

Por otro lado, se observó que, al incrementar la longitud del periodo, la frecuencia central tiende a desplazarse hacia valores más bajos.

## 10. Discusión y conclusiones

Las tintas fabricadas mediante la dispersión de polvos en una base de elastómero demostraron ser eficientes y de fácil incorporación sobre la tela de algodón. Si bien a simple vista las muestras mostraban una cobertura adecuada, es fundamental garantizar un recubrimiento homogéneo del polvo. Para ello, se requiere una distribución homogénea de tamaño de partícula.

A partir de las micrografías de SEM, se observó que las muestras preparadas con magnetita y níquel presentaron mejor comportamiento y distribución dentro del elastómero para las tres concentraciones de 20%, 40% y 60% a diferencia de las muestras de magnetita mineral, ver Fig. 49.



*Fig. 49 Micrografías obtenidas por SEM usando electrones retrodispersados donde se hace la comparación de la dispersión de polvo en elastómero de (a) magnetita mineral, (b) óxido de hierro y (c) níquel.*

En cuanto a las caracterizaciones elementales, para las tres tintas de magnetita mineral, magnetita y níquel se mostraron comportamientos similares:

En primer lugar, el análisis DRX, al comparar los espectros de polvo con las dispersiones de éste en el elastómero, se mantenían los picos característicos de cada muestra (magnetita mineral, magnetita y níquel), además en la dispersión en el elastómero se presentaron dos picos anchos por la contribución de la parte amorfa del elastómero.

En segundo lugar, las propiedades magnéticas indicaron que se tienen ciclos de histéresis estrechos característico de un material magnético suave con valores bajos de  $M_s$ ,  $H_c$  y %remanencia. De las muestras de magnetita y níquel se prestó especial interés en la  $M_s$  ya que éste aumentaba proporcionalmente con la concentración del polvo, lo cual confirma que las proporciones empleadas en las formulaciones fueron adecuadas.

En tercer lugar, se realizaron las pruebas de dobleces para asegurar que la tinta no se desprendía fácilmente de la tela, después de 1000 dobleces, en los tres tipos de tinta y en todas las concentraciones, no se observaron pérdidas significativas de material. Aunque las muestras con níquel presentaron la mayor pérdida de peso, esta fue inferior al 1 %.

En cuarto lugar, los espectros de absorción de microondas evidenciaron que, aunque las tintas comerciales (primer magnético y pintura de níquel en aerosol) no resultaron adecuadas debido a que son solubles en agua y de difícil control de depósito sobre la tela, los resultados confirmaron la aparición de un band gap fotónico en la región de microondas y sirvieron como base para ajustar la periodicidad de la estructura y con ello modificar la frecuencia central ya que esta depende del parámetro  $a$ .

Por otro lado, para las tintas fabricadas con magnetita y níquel, se observó que la concentración de polvo en el elastómero no modificaba el valor de la frecuencia central del band gap, ya que se mantuvo dentro del mismo intervalo para las tres concentraciones. No obstante, se identificó una relación entre la concentración y la transmisión, evidenciándose un aumento en la amplitud de la banda conforme se incrementaba la concentración.

Finalmente, los valores obtenidos para las frecuencias centrales en las tintas de magnetita y níquel fueron comparables con los reportados por Saib et al. y Hamidi et al. Para compositos de nanobarras ferromagnéticas se reporta un valor de 21 GHz ( $d=1.818$  mm) y 26 GHz ( $d=1.538$ ) y en este trabajo para la tinta de magnetita

se tiene un valor en el rango de 27-30 GHz. Para las nanobarras de níquel se reporta un valor de 26.2 GHz ( $d=1.5$  mm) y para la tinta de níquel se tiene un valor en un rango de 28 GHz.

En resumen:

1. Se logró la integración de materiales magnéticos en patrones bien definidos por la técnica de serigrafía.
2. Se fabricaron tintas eficientes a base de elastómero con la dispersión de polvos a distintas concentraciones.
3. Las micrografías de SEM sirvieron para observar la calidad del recubrimiento y el análisis químico elemental para comprobar la pureza de los materiales empleados.
4. Con el análisis de propiedades magnéticas se comprobaron las concentraciones usadas.
5. Se realizaron las primeras pruebas de doblados en donde no se tuvo pérdidas significativas del material.
6. Se logró inducir un *band gap* fotónico en las muestras usando las tintas magnéticas.
7. Se comprobó que la frecuencia central puede ser modulada en función de la longitud del periodo

## 11. Perspectivas del trabajo

A partir de los resultados obtenidos, se abren diversas perspectivas que permitirán profundizar y optimizar el sistema propuesto. En primer lugar, si bien se ha establecido una metodología eficiente para la integración de materiales magnéticos en patrones periódicos bien definidos que inducen un band gap fotónico, es necesario evaluar la estabilidad y durabilidad del material mediante otras pruebas de resistencia, como ciclos de lavado, deformaciones, cambios de periodo al estirar el textil y con ello medir si el band gap sufre algún cambio.

Asimismo, se pretende introducir defectos en la estructura periódica mediante la modificación del periodo en regiones específicas. Esta estrategia permitiría estudiar la localización de modos dentro del band gap y sus posibles aplicaciones en dispositivos selectivos de frecuencia.

Por otro lado, la aparición de una segunda banda en las muestras con 60% de magnetita sugiere la posible presencia de resonancia ferromagnética. Para confirmar este fenómeno y evaluar la formación del band gap y la resonancia, se plantea realizar experimentos bajo la aplicación de campos magnéticos externos variables.

## 12. Bibliografía

[1] Singh, Mukesh y Singh, Annika. (2013). Ultraviolet Protection by Fabric Engineering. *Journal of Textiles*. 2013. 10.1155/2013/579129.

[2] Matusiak, Malgorzata. (2006). Investigation of the thermal insulation properties of multilayer textiles. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 14. 98-102.

[3] Castano, Lina & Flatau, Alison. (2014). Smart fabric sensors and e-textile technologies: A review. *Smart Materials and Structures*. 23. 053001. 10.1088/0964-1726/23/5/053001.

[4] Akter, A., Apu, M. M. H., Veeranki, Y. R., Baroud, T. N., & Posada-Quintero, H. F. (2024). Recent studies on smart textile-based wearable sweat sensors for medical monitoring: A systematic review. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 13(4), 40. <https://doi.org/10.3390/jsan13040040>

[5] Xiaolei Song, Congzhu Xu, Yuyan Wang, Huizhen Ke, Yonggui Li, Qufu Wei, Xinqun Feng b. (2023). Optimization on magnetic properties of Nd-doped Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles for magnetic shielding fabrics. *Journal of rare earths*, 42(Julio 2023), 638–689.

[6] Peng, Y.; Cui, Y. Advanced textiles for personal thermal management and energy. *Joule* 2020, 4, 724–742.

[7] Madheswaran, BALAMURUGAN & Shanmugam, Saravanan & Soga, Tetsuo. (2017). Coating of green-synthesized silver nanoparticles on cotton fabric. *Journal of Coatings Technology and Research*. 14. 1-11. 10.1007/s11998-016-9894-1.

[8] Song, Y.-N., Li, Y., Yan, D.-X., Lei, J., & Li, Z.-M. (2020). Novel passive cooling composite textile for both outdoor and indoor personal thermal management. *Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing*, 130(105738), 105738.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105738>

[9] Attia, N. F., Moussa, M., Sheta, A. M. F., Taha, R., & Gamal, H. (2017). Synthesis of effective multifunctional textile based on silica nanoparticles. *Progress in Organic Coatings*, 106, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.02.006>

[10] Plohl, O., Ojstršek, A., & Jug, L. (2022). A Review of Electro Conductive Textiles Utilizing the Dip-Coating Technique: Their Functionality, Durability and Sustainability. *Polymers*, 14. <https://doi.org/10.3390/polym14214713>.

[11] Bica, I., Iacobescu, G., Chirigiu, L., & Anitas, E. (2025). Eco-Friendly Magnetically Active Textiles: Influence of Magnetic Fields, Pumpkin Seed Oil, and Propolis Microparticles on Complex Dielectric Permittivity Components. *Journal of Composites Science*. <https://doi.org/10.3390/jcs9050237>.

[12] Mazinani, S., Sedighi, A., & Montazer, M. (2018). Fabrication of electrically conductive superparamagnetic fabric with microwave attenuation, antibacterial properties and UV protection using PEDOT/magnetite nanoparticles. *Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2018.08.046>.

[13] Wan, J., Song, Y., Zhang, H., Xu, C., Guo, H., Miao, L., Wang, H., Xiang, Z., & Han, M. (2021). Magnetic, conductive textile for multipurpose protective clothing and hybrid energy harvesting. *Applied Physics Letters*, 118, 143901. <https://doi.org/10.1063/5.0044022>.

[14] Zhao, Z., Gong, W., Liao, Z., Wang, Y., Zhang, H., Tang, X., & Yue, J. (2024). High-performance cobalt-embedded SiC nanofiber fabric for microwave dissipation. *Composites Communications*.

<https://doi.org/10.1016/j.coco.2024.102131>.

[15] Wagih, M., Balocchi, L., Benassi, F., Carvalho, N. B., Chiao, J.-C., Correia, R., Costanzo, A., Cui, Y., Georgiadou, D., Gouveia, C., Grosinger, J., Ho, J. S., Hu, K., Komolafe, A., Lemey, S., Loss, C., Marrocco, G., Mitcheson, P., Palazzi, V., ... Beeby, S. (2023). Microwave-enabled wearables: Underpinning technologies, integration platforms, and next-generation roadmap. *IEEE journal of microwaves*, 3(1), 193–226. <https://doi.org/10.1109/jmw.2022.3223254>

[16] Gadot, F., Ammouche, A., De Lustrac, A., Chelnokov, A., Bouillault, F., Crozat, P., & Lourtioz, J. M. (1998). Photonic band gap materials for devices in the microwave domain. *IEEE Transactions on Magnetics*, 34(5), 3028-3031. <https://doi.org/10.1109/20.717708>

[17] V, Subramanian. (2008). Microstrip microwave band gap structures. *Pramana*. 70. 739-746. 10.1007/s12043-008-0034-z.

[18] King, T.-C., Chen, D.-X., Lin, W.-C., & Wu, C.-J. (2015). Photonic band gap structure for a ferroelectric photonic crystal at microwave frequencies. *Applied Optics*, 54(29), 8738-8741. <https://doi.org/10.1364/AO.54.008738>

[19] Man, Weining & Florescu, Marian & Williamson, Eric & He, Yingquan & Hashemizad, Seyed & Leung, Brian & Liner, Devin & Torquato, Salvatore & Chaikin, Paul & Steinhardt, Paul. (2013). Isotropic band gaps and freeform waveguides observed in hyperuniform disordered photonic solids. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 110. 10.1073/pnas.1307879110.

- [20] Awasthi, Suneet & Panda, Ranjita & Chauhan, Prashant & Shiveshwari, Laxmi. (2018). Multichannel tunable omnidirectional photonic band gaps of 1D ternary photonic crystal containing magnetized cold plasma. *Physics of Plasmas*. 25. 052103. 10.1063/1.5026547.
- [21] F. Gadot, A. Chelnokov, A. De Lustrac, P. Crozat, J.-M. Lourtioz, D. Cassagne, C. Jouanin; Experimental demonstration of complete photonic band gap in graphite structure. *Appl. Phys. Lett.* 29 September 1997; 71 (13): 1780–1782. <https://doi.org/10.1063/1.119396>
- [22] Zhang, Weiyi & Lei, XY & Wang, Zh & Zheng, D. & Tam, WY & Chan, C. & Sheng, Ping. (2000). Robust Photonic Band Gap from Tunable Scatterers. *Physical review letters*. 84. 2853. 10.1103/PhysRevLett.84.2853.
- [23] Qin, Zichen & Liu, Tao & Wan, Duanduan. (2023). Effects of orientational and positional randomness of particles on photonic band gap. *Physical Review B*. 107. 10.1103/PhysRevB.107.174110.
- [24] Vovchenko, Ludmila & Lozitsky, Oleg & Sahalianov, Ihor & Matzui, Ludmila & Launets, Vilen. (2017). Microwave Properties of One-dimensional Photonic Structures Based on Composite Layers Filled with Nanocarbon. *Nanoscale Research Letters*. 12. 10.1186/s11671-017-2034-8.
- [25] Peymanfar, R., Yektaei, M., Javanshir, S., & Selseleh-Zakerin, E. (2020). Regulating the energy band-gap, UV–Vis light absorption, electrical conductivity, microwave absorption, and electromagnetic shielding effectiveness by modulating doping agent. *Polymer*, 209, 122981. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122981>
- [26] Singh, B. K., Bambole, V., Tiwari, S., Shukla, K. K., Pandey, P. C., & Rastogi, V. (2021). Photonic band gap consequences in one-dimensional exponential graded

index photonic crystals. *Optik*, 240, 166854.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166854>

[27] Prokopchuk, A., Zozulia, I., Didenko, Y., Tatarchuk, D., Heuer, H., & Poplavko, Y. (2021). Dielectric Permittivity Model for Polymer–Filler Composite Materials by the Example of Ni- and Graphite-Filled Composites for High-Frequency Absorbing Coatings. *Coatings*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/coatings11020172>

[28] Dyogtyev, Andriy & Sukhoivanov, Igor & De, R & Rue, La. (2008). The influence of photonic crystal parameters on the photonic band-gaps - art. no. 70090D. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 7009. 10.1117/12.793323.

[29] O'Brien, S., & Pendry, J. B. (2002). Photonic band-gap effects and magnetic activity in dielectric composites. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 14(15), 4035. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/15/317>

[30] Mugiraneza, Sam & Hallas, Alannah. (2022). Tutorial: a beginner's guide to interpreting magnetic susceptibility data with the Curie-Weiss law. *Communications Physics*. 5. 95. 10.1038/s42005-022-00853-y.

[31] William M. Haynes, David R. Lide, Thomas J. Bruno (ed.), *CRC Handbook of Chemistry and Physics, A Ready-Reference Book of Chemical and Physical Data*, 97th edition (2016-2017), CRC Press, Taylor & Francis Group, London, ISBN 9781498754293

[32] W. D. Callister y D. G. Rethwisch. *Materials science and engineering*, volume 5. John Wiley & Sons NY, 2011

[33] Hossain, M. T., Shahid, M. A., Limon, M. G. M., Hossain, I., & Mahmud, N. (2024). Techniques, applications, and challenges in textiles for a sustainable future.

*Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(1), 100230.  
<https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100230>

[34] Abtew, Mulat & Atalie, Desalegn & Dejene, Bekinew & McBee-Black, Kerri. (2025). Intelligent and electronic textile materials for adaptive apparel: Innovations, functional design, and future directions. *Journal of Industrial Textiles*. 55. 10.1177/15280837251346789.

[35] García, P. P., & Gómez, M. Á. L. (n.d.). *El impacto de los tejidos inteligentes en la industria textil tradicional*.

[36] Grancarić, Ana & Jerkovic, Ivona & Koncar, Vladan & Cochrane, Cédric & Kelly, Fern & Soulat, Damien & Legrand, Xavier. (2018). Conductive polymers for smart textile applications. *Journal of Industrial Textiles*. 48. 152808371769936. 10.1177/1528083717699368.

[37] ÇetiNer, S., Göl, B., & Köse, H. (2017). Development of Flexible Smart Fabric Sensor for Wearable Electrocardiogram. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 10-15. <https://doi.org/10.17780/ksujes.338039>

[38] Angelucci, A., Cavicchioli, M., Cintorrino, I. A., Lauricella, G., Rossi, C., Strati, S., & Aliverti, A. (2021). Smart Textiles and Sensorized Garments for Physiological Monitoring: A Review of Available Solutions and Techniques. *Sensors*, 21(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/s21030814>

[39] Júnior, H. L. O., Neves, R. M., Monticeli, F. M., & Dall Agnol, L. (2022). Smart Fabric Textiles: Recent Advances and Challenges. *Textiles*, 2(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/textiles2040034>

[40] Iakovlev, D., Hu, S., Hassan, H., Dwyer, V., Ashayer-Soltani, R., Hunt, C., & Shen, J. (2018). *Smart Garment Fabrics to Enable Non-Contact Opto-Physiological Monitoring*. *Biosensors*, 8(2), 33. <https://doi.org/10.3390/bios8020033>

[41] Tecer, A., & Karakışla, M. (2024). Investigation of shielding properties of conductive cotton composite fabric materials against electromagnetic waves, 66(1), 1-18. ISSN 1303-6017 E-ISSN 2687-4806  
<https://dergipark.org.tr/en/pub/communb/issue/82815/1404300>

[42] Gültekin, B. C., Gültekin, N. D., Atak, O., & Şimşek, R. (2018). Evaluation of the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Carbon-Based Screen-Printed Polyester Fabrics. *Fibers and Polymers*, 19(2), 313-320. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-7462-7>

[43] Putra, Valentinus, Mohamad, Julianny, Arief, Diana & Yusuf, Yusril. (2021). Surface modification of polyester-cotton (TC 70%) fabric by corona discharged plasma with tip-cylinder electrode configuration-assisted coating carbon black conductive ink for electromagnetic shielding fabric. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*. 28. 272-282. 10.1080/25765299.2021.1889116.

[44] Park, J.-H., Park, J., Tang, F., Song, Y.-G., & Jeong, Y. G. (2024). Electromagnetic Interference Shielding and Joule Heating Properties of Flexible, Lightweight, and Hydrophobic MXene/Nickel-Coated Polyester Fabrics Manufactured by Dip-Dry Coating and Electroless Plating. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(29), 38490-38500. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c06735>

[45] M. Tian, M. Du, L. Qu, S. Chen, S. Zhu, G. Han (2017). Electromagnetic Interference Shielding Cotton Fabrics with High Electrical Conductivity and Electrical Heating Behavior via Layer-by-Layer Self-Assembly Route. *RSC Advances*, 7, 42641–42652. DOI: [10.1039/C7RA08224J](https://doi.org/10.1039/C7RA08224J).  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/ra/c7ra08224j>

[46] Steffens, F. (2022). Recent Developments in Textile Materials Based on the Piezoelectricity Concept. *Journal of Textile Science & Fashion Technology*, 9(5). <https://doi.org/10.33552/JTSFT.2022.09.000723>

[47] Maestri, G., Ferreira, L. B., Bachmann, P., Paim, A. A., Merlini, C., & Steffens, F. (2023). Recent advances in piezoelectric textile materials: A brief literature review. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 18, 15589250231151242. <https://doi.org/10.1177/15589250231151242>

[48] Hossain, Md. M., & Bradford, P. D. (2021). Chapter 3—Durability of smart electronic textiles. En A. Ehrmann, T. A. Nguyen, & P. Nguyen Tri (Eds.), *Nanosensors and Nanodevices for Smart Multifunctional Textiles* (pp. 27-53). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820777-2.00003-0>

[49] Zaman SU, Tao X, Cochrane C, Koncar V. Market readiness of smart textile structures- reliability and washability. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2018;459(1).

[50] Skrzetuska, E., & Rzeźniczak, P. (2025). Circularity of Smart Products and Textiles Containing Flexible Electronics: Challenges, Opportunities, and Future Directions. *Sensors*, 25(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/s25061787>

[51] De Oliveira, C. R. S., da Silva Júnior, A. H., Immich, A. P. S., & Fiates, J. (2022). Use of advanced materials in smart textile manufacturing. *Materials Letters*, 316, 132047. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132047>.

[52] Herrera, C., Restrepo, M., & Sánchez, L. (2019). Estudio De La Aplicación De Los Metamateriales En El Diseño De Antenas Textiles. *Revista Politécnica*, 15(29), 108-127.

[53] Engheta, N., & Ziolkowski, R. W. (s. f.). *Metamaterials, Physics and Engineering Explorations*.

[54] Moreno, G. M., Pérez-Walton, S., López, F., Moreno, G. M., Pérez-Walton, S., & López, F. (2022). Metasuperficies en el diseño de antenas: Una introducción. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 32(2), 145-170. <https://doi.org/10.18359/rcin.6071>

[55] Huang, W., Li, C., Fang, B., Xu, J., Liu, F., Xu, L., Tang, Y., Hong, Z., & Jing, X. (2024). Research progress of terahertz wave dynamic control of digital coded metasurfaces. *Optics and Lasers in Engineering*, 174, 107977. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107977>.

[56] Ali, A., Mitra, A., & Aïssa, B. (2022). Metamaterials and Metasurfaces: A Review from the Perspectives of Materials, Mechanisms and Advanced Metadevices. *Nanomaterials*, 12(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/nano12061027>

[57] Luna, F., Boggi, S., & Fano, W. G. (2020). Estudio de modelos circuitales de metamateriales bidimensionales de banda prohibida electromagnética basados en la celda de Yang. *Elektron: ciencia y tecnología en la electrónica de hoy*, 4(1), 27-34.

[58] Vovchenko, Ludmila & Lozitsky, Oleg & Sahalianov, Ihor & Matzui, Ludmila & Launets, Vilen. (2017). Microwave Properties of One-dimensional Photonic Structures Based on Composite Layers Filled with Nanocarbon. *Nanoscale Research Letters*. 12. 10.1186/s11671-017-2034-8.

[59] Eghan, B., Ofori, E. A., Seidu, R. K., & Acquaye, R. (2024). Recent Progress to Address the Challenges of Conductive Inks for E-Textiles. *Engineering Proceedings*, 52(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/engproc2023052003>

- [60] Alarifi, I. M. (2023). A comprehensive review on advancements of elastomers for engineering applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 6(4), 451-464. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.05.001>
- [61] Soukoulis, C. M. (Ed.). (2012). Photonic band gap materials (Vol. 315). Springer Science & Business Media
- [62] Aquino, S. C., & Ramírez, H. C. (2018). *Electromagnetismo IV: ondas electromagnéticas en el rango de microondas Versión 1.0*. UNAM.
- [63] Young, H. D., & Freedman, R. A. (2009). Física Universitaria, Volumen 2. (12a ed.). Pearson Educación.
- [64] Castillo, Ebert & Castillo-Aranibar, Patricia & Polar, Manuel & Gonzales Fuentes, Lee & Zenteno, Efrain. (2014). Aplicaciones y Teoría de Ingeniería de Microondas.
- [65] Foo Keng Yuen, B.H. Hameed (2009) Recent developments in the preparation and regeneration of activated carbons by microwaves. *Advances in Colloid and Interface Science*. Volume 149, Issues 1–2. 19-27. ISSN 0001-8686. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.12.005>.
- [66] Yablonovitch, Eli. (2002). Photonic Crystals: Semiconductors of Light. *Scientific American*. 285. 47-51, 54. 10.1038/scientificamerican1201-46.
- [67] M. M. Sigalas, C. M. Soukoulis, R. Biswas, and K. M. Ho. Effect of the magnetic permeability on photonic band gaps. *Physical Review B*, 56(3):959, July 1997.
- [68] Chul-Sik Kee, Jae-Eun Kim, Hae Park, S. Kim, H. Song, Y. Kwon, N. Myung, S. Shin, and H. Lim. Essential parameter in the formation of photonic band gaps. *Physical Review E*, 59(4):4695-4698, 1999.

[69] Aimad SAib. Tesis doctoral. Modeling and design of microwave devices based on ferromagnetic nanowires. Universit\_e Catholique de Louvain, 2004.

[70] Hornreich, R.M. & Kugler, M. & Shtrikman, S. & Sommers, C. (1997). Phonon Band Gaps. <http://dx.doi.org/10.1051/jp1:1997172>. 7. 10.1051/jp1:1997172.

[71] Saib, A. & Vanhoenacker-Janvier, Danielle & Huynen, Isabelle & Encinas, A. & Piraux, L. & Ferain, Etienne & Legras, Roger. (2003). Magnetic photonic band-gap material at microwave frequencies based on ferromagnetic nanowires. *Applied Physics Letters*. 83. 2378-2380. 10.1063/1.1610798.

[72] Laso, M. a. G., Erro, M. J., Benito, D., Garde, M. J., Lopetegi, T., Falcone, F., & Sorolla, M. (1999). Analysis and design of 1-D photonic bandgap microstrip structures using a fiber grating model. *Microwave and Optical Technology Letters*, 22(4), 223-226. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2760\(19990820\)22:4<223::AID-MOP1>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2760(19990820)22:4<223::AID-MOP1>3.0.CO;2-X)

[73] Morales, Fabiana & Sagredo, V. & Torres, T. & Márquez, Gerson. (2018). Caracterización de nanopartículas de magnetita sintetizadas por el método de coprecipitación. 40. 39-44.

[74] Mencía, A. L. (2018). *Síntesis y funcionalización de nanopartículas magnéticas*. Universidad de Oviedo.

[75] Zanella, Rodolfo. (2012). Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 5(1), 69-81. Epub 30 de agosto de 2021. Recuperado en 30 de enero de 2025, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2448-56912012000100069&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912012000100069&lng=es&tlng=es).

- [76] Corral, R. (2015). Batik: Arte textil milenario. *ASRI*, 2174–7563.
- [77] *Videos y ejemplos de qué es la Serigrafía y tipos de Serigrafiado*. (s/f). Grupobillingham.com. Recuperado el 31 de enero de 2025, de <https://www.grupobillingham.com/serigrafia>
- [78] *Ecoflex™ 00-30*. (s/f). Smooth-On, Inc. Recuperado el 3 de febrero de 2025, de <https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-30/>
- [79] Valenzuela-Amaro, H. M., Vázquez Ortega, P. G., Zazueta-Alvarez, D. E., López-Miranda, J., & Rojas-Contreras, J. A. (2022). Síntesis verde de nanopartículas de magnetita (NPs-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): factores y limitaciones. *Mundo Nano Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 16(30), 1e–18e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69744>
- [80] Mascolo, M., Pei, Y., & Ring, T. (2013). Room temperature co-precipitation synthesis of magnetite nanoparticles in a large pH window with different bases. *Materials*, 6(12), 5549–5567. <https://doi.org/10.3390/ma6125549>
- [81] Jurkowski, Andrzej & Koziół, Jacek & Gronczewska, Ewelina. (2019). A method to increase the survival of probiotic bacteria *Lactobacillus brevis* at a lowered pH. *Biological Letters*. 54. 13-20. 10.2478/biolet-2019-0002.
- [82] Petcharoen, K., & Sirivat, A. (2012). Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles via the chemical co-precipitation method. *Materials Science & Engineering. B, Solid-State Materials for Advanced Technology*, 177(5), 421–427. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2012.01.003>
- [83] Manoj Pudukudy., Qingming Jia., Yanan Dong., Zhongxiao Yue., Shaoyun Shan. (2019). Magnetically separable and reusable rGO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposites for

the selective liquid phase oxidation of cyclohexene to 1,2-cyclohexane diol. *Royal Society of Chemistry*, 9, 32517–32534.

[84] Salazar, J. V. C. (2017). *Síntesis de nanopartículas de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (magnetita) y su recubrimiento usando carbonización de glucosa mediante un proceso solvotérmico*. IPICYT

[85] Hadadian, Y., Masoomi, H., Dinari, A., Ryu, C., Hwang, S., Kim, S., Cho, B. K., Lee, J. Y., & Yoon, J. (2022). From Low to High Saturation Magnetization in Magnetite Nanoparticles: The Crucial Role of the Molar Ratios Between the Chemicals. *ACS Omega*, 7(18), 15996–16012. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01136>.

[86] Mascolo, M., Pei, Y., & Ring, T. (2013). Room temperature co-precipitation synthesis of magnetite nanoparticles in a large pH window with different bases. *Materials*, 6(12), 5549–5567. <https://doi.org/10.3390/ma6125549>

[87] Petcharoen, K., & Sirivat, A. (2012). Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles via the chemical co-precipitation method. *Materials Science & Engineering. B, Solid-State Materials for Advanced Technology*, 177(5), 421–427. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2012.01.003>

[88] Oikonomou, Christos. (2014). Surface Characterization of Soft Magnetic Composite Powder and Compacts.

[89] *Nickel Conductive Paint*. (s. f.). Recuperado 17 de junio de 2025, de <https://mgchemicals.com/products/conductive-paint/conductive-acrylic-paints/nickel-conductive-paint/>

[90] V. Gjokaj, C. Crump, B. Wright, P. Chahal, Direct Printing of Antennas on Large 3D Printed Plastic Structures, in: 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). 2020. 666. 10.1109/ECTC32862.2020.00110.

[91] M. Mohammadifar, S. Choi, A solid phase bacteria-powered biobattery for low-power, low-cost, internet of Disposable Things, J. Power Sources 429 (2019) 105, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.05.009>.

[92] R.K. Arun, M. Anjali, P. Sardar, B.M. Singh, N.C. Jha, A spiral shaped regenerative microfluidic fuel cell with Ni-C based porous electrodes, Int. J. Energy Res. 43 (2019) 8834, <https://doi.org/10.1002/er.4841>.

[93] F.J. Förster, S. Brack, R. Poser, J. von Wolfersdorf, B. Weigand, A novel surface-integrated spray-on thermocouple for heat transfer measurements, Exp. Therm Fluid Sci. 93 (2018) 356, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.01.017>.

[94] J.-C. Chieh, B. Dick, S. Loui, J.D. Rockway, Development of a Ku-Band Corrugated Conical Horn Using 3-D Print Technology, IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. 13 (2014) 201–204, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2301169>.

[95] Gao, Ye & Zhao, Jingzhe & Zhou, Bing & Zhu, Yanchao & Wang, Zichen. (2010). Aqueous synthesis of flower-like nickel nanostructures under the induction of magnetic field. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 368. 137-141. 10.1016/j.colsurfa.2010.07.028.

[96] Toralva, María & Solis, Jose & Gómez, Monica. (2016). Fabricación y caracterización de celdas solares sensibilizadas de TiO<sub>2</sub> modificado con nanopartículas de NiO. Boletín de la Sociedad Química del Perú. 82. 87. 10.37761/rsqp.v82i1.54.

[97] Tech, L. (2023, mayo 27). *Pinturas en aerosol conductoras de electricidad para plástico: soluciones versátiles para electrónica y galvanoplastia*. Dr. Dietrich Müller GmbH. <https://www.mueller-ahlhorn.com/es/pinturas-en-aerosol-conductoras-de-electricidad-para-pl%C3%A1stico-soluciones-vers%C3%A1tiles-para-electr%C3%B3nica-y-galvanoplastia/>

[98] De Jesus Andrade Fidelis, R., Pires, M., de Resende, D. S., Costa Lima, G. F., de Paiva, P. R. P., & Bezerra, A. C. da S. (2025). Magnetite: Properties and applications – A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 614(172770), 172770. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2025.172770>

[99] Forero Pinilla, Á. H., Ardila Barragán, M. A., & Díaz Bello, S. C. (2008). Caracterización y beneficio de un mineral de magnetita para lavado de carbones en medios densos. *PROSPECTIVA*, 6(1), 18-22.

[100] Lewis, Larry & Stein, Judith & Gao, Yan & Colborn, Robert & Hutchins, Gudrun. (1997). Platinum Catalysts Used in the Silicones Industry: Their Synthesis and Activity in Hydrosilylation. *Platinum Met Rev.* 41. 10.1595/003214097X4126675.

[101] Lukin, R. Y., Kuchkaev, A. M., Sukhov, A. V., Bekmukhamedov, G. E., & Yakhvarov, D. G. (2020). Platinum-Catalyzed Hydrosilylation in Polymer Chemistry. *Polymers*, 12(10), 2174. <https://doi.org/10.3390/polym12102174>

[102] Ma, J., & Chen, K. (2017). Modulated self-reversed magnetic hysteresis in iron oxides. *Scientific Reports*, 7, 42312. <https://doi.org/10.1038/srep42312>

[103] Peña-Rodríguez, G., Rivera-Suárez, P. A., González-Gómez, C. H., Parra-Varas, C. A., Garzón-Posada, A. O., Landínez-Téllez, D. A., & Roa-Rojas J. (2018). Efecto de la concentración de magnetita en la estructura, propiedades eléctricas y

magnéticas de un material compuesto a base de resina de poliéster. *TecnoLógicas*, 21(41), 13-27. <https://doi.org/10.22430/22565337.708>

[104] Hamidi, S. M., Sobhani, A., & Aftabi, A. (2015). Fabrication and Characterization of a Microwave Filter Based on a Nanowire-Supported Magnetic Photonic Band Gap Material *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, , 28(12), 3565-3569. . <https://doi.org/10.1007/s10948-015-3196-1>

[105] B.A. Abd-El-Nabey, S. El-Housseiny, A.M. Abdel-Gaber, M.E. Mohamed, Kinetics of oxidation of metals in the air at room temperature using EDX, *Results in Chemistry*, Volume 5, 2023, 100876, ISSN 2211-7156, <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100876>

[106] He, X., & Shi, H. (2012). Size and shape effects on magnetic properties of Ni nanoparticles. *Particuology*, 10(4),497–502. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2011.11.011>

[107] Ping Xu, Tian-Yi Cai, Zhen-Ya Li, Studies on magnetic photonic band-gap material at microwave frequency, *Solid State Communications*, Volume 130, Issue 7, 2004, (451-454), ISSN 0038-1098, <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2004.02.049>.