



DISEÑO DE UN SENSOR DE CORRIENTE BASADO EN UNA FBG RECUBIERTA DE GALFENOL POR ELECTRODEPOSICIÓN Y CON ELEVADA MAGNETOSTRICCIÓN

Luis López Hernández

Tutor: Héctor García Miquel

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2019-20

Valencia, 17 de noviembre de 2020



Resumen

Este proyecto consiste en diseñar y fabricar un sensor de corriente basado en fibras ópticas. Se utilizará una FBG (Rejilla de fibra de Bragg), recubierta con un material altamente magnetostrictivo que provoque una alteración en la longitud de onda de la fibra al aplicar una corriente. Mediante un interrogador óptico se comprobará la variación de la longitud de onda que pasa por la fibra al acercar una bobina por la que pasa una corriente variable.

Se obtendrán las condiciones óptimas de electrodeposición de Galfenol para conseguir una elevada magnetostricción. Se demostrará como el campo electromagnético generado mediante una corriente, deformará el Galfenol que a su vez deformará el vidrio de la FBG. Esta deformación se verá reflejada en una variación de la longitud de onda.

Palabras clave: FBG, sensor, magnetostricción, Galfenol.

Resum

Aquest projecte consisteix en dissenyar i fabricar un sensor de corrent basat en fibres òptiques. Per allò utilitzaré una FBG (Reixeta de fibra de Bragg), recoberta amb un material altament magnetostrictiu que provoqe una alteració en la longitud d'ona de la fibra a l'aplicar una corrent. Mitjançant un interrogador òptic per comprovar la variació de longitud d'ona que passa per la fibra a l'apropar una bobina per la qual passa una corrent variable.

S'obtindran les condicions òptimes d'electrodeposició de Galfenol per aconseguir una elevada magnetostricció. Es demostrarà com el camp electromagnètic generat mitjançant una corrent, deformarà el Galfenol que a la vegada deformarà el vidre de la FBG. Aquesta deformació es veurà reflectida en una variació de la longitud d'ona.

Paraules clau: FBG, sensor, magnetostricció, Galfenol.

Abstract

In this project we design and manufacture a current sensor based on optical fibers. For this we will use coated FBG (Fiber Bragg Grating) with a higher magnetostrictive material. This material induces wavelength fiber modulation that we apply a current. We use an optic interrogator for check the wavelength variation in the fiber at time we bring closer a current variable coil.

Optimum Galphenol electrodeposition conditions will be obtained to achieve high magnetostriction. It will be demonstrated how the electromagnetic field generated by a current will deform the Galphenol which in turn will deform the glass of the FBG. This deformation will be reflected in a variation of the wavelength.

Key words: FBG, sensor, magnetostrictive, Galphenol.



Índice

Capítulo 1.	Introducción.....	2
1.1	Estado del arte	2
1.2	Objetivos del proyecto.....	3
1.3	Fases del proyecto.	3
1.4	Metodología	4
1.4.1	Gestión del proyecto.....	4
1.4.2	Distribución de tareas	4
1.4.3	Diagrama temporal	4
Capítulo 2.	Desarrollo y resultados.	6
2.1	Marco teórico	6
2.1.1	Fibras FBG	6
2.1.2	Pulverización catódica (Sputtering).....	10
2.1.3	Niquelado químico	12
2.1.4	Electrodeposición de GaFe	14
2.2	Experimentación.....	16
2.2.1	Magnetostricción gigante.....	16
2.2.2	Creación de un bloque de fuentes de corriente.....	21
2.2.3	Pruebas de Galfenol en hilo de cobre.....	23
2.2.4	Pruebas de Galfenol en fibra óptica	31
2.2.5	Pruebas de Galfenol en FBG	38
2.3	Conclusiones y trabajo futuro.....	48
2.3.1	Conclusiones	48
2.3.2	Trabajo futuro.....	49
Capítulo 3.	Bibliografía.....	50



Capítulo 1. Introducción

1.1 Estado del arte

En la actualidad, debido a sus particulares características, las fibras ópticas se utilizan como sensores, sustituyendo a los tradicionales basados en semiconductores. Su pequeño tamaño y la ausencia de corriente eléctrica los convierten en una alternativa ideal. Las principales magnitudes que miden son temperatura y presión, factores físicos que inducen grandes interferencias.

En este caso en concreto usaremos FBG. Éstas son un tipo de fibras que son capaces de reflejar una longitud de onda en concreto. Esta longitud de onda habrá sido seleccionada previamente mediante el grabado de una rejilla que explicaremos más adelante. Cualquier cambio en las condiciones físicas en el área de la rejilla, hará que cambie la longitud de onda reflejada, lo que lo convierte en una buena alternativa como sensor.

No cesan las constantes investigaciones en busca de materiales que se puedan utilizar en la fabricación de nuevos sensores más rápidos, más baratos, más precisos o con menos interferencias. El Galfenol, una aleación de galio y hierro, de relativo reciente descubrimiento tiene unas propiedades altamente magnetostrictivas. Esto quiere decir que es capaz de deformarse con la presencia de un campo magnético cercano. El Galfenol se conoce como tal cuando las proporciones de Galio se mantienen entre el 15% y el 35% de galio. Dependiendo del porcentaje de galio que se aplique al material se conseguirán diversas propiedades de magnetostricción, alcanzando unos valores máximos en el 19% y el 27%. Estudios previos han demostrado en estos puntos deformaciones de hasta 400 ppm (partículas por millón) y 150 ppm en los experimentos realizados en microhilos. Para llevar a cabo este proyecto se recurrirá a información sobre fibras ópticas con FBG y se complementará con las investigaciones de magnetostricción del Galfenol. [5]

Mediante pulverización catódica (en inglés sputtering), proceso posteriormente explicado, se recubrirá con una pequeña capa de níquel de unos 100 nm de espesor en la sección de la rejilla de la FBG. Una vez obtenida esa fina capa de níquel, mediante deposición química aumentaremos el espesor de níquel con objeto de disminuir la resistencia de la fibra recubierta de Ni, para poder llevar a cabo la electrodeposición. Por último, sobre esta porción de fibra suficientemente conductora, procederemos a la electrodeposición de Galfenol.

Al finalizar este procedimiento, el objetivo es que cuando una haya una corriente cercana que genere un campo magnético, el Galfenol se deforme de manera proporcional a la intensidad del campo aplicado con la consiguiente deformación del tramo de vidrio de la rejilla de la FBG. Esto efectuará un cambio en las condiciones de la rejilla que conllevará un cambio en la longitud de onda reflejada.



1.2 Objetivos del proyecto

Los objetivos principales del proyecto son los siguientes:

1. Pulverización catódica (Sputtering) de níquel sobre fibra óptica.
2. Deposición química de níquel sobre la capa de Sputtering.
3. Electrodeposición de Galfenol con concentraciones de galio del 19%.
4. Fabricación del sensor.

Como objetivos secundarios necesarios para el alcance de los objetivos principales, nos planteamos los siguientes:

- Investigación previa sobre las características del Galfenol.
- Investigación previa sobre el Níquel. Características, uso y aplicaciones.
- Investigación sobre las redes de Bragg en fibra (FBG).
- Aprender el funcionamiento de la máquina de pulverización catódica (Sputtering).
- Aprender a manejar el microscopio electrónico de barrido de emisión de campo junto al microscopio de iones de galio focalizados para el análisis de materiales.
- Aprender a realizar niquelado químico para el recubrimiento de fibras.
- Aprender el procedimiento de electrodeposición para añadir la capa de Galfenol.
- Utilización del interrogador óptico mediante el software ELIGHT para el análisis de señales en una FBG.

1.3 Fases del proyecto.

- a) Búsqueda bibliográfica en artículos científicos, material de internet, experimentos previos o personas de interés.
- b) Experimentación en la deposición del Galfenol sobre hilos de cobre, comprobando porcentajes del material según la densidad de corriente aplicada.

- c) Experimentación en la deposición química del níquel sobre fibra óptica para lograr la conductividad que haga posible la deposición del Galfenol.
- d) Selección de los mejores resultados para el experimento sobre FBG.
- e) Análisis de los resultados mediante interrogador óptico.

1.4 Metodología

1.4.1 Gestión del proyecto

La planificación a corto-medio plazo se ha visto afectada debido a la situación sanitaria por la COVID-19. Es por ello por lo que, aunque el objetivo ha sido el mismo, se han distribuido los tiempos y la ejecución de los experimentos.

1.4.2 Distribución de tareas

El proyecto se ha dividido en 4 tareas principales:

1. Estudio y análisis de investigaciones, previos a la electrodeposición del Galfenol.
2. Manejo de equipos.
3. Fabricación y testeo de pruebas modelo.
4. Fabricación sobre FBG del sensor definitivo.
5. Análisis de los resultados del sensor definitivo.

1.4.3 Diagrama temporal

Se aportan dos diagramas temporales. El previsto al iniciar el proyecto y el adaptado a tiempo real por los imprevistos producidos por la Covid19.

Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio (1ra quincena)	Junio (2da quincena)	Julio
Inicio y análisis del proyecto.	Tareas de investigación y búsqueda de anteriores proyectos.	Realización de pruebas en fibra pelada.	Mejora en las pruebas en fibra pelada.	Seleccionar los mejores resultados e implementarlos sobre FBG.	Análisis mediante el interrogador óptico el prototipo en FBG.	Presentación del trabajo

Tabla 1. Diagrama temporal previsto.

En marrón, retrasos debidos a la Covid19, en verde las tareas de investigación, en azul claro los experimentos realizados, en azul intermedio están las mejoras en los experimentos realizados y en azul oscuro la implementación en la FBG.

Febrero	Marzo	Abril	Mayo, junio y julio	Agosto	Septiembre (1ra quincena)
Inicio y análisis del proyecto	Investigación y listado de materiales. Solicitud y compra de materiales.	Investigación y ampliación de conocimientos, Confinamiento y parálisis del proyecto.	Confinamiento y parálisis del proyecto.	Releer datos de investigación y comienzo de la redacción teórica.	Electrodeposición de GaFe sobre hilo de cobre para comprobar características del proceso.
Septiembre (3ra semana)	Septiembre (4ta semana)	Octubre (1ra quincena)	Octubre (2da quincena)	Noviembre (1ra quincena)	Noviembre (2da quincena)
Sputtering de Ni y deposición química en fibra pelada,	Análisis de los resultados de deposición en microscopía electrónica.	Redacción y mejora de los resultados obtenidos anteriormente. Cierre de la universidad e imposibilidad de acceso presencial.	Finalización de la mejora de los resultados y aplicación de los mejores resultados sobre FBG.	Análisis de los resultados sobre FBG. Finalización de la redacción.	Presentación del proyecto

Tabla 2. Diagrama temporal real.

Capítulo 2. Desarrollo y resultados.

2.1 Marco teórico

2.1.1 Fibras FBG

Para la realización de mediciones físicas, los sensores eléctricos tradicionales tienen el gran inconveniente de pérdidas de transmisión y gran facilidad de mezclar interferencias. Esto se puede solucionar con sensores que no se basen en la transmisión eléctrica, sino en la transmisión de luz. Así aparece como una buena opción la fibra óptica [3]:

La fibra óptica se compone de un núcleo de óxido de silicio y germanio de muy alto índice de refracción por el que se transmite la luz. El núcleo puede variar su tamaño de $10\ \mu\text{m}$ a $100\ \mu\text{m}$, dependiendo de los modos que deseamos transmitir. En nuestro caso al utilizar fibras monomodo utilizaremos fibra óptica con núcleos de $10\ \mu\text{m}$. Las fibras también disponen de un revestimiento de un índice de refracción menor y un recubrimiento de plástico para proteger las dos anteriores capas. El diámetro de la FBG incluida la cobertura de protección es de $250\ \mu\text{m}$, y de $125\ \mu\text{m}$ sin el recubrimiento.

Lo que permite que la luz sea transmitida por la fibra es la diferencia del índice de refracción entre el núcleo y el recubrimiento. [2] [15]

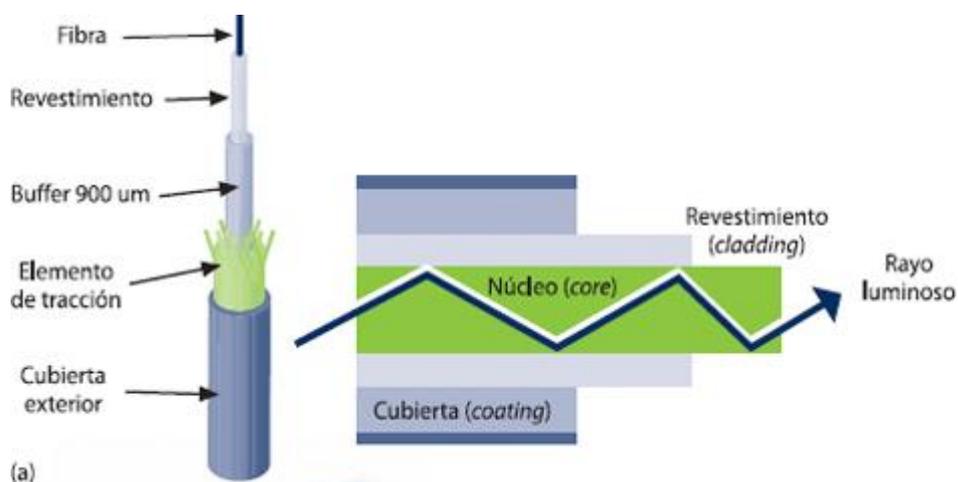


Figura 1. Partes de la fibra óptica con señal reflejada en el interior. [14]



Según la ley de Snell, cuando transmitimos por un material e impactamos con otro distinto, dependiendo de los índices de refracción de cada material, podemos llegar a un ángulo crítico en el que todo rayo de incidencia sea reflejado y nada transmitido. Siendo n_2 el índice de refracción del material del revestimiento de la fibra y n_1 el del núcleo, según Snell el ángulo crítico se verá dado por la función 2.1.

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

La ley de Bragg permite estudiar las direcciones en las que la dirección de rayos X sobre la superficie de un cristal produce interferencias constructivas, dado que permite predecir los ángulos en los que los rayos X son difractados por un material cristalino.

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \quad [12] \quad (2.2)$$

En una FBG lo que se pretende es la variación periódica del índice de refracción en un tramo de fibra óptica típicamente de unos 5mm. Esto refleja una longitud de onda concreta y deja transmitir las demás. Siendo λ_B la longitud de onda de Bragg, n_{eff} el índice de refracción efectivo y Λ el período de la rejilla, la FBG respondería a la siguiente ecuación: [12]

$$\lambda = 2 n_{eff} \Lambda \quad (2.3)$$

La longitud de onda de Bragg varía con la temperatura y deformación que afecta al período de la rejilla y al índice de refracción efectivo. Esa deformación se ve plasmada a continuación, siendo ε la deformación y T la temperatura:

$$\Delta\lambda = \frac{\partial\lambda}{\partial\varepsilon} \varepsilon + \frac{\partial\lambda}{\partial T} \Delta T \quad (2.4)$$



Para la fabricación de una FBG se incide transversalmente en la fibra con un haz láser ultravioleta de alta potencia, a través un cristal de cuarzo que actúa como máscara de fase, generando un patrón de interferencia en el núcleo de la fibra. Esto provocará un cambio permanente en las características físicas de la matriz de silicio, consistente en una modulación periódica espacial del índice de refracción del núcleo, adquiriendo de este modo una estructura resonante.

Otra característica de las FBG es que son muy sensibles a variaciones físicas como los cambios de temperatura y presión. Esto se ve reflejado en una variación en la longitud de onda que se refleja. Esta sensibilidad se pretende aprovechar para su uso como sensores, trasladando estas variaciones a una unidad medible como puede ser grados en temperatura, pascales en presión o en nuestro caso $KA/m \cdot A$ en campo magnético, pudiendo llegar hasta automatizar este sistema de medidas. [3]

En un principio las redes de difracción de Bragg se crearon para el filtro de determinadas longitudes de onda de señales ópticas. Al tratarse de una estructura resonante actúa como un filtro de banda estrecha. Si recibe luz desde una fuente de banda ancha, sólo reflejará el rango espectral que coincida con la longitud de onda de la FBG. El resto se transmitirá sin ninguna pérdida hasta la siguiente FBG inscrita en la fibra.

Pronto se descubrió que estas microestructuras en forma de rejilla, llamada Red de Bragg en Fibra o FBG (Fiber Bragg Grating en inglés) aportaban, por sus características únicas, grandes ventajas como sensores: bajas pérdidas en relación con su longitud, inmunidad a las interferencias electromagnéticas y de radiofrecuencia, pequeño tamaño, poco peso, funcionamiento seguro en entornos con materiales peligrosos, alta sensibilidad y fiabilidad a largo plazo. Por todo ello se presenta como una alternativa a los sensores eléctricos convencionales. [4]

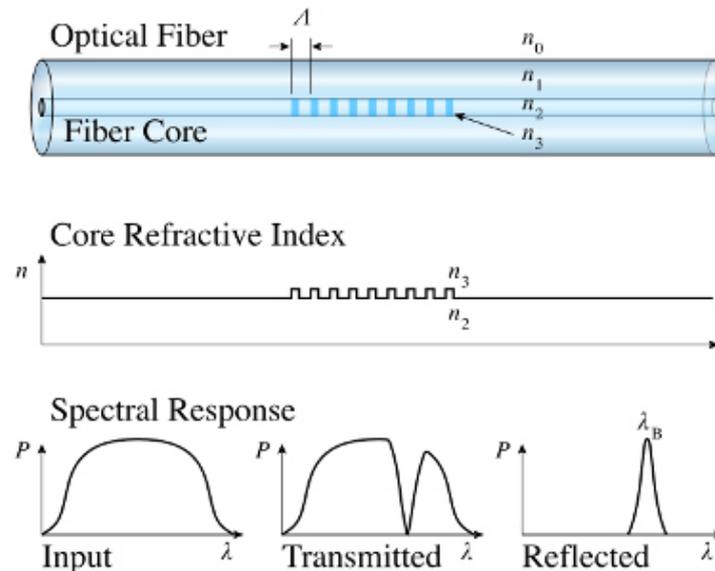


Figura 2. Estructura de un FBG y su respuesta espectral. [3]

Cuando la corriente eléctrica atraviesa un conductor, esta genera un campo magnético a su alrededor. Este caso en concreto pretende usar las FBG como sensor de corriente basado en la medida del campo magnético que se produce.

Una cualidad de cualquier material magnetostrictivo es deformarse cuando detecta un campo magnético próximo. Logrando adherir eficazmente Galfenol en la zona de la rejilla de la FBG, en el momento en que se le aplicara un campo magnético cercano, el Galfenol se deformaría, deformando consigo a la FBG y trasladándolo a una variación de la longitud de onda reflejada según el nivel de campo aplicado.

Actualmente podemos encontrar materiales como el Terfenol-D, mucho más magnetostrictivos que el Galfenol, llegando a deformaciones que pueden alcanzar las 2000 ppm. Pero a diferencia del Galfenol, no se pueden encontrar estudios sobre deposición sobre otros materiales. Unas variaciones de 275 – 320 ppm son suficientes como para poder demostrar el uso de este material como sensor de corriente. [5]

2.1.2 Pulverización catódica (Sputtering)

La pulverización catódica, comúnmente llamada por su nombre en inglés Sputtering, es un proceso muy utilizado para la deposición de películas muy delgadas (del orden de los nanómetros de espesor) en materiales. Su funcionamiento se basa en la vaporización de los átomos de un sólido (llamado blanco o target en inglés) compuesto del material que queremos adherir mediante el bombardeo por iones energéticos. [1]

En este caso en concreto se utilizará la máquina de pulverización catódica Leica EM MED020 que dispone la UPV en el departamento de microscopía electrónica. El objetivo será recubrir las FBG con unos nanómetros de níquel.



Figura 3. Máquina de Sputtering UPV Leica EM MED020.

En primer lugar, se colocan las fibras en un módulo adaptado al tamaño de la máquina. Antes de empezar la pulverización hay que consultar la tabla de materiales adjunta para saber la distancia del blanco a las muestras y la intensidad que debemos que poner. En el caso del Níquel, se sitúan las fibras a 5 centímetros del blanco y se aplica una corriente de 90 miliamperios.

Una vez realizado lo anterior seguimos los siguientes pasos:

- Seleccionar el proceso con el botón SPUT.
- Hacer vacío seleccionando PUMP FULL SPEED y comprobar que el valor es menor a 10^{-5} milibares.
- Pulsar PUMP STANDBY.
- Añadir gas argón pulsando ARGON y regulando el vacío entre $2 \cdot 10^{-2}$ y $5 \cdot 10^{-2}$.
- Si se quiere usar la máquina durante un largo período de tiempo (10 minutos por cara de la fibra), pulsar WATER para activar la refrigeración por agua.
- Seleccionar la corriente consultada anteriormente pulsando NOMINAL VALUE y regulándola con UP y DOWN.
- Pulsar PROCESS ON para comenzar la pulverización.
- Pulsar PROCESS OFF cuando ha pasado el tiempo deseado y romper el vacío con PUMP STANDBY.

Al hacer un Sputtering sobre una muestra cilíndrica, y haciéndose solo sobre la parte superior, se repite el proceso volteando la muestra 180° , obteniendo así un recubrimiento más uniforme. Al ser un proceso más largo de lo habitual, es necesario asegurarse de que las mangueras del agua (entrada y salida) están conectadas antes de comenzar el proceso para poder usar refrigeración.



Figura 4. Zona de trabajo de la máquina de Sputtering UPV Leica EM MED020.

2.1.3 Niquelado químico

El niquelado químico es un proceso muy utilizado en la industria ya que ofrece unos resultados rígidos y homogéneos en toda la pieza depositada, aun tratándose piezas con formas irregulares. Es un procedimiento que se puede aplicar sobre una gran variedad de materiales, incluyendo los no metales como pueden ser el vidrio y el plástico. Esto es posible porque se deposita una aleación de Níquel y Fósforo sin aplicar una fuente exterior de corriente. [6]

Aunque existe la posibilidad de la deposición directa del niquelado químico sobre el vidrio de la FBG, resulta mucho más cómoda la deposición del níquel sobre el propio níquel, ya que, para efectuar deposiciones sobre no metales, es necesario dopar de cloruros la pieza que queramos tratar. Dado que la velocidad de la pulverización catódica ofrece velocidades de deposición muy lentas, la opción de acelerar el proceso con este procedimiento está más que justificado, pudiendo llegar a depositar 1 μm de material al minuto respecto al máximo de 12 nm por minuto al que puede trabajar la máquina de Sputtering.

Las composiciones exactas sobre las disoluciones para el niquelado químico son muy diversas, siendo cada empresa del sector que se dedica a este campo, la que diseña la suya propia. Se puede sacar en común de todas ellas la necesidad de mantener una mezcla alcalina con un pH de 8 – 9 y el trabajo a una temperatura superior a 90°C.

La decisión final viene dada por la elección de la composición mejor desarrollada teóricamente, ya que en este campo es complicado encontrar información por el secretismo de la industria en que no repliquen sus procedimientos. Se usará amoniaco para subir el pH de la disolución:

- Cloruro de níquel (30 g/L anhidro, 58 g/L hexahidratado).
- Hipofosfito de sodio (10 g/L).
- Citrato de sodio (100 g/L). (Tampón de pH y evitar la creación de hipofosfito insoluble).
- Amoniaco. (Añadir para mantener la disolución a un pH de 8 – 9).



En estas condiciones se obtienen unos valores comprendidos entre el 5% y el 10% de fósforo, nivel ideal para obtener un niquelado resistente a la corrosión y al desgaste [7]. En los análisis posteriores de materiales se verifica una concentración en torno al 10% de fósforo.

2.1.4 Electrodeposición de GaFe

Un material magnetostrictivo es el que es capaz de deformarse y cambiar sus dimensiones por la acción de un campo magnético. El objetivo es lograr la deposición de un material altamente magnetostrictivo para que un campo generado por corrientes eléctricas consiga una deformación en el material. Los materiales ferromagnéticos tienen una estructura dividida en dos dominios polarizados magnéticamente. La rotación de estos dominios por la presencia de un campo magnético es lo que produce una deformación mecánica del material.

Con una imanación transversal en el recubrimiento de la FBG, es decir imanada de forma vertical a la bobina, conseguiríamos un máximo en la deformación, ya que el campo inducido es axial (en horizontal) y la estructura del material tenderá a seguirlo.

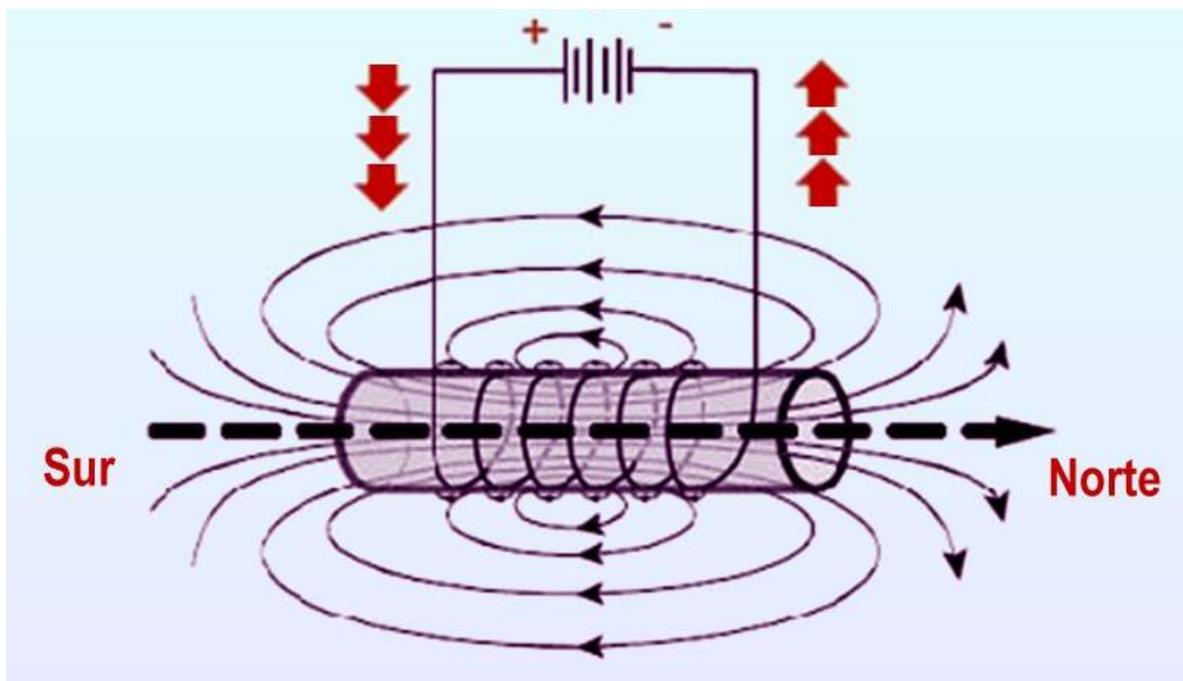


Figura 5. Dirección de los campos en una bobina. [13]

El Galfenol es una aleación de hierro y galio nacida de la necesidad de encontrar un material que sea mecánicamente robusto a la vez que altamente magnetostrictivo. Los materiales típicamente magnetostrictivos como el níquel, hierro o cobalto cumplen con la cualidad de ser robustos, pero se quedan con una magnetostricción baja. También existen materiales como el

Terfenol, que cumple con creces la necesidad de ser altamente magnetostrictivos, pero sufre la debilidad de ser frágil y poco resistente a la tracción.

Los estudios teóricos han demostrado que manteniendo un porcentaje de galio entre el 15% y el 35% se puede conseguir alta magnetostricción, alcanzando un máximo en el 27%, soportando tensiones de 440 MPa y logrando deformaciones cercanas al 0.25%. [8]

Se va a optar por una electrodeposición basada en fuentes de corriente, ya que en este proceso el control de la densidad de corriente es un punto crítico para mantener los porcentajes de aleación donde se sitúa el Galfenol. Investigaciones previas se basan en el uso de electrodos de tensión, usando un electrodo de calomel como referencia para el mantenimiento de una densidad de corriente estable en toda la deposición; pero el uso de una fuente de corriente permite un control más preciso del flujo. La variación de la composición podría alterar la curva, por ello seleccionaremos una en la que se hayan obtenido buenos resultados y la mantendremos constante durante todo el procedimiento.

Es necesario un previo estudio sobre los porcentajes de deposición respecto a la densidad de corriente aplicada, porque los estudios realizados hasta ahora hacen referencia únicamente a la variación de tensión en el electrodo de calomel, analizando en que puntos nos situamos en unos niveles óptimos. Por ahora no se ha podido superar el umbral de 150 ppm de deformación en microhilos, aunque teóricamente es posible alcanzar los 300 ppm.

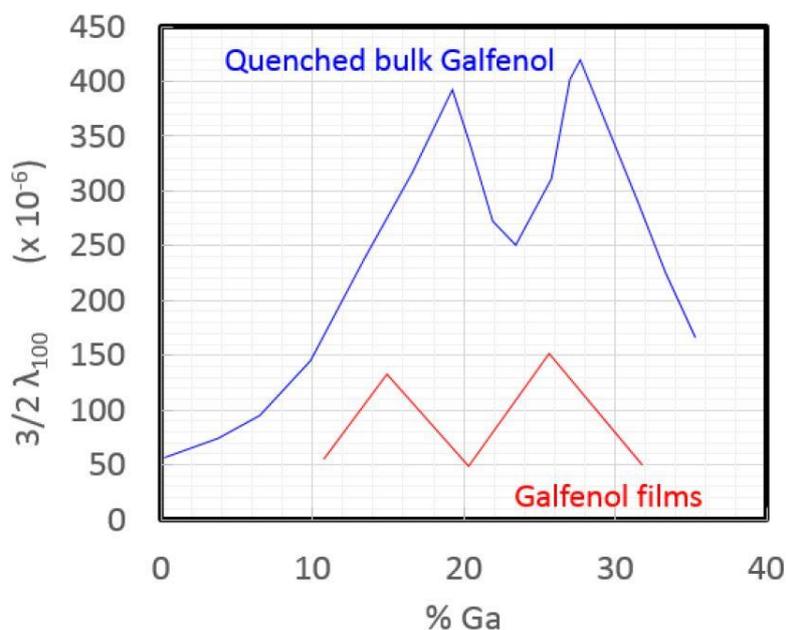


Figura 6. Magnetostricción según el porcentaje de Galio en GaFe a granel templado (azul) y GaFe electrodepositado en microhilos (rojo). [10]

2.2 Experimentación

Se efectuarán unas pruebas iniciales de magnetostricción en barra de Terfenol para el aprendizaje del manejo de equipos y tener como objetivo unos resultados en mente. A continuación, se harán todos los análisis en hilo de cobre hasta lograr lo mejores resultados posibles. Para finalizar trasladaremos esos resultados a la FBG.

2.2.1 Magnetostricción gigante.

Para conocer el comportamiento de un material magnetostrictivo, se hace un previo análisis mediante una FBG adherida mediante pegamento plástico a una barra de Terfenol. El Terfenol es un material de magnetostricción gigante que puede llegar a deformaciones de 2000 ppm. Estos niveles solo son alcanzables con previas precompresiones para ampliar el límite de saturación del campo, forzando a que su estructura sea puramente transversal. En nuestro caso se utiliza solo como muestra de resultados que alcanzar con el Galfenol, así que alcanzar los 600 ppm es suficiente como ejemplo.

Las FBG son proporcionadas por *Photonics Research Lab* del ITEAM la UPV, equipo que se dedica a su estudio, fabricación y conectorización.

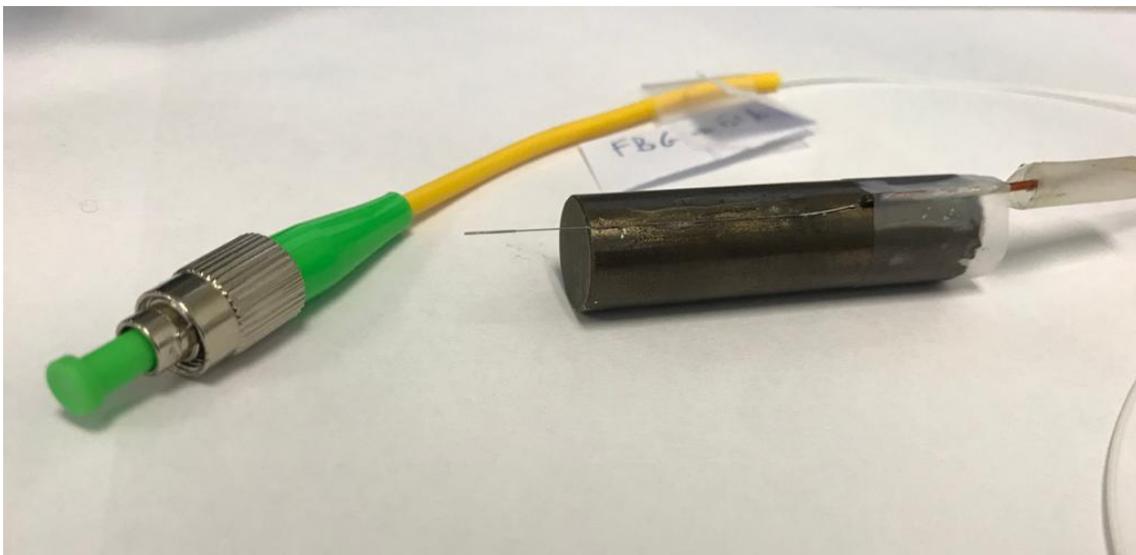


Figura 7. FBG recubierta de Galfenol pegada a una barra de Terfenol con el conector puesto.

El pegamento es totalmente inmune a la variación de los campos por lo que no afectará a los resultados.

Se usará el interrogador óptico estático que posee el ITEAM previo aprendizaje del uso de su software, el ENLIGHT. Se utilizará el canal 1 del interrogador para conectar la FBG y se visualizará el espectro de la señal mediante un ordenador conectado por ethernet al puerto LAN del dispositivo.



Figura 8. Máquina para dotar de conector las fibras ópticas.

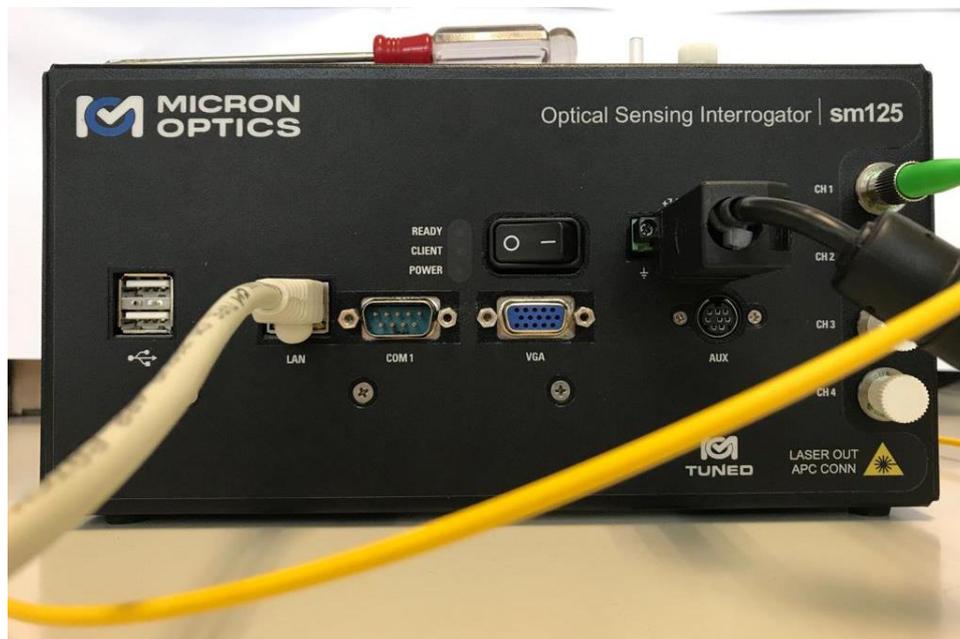


Figura 9. Interrogador óptico utilizado para análisis de las FBG.

Se usará una bobina con una sensibilidad de $18,9 \text{ KA/m}\cdot\text{A}$, refrigerada por agua mediante una bomba para mantener la temperatura constante y que la fibra se vea afectada lo menos posible por cambios físicos externos.

La bobina se alimentará con una señal de $0,2 \text{ Hz}$ triangular que oscilará entre los 0A y los 5A . Estas condiciones no han sido elegidas arbitrariamente. El interrogador óptico utilizado no es capaz de detectar cambios a frecuencias superiores a 2 Hz , lo que obliga a trabajar a frecuencias inferiores. La amplitud de la señal triangular es elegida por el límite de saturación del Terfenol. En sucesivas pruebas anteriores, se ha detectado que en campos superiores a 95 KA/m , el material comenzaba a saturarse.

Para evitar movimientos en la FBG por la imanación del campo, se insertará en una cobertura de vidrio cilíndrica tal como vemos en la siguiente imagen.

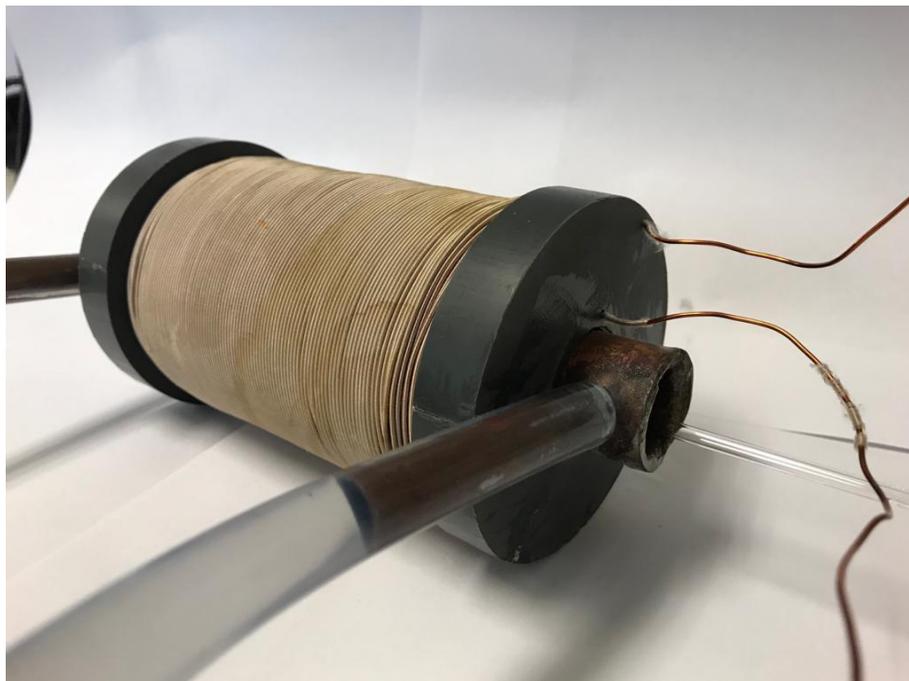


Figura 10. Bobina de $18,9 \text{ KA/m}\cdot\text{A}$ refrigerada por agua.

Como resultado del experimento obtenemos la señal de la siguiente Figura.

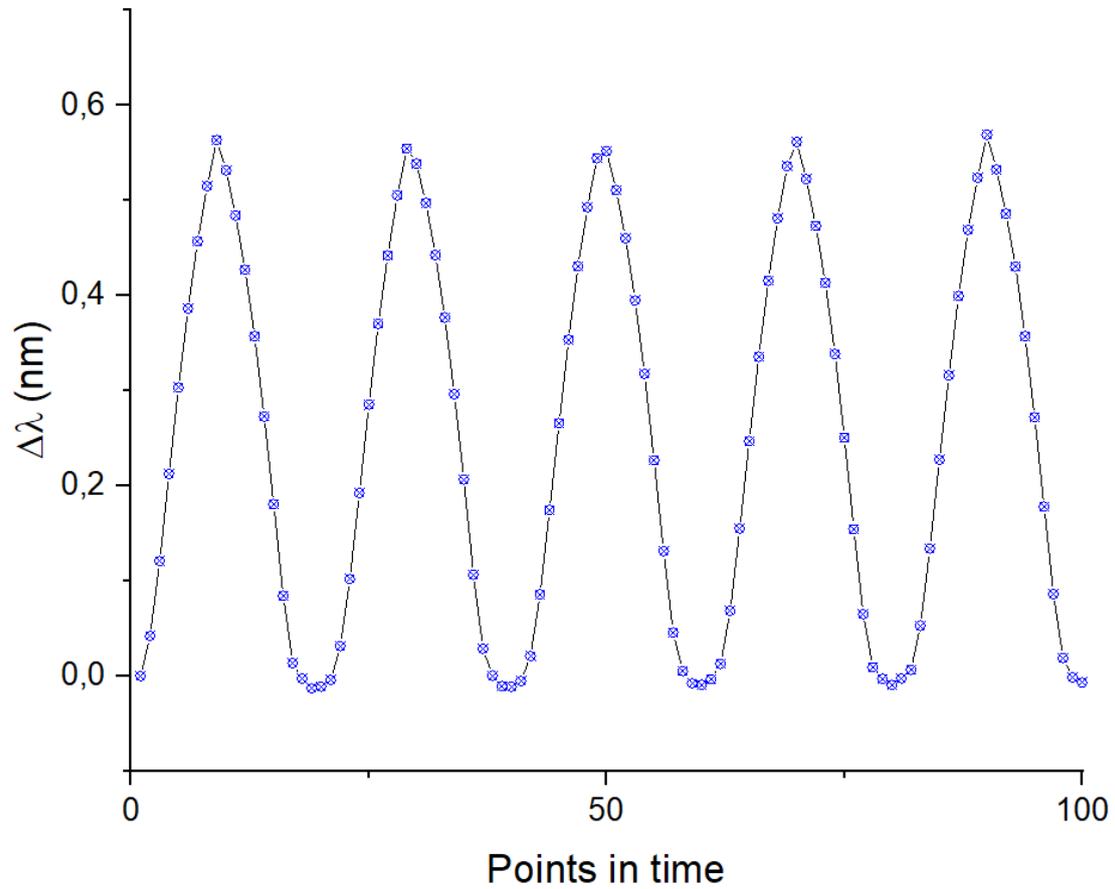


Figura 11. Magnetostricción del Terfenol-D medido con una FBG al aplicar un campo magnético axial triangular de 95 KA/m de amplitud.

Se aprecia una diferencia de 600 pm en la variación de la longitud de onda de 0A a los 5A. Seleccionamos la zona máximamente lineal que es la que interesa analizar.

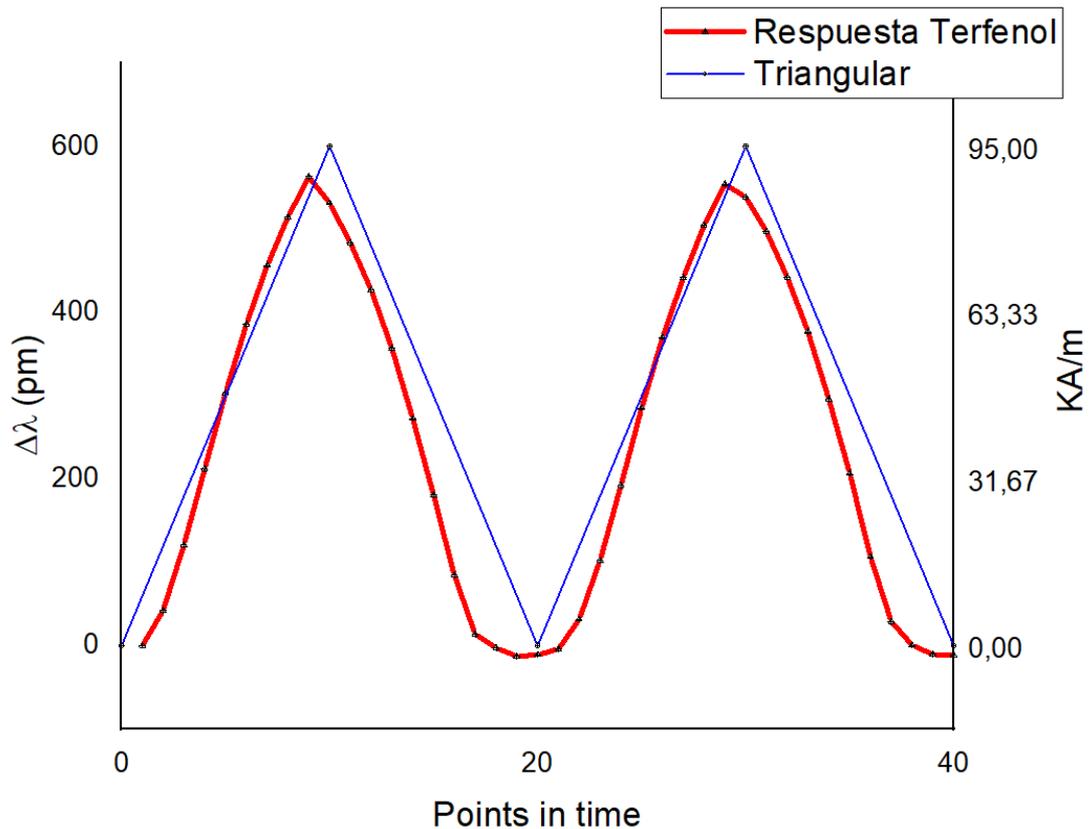


Figura 12. Señal triangular detectada en la FBG (rojo) por el interrogador óptico con la señal triangular aplicada de 95 KA/m (azul) por el generador.

Se obtiene una zona máximamente lineal en un tramo de 500 pm que si se escala a corriente serían 100 pm por amperio aplicado. Teniendo en cuenta que se pueden apreciar variaciones sin que las tape el ruido a partir de 5 pm de variación, esta bobina en concreto ofrecería sensibilidad desde los 50 miliamperios. Para poder aplicarlo a cualquier bobina es necesario sacar el equivalente en campo. La bobina de la *Figura 9* genera un campo de 18,9 KA/ m · A, por ello se ha estado aplicando un campo total de 94,5 KA/m. En conclusión, sería capaz de detectar campos desde 0,945 KA/m.



Figura 13. Fuente de corriente utilizada para alimentar la bobina.

2.2.2 Creación de un bloque de fuentes de corriente

Se diseña y fabrica una batería de cinco fuentes de corrientes para la electrodeposición del Galfenol con objeto de posibilitar la ejecución de estudios simultáneos de electrodeposiciones.

Se diseñará únicamente una fuente de corriente que se duplicará en la práctica las veces que sea necesario. Se elige un diseño de tres resistencias variables para una mejor precisión en cualquier rango de corrientes y un operacional OP27.

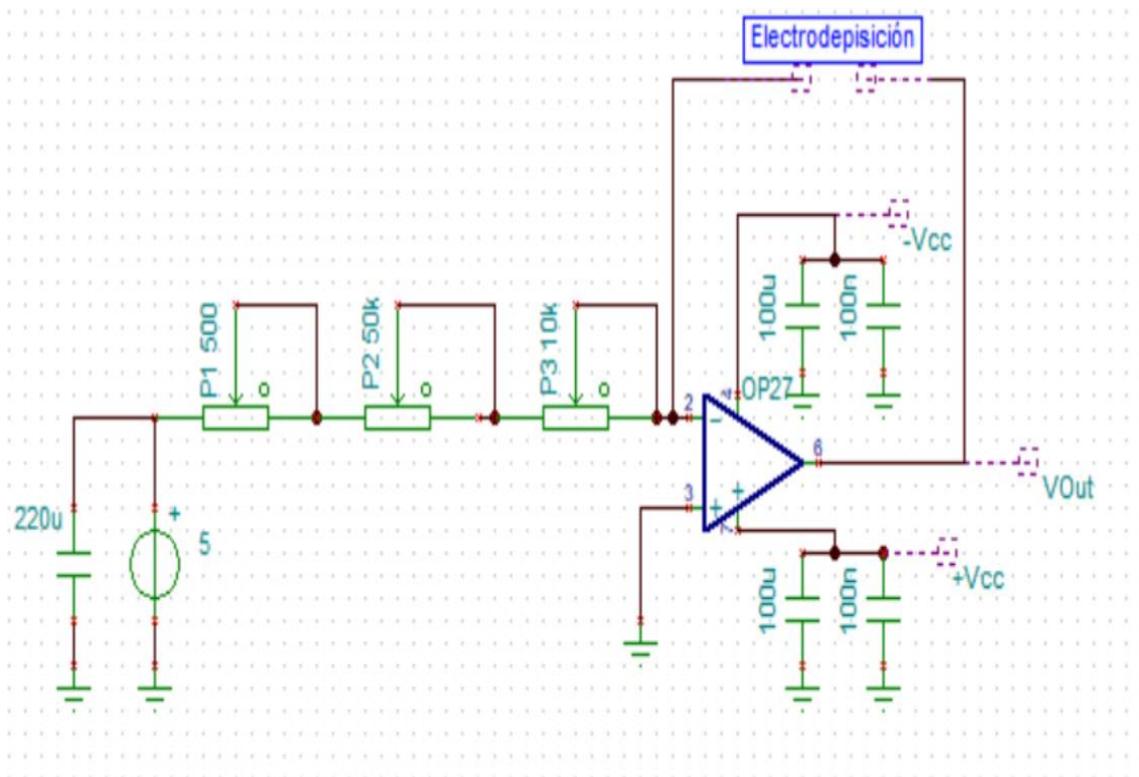


Figura 14. Diseño de la fuente de corriente.

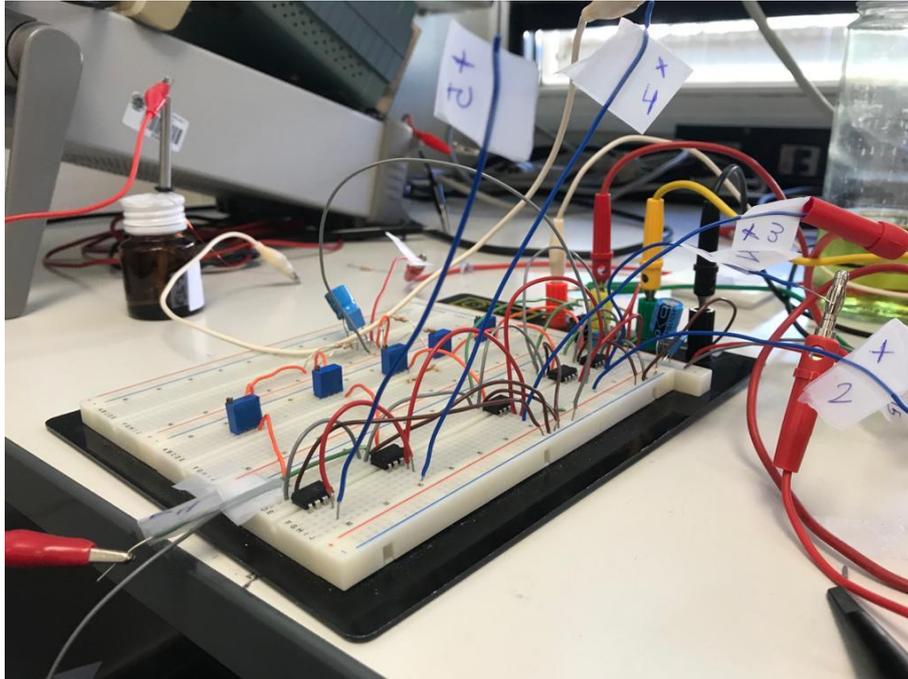


Figura 15. Batería de 5 fuentes de corriente usando el diseño de la figura anterior.

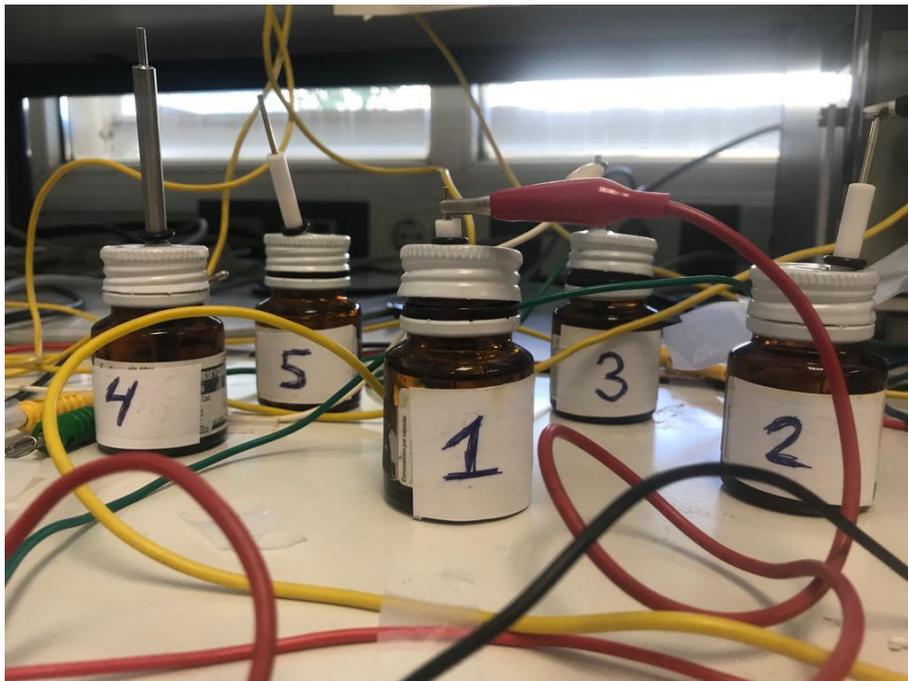


Figura 16. Recipientes preparados para la electrodeposición de GaFe, numerados y con sus respectivos electrodos.

2.2.3 Pruebas de Galfenol en hilo de cobre

Se decide utilizar la siguiente composición:

COMPONENTE	MOLES POR LITRO (M)	MASA MOLAR	GRAMOS (1 L)	GRAMOS (0.1 L)
Sulfato de Galio (III)	0,06	427,63	25,66	2,57
Sulfato de Hierro (II)	0,03	278,01	8,34	0,83
Ácido bórico	0,5	61,83	30,92	3,09
Citrato de sodio	0,15	263,11	39,47	3,95
Ácido ascórbico	0,04	176,12	7,05	0,71

Tabla 3. Composición de la disolución para la electrodeposición de Galfenol [5].

A parte del sulfato de galio (III) y el sulfato de hierro (II), se añade citrato de sodio que, además de ser antioxidante como el ácido ascórbico (vitamina C), tiene una función como componente tampón (buffer) junto al ácido bórico; es decir, que en mezclas ácidas (pH 3 – 4), como es el caso, funciona como reguladora del PH evitando grandes variaciones[11]. Se utilizarán recipientes de 250 ml, posteriormente dividiéndose en porciones de 20 ml.



Figura 17. Productos químicos de la disolución para la electrodeposición de GaFe.

El azufre es un elemento no metálico de un color amarillento. La disolución contiene los componentes metálicos en forma de sulfato. Esto hará que, conforme avance la deposición metálica, quede azufre libre que proporcione un color amarillento al líquido del baño electrolítico.

Las primeras pruebas en hilo de cobre de $100\ \mu\text{m}$ se efectuaron a $40\ \text{mA}/\text{cm}^2$. Al hacer el análisis de materiales con EDX no se superaba en ninguna el 8% de Galio. Los recubrimientos resultaron además de pobres de este material amorfos y con abundante óxido de hierro.

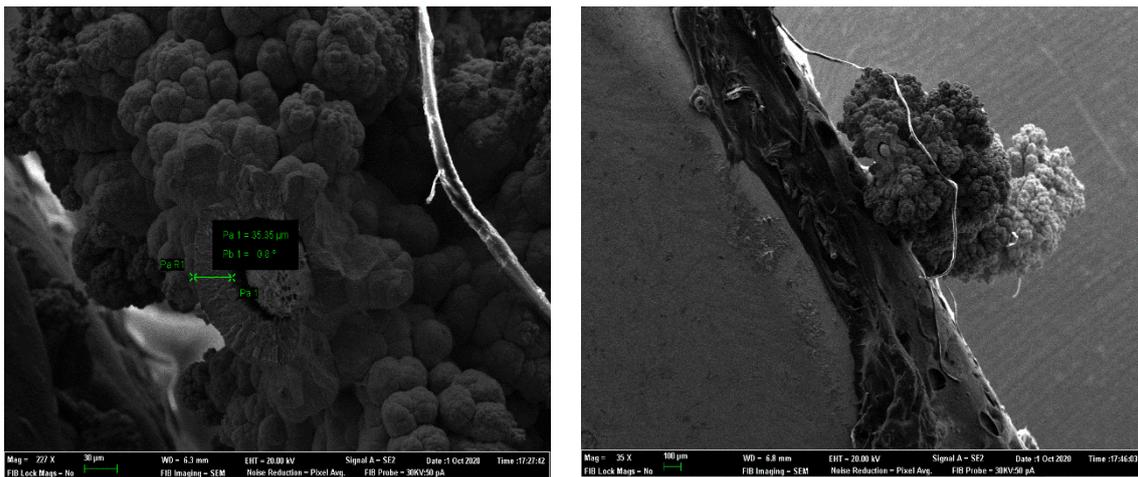


Figura 18. Fotografías de EDX de deposiciones en hilo de $100\ \mu\text{m}$ a $40\ \text{mA}/\text{cm}^2$.

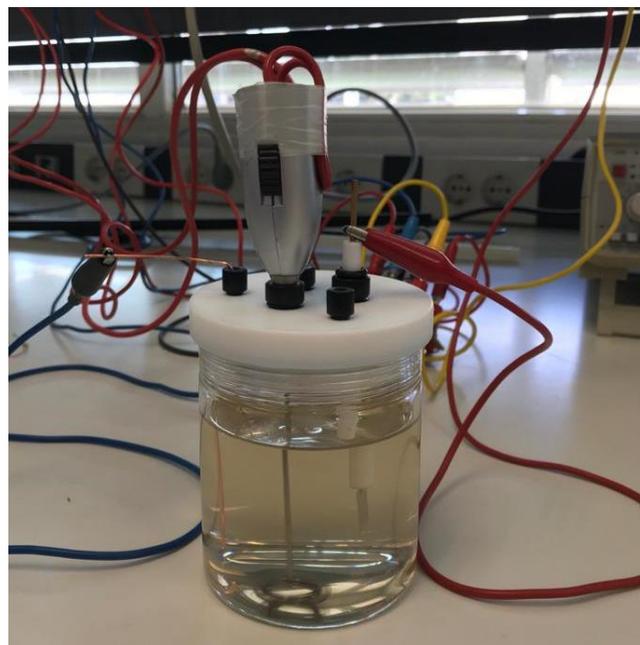


Figura 19. Recipiente de 250 ml para la deposición de Galfenol con motor para el continuo mezclado de la disolución.

Se optó por un estudio sistemático variando la densidad de corriente en secciones de 3,5 cm de hilo de cobre de 200 μm . La decisión de usar hilo de cobre más gruesa viene dada por dos factores: la primera es intentar que se asemeje lo más posible a una fibra real, que son 125 μm más la capa de niquelado previo; el segundo factor es la manejabilidad. El hilo de 100 μm , al ser tan fino es muy difícil de manipular y es muy susceptible a roturas. Se eligió una distancia ánodo-cátodo de 1,5 cm para que todas las muestras estuvieran en las mismas condiciones.

Como los artículos científicos hablaban de corrientes entre 4 y 20 mA/cm^2 , el estudio se hizo con densidades de corriente entre 2,3 y 34 mA/cm^2 . Estas cifras son resultado de hacer las pruebas entre 0,5 y 7,5 mA con un paso de 0,5 mA.

Con el sistema de espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDX), del departamento de microscopía electrónica, se pudieron observar los porcentajes y el nivel de oxidación de las deposiciones.



Gráfica 1. Porcentaje de Galio depositado según la densidad de corriente aplicada. Sección de 3,5 cm de hilo de cobre de 200 μm de diámetro. Deposición realizada con una distancia ánodo – cátodo de 1,5 cm.

Se demostró que al bajar de los 7,5 mA/cm^2 se deposita principalmente óxido de hierro y, aunque el Galio sigue depositándose en pequeñas cantidades, el espesor apenas supera los 5 μm por lado tras 60 horas de deposición. A partir de esta densidad empieza a depositarse Galfenol siguiendo una cierta tendencia, como se observa en la gráfica anterior, a una velocidad de 0,6 μm por hora y lado. Además, la deposición empieza a ser mucho más homogénea y sólida.

También comprobamos que, al aumentar la corriente a partir de 30 mA/cm^2 comienza a depositarse mayoritariamente hierro. La velocidad de deposición también sigue una tendencia al alza, cuanto más corriente mayor es la velocidad de deposición, llegando a situarse en $1,5 \mu\text{m}$ por hora.

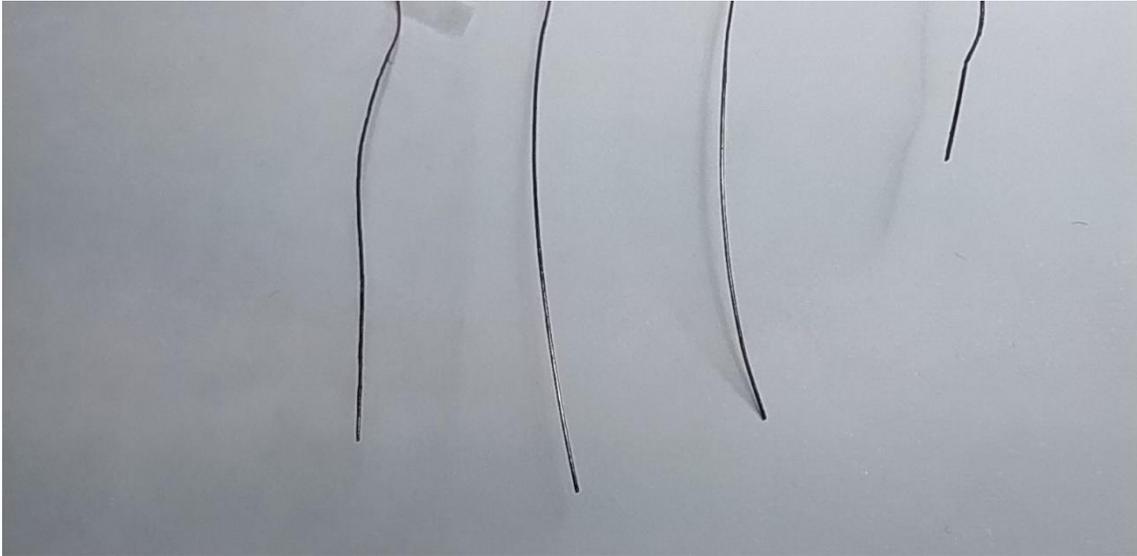


Figura 20. Hilo de $200 \mu\text{m}$ utilizado para el estudio sistemático de corriente. En el extremo se puede apreciar la deposición en una tonalidad más brillante.

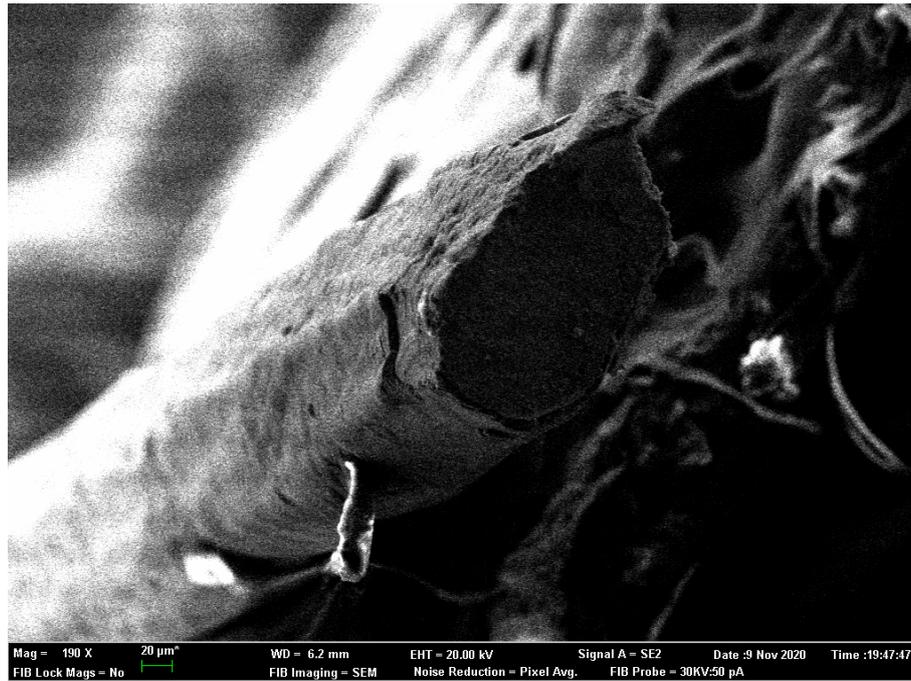


Figura 21. Imagen de EDX. Deposición en hilo de cobre a 5 mA/cm^2 durante 60 horas.



Figura 22. Imagen de EDX. Análisis de conductividad. En gris oscuro se muestran los óxidos depositados, el gris claro únicamente queda el hilo de cobre.

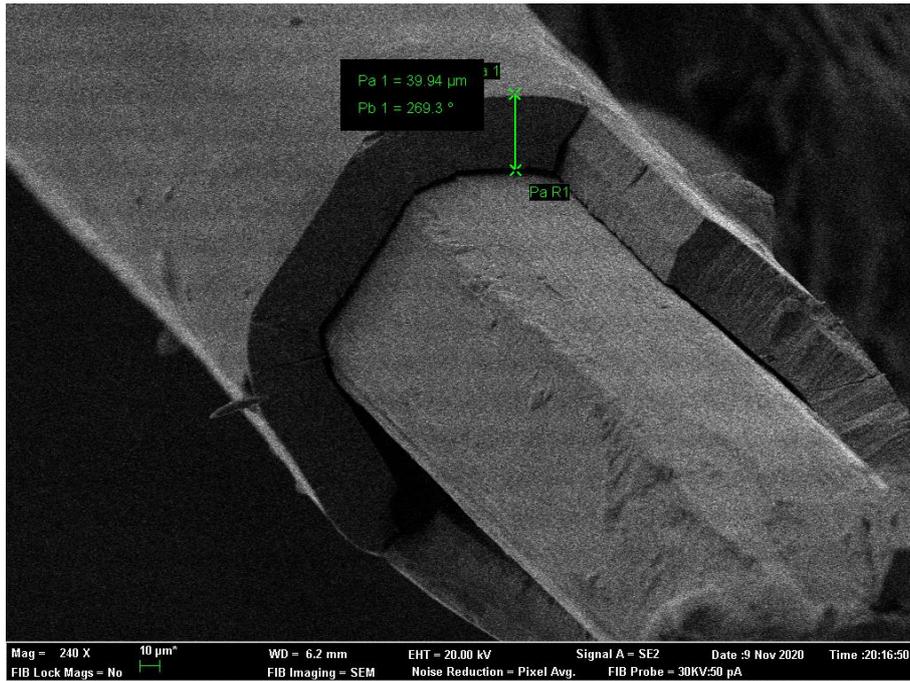


Figura 23. Imagen de EDX. Deposición de 40 μm de GaFe hecha a 7,5 mA/cm^2 durante 60 horas.



Figura 24. Imagen de EDX. Análisis de conductividad de hilo de cobre recubierto a 7,5 mA/cm^2 durante 60 horas. Óxido en la parte superficial (gris oscuro). GaFe en la capa interna.

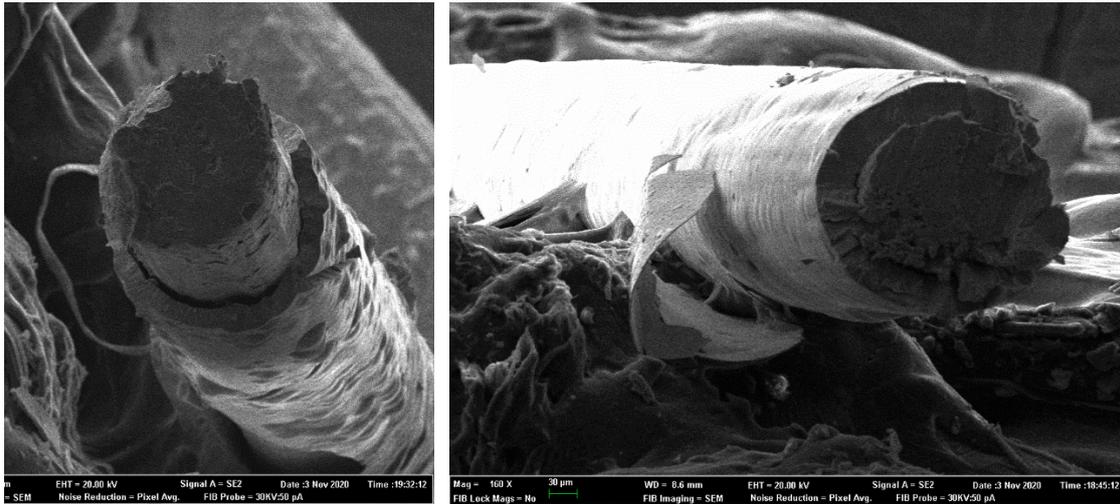
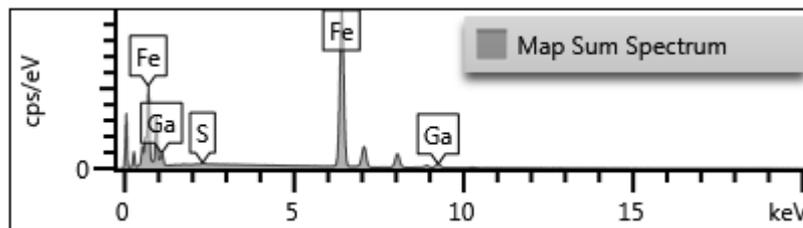
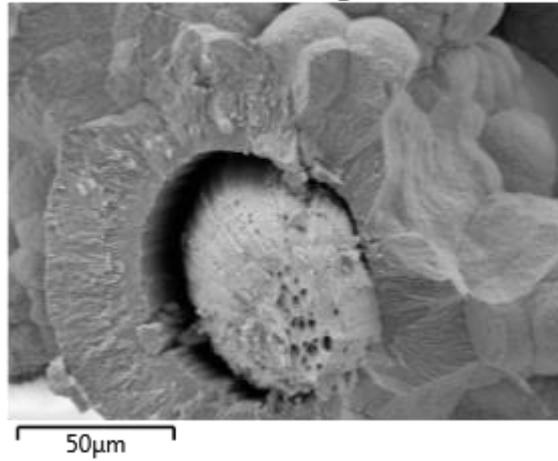


Figura 25. Imagen de EDX. Deposiciones de GaFe a 25 mA/cm^2 .

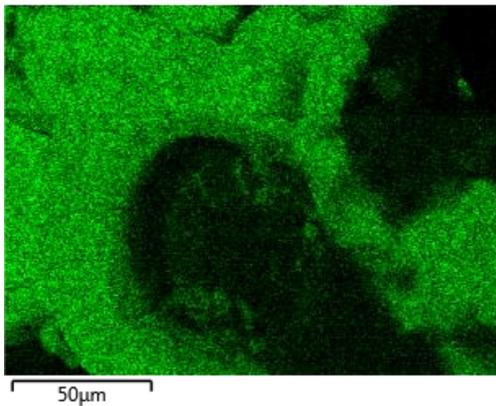
El motor para remover la disolución no aportaba ninguna ventaja de deposición ni velocidad y, en contraparte, era muy aparatoso, en cualquier mal movimiento deformaba el hilo de cobre o en el caso de que se hiciera con fibra podría romper las fibras. También me di cuenta de que un indicio de que podría estar depositando es la creación de burbujas alrededor del hilo. A más corriente más burbujas y más rápidas y, si bajaba la corriente menos y más lentas. Esta, posteriormente, se convertiría en una buena señal para saber si, al hacer la deposición en las fibras, estaría conduciendo todo el tramo o se habría producido algún corte a medio camino y sólo se quedaba depositando la primera parte de la fibra.

A continuación, podemos ver los resultados de EDX en microscopía para el análisis de materiales del recubrimiento de un hilo de cobre con un 11% de galio. Para ello se efectúa un mapeado de únicamente hierro y galio, y así, saber la proporción de cada elemento.

Electron Image 10



Fe K α 1



Ga K α 1

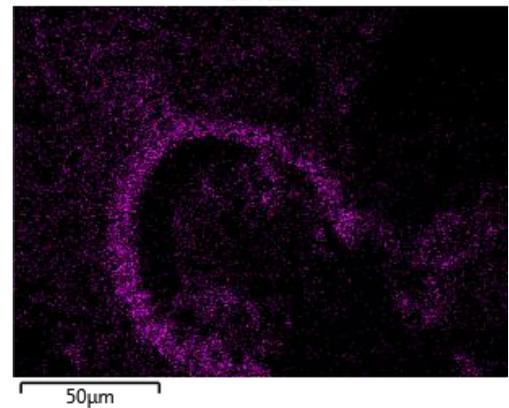


Figura 26. Imágenes de EDX. Se genera un mapa de los elementos hierro y galio de un hilo de cobre depositado con Galfenol.

2.2.4 Pruebas de Galfenol en fibra óptica

Es necesario comprobar si las pruebas realizadas sobre hilo de cobre son extrapolables a la deposición sobre otro material como es el vidrio. Se procede al recubrimiento de un tramo de fibra sin FBG previamente pelada para depositar directamente sobre el vidrio. Para ello se hará un recubrimiento de níquel para tener una capa conductora.

Se obtuvieron diversos tramos de fibra que nos proporcionó el ITEAM de la UPV para hacer simulaciones de deposición sobre vidrio. Al disponer de una fuente de corriente común que no supera los 30 V, las fibras deben ser lo suficientemente conductoras para que puedan pasar al menos 30 mA de corriente. Para ello y usando la sencilla ley de Ohm, es fácil deducir que sin una impedancia inferior a 1 K Ω , no se puede simular los resultados obtenidos con el hilo de cobre.

Las fibras se deben enrollar en la máscara para el proceso de Sputtering, dejando únicamente en la ventana de 5 cm la parte pelada de la fibra. Se metalizará también parte sin pelar de la fibra para lograr mayor rigidez y evitar posteriores roturas.

En toda la documentación previa aparece el Titanio como un material neutro a la hora de hacer una deposición química, quiere decir, que no afecta su uso a la disolución. Esto hizo que los primeros recubrimientos por Sputtering fueran hechos en Titanio.



Figura 27. Máscara para hacer Sputtering en las fibras con una ventana de 5 cm para seleccionar la zona a recubrir.

Se observó que el recubrimiento con Titanio era poco conductor con una resistividad casi nula, ya que en 10 minutos la deposición por Sputtering no alcanza los 100 nm de espesor. Con la imposibilidad de poder aplicar más tiempo, ya que el servicio de microscopía no podía tener en uso tanto tiempo para un solo usuario el servicio de pulverización catódica, se decidió el uso del níquel ya que aun con una capa tan delgada no fuera suficientemente conductor, es posible aumentar su espesor con otros procedimientos como es el niquelado químico.



Figura 28. Máscara con 6 fibras peladas y preparadas para el Sputtering.

Al poder realizar una capa nanométrica mediante Sputtering el procedimiento de niquelado químico se puede realizar sin necesidad de aplicar cloruros al vidrio. La siguiente composición es la que se eligió para el baño químico, utilizando un pH de 9 y una temperatura superior a 90°C como se detalla en el apartado teórico.

COMPONENTE	GRAMOS EN 1L	GRAMOS EN 250 ML
Cloruro de Níquel	30 (55)	7,5 (13,76)
Hipofosfito sódico	10	2,5
Citrato de sodio	100	25

Tabla 4. Composición de la disolución del niquelado químico. [7]



Figura 29. Químicos utilizados para el niquelado químico.

El cloruro de níquel utilizado viene en forma de cloruro de níquel hexahidratado, lo que aumenta su masa atómica. Es necesario pues, añadir casi el doble para mantener la concentración de níquel. 237,69 de masa molar respecto a 129,56 del puro. En la tabla se puede ver, entre paréntesis, los gramos reales para el cloruro de níquel hexahidratado. La disolución debe mantenerse en un pH entre 8 y 9. Se utilizará amoníaco para subirlo.

El proceso electroquímico trabaja a temperaturas superiores a 90°C. Se adquirieron recipientes para trabajar a altas temperaturas y se utilizó inicialmente un infiernillo de laboratorio. Posteriormente y por comodidad se decidió la sustitución por un hornillo eléctrico (*hot plate*).



Figura 30. Infiernillo para la deposición química de Níquel y termómetro láser para mantener la temperatura a 90°C.

En la siguiente imagen se puede apreciar el niquelado químico alrededor del vidrio y su posterior depositado de Galfenol.

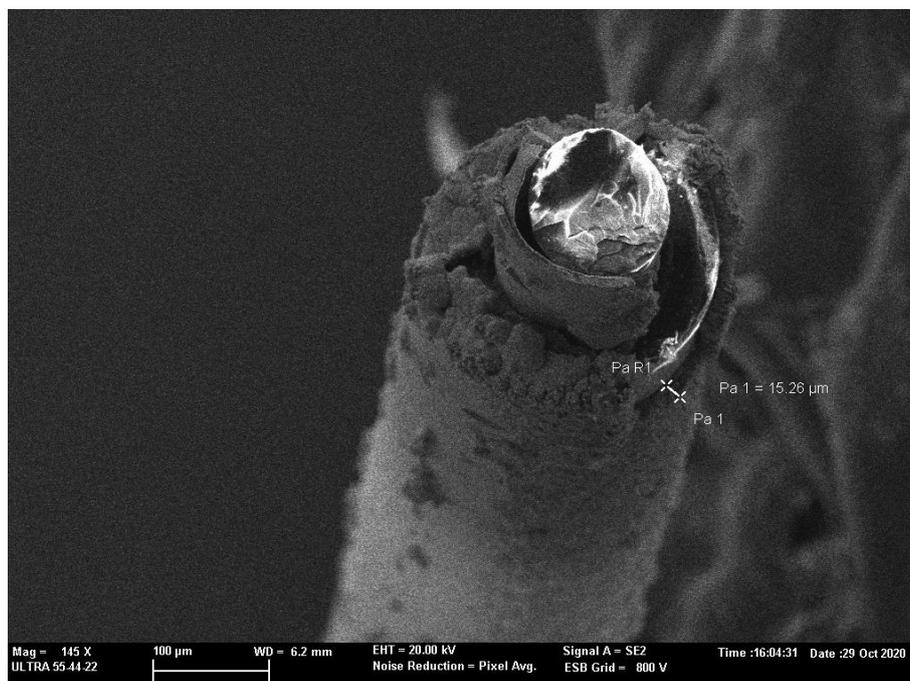


Figura 31. Imagen de EDX. Primeras deposiciones de 15 µm de GaFe en fibra pelada con previo niquelado químico.

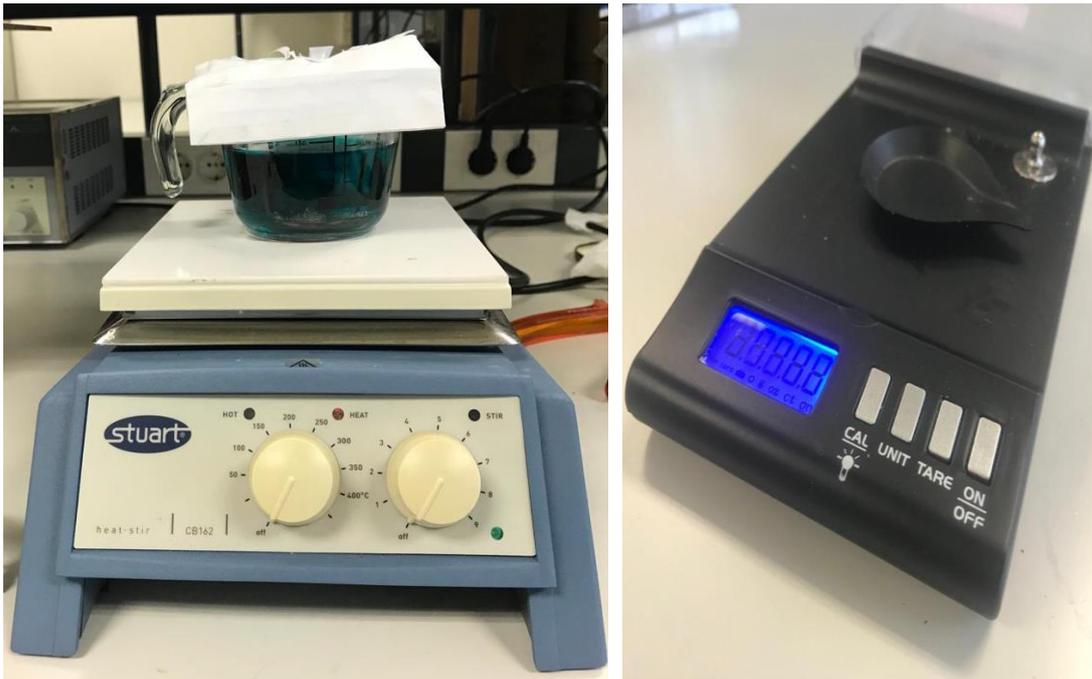


Figura 32. Hornillo eléctrico para la deposición química de níquel y balanza electrónica de precisión.

Se comprobó que el hornillo eléctrico tardaba más en alcanzar la temperatura, pero una vez superados los 90°C, resultaba mucho más fácil mantenerla .

Las primeras pruebas aportaron resultados deseados. Homogeneidad en el recubrimiento con un 10% – 11% de fósforo, unas 5 micras por lado cada 6 – 7 minutos y una resistividad de unos pocos ohmios (20 – 80 Ω).

La temperatura con la que se trabaja provoca una alta evaporación de agua y amoníaco que hace que aumente la concentración y baje el PH, se van generando pequeñas turbulencias en el níquel, resultado del desprendimiento de algunos átomos del Sputtering que hace que se vaya depositando en el fondo. Esto hace que la deposición en las fibras sea más débil y rugosa, lo que obliga a limpiar el recipiente y renovar la disolución cada cierto tiempo.

Una vez logrado este recubrimiento, se suelda hilo de cobre con tintura de plata a un extremo de la fibra para su uso como conector a la hora de la electrodeposición. Se decide seguir utilizando la misma disolución por no haber perdido todavía su concentración.



Debido al decremento del pH a niveles inferiores a 2 por el uso de la disolución, las muestras comenzaron a deshacerse en la disolución de electrodeposición de Galfenol. Se solucionó añadiendo amoníaco para regular el pH entre 3.5 y 4. La conclusión fue que una disolución tan ácida disolvía la capa de metal antes de que pudiera empezar la disolución química, ya que después de este ajuste los resultados no solo eran igual de efectivos, sino que la velocidad de deposición aumentó a unos 2 μm por hora.

A continuación, se puede ver análisis de EDX en microscopía electrónica de una fibra óptica niquelada y electrodepositada con Galfenol. Para ello se efectúa un mapeado de los distintos materiales presentes. Entre ellos encontramos el óxido de silicio en la parte central (la fibra óptica), la capa de deposición química de níquel y la capa exterior de hierro. En esta última capa se observan átomos de oxígeno que representa el óxido depositado en esta muestra en concreto. El Galio es un componente ausente, ya que se utilizó una corriente superior a 35 mA/cm^2 como experimento.

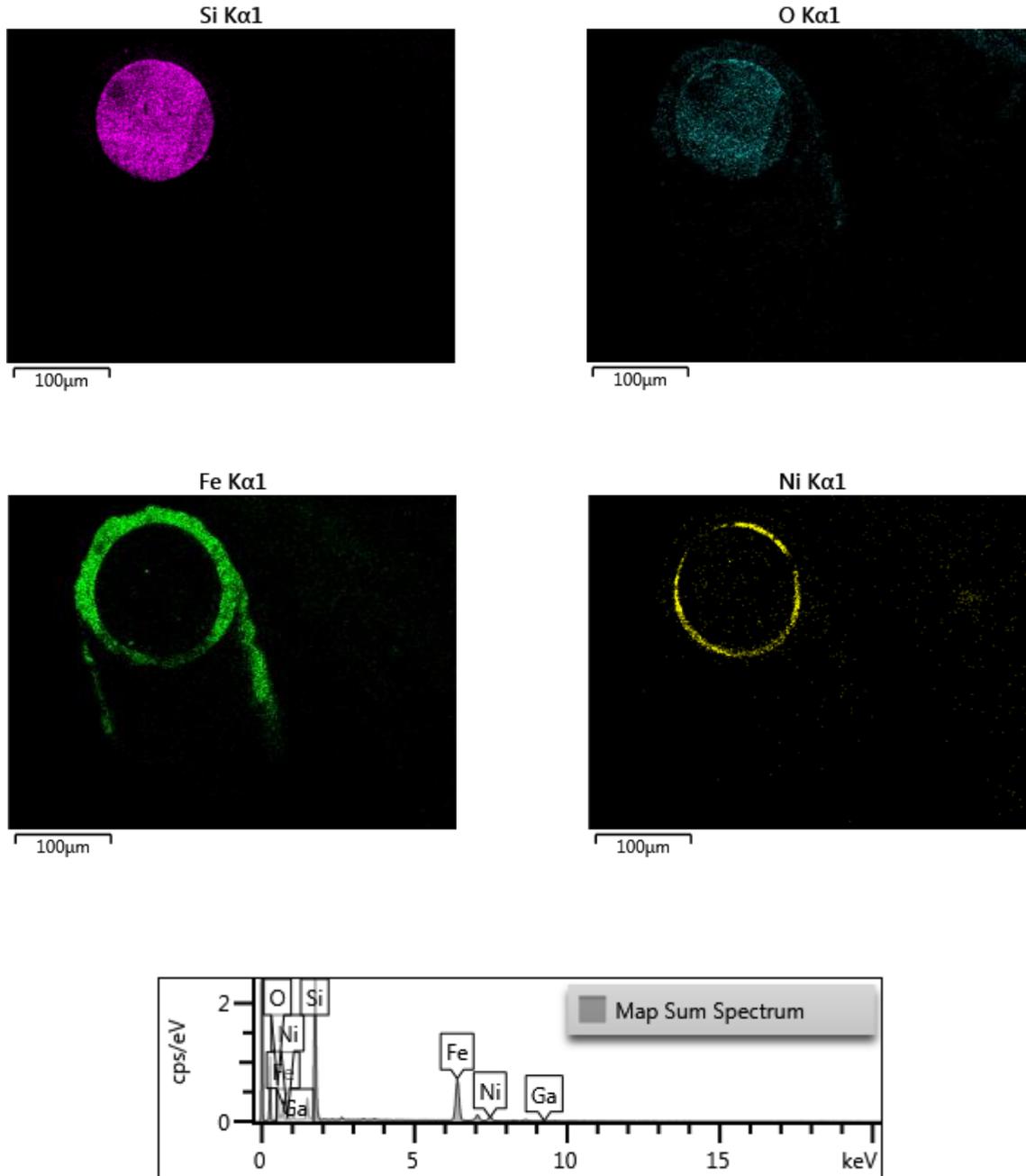


Figura 33. Imágenes de EDX. Fibra óptica con deposición química de níquel y electrodeposición de hierro. Se añade el espectro del mapa de los elementos encontrados en el análisis.

2.2.5 Pruebas de Galfenol en FBG

Controlados todos los procesos se decide aplicarlos a las FBG para comprobar la magnetostricción del material.

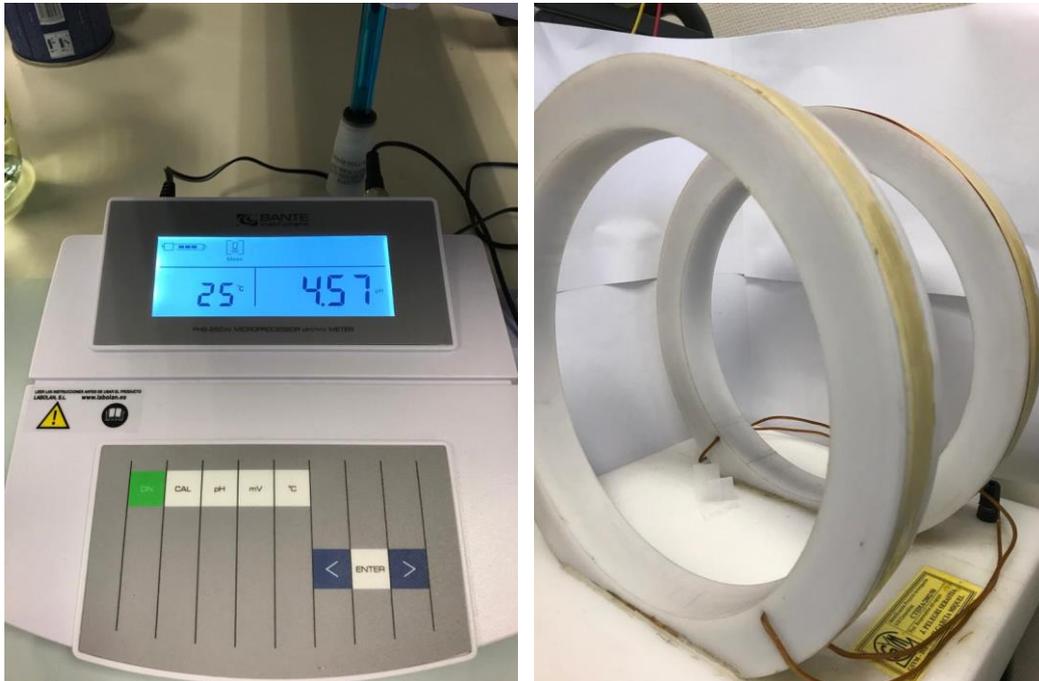


Figura 34. Medidor de PH electrónico de precisión utilizado y bobina Helmholtz para la aplicación de un campo transversal.

La primera prueba se realizará con un PH más bajo como era el inicialmente utilizado (2 – 2,5), en un tramo de 3,5 cm de FBG durante 12 horas a 5 mA (equivalente a una densidad de corriente de $17,5 \text{ mA/cm}^2$), es decir en el primer pico de galio en la gráfica de deposición. Lo primero es realizar un análisis de EDX para comprobar la homogeneidad de la composición y el porcentaje de galio depositado. Se consigue $7 \mu\text{m}$ de espesor homogéneos a lo largo de la fibra. En la *Figura 34*, al ser una capa suficientemente fina de deposición, todavía se puede apreciar entre el Galfenol y el vidrio, la fina capa de niquelado químico. Respecto a la composición, se ha conseguido un 24% de galio, sin situarnos en ninguno de los picos de máxima magnetostricción, pero sí en la zona útil de trabajo entre el 15% y el 35%.

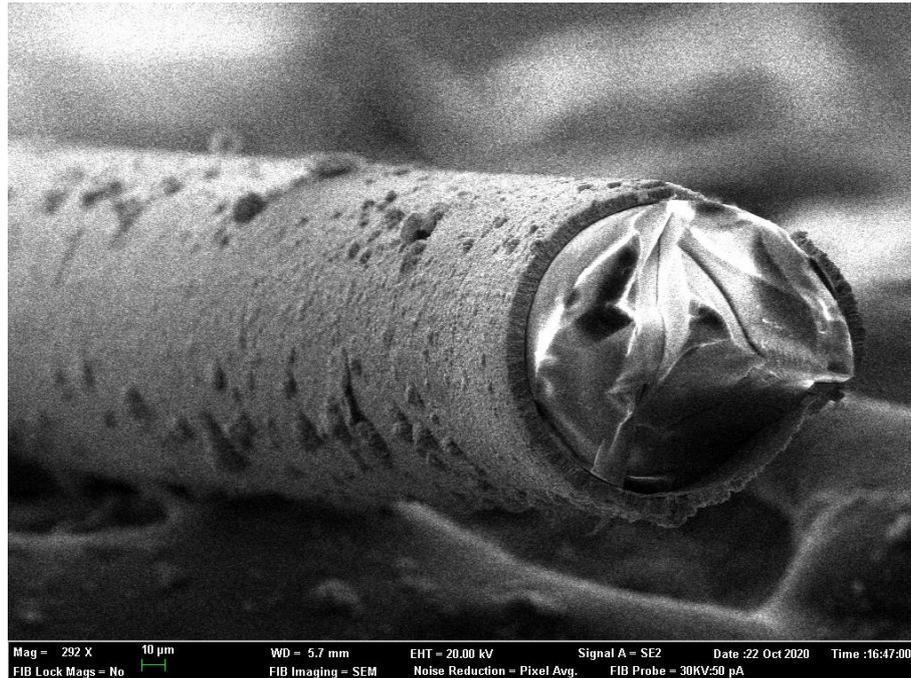


Figura 35. Imagen de EDX. Deposición de GaFe en FBG al 24% de Ga. 17.5 mA/cm^2 durante 12 horas.

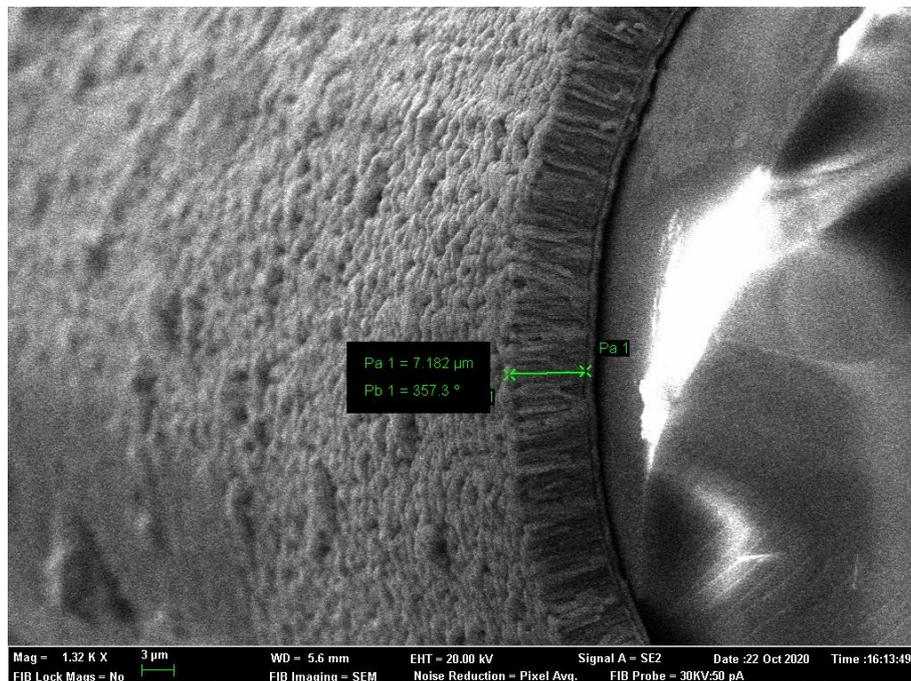


Figura 36. Imagen EDX. Deposición de GaFe al 24%. 7 µm de espesor.

Antes de cualquier prueba, se ha analizado en el interrogador óptico la ausencia de magnetostricción en el niquelado químico, ya que el níquel, aunque no altamente magnetostrictivo, sí que lo es pudiendo llegar a 35 ppm de deformación del material, pudiendo ensuciar los resultados del Galfenol. A estos niveles de espesor, no se ha detectado ninguna

variación producida por el níquel, por lo que podemos estar seguros de que los resultados obtenidos serán únicamente del Galfenol.

Una vez verificado que nos situamos en la composición adecuada para obtener una elevada magnetostricción, se conecta al interrogador óptico. Con un imán de neodimio se puede comprobar su alto magnetismo aun teniendo únicamente una capa de unas pocas micras de Galfenol. En el interrogador óptico se pueden apreciar variaciones bruscas en los picos por la proximidad del imán, pero para hacer una correcta verificación, aislándolo de movimientos, cambios bruscos de temperatura (el imán al ser de metal es un magnífico conductor de la temperatura), o cualquier variación externa, se usa la bobina.

Aplicando una corriente de 6A cuadrada, se obtienen los resultados de la *Figura 34*. El resultado es una señal muy ruidosa y con apenas 5 pm de variación en la longitud de onda. Aunque parezca una señal insignificante, hay que recalcar que 7 μm de espesor son capaces de deformar 125 μm de vidrio.

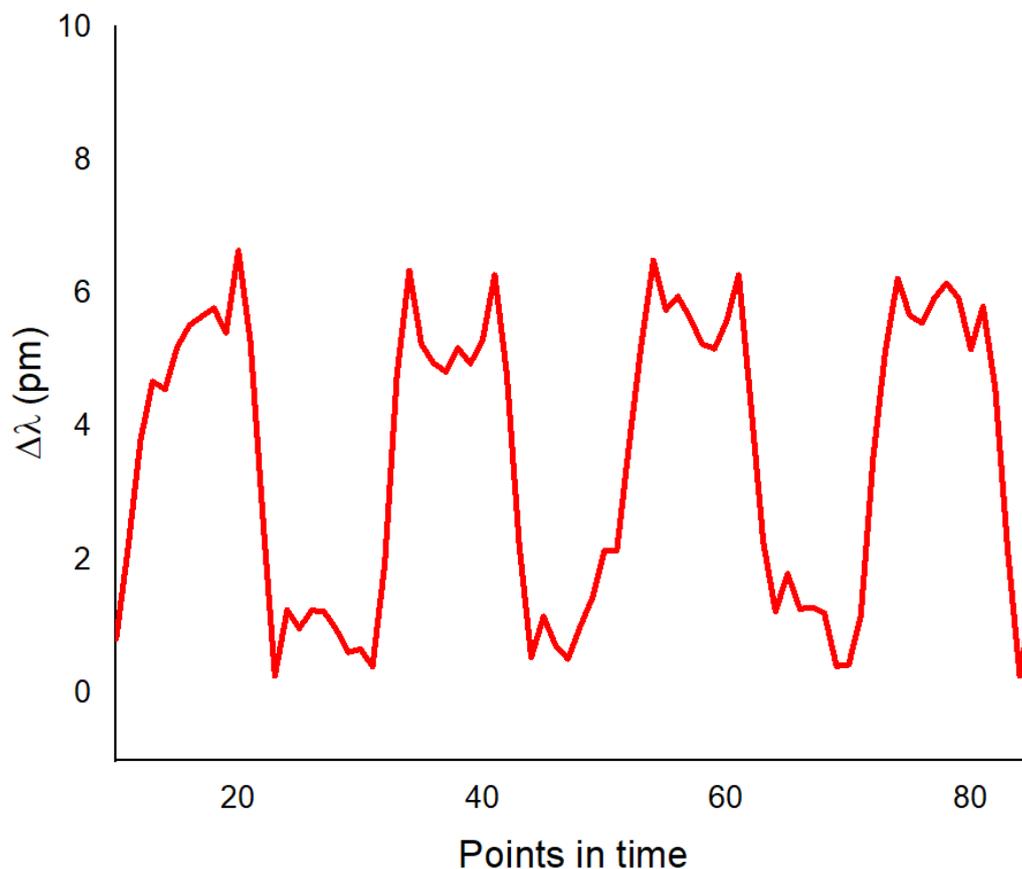


Figura 37. Movimiento de la longitud de onda de la primera muestra de GaFe depositada en FBG. Deformación de 4 picómetros con 6A aplicados (113,4 KA/m · A).

	PH	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo	Velocidad de deposición	Galio (%)
FBG 1	2 – 2,5	17,5	12 horas	≈ 0,6 μm / h	24 %

Tabla 5. Resultado FBG con 24% de Galio y 7 μm de espesor.

Estos datos dan a intuir, que es posible la obtención de unos resultados muy favorables consiguiendo aplicar una capa más gruesa de Galfenol y situándonos en uno de los picos de alta magnetostricción, alrededor del 19% o el 27%. Se opta por depositar un 27% del Galio, no por la mayor deformación que podría suponer, sino porque se sitúa en una densidad de corriente más alta, lo que llevaría a un incremento de la velocidad de deposición.

Para la segunda prueba en FBG se decidió subir el PH hasta 3,8. Con estas condiciones y a una densidad de corriente de 27,5 mA/cm², se decide dejar 60 horas un tramo de 3,5 cm de FBG depositando. Se elige esa corriente para que conforme vaya creciendo el espesor y vaya disminuyendo la densidad, la cantidad de Galio no descienda nunca del 19%.

Como resultado se obtienen unos resultados con espesores menos uniformes posiblemente a impurezas añadidas en la realización del niquelado químico. Se consiguió una posición entre el 20% y el 28% de Galio según el radio en la que nos encontremos respecto a la fibra. Tal y como se había calculado antes con las variaciones de superficie, al ir depositando, también iba variando la densidad de corriente, variando a su vez el punto de la gráfica en la que la deposición se sitúa.

En la *Figura 38* se ve la deposición desde una perspectiva más alejada. En este caso, debido al espesor de la deposición, la capa de niquelado queda inapreciable. En la *Figura 39* se aprecia la capa de Galfenol de casi 97 μm, casi 14 veces más grueso que en la primera prueba hecha. Esto sitúa la velocidad de electrodeposición en más de 1,5 μm por hora.

Por último, se decide hacer un análisis de conductividad para comprobar si existen zonas con óxidos. En la *Figura 40* comprobamos que apenas existen estos casos, manteniendo una tonalidad de gris constante en todas las zonas.

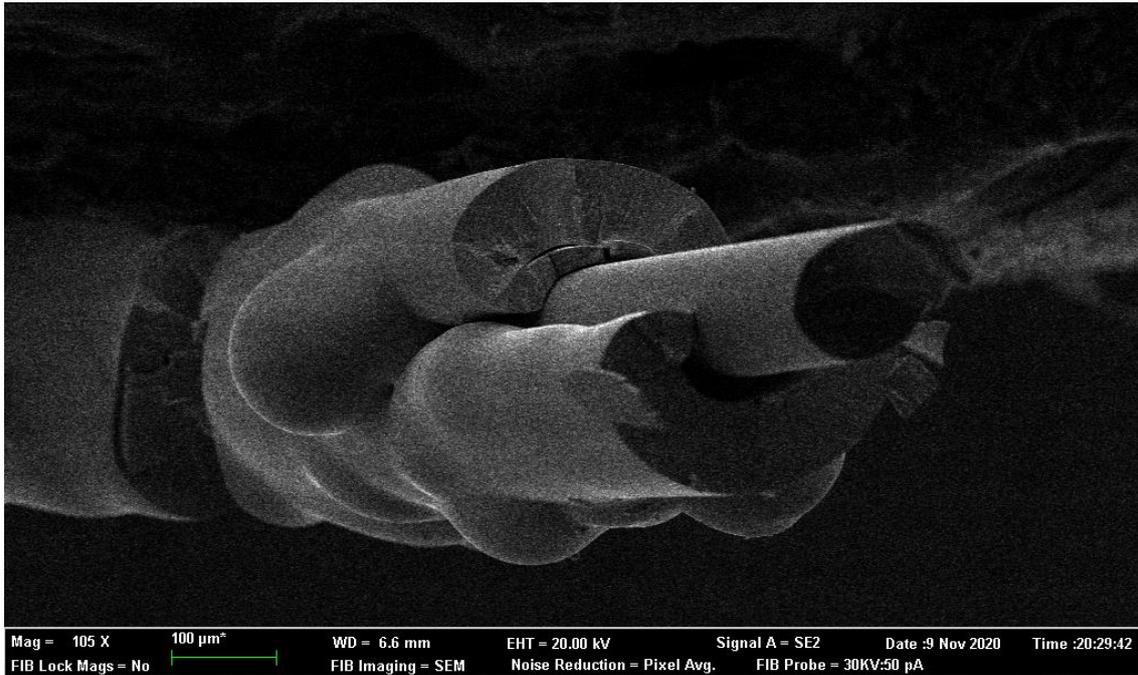


Figura 38. Imagen EDX. Segunda deposición de GaFe en FBG al 20% - 27% de Ga según la distancia desde la fibra.

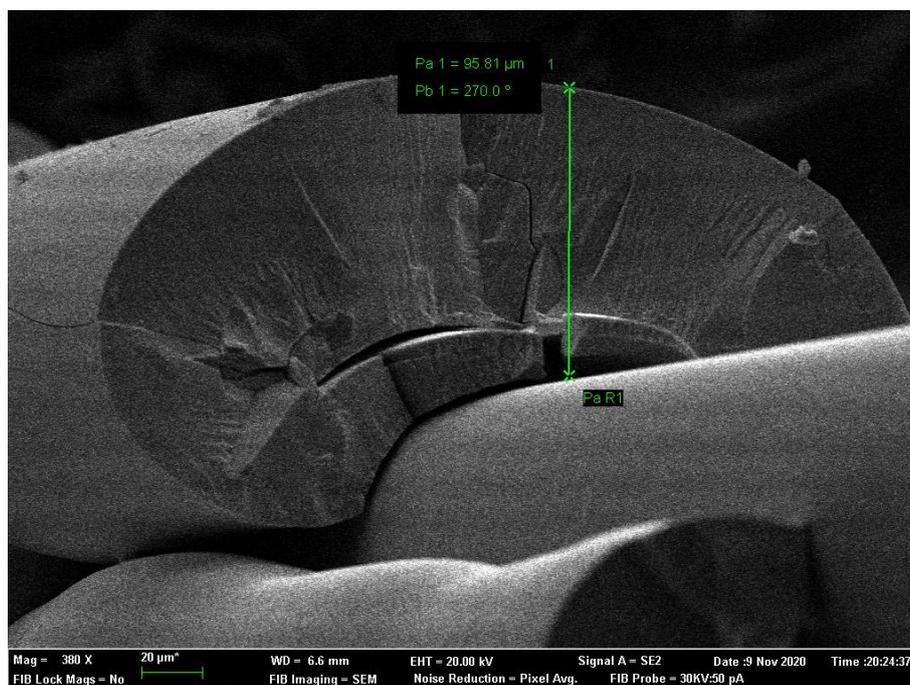


Figura 39. Imagen EDX. Imagen aumentada de la segunda deposición de GaFe. 97 μm de espesor.



Figura 40. Imagen EDX. Se muestra en gris claro la alta conductividad del recubrimiento, viendo que carece de óxidos. En oscuro la baja conductividad del vidrio.

Se vuelve a realizar el mismo procedimiento que con la primera FBG analizada. Primero, aplicar una señal de corriente cuadrada de 6A a la bobina, generando un campo de unos 113 KA/m en su máximo. Como resultado se obtiene lo que aparece representado en la *Figura 41*. Con casi 14 veces más de sección que en la FBG de la prueba 1, solo se alcanza un desplazamiento de la onda reflejada de 10 pm y reducido el ruido que aparece en la señal.

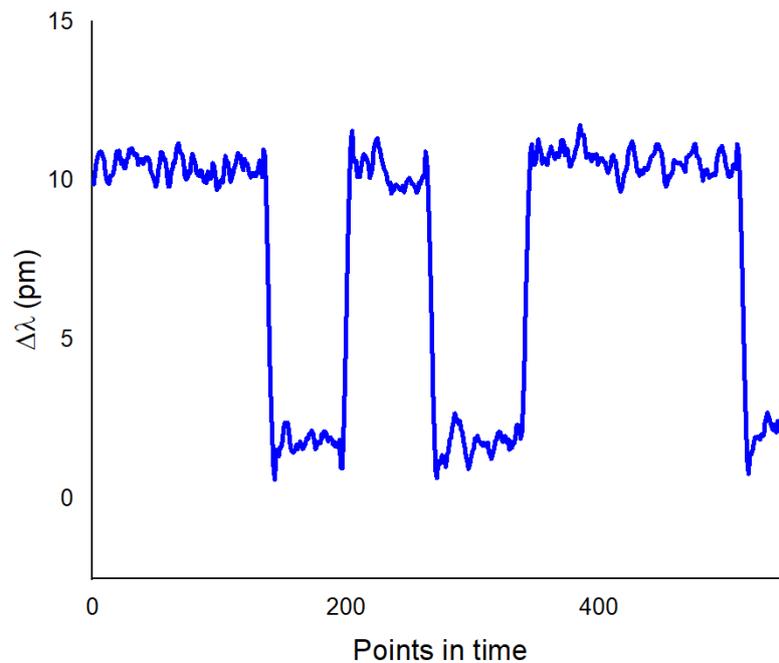


Figura 41. Señal cuadrada resultado de la saturación del Galfenol al aplicar 80 KA/m de campo axial en la segunda FBG de prueba.

	PH	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo	Velocidad de deposición	Galio (%)
FBG 2	4,75	27,5 – 22,5	60 horas	≈ 1,6 μm / h	20 - 28 %

Tabla 6. Resumen en los resultados de electrodeposición en una FBG.

Distancia al vidrio	14 μm	28 μm	42 μm	56 μm	70 μm	84 μm	97 μm
Ga (%)	28,1	19,7	20,8	23,6	26,7	26,6	26,5

Tabla 7. Resumen del análisis en microscopía del galio depositado en la FBG según la distancia al vidrio de la fibra óptica.

Se analiza nuevamente utilizando de una bobina de Helmholtz para cambiar la dirección del campo. No se obtienen resultados concluyentes.

Se aplica una señal triangular para demostrar que la limitación del movimiento es debida a una saturación del material debido a la polarización axial del Galfenol depositado. Cuando el material llegue a su límite de deformación, la señal triangular se convertirá en un valor constante hasta que el valor del campo vuelva a bajar. En la *Figura 42* se ve como la señal triangular se satura enseguida, imposibilitando un análisis completo de la magnetostricción de este material. En la *Figura 43* se puede ver la misma señal filtrada.

Debido a su alto contenido el ruido en las donas de saturación, se muestra la señal filtrada en la *Figura 43*.

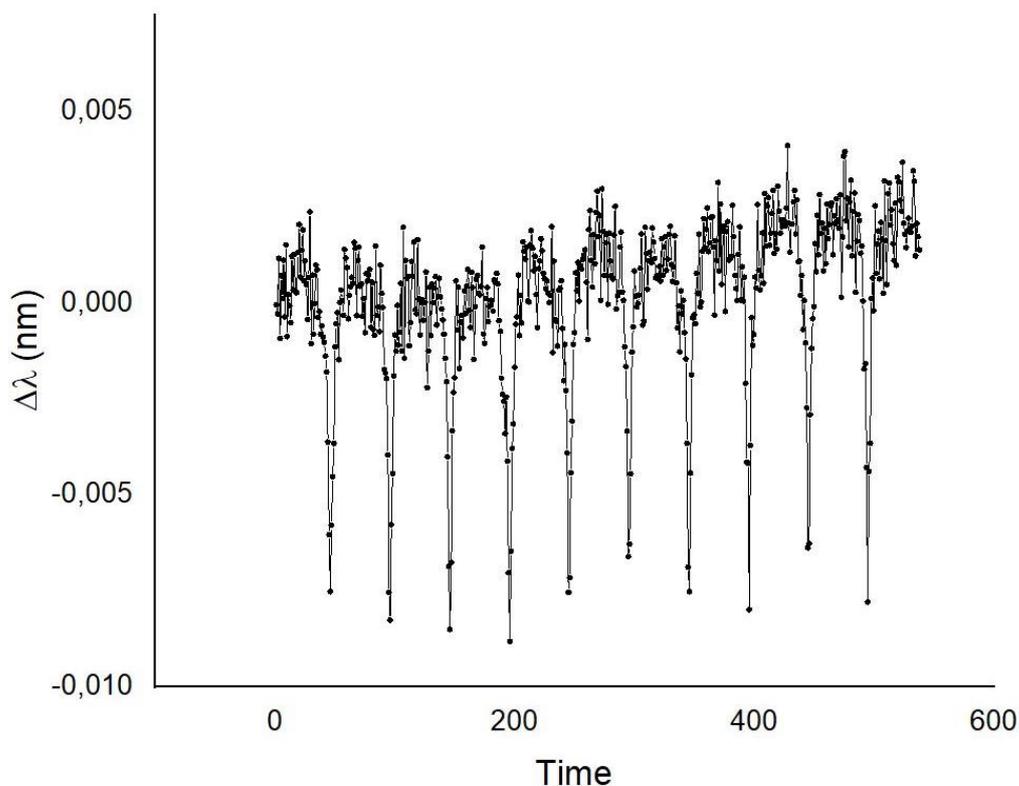


Figura 42. Magnetostricción de la FBG al aplicar una señal triangular de 80 KA/m.

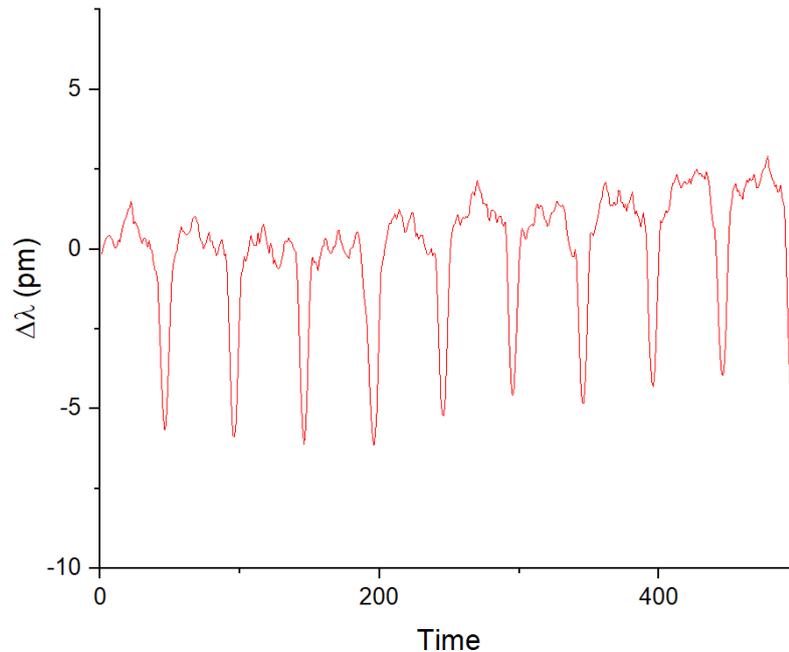


Figura 43. Resultado en la FBG con 28% de Ga y 97 μm de espesor. Filtrado con OriginPro una señal triangular insertada en la bobina al aplicar una señal de 80 KA/m.

Obtenido este resultado, mediante un análisis estimatorio se intuye como sería la señal sin saturar (señal triangular estimada de la *Figura 44*). Aquí se aprecian máximos de deformación de 25 pm. Hay que destacar que es un análisis estimatorio y que se debería cotejar con resultados reales.

Esta saturación es producida por la imanación axial del Galfenol en el hilo. Para conseguir un máximo en la deformación del material lo ideal es cambiar este tipo de imanación a una transversal. Puede hacerse con una precompresión o aplicar altas corrientes a través del Galfenol que, aparte de generar un campo circular a través de la fibra, le infligiría un elevado calentamiento. Cortar la corriente y enfriarla en un corto periodo de tiempo, podría cambiar la imanación del material.

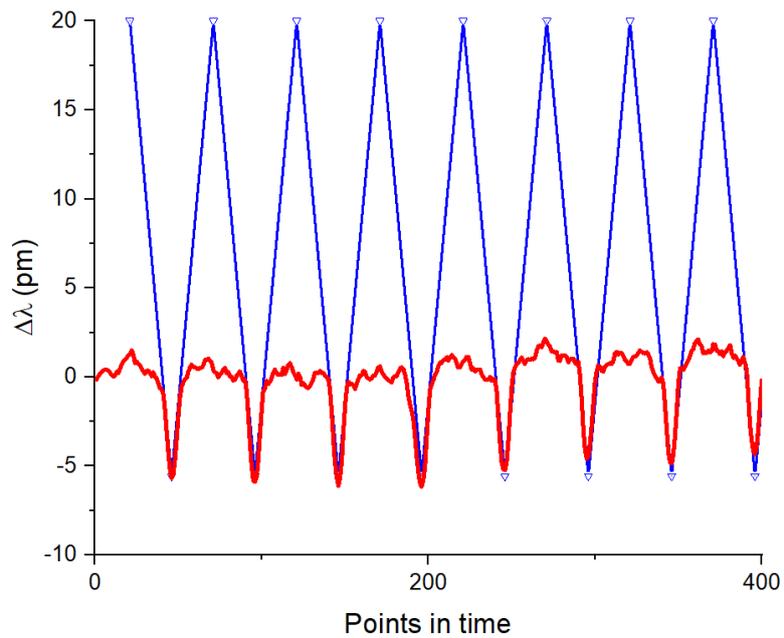


Figura 44. Estimación de la señal sin saturar triangular de la segunda FBG de prueba. En rojo la señal saturada y filtrada. En azul una señal triangular ideal representando la progresión estimada sin saturar.

2.3 Conclusiones y trabajo futuro

2.3.1 Conclusiones

El objetivo de la investigación era comprobar el uso de la magnetostricción del Galfenol en FBG's para su uso como sensores de corriente. Se ha demostrado que con muy poca cantidad es capaz de mostrar deformaciones en la FBG y ser apreciables en el interrogador óptico.

Se ha detectado el problema de la temprana saturación del Galfenol por su imanación axial, que impide un elevado movimiento de sus átomos en la dirección en que la bobina efectúa el campo, lo que se traslada en una limitación de la deformación en la FBG. El conseguir una imanación circular y efectuar una precompresión en el material (sea físicamente o por temperatura), conseguiría desaturar el material y poder llegar a unos resultados más favorables.

Aun así, se ha llegado a conseguir 15 pm de deformación mediante la FBG de la prueba 2 con un muy bajo contenido en ruido, teóricamente pudiendo conseguir hasta 25 pm con esta fibra.

Para finalizar, reseño las condiciones de electrodeposición de Galfenol óptimas a las que he llegado:

PH	Volumen disolución (ml)	Distancia cátodo-ánodo	Longitud fibra depositada	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Velocidad de deposición
3 - 4	20	1,5 cm	3,5 cm	22,5 a 30	≈ 1,5 μm/h

Tabla 8. Deposición óptima de Galfenol.

2.3.2 Trabajo futuro

Podemos dividir en varios apartados el trabajo para mejorar este sensor:

- **Lograr un mayor espesor y más homogéneo**

Variar la corriente cada cierta hora según vaya depositando el Galfenol para mantener una densidad de corriente constante y lograr varios cientos de micras con la misma cantidad en los componentes de la composición. Repetir los análisis con las bobinas y comparar resultados.

- **Mejora del campo**

Al tratarse de una deposición con una imanación axial no se puede conseguir una deformación máxima del material. Mediante una corriente de alta intensidad pasada por el hilo podemos cambiar a una imantación circular, procedimiento muy utilizado en la industria. Para llevar a cabo este estudio, se recopilará información que haga referencia a métodos de imanación de materiales.

- **Trabajar en la parte lineal y conseguir una equivalencia en corriente**

Cuando consigamos una respuesta elevada al campo, analizar cuál es el punto de saturación del Galfenol y trabajar cuando la respuesta es lineal. Escalar el movimiento en nanómetros del espectro del FBG a la variación de corriente para poder fabricar un sensor de corriente efectivo y automatizado.

- **Pasar la corriente por el propio recubrimiento y repetir los análisis**

Lo que se ha pretendido con este estudio es obtener una base sólida desde la que partir hacia el siguiente objetivo. Un uso práctico sería que la propia fibra fuera en serie a la corriente que deseamos medir. La fibra debería estar sumergida en aceite, alcohol o cualquier fluido no conductor que funcionara como refrigerante, ya que las fibras son muy susceptibles a las variaciones de temperatura. El campo generado por la propia corriente que pasa por la fibra generaría un cambio en el espectro reflejado en la FBG que podríamos trasladarlo a un cambio en la corriente.

Capítulo 3. Bibliografía.

- [1] Real academia de la ingeniería, <http://diccionario.raing.es/es/lema/pulverizaci%C3%B3n-cat%C3%B3dica> .
- [2] Jorge Ferrer Alarcón , “Diseño de un sistema de interrogación de bajo coste y monitorización del movimiento humano mediante sensores ópticos basados en FBGs”, https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/36263/FerrerAlarcon_Jorge.pdf?sequence=1.
- [3] Grupo Cofitel, “Boletines informativos sobre sensores de fibras FBG”, <https://www.c3comunicaciones.es/sensores-de-fibra-fbg-fiber-bragg-grating/>.
- [4] B. Torres Górriz, “Estudio experimental de sensores ópticos tipo FBG para medir deformaciones y temperaturas en estructuras”, Trabajo de Investigación CST/MIH-06, Universidad Politécnica de Valencia (Nov 2009).
- [5] Jack H.-G. Ng, Paul M. Record, Xinxin Shang, Krystian L. Wlodarczyk, Duncan P. Hand, Giuseppe Schiavone*, Eitan Abraham, Gerard Cummins, Marc P.Y. Desmulliez, “Optimised co-electrodeposition of Fe–Ga alloys for maximum magnetostriction effect”.
- [6] Tecnocrom industrial, <http://www.tecnocrom.es/index.php/es/tratamientos/niquel-quimico.html>.
- [7] Profesor Frank de Copenhague, “Niquelado sin electricidad (deposición catalítica de níquel)”, <http://cientificosaficionados.com/tecnicas/niquelado%20sin%20electricidad.htm>.
- [8] Rick Allen Kellogg, “Development and modeling of iron-gallium allows”, http://www.aerosmart.umd.edu/TechPubs/Kellogg_2003_Dissertation.pdf.
- [9] Eliot C. Estrine, Matt Hein, William P. Robbins, and Bethanie J. H. Stadler, “Composition and crystallinity in electrochemically deposited magnetostrictive Galfenol (FeGa)”.
- [10] Bethanie J. H. Stadler, Madhukar Reddy, Rajneeta Basantkumar, Patrick McGary, Eliot Estrine, Xiaobo Huang, Sang Yeob Sung, Liwen Tan, Jia Zou, Mazin Maqableh, Daniel Shore, Thomas Gage, Joseph Um, Matthew Hein and Anirudh Sharma, “Galfenol Thin Films and Nanowires”.
- [11] Usos del citrato de sodio. https://es.wikipedia.org/wiki/Citrato_de_sodio#Usos
- [12] Dr. Héctor García Miquel. Transductores e instrumentación electrónica. Sensores basados en fibra Óptica con FBG.
- [13] <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.negocioscontralaobsolescencia.com%2Ftaller%2Fcampos-magneticos-para-dummies&psig=AOvVaw0Bi5g8-omJXol26pODMoN1&ust=1605550766166000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCNj-rJShhe0CFQAAAAAdAAAAABAD>
- [14] <https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.mailxmail.com%2Fcurso-red-instalacion%2Ffibra-optica-sistemas&psig=AOvVaw1psHqrkmxu9vjEpZ7VYIN9&ust=1605643935734000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCMD7sqrwh-0CFQAAAAAdAAAAABAK>
- [15] HBM productos y servicios. <https://www.hbm.com/es/4596/que-es-una-red-de-bragg-en-fibra/>