

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE

Departamento de Matemáticas y Física

Sustentabilidad y Tecnología

**PROYECTO DE APLICACIÓN PROFESIONAL (PAP) s
PROGRAMA DE APOYO A LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN
NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍA I**



**ITESO, Universidad
Jesuita de Guadalajara**

**4I03B Programa de apoyo a la investigación y desarrollo en nano ciencias y
nanotecnología**

**Desarrollo de materiales multifuncionales magnetoeléctricos para nano-
dispositivos de nueva generación**

PRESENTAN

Programas educativos y Estudiantes

[Ing. en nanotecnología Tamara Gutiérrez Guerra]

Profesora PAP: Dra. Yenni Guadalupe Velázquez Galván

Tlaquepaque, Jalisco, 03 de octubre del 2022

ÍNDICE

REPORTE PAP	2
Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional.....	2
Resumen	2
1. Introducción	3
1.1. Objetivos	6
1.2. Justificación.....	7
1.3 Antecedentes	13
1.4. Contexto	15
2. Desarrollo	16
2.1. Sustento teórico y metodológico	16
2.2. Planeación y seguimiento del proyecto	26
3. Resultados del trabajo profesional	32
4. Reflexiones del alumno o alumnos sobre sus aprendizajes, las implicaciones éticas y los aportes sociales del proyecto.....	49
5. Conclusiones	52
6. Bibliografía	53
Anexos.....	55

REPORTE PAP

Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional

Los Proyectos de Aplicación Profesional (PAP) son una modalidad educativa del ITESO en la que el estudiante aplica sus saberes y competencias socio-profesionales para el desarrollo de un proyecto que plantea soluciones a problemas de entornos reales. Su espíritu está dirigido para que el estudiante ejerza su profesión mediante una perspectiva ética y socialmente responsable.

A través de las actividades realizadas en el PAP, se acreditan el servicio social y la opción terminal. Así, en este reporte se documentan las actividades que tuvieron lugar durante el desarrollo del proyecto, sus incidencias en el entorno, y las reflexiones y aprendizajes profesionales que el estudiante desarrolló en el transcurso de su labor.

Resumen

El presente proyecto de aplicación profesional (PAP4I03) del Programa de apoyo a la investigación y desarrollo en nano ciencias y nanotecnología se llevó a cabo por primera vez y bajo la supervisión de la Dra. Yenni Velázquez, investigadora y docente del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), en el que se realizó la investigación, diseño y desarrollo de un material multifuncional magnetoeléctrico para la generación de un cosechador de energía magneto-mecano-eléctrico (MME). Específicamente, durante el periodo del proyecto, se estuvo trabajando en generar la nanoestructura con propiedades magnetostrictivas que se requiere para dicho sistema.

El fin del mismo es lograr producir un dispositivo capaz de capturar, almacenar y alimentar sistemas de manera sostenible. Se investigó el potencial del Galfenol (FeGa) como material magnetostrictivo que presenta beneficios para la transferencia de energía magnético-

mecánica en ambientes de bajo campo magnético. Se realizaron pruebas de electrodeposición química de FeGa sobre láminas de Cu en diferentes arreglos de celdas electroquímicas y con diferentes recetas electrolíticas. Esto para encontrar la receta y los parámetros óptimos que resultaran en la composición deseada (Fe:80%, Ga:20%). Y, de igual manera, estudiar el efecto de los diferentes parámetros de síntesis, como el potencial y el pH, en la composición y propiedades del Galfenol.

Por otro lado, se aprovecharon diferentes métodos de caracterización para determinar la presencia de los iones de interés, la estequiometría propuesta, así como la topografía y morfología del depósito. Los métodos empleados durante este proyecto fueron el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) para medir el espesor y conocer la composición de las muestras, el Microscopio de Fuerza Atómica (AFM) para medir la rugosidad de los depósitos y el método de difracción de rayos X (XRD) para conocer la estructura cristalina, las fases presentes y la composición.

1. Introducción

Actualmente, el interés en los cosechadores de energía ha incrementado exponencialmente, gracias a su capacidad de recolectar, almacenar y administrar toda aquella energía que se encuentra a nuestro alrededor y no es aprovechada, como la energía lumínica, eólica, térmica. En el caso de esta investigación, se demuestra un particular interés en la energía generada por efecto piezoeléctrico y en el acoplamiento con la parte magnética de un sistema híbrido (Twenergy, 2016).

Recientemente, los compuestos magnetoeléctricos (ME), que pueden convertir la energía del campo magnético en energía del campo eléctrico por medio de un estímulo mecánico, demuestran eficiencia en la recolección de energía. Un compuesto ME presenta una mayor eficiencia para convertir el campo magnético de baja amplitud en energía eléctrica, especialmente en el rango de baja frecuencia. Es por eso el alto interés de este proyecto en

investigar y generar recolectores de energía MME basados en compuestos ME (Yu, Chu, Yang, Asl, & Yuan , 2020). Los generadores MME utilizan el acoplamiento magnetoeléctrico (ME) en compuestos de materiales piezoeléctricos y magnetostrictivos. Debido a que la fase piezoeléctrica en el compuesto también responde directamente a la vibración mecánica, un recolector de energía basado en ME puede aprovechar la energía de las vibraciones mecánicas y los campos magnéticos simultáneamente. El cosechador MME tiene un alto potencial como proveedor de energía ubicuo y autónomo, ya que puede recolectar energía a partir de niveles diminutos de ruido magnético, en un entorno ambiental y convertirla en electricidad utilizable (Venkateswarlu , Haribabu , Geon-Tae , Mahesh, & Dae-Yong , 2017). Como parte de los objetivos de este proyecto, se pretende aprovechar dicha energía para alimentar sistemas o dispositivos de baja potencia.

Estos materiales fabricados a partir de materiales nanoestructurados se encuentran en un área de gran desarrollo en la actualidad, ya que estos dispositivos hacen posible la fabricación y aprovechamiento de aparatos electrónicos autosuficientes, que utilicen la energía recolectada de su alrededor sin necesitar de ninguna otra fuente complementaria (Twenergy, 2016). Algunas de sus aplicaciones más innovadoras de estos sistemas híbridos, que se han propuesto hasta el momento, van direccionadas hacia el área médica para darle un enfoque autosustentable a nuevos tratamientos y tecnologías médicas. Un ejemplo de ello es el enfoque en aplicaciones de ingeniería de tejidos con biomateriales compuestos de ME (Kopyla , Surmenev , Surmeneva, Fetisov, & Kholkin, 2021).

Además, Hongye Guan y otros, han logrado un novedoso analizador de sudor-lactato portátil autoalimentado para la construcción de grandes datos deportivos. El mecanismo de funcionamiento se basa en el nuevo efecto de acoplamiento sudor-evaporación-biosensor. El biosensor autoalimentado del analizador puede generar electricidad a través de la evaporación natural del sudor, y el volumen de salida depende de la concentración de lactato del sudor. La señal de salida no solo actúa como fuente de energía del dispositivo, sino también como información de biosensores. El analizador de sudor-lactato consta

principalmente de un biosensor de evaporación del sudor, una carcasa que recoge el sudor, un condensador, un transmisor inalámbrico, dos almohadillas de algodón y un sustrato de polidimetilsiloxano (PDMS) (Guan, y otros, 2019).

El riñón tiene un interés clave en la nanotecnología y la nanomedicina debido a sus funciones esenciales en la fisiología. La enfermedad renal crónica (ERC), describe una lesión gradual debida a enfermedades adquiridas o congénitas que implican trastornos de la regulación inmunológica, diabetes, hipertensión, enfermedades metabólicas u otros trastornos. La ERC, que puede conducir a la enfermedad renal terminal (ERT), la pérdida permanente de la función renal requiere diálisis o trasplante de riñón (Hauser, Chang, Yanagawa, & Hamon, 2021). La ERC, se caracteriza por un aumento súbito de la creatinina sérica (CRS), la reducción de la diuresis y la disfunción renal durante un periodo de horas a días, lo que se relaciona con una elevada morbilidad y mortalidad, que sigue siendo de aproximadamente el 50% incluso con un tratamiento de apoyo como la terapia de sustitución renal (Zhao, y otros, 2021).

Se han desarrollado varios biomarcadores indicativos del daño renal, como la interleucina-18 (IL-18) urinaria, la lipocalina asociada a la gelatinasa de neutrófilos (NGAL), la cistatina C (CysC), el Dickkopf-3, etc., para el diagnóstico precoz de la ERC, pero estos siguen presentando algunas limitaciones que deben abordarse (Zhao, y otros, 2021).

En la actualidad se ha desarrolló una innovadora plataforma de inmunosensores electroquímicos con actividad redox inherente mediante un nanocompuesto de óxido de grafeno funcionalizado con aminoferroceno (Fc-GO) y recubierto superficialmente con una película de polietilenimina (PEI). En resumen, los anticuerpos Anti-CysC se inmovilizaron en la película de PEI fundida a través de sus porciones Fc con el fin de mejorar la sensibilidad y la reproducibilidad del nanosistema. Por lo tanto, esta forma de nanoplaca podría capturar eficazmente la CysC en muestras de suero y orina sobre la base de la interacción antígeno-anticuerpo, logrando una prueba real en el punto de atención del biomarcador en la etapa

temprana de la AKI sin soluciones adicionales de la sonda redox y pasos complejos (Zhao, y otros, 2021).

En resumen, la nanotecnología y los sistemas híbridos tienen mucho que aportar en diferentes áreas y dar soluciones a problemas cotidianos a los que nos enfrentamos día con día. Los cosechadores de energía presentan diversas aplicaciones. Específicamente, en la medicina, los sistemas híbridos y los cosechadores de energía son una prometedora alternativa que dar solución a algunas limitaciones que presentan los tratamientos actuales.

En este proyecto se pretende aumentar la innovación de estructuras de materiales para sistemas de energía autosustentable, limpias y de alta duración. Como resultado se busca la fabricación de cosechadores de energía MME que al aplicarlos en dispositivos electrónicos y de salud, mejoren y eficienten su funcionamiento como fuente autosustentable. Además, debido a su versatilidad, la posible aplicación del sistema híbrido propuesto para biosensado.

Este proyecto consta del estudio y fabricación de la nanoestructura magnética necesaria para lograr generar el sistema del que se ha estado hablando. Durante el periodo de este, se implementó la síntesis, por el método de electrodeposición, de la aleación de interés ($\text{Fe}_x\text{Ga}_{x-1}$), con el fin de identificar y analizar los efectos del potencial aplicado, geometría y distribución de los electrodos, tiempo, densidad de corriente y pH del electrolito en un sistema electroquímico. Para concluir la receta del electrolito y los parámetros que resultarían en la composición (Fe:80%, Ga:20%), que, según los estudios, demuestra las propiedades óptimas para ser aplicado como cosechador de energía y biosensor.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo General

- Estudiar y analizar los parámetros de síntesis para fabricar nanoestructuras de la aleación de Galfenol con la estequiometría de interés (Fe:80%, Ga:20%), ya que

dicha composición la aleación presenta las propiedades de magnetostricción que se requieren para el funcionamiento del sistema MME. Además, encontrar y reproducir los parámetros que efficienten el proceso electroquímico y la película resultante. Esto con el fin de diseñar y desarrollar un material multifuncional magnetoeléctrico para la generación de un cosechador de energía MME para capturar, almacenar y alimentar sistemas de manera sostenible.

1.1.2 Objetivos Particulares

- Familiarizarse y aprovechar el método de síntesis de electrodeposición química para el crecimiento de nanoestructuras de Galfenol (FeGa).
- Identificar y analizar los efectos del potencial aplicado, geometría y distribución de los electrodos, tiempo de deposición, densidad de corriente y pH del electrolito en un sistema electroquímico.
- Caracterizar la composición química de depósitos de Galfenol mediante EDS con Microscopio Electrónico de Barrido, por sus siglas en inglés (SEM).
- Caracterizar rugosidad y espesor de películas de $\text{Fe}_x\text{Ga}_{x-1}$ mediante Microscopio de Fuerza Atómica, por sus siglas en inglés (AFM).
- Estudiar y familiarizarse con la deposición de la aleación en membrana, con el fin de obtener una composición Fe:80%, Ga:20%.

1.2. Justificación

Los cosechadores de energía tienen como función retener energía después de capturarla para que los dispositivos sean autónomos. En el caso de este proyecto es un cosechador de energía magneto-mecano-eléctrico para un sistema sostenible de detección y sensado, como lo es un biosensor. Los materiales ME laminados, resultan ser los candidatos más favorables para los sensores de campo magnético y cosechadores de energía, debido a su respuesta ME efectiva y por la generación de potencia con alto voltaje a dispositivos electrónicos (Kambale, 2013).

La magnetostricción es un fenómeno físico por el cual un material cambia de forma o dimensión a medida que se magnetiza y viceversa. Esta tiene el potencial de ser una propiedad muy útil para los sensores, actuadores y transductores basados en MEMS, pero los dispositivos magnetostrictivos actualmente tienen un tamaño mesoscópico y están comercialmente restringidos a aplicaciones de sensado debido a las limitaciones con las propiedades del material, el costo y la capacidad de fabricación de las muestras (Kay , Hoyd-Gigg, Popov, Record, & Desmulliez, sf).

El generador MME basado en acoplamiento ME utiliza vibraciones mecánicas inducidas por la alternancia de un campo magnético. En teoría, la amplitud de la vibración mecánica del generador MME es proporcional a la intensidad del campo magnético que rodea al generador y, por lo tanto, la distribución del campo magnético dentro del generador afecta la deformación y la potencia de salida resultante del dispositivo (Venkateswarlu , Haribabu , Geon-Tae , Mahesh, & Dae-Yong , 2017).

El uso de estos sistemas, de baja potencia, ha ido incrementando, y a su vez, la demanda de energía para mantenerlos en funcionamiento. Estos sensores requieren de energía permanente que es suministrada por baterías químicas. Sin embargo, la energía de las baterías es finita y deben ser cargadas constantemente.

El desarrollo de un MME permitirá reemplazar la fuente de energía que actualmente se utiliza, ya que las baterías comunes, en su mayoría, están compuestas de químicos tóxicos como pueden ser mercurio, litio, níquel, cadmio, manganeso, plomo; que al ser desechadas y entrar en contacto con el medio ambiente y contaminan los ecosistemas. Las baterías desechables no solo representan un riesgo para el medio ambiente sino también para la salud humana; al ser tóxicos algunos componentes de las baterías, si los humanos tienen contacto con ellos por algún medio, ya sea cuerpos de agua o cultivos, por poner algún ejemplo, pueden provocar diarrea, vómitos, daño al sistema nervioso, incluso la muerte,

dependiendo la exposición a las sustancias peligrosas, algunos de ellas también son cancerígenos.

El funcionamiento continuo de estos sistemas requiere de una mayor autonomía en aplicaciones remotas, ya que estos dependen de un suministro permanente. Desarrollar e implementar un cosechador de energía fomenta la investigación para el desarrollo de energías alternativas y autónomas que no impliquen daños y consecuencias para el medio ambiente y el usuario. La visibilidad y concientización de este problema ecológico y la búsqueda de alternativas sustentables y ecológicamente responsables, ha incitado el avance de los estudios de los fenómenos de magnetismo, electricidad y conductividad, en los cuales se ha descubierto y demostrado la utilidad de la aplicación de estas propiedades en los cosechadores de energía.

Es importante que surjan nuevas tendencias e iniciativas que promuevan la utilización de tecnologías que permitan aprovechar muchas de las fuentes renovables de energía. Los beneficios de la implementación de un MME no solo impactan en el cuidado ambiental, sino que, también, genera avances tecnológicos que impacten y den soluciones importantes para la humanidad. Como lo son los sensores para enfermedades, por ejemplo, enfermedades renales. Esto pueden llegar a ser dispositivos menos invasivos, autónomos, innovadores y efectivos.

Se ha demostrado que los sistemas híbridos de ME recientemente desarrollados, los cuales combinan fases piezoeléctricas (PE) y magnetostrictivas (MS) acopladas elásticamente, producen efectos de ME muy fuertes incluso a temperatura ambiente, lo que los convierte en una prometedora caja de herramientas para resolver muchos problemas de la medicina moderna (Kopyl, Surmenev, Surmeneva, Fetisov, & Kholkin, 2021).

El acoplamiento entre las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales ME ofrece oportunidades excepcionales para desarrollar cargas eléctricas sin ninguna conexión de

cables, lo que permite una integración menos invasiva en los dispositivos para aplicaciones biomédicas (Kopyl, Surmenev, Surmeneva, Fetisov, & Kholkin, 2021).

Como es bien sabido, el cuerpo humano es un sistema de ingeniería extremadamente complejo formado por billones de células interconectadas que se ha optimizado a lo largo de muchos años de evolución. Los campos eléctricos intrínsecos a nivel subcelular desempeñan un papel importante en estas interacciones, y esta gran cantidad de efectos electro-físicos determina los mecanismos fisiológicos fundamentales. Los materiales ME pueden permitir que las células reaccionen de forma remota a nano y microescala, abriendo así posibilidades sin precedentes para las aplicaciones biomédicas. Al controlar sus propios campos eléctricos que subyacen a las interacciones célula a célula y célula a célula, se espera que los materiales ME desempeñen un papel importante en el desarrollo de métodos de imagen y tratamiento que permitan eliminar los daños colaterales y mejorar significativamente la eficacia de los tratamientos modernos (Kopyl, Surmenev, Surmeneva, Fetisov, & Kholkin, 2021).

Actualmente, Kopyl y otros, realizaron una investigación para aprovechar estos efectos y sistemas para aplicaciones biomédicas como la magnetocardiografía, la magnetotomografía, la magnetomiografía y la magnetoneurografía. Además, otra revisión considera los problemas asociados con el desarrollo y la aplicación de un nuevo tipo de materiales médicos "inteligentes" basados en compuestos ME, principalmente para la regeneración del tejido óseo, capaces de crear estímulos adicionales que afectan al proceso de generación (Tikhonova, y otros, 2020).

Para este proyecto en específico se pretende trabajar con Galfenol ($\text{Fe}_x\text{Ga}_{x-1}$). Este es un material interesante por su gran constante de magnetostricción (hasta 400 ppm) y sus sólidas propiedades mecánicas. 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 estudios teóricos han demostrado que manteniendo un porcentaje

de galio entre el 15% y el 35% se puede conseguir alta magnetostricción, como se puede ver en la figura 1, alcanzando un máximo en el 27%, soportando tensiones de 500 MPa y logrando deformaciones cercanas al 0.25% (Lopes, 2020).

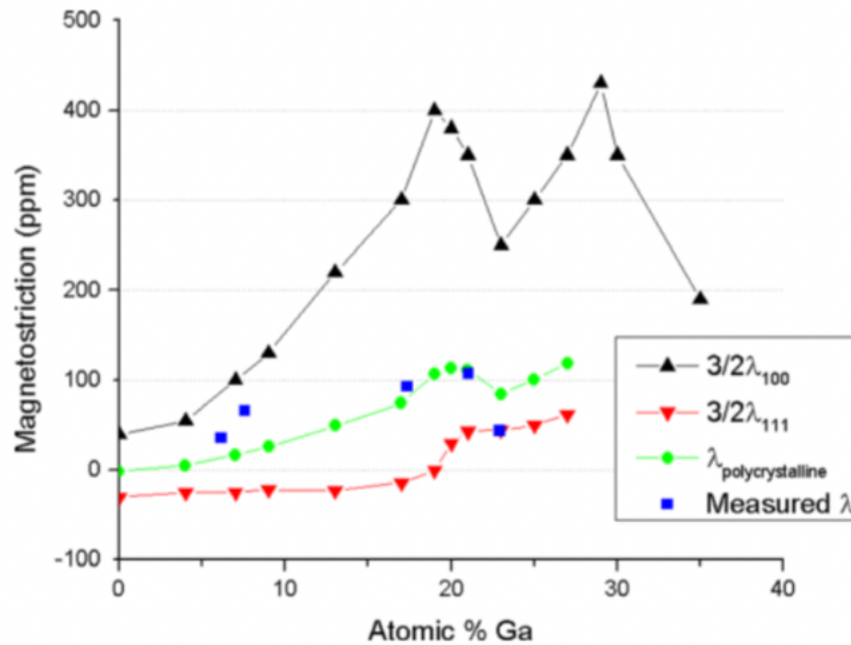


Figura 1. Comparación de los valores de magnetostricción para el Galfenol monocristalino (100) y (111) de la literatura, calculando el Galfenol policristalino y Galfenol electrodepositado.

Se puede fabricar una amplia gama de dispositivos aprovechando la combinación única de propiedades magnéticas y mecánicas del Galfenol. Puesto que, además, este presenta alta resistencia a la corrosión, alta permitividad magnética, una propiedad importante para MME magnéticos de baja potencial, y la materia prima es aproximadamente 6 veces menos costosa que el Terfenol D, una aleación basada en Fe de tierras raras, lo que convierte al Galfenol en un material muy atractivo para aplicaciones basadas en MME (Kay , Hoyd-Gigg, Popov, Record, & Desmulliez, sf).

A pesar de las altas propiedades magnetostrictivas del Terfenol D, su gran anisotropía magnetocristalina, que da lugar a altos campos de saturación, limita su uso en aplicaciones prácticas. Por lo que la alternativa para estas aplicaciones de detección y actuación que

requieren baja potencia, alta frecuencia de funcionamiento, excelente fiabilidad o despliegue en entornos difíciles, es el Galfenol (Kay , Hoyd-Gigg, Popov, Record, & Desmulliez, sf).

La mayoría de los materiales magnetostrictivos sufren de ser extremadamente frágiles, incluido el Terfenol D. El Galfenol, sin embargo, es un material mucho más dúctil y, por tanto, funcional para muchas aplicaciones. Este presenta, también, magnetostricción a campos magnéticos muy bajos $\sim 100\text{Oe}$ (8000 Am^{-1}) con baja histéresis debido a su alta permitividad magnética, una propiedad importante para MEMS magnéticos de baja potencia (Kay , Hoyd-Gigg, Popov, Record, & Desmulliez, sf).

Los métodos tradicionales para producir dichos componentes magnetostrictivos implican mecanizar piezas para generar la geometría requerida. Tal proceso es difícilmente compatible para la fabricación de alto volumen de dispositivos MME y, por lo tanto, la incorporación de la funcionalidad magnetostrictiva dentro del campo de los microsisemas ha sido limitada hasta la fecha. El Terfenol D y otros materiales altamente magnetostrictivos no pueden depositarse electroquímicamente a diferencia del Galfenol, lo que lo convierte en un material muy atractivo (Kay , Hoyd-Gigg, Popov, Record, & Desmulliez, sf). El Galfenol también puede depositarse por pulverización, aunque esta técnica de fabricación requiere un costoso equipo de vacío y la tasa de deposición depende de la presión parcial del gas inerte (H.G. Ng, y otros, 2015). Por lo que, el método que se utilizará, por sus beneficios en comparación, será el método electroquímico. La electrodeposición de Galfenol tiene muchas ventajas sobre los métodos de deposición anteriores, como el bajo coste, la alta tasa de deposición y la capacidad de recubrir superficies grandes o no planas. Este método puede utilizarse para la deposición de películas finas y la producción una gran variedad de nanoestructuras haciendo uso de membranas porosas, por ejemplo, nanocables., lo que demuestra la viabilidad de este método para la producción a gran escala de microestructuras magnetostrictivas y dispositivos MEMS (H.G. Ng, y otros, 2015).

1.3 Antecedentes

Diferentes sistemas y metodologías experimentales de MME han sido propuestas y desarrolladas en la última década, por ejemplo, la fabricación de piezoeléctricos monocristalinos o de compuestos de microfibras (MFC), sistemas multimodales de compuestos ME para la cosecha de energía magnética y mecánica, o la implementación de Galfenol texturizado en su fase magnetostrictiva para mejorar la suministración de potencia a dispositivos electrónicos (Yu, Chu, Yang, Asl, & Yuan , 2020).

En la bibliografía se menciona que recientemente se han desarrollado algunos nuevos grados de aleaciones de Ferroaluminio (Fe-Al) y Galfenol (Fe-Ga). Estas aleaciones no solo mostraron buenas características de magnetostricción, sino también fuertes comportamientos anisotrópicos magnéticos. Además, estos materiales magnetostrictivos podrían exhibir buena ductilidad y acoplamiento magneto-mecánico, que son benéficos para la transferencia de energía magnético-mecánica en ambientes de bajo campo magnético (Venkateswarlu , Haribabu , Geon-Tae , Mahesh, & Dae-Yong , 2017). Además, las películas delgadas tienen valores de acoplamiento ME directo de mayor magnitud y una clara evidencia de acoplamiento ME indirecto en comparación con los materiales a granel. Por ello se utiliza la técnica de electrodeposición para generar depósitos de materiales con estas propiedades como es el Galfenol (Ortega , Kumar , Scott, & Katiyar, sf).

La electrodeposición de $\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x$ fue demostrada por primera vez por McGary y luego refinada y caracterizada por Reddy y Estrine (Lupu, Chiriac, & Pascariu, 2008). Hasta la fecha, los parámetros de electrodeposición de $\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x$ solo se han definido para superficies planas (Hein, Park, Cozzo, Flatau, & Stadler, sf). Por otro lado, también se ha aprovechado los métodos de deposición física de vapor (PVD) debido a las propiedades que presenta esta aleación, varios grupos han estado trabajando en películas delgadas de FeGa, estudiando el efecto de parámetros como, la influencia de la tasa de evaporación de Ga, la densidad de potencia para la pulverización catódica de Fe y el efecto de la temperatura del sustrato en las películas de FeGa.

Debido a que la electrodeposición de $\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x$ ha sido estudiada poco y existen solo algunos artículos científicos relevantes relacionados con su estudio mencionaremos los más importantes y en los que nos basamos para el desarrollo de este proyecto. Kay y otros, presentan un trabajo en el que se depositó electroquímicamente Galfenol, en una celda Hull. Esta permite analizar el efecto de un amplio rango de densidades de corriente en la morfología y composición del depósito. En este estudian el efecto de incorporar citrato de sodio en el electrolito, concluyendo que al añadirlo como agente complejante se obtenían depósitos metálicos brillantes. Y, por el contrario, los intentos de utilizar ácido acético, ácido cítrico y ácido fosfórico mezclados con sulfato de galio dieron como resultado un pH inferior a 2, lo que provoca una excesiva evolución del hidrógeno en el cátodo cuando se aplica la corriente a la celda (Kay, Hoyd-Gigg, Popov, Record, & Desmulliez, sf).

Sólo hay unas pocas combinaciones de pH y voltaje en las que los iones de Ga permanecen estables en soluciones acuosas. H.G. Ng, Jack y otros, estudian el efecto de este parámetro en la composición resultante de la aleación $\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x$ y en la evolución del hidrógeno en el electrolito, lo cual provoca la formación de hidróxido y óxido de galio y su inclusión en los depósitos. Con esta investigación se concluye que el valor de pH sugerido por la bibliografía, ligeramente inferior a 3.0, no permite una deposición significativa de galio hasta que la concentración de iones Fe^{2+} se reduce a 1/10. Por el contrario, sólo cuando el pH es de 4.0 logran depositar una película homogénea a través de un sustrato de gran superficie con una longitud de unos pocos centímetros (H.G. Ng, y otros, 2015).

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, aún se debe de profundizar y estudiar más a fondo el comportamiento y los parámetros influyentes en la deposición de esta aleación para garantizar los avances en las aplicaciones en tiempo real (Nivedita, Manivel, Pandian, & et al., 2018)

1.4. Contexto

Los recientes avances en diferentes tipos de dispositivos electrónicos, como por ejemplo sistemas microelectromecánicos (MEMS) y redes de sensores inalámbricos (WSN), ha permitido un creciente campo de aplicaciones que facilitan el trabajo de diagnóstico y monitoreo en áreas específicas que así lo requieran, sin embargo, estos sensores requieren de energía permanente que es suministrada por baterías químicas (Vargas Sanchez, 2019).

El impacto ambiental de las baterías representa la explotación de recursos, desperdicio y contaminación de agua; para dar una idea del alcance perjudicial de una pila de mercurio, está puede llegar a contaminar hasta 600 mil litros de agua, las pilas de reloj hasta 2 millones de litros de agua.

En las últimas décadas, diferentes alternativas han sido propuestas para generar de forma remota energía aprovechable, con el fin de convertir estos sistemas dependientes en autónomos. Un cosechador de energía es una de las alternativas innovadoras que se han propuesto puesto que estos son capaces de obtener energía de una fuente natural externa, ya sea de la luz del entorno, energía mecánica, energía térmica, solar, eólica, etc. Hasta ahora los sistemas de captura de energía no han logrado abastecer cantidades de potencia como para lograr trabajos grandes. Solo para sensores o algún otro dispositivo intermitente que utilice alta potencia.

La recolección de energía a partir de la vibración ambiental mediante la tecnología MEMS es una de las alternativas más prometedoras. La vibración puede convertirse en energía eléctrica utilizando tres tipos de transductores electromecánicos: electromagnéticos, electrostáticos y piezoeléctricos (Liu, y otros, 2008).

Como se mencionó anteriormente, en este proyecto, se pretende desarrollar un sistema híbrido conformado por un piezoelectrico y un cosechador de energía MEMS. Los generadores de energía piezoeléctricos fabricados con tecnología de sistemas microelectromecánicos (MEMS) pueden obtener energía de fuentes de vibración ambiental de bajo nivel. Los generadores de energía MEMS desarrollados se caracterizan por una

frecuencia de funcionamiento fija/estrecha y una potencia de salida en el nivel de los microvatios (Liu, y otros, 2008).

Con los recientes avances en la tecnología inalámbrica y de sistemas microelectromecánicos (MEMS), los sensores tienen la capacidad de colocarse prácticamente en cualquier lugar. Por ejemplo diversos tipos de sensores han sido desarrollados para ser conectados a redes con el fin de obtener mediciones in-situ, de algunas variables físicas en aplicaciones destinadas al control de procesos en la industria, bio-monitoreo, sistemas de seguridad, comunicación móvil, monitoreo estructural, entre otras (Vargas Sanchez, 2019).

También se han desarrollado diferentes tipos sensores portátiles son usados para el monitoreo de algunos parámetros fisiológicos, como el ritmo cardíaco, temperatura corporal, entre otros. Además, de dispositivos que permitan la detección de enfermedades, como por ejemplo renales, de una manera poco invasiva y autosustentable. Estos dispositivos son de suma importancia debido a que el monitoreo temprano de estos parámetros da la oportunidad de tener una respuesta más rápida a una emergencia, llevar un seguimiento más preciso de los padecimientos, entre muchos beneficios para el usuario.

Otra aplicación actual es un sistema cosechador de energía basado en elementos piezoeléctricos introducidos en estructuras pavimentadas para ser utilizadas en carreteras.

2. Desarrollo

2.1. Sustento teórico y metodológico

A continuación, se presentan los sustentos teóricos utilizados durante la investigación y desarrollo experimental del proyecto PAP de desarrollo de materiales multifuncionales magnetoeléctricos para nano-dispositivos de nueva generación durante el periodo de primavera 2022.

○ ELECTROQUIMICA

La electroquímica es el área de la química que estudia la conversión entre la energía eléctrica y la energía química. Se les denomina procesos electroquímicos a las semirreacciones de oxidación-reducción (redox) en donde la energía liberada por una reacción espontánea se transforma en electricidad, y este proceso se lleva a cabo en la celda electroquímica. En otras palabras, las reacciones químicas que se dan en la interface de un conductor eléctrico, llamado electrodo, el cual puede ser un metal o un semiconductor y un conductor iónico, el electrolito, pudiendo ser una disolución y en algunos casos especiales, un sólido (Bard & Faulkner, 2001). Específicamente, una reacción redox es aquella en la se presenta una transferencia de electrones entre las sustancias presentes, en la figura 2 se muestra un ejemplo de una reacción redox.

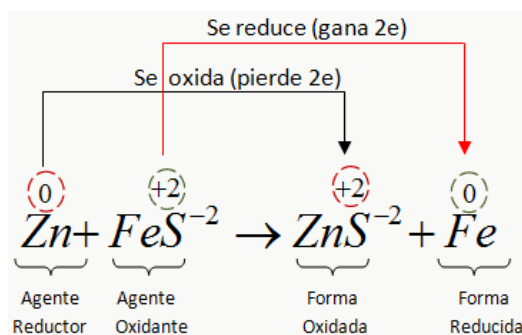


Figura 2. Ejemplo de una reacción redox.

En una celda electroquímica, como la que se muestra en la figura 3, el ánodo es aquel en donde se lleva a cabo la oxidación, es decir, dona electrones, mientras que el cátodo recibe electrones, siendo el que se reduce. La corriente fluirá del ánodo al cátodo debido a la (Bard A. J., 2001) (Bard A. J., 2001) (Bard & Faulkner, 2001) (Bard A. J., 2001) (Bard A. J., 2001) diferencia de potencial entre los dos electrodos. El potencial de la celda depende de la naturaleza de los electrodos y iones, así como de la concentración del electrolito y de la temperatura (Ibero, 2005).

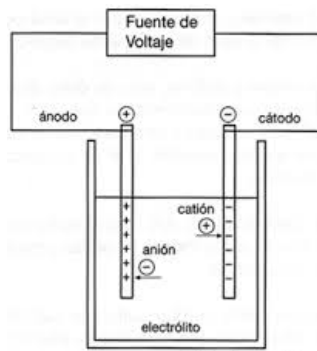


Figura 3. Celda electroquímica de dos electrodos.

○ ELECTRODEPOSICIÓN A TRES ELECTRODOS

De la misma manera, existen celdas electroquímicas de 3 electrodos. Estas requieren de un electrodo de trabajo (ET) donde ocurre la reacción de interés, de un electrodo de referencia (ER), el cual tiene un potencial fijo y no circula corriente a través de este durante las medidas, por lo que cualquier cambio en el potencial aplicado a la celda modifica la polarización del electrodo de trabajo. Llevando el electrodo a potenciales más negativos, se aumenta la energía de los electrones en él, alcanzando así un nivel suficientemente alto para transferirse a estados electrónicos vacantes de especies en el electrolito (Bard A. J., 2001). En ese caso, aparece un flujo de electrones desde el electrodo a la solución (corriente de reducción). Por último, el contraelectrodo que es donde ocurre el proceso de deposición. De igual manera, se emplea para hacer conexión eléctrica al electrolito, para de esta manera poder aplicar una corriente al electrodo de trabajo. Los tres electrodos se encuentran sumergidos en la solución electrolítica que completa el circuito, como se muestra en el arreglo representado en la figura 4.

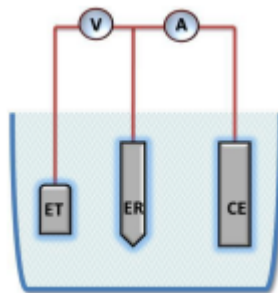


Figura 4. Celda electroquímica de tres electrodos

○ CONTROL DEL PH

Debido a que el pH del electrolito juega un papel muy importante durante el proceso de electrodeposición de Galfenol, es necesario mantener un control de este durante las pruebas experimentales. Esto se debe a que su valor tiene una relación directa con a la estabilidad de los iones Ga, la tasa de deposición de los iones de Fe y Ga, la evolución del hidrógeno y formación de hidróxidos, la composición final de la película y otras importantes variables (H.G. Ng, y otros, 2015).

Para fines de este proyecto, la medición del pH se monitoreó a través del electrodo de pH inalámbrico de campo HALO serie HI10482 (figura 5). Está conformado por un cuerpo durable de PEI y un bulbo esférico de detección. El PEI es un plástico de alta calidad que es químicamente resistente a muchos productos químicos agresivos. Este brinda protección alrededor de la punta de vidrio esférica para minimizar la rotura debido a golpes accidentales o caída del electrodo.

La lectura se hace de manera inalámbrica. El electrodo de pH se conecta a la aplicación de Hanna Lab con un dispositivo Apple o Android compatible a través de Bluetooth. Las mediciones pueden visualizarse en la pantalla, con datos tabulados o como un gráfico en

función del tiempo. El gráfico puede ser panorámico y ampliado con la tecnología de zoom táctil para mejorar la visualización (HANNA Instruments, s.f.).



Figura 5. Electrodo de pH inalámbrico de campo HALO.

Antes de utilizar este dispositivo, es necesario realizar una calibración para que las mediciones sean lo más precisas posible. Este dispositivo permite la calibración de pH en hasta cinco puntos y se realiza con soluciones Buffer con un pH específico, desde un pH de 1 hasta uno de 10. También podrías mencionar el rango de pH. Este procedimiento se debe de realizar cada cierto tiempo, aproximadamente cada tres o cuatro semanas, para que la efectividad de este no disminuya. Además, antes y después de haber realizado cualquier medición, es necesario limpiar el electrodo con agua destilada secando con ayuda de una Kintex con mucho cuidado (HANNA Instruments, s.f.).

○ ELECTRODEPOSICIÓN EN MODO PULSADO

Según Babu y otros, las propiedades físicas de los depósitos realizados por electroquímica, como la morfología, la uniformidad, la compacidad y la adherencia al sustrato, se controlan mediante la aplicación adecuada de pulsos de ciclo de trabajo deseado. Estos efectos se deben a la influencia de los pulsos periódicos en la concentración de la especie iónica que oscila con el tiempo en el electrodo y en el transporte de masa que controla la cinética de

la reacción (Babu , Rajalakshmi , Dhanasekaran, & Ramasamy, 1991). El modo pulsado resulta en procesos más controlados y deposiciones más uniformes (H.G. Ng, y otros, 2015).

Es por ello, que durante el desarrollo de este proyecto se hizo uso de dicha técnica. Para ello, se requiere de un potencial de deposición "encendido" E_1 y un potencial "apagado" E_2 que se aplican durante t_1 y t_2 , respectivamente. Durante el potencial "off" E_2 la corriente es casi nula. Esto permite compensar eficazmente los gradientes de pH y de concentración de los iones metálicos (H.G. Ng, y otros, 2015). Además, cada ciclo corresponde a la suma de t_1 y t_2 , es decir, a la aplicación de E_1 y E_2 . El número de ciclos es determinado según el tiempo total de deposición que se requiere.

Un depósito denso de aleación Fe-Ga con bajo contenido de oxígeno sólo puede lograrse cuando la formación y la redisolución del hidróxido se eliminan. En el estudio de H.G. Ng y otros realizado en 2015, en el que se implementó el modo pulsado para la deposición de Galfenol, cada ciclo condujo a la deposición de la aleación Fe-Ga en paralelo con la precipitación del hidróxido de galio durante la aplicación del potencial de avance E_1 y la redisolución del hidróxido durante el paso de potencial inverso E_2 (H.G. Ng, y otros, 2015).

○ GRÁFICA CORRIENTE Vs TIEMPO

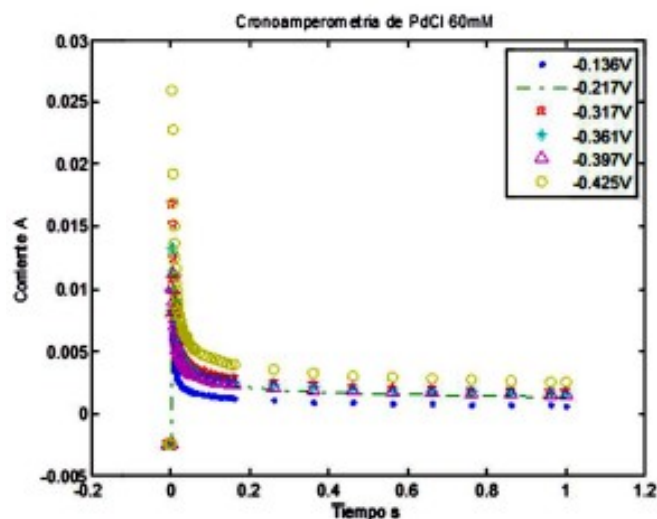
La densidad de corriente utilizada durante la deposición desempeña un papel importante en la determinación del tamaño de los cristalitos y de los defectos del revestimiento y, por tanto, de la microestructura de este. Según Augustin y otros, la cobertura del recubrimiento aumentó al aumentar la densidad de corriente. A mayores densidades de corriente, el flujo de iones hacia el cátodo es alto y esto promueve una mayor nucleación y una mejor cobertura de la superficie (Augustin , Huilgol, Udupa, & Bhat K , 2016).

De igual manera, se presenta una reducción del tamaño cristalino con el aumento de la densidad de corriente. En el estudio de Augustin y otros explican que la disminución del tamaño cristalino que se da con el aumento de las densidades de corriente podría deberse

al aumento de la tasa de nucleación (Augustin , Huilgol, Udupa, & Bhat K , 2016). Es por ello por lo que damos cuenta que el control de la corriente durante el proceso es de alta importancia. La gráfica de corriente vs tiempo nos proporciona información sobre el buen funcionamiento del proceso de electrodeposición (figura 6). Cuando se aplica el potencial a través de los electrodos, se observa una corriente máxima que disminuye gradualmente en pocos segundos. Si se puede observar el rampeado, es decir, que la corriente sube a un máximo y baja hasta estabilizarse, podemos confirmar que efectivamente está pasando voltaje y que el proceso de electrodeposición está ocurriendo efectivamente (Ahmad, y otros, 2016).

Cuando la corriente se vuelve constante, significa que los iones se están depositando correctamente en el electrodo de trabajo (Ahmad, y otros, 2016). Es importante mencionar que el área bajo la curva de esta gráfica corresponde a la carga depositada.

Al mismo tiempo, de la gráfica de corriente Vs tiempo podemos notar el comportamiento del voltaje en relación con la corriente, y dar cuenta que estos son directamente proporcionales, es decir, a mayor voltaje, será mayor la corriente aplicada al sistema.



*Figura 6. Gráfica de cronoamperometría simple.
(Torres , Rosales Rivera, & Gómez Peña, 2012)*

A continuación, se describen las técnicas utilizadas para el análisis del efecto los diferentes parámetros en la electrodeposición de Galfenol y la caracterización de las muestras obtenidas a lo largo del proyecto.

○ SEM

El SEM es un instrumento utilizado para la observación y caracterización de sólidos orgánicos e inorgánicos imperceptibles en un Microscopio Óptico. Las mediciones se realizan al incidir un haz de electrones hacia la muestra en vacío, como muestra la imagen 7, mientras que el haz es condensado por un sistema electroóptico compuesto por lentes condensadoras, lentes objetivo, una bobina de barrido y una rejilla de apertura variante hasta llegar a la muestra. Al interactuar los electrones con la muestra, diferentes respuestas se pueden producir. Por esto, el sistema está equipado generalmente con 3 diferentes tipos de detectores:

- Detector de Electrones Secundarios (SE): para obtener imágenes de alta resolución
- Detector de Electrones Retro dispersados (BE): para obtener imágenes de composición y topografía de la superficie
- Espectrómetro de Energía Dispersiva (EDS): recolecta los Rayos X generados por la muestra para realizar análisis semicuantitativo y de distribución de elementos presentes en la muestra.

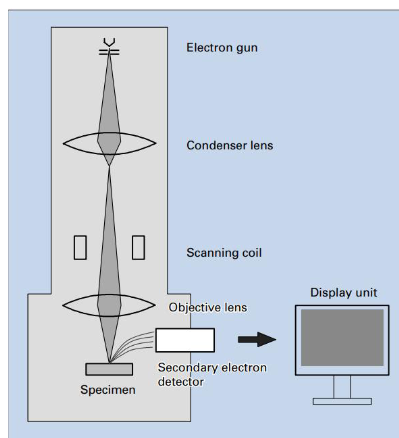


Figura 7. Sistema electroóptico del SEM.

○ AFM

El AFM es utilizado para caracterizar principalmente la rugosidad y topografía de la superficie de una muestra plana. Su principio de funcionamiento es la medición de las fuerzas de interacción (Van der Waals y electrostáticas) entre la punta de un cantiléver y la superficie de la muestra que causan una deflexión en el cantiléver y son medidas con un sensor de distancia de resolución nanométrica. El cantiléver se mueve con forma de barrido sobre un área de hasta $90 \times 90 \mu\text{m}$ (figura 8). Las mediciones pueden realizarse en modo contacto, no contacto o “tapping”, según la resolución u objetivo que se desee. Las imágenes obtenidas son una representación gráfica de la fricción o potencial con coloración que simula la rugosidad y topografía de la superficie.

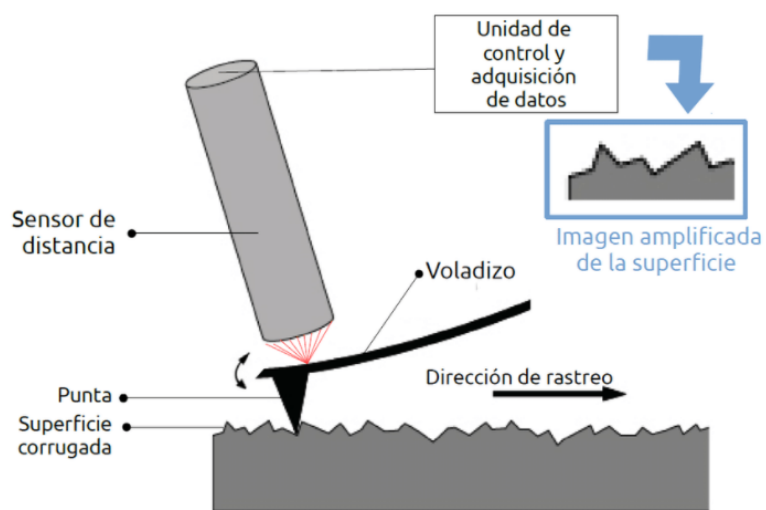


Figura 8. Componentes y principios principales del AFM.

○ XRD

El XRD es la única técnica que revela información estructural de los materiales, como su composición química a través del acomodo de los átomos, su estructura cristalina, el tamaño de los cristales, cuantificar las fases presentes, la deformación, y el espesor de las

capas. Esta se puede aprovechar en una amplia gama de materiales, desde polvos y sólidos hasta las películas delgadas y nanomateriales (Malvern Panalytical, s.f.).

Durante un análisis XRD, se incide un haz de rayos X hacia la muestra, como muestra la figura 9. La intensidad de dispersión generada por ello se mide en función de la dirección de emisión (salida). El ángulo entre las direcciones del haz emitido y el haz recibido se denomina 2θ (Dos Santos, 2020). El ángulo está en términos de 2 theta porque se tienen dos ángulos; con el que incide y el que se detecta.

Es el fenómeno de difracción el que permite conocer el acomodo de los átomos y, por ende, la estructura cristalina de la muestra. Del análisis XRD, a altos voltajes, se pretende obtener la radiación característica, la cual corresponde a la radiación de los rayos x. Esto para conocer los picos de la radiación característica. Y así, graficar la intensidad de dichos picos en función del ángulo medido (2θ). A partir de esto se encontrarán los planos atómicos cristalinos. Cada uno de los picos representa un plano cristalino, según sus índices de Miller. Además, el área bajo la curva de los mismos corresponde a las celdas unitarias que están ordenadas en cada dirección.

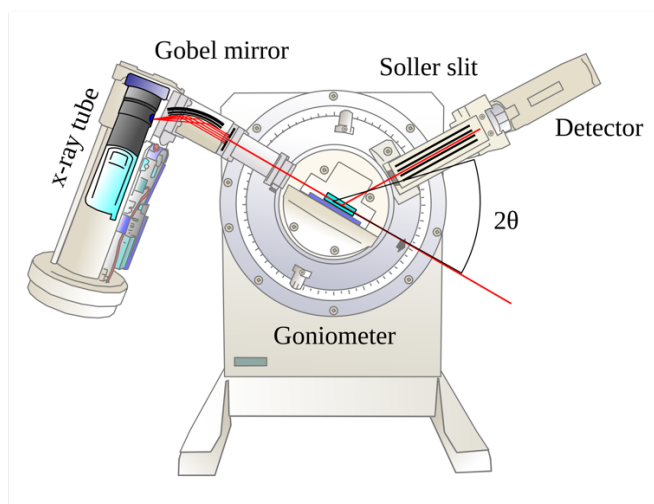


Figura 9. Difractómetro XRD.

2.2. Planeación y seguimiento del proyecto

- Descripción del proyecto

En esta investigación se trabajó con la parte magnética del sistema nanoestructurado con propiedades magnéticas del cosechador MME o ME, por lo que se comenzó indagando en la literatura sobre materiales magnetoelásticos, electrodeposición química y lo necesario para empezar a experimentar, además de leer artículos de investigación sobre el método de síntesis de interés y específicamente de la síntesis de películas delgadas de Galfenol con este método.

Antes de sintetizar la nanoestructura magnetoelástica, primero se hicieron electrodeposiciones de un metal puro, para las cuales se escogió níquel por ser un compuesto afable para la deposición y de lenta oxidación. La deposición de la película de níquel se hizo con el objetivo de comprender, adaptarse y familiarizarse con el montaje experimental y funcionamiento del método de electrodeposición a tres electrodos, y confirmar el correcto uso y conexión de la fuente.

Por ello, para arrancar los primeros experimentos de electrodeposiciones de un solo metal a tres electrodos, con un electrolito como la fuente de iones metálicos que además contenían compuestos para aumentar conductividad del baño electrolítico, mejorar corrosión del ánodo, mantener el pH y prevenir oxidación del baño, se tomaron en cuenta diferentes parámetros que influyen en el proceso de electrodeposición, como la concentración del compuesto, fuente de iones metálicos, voltaje aplicado, fuente de voltaje, pH, electrodos, composición del electrolito y el tiempo de deposición.

Para poder seguir con deposiciones de la aleación FeGa se optaron por diferentes recetas de electrolitos, estos variaban en concentración de los elementos a depositar, así como la cantidad y naturaleza de los aditivos; esto para experimentar diferentes formas de deposiciones y poder definir las más propicias para la aleación del Galfenol. De igual

manera, se fueron modificando parámetros como el valor del pH, el potencial, el tiempo y la corriente de entrada para así encontrar la manera más óptima de deposición de Galfenol, la cual nos resulte en una película homogénea de la aleación de interés con la composición deseada (Fe:80%, Ga:20%).

Algunas de las deposiciones obtenidas se caracterizaron en el SEM, para confirmar la presencia de depósito y realizar un análisis EDS para conocer la composición de los depósitos. De igual manera, a partir de esta técnica de caracterización, se estudió la morfología y uniformidad del depósito, además de medir el espesor de la película. Además, en algunos casos, las muestras se caracterizaron en el AFM para examinar la topografía y el espesor de las mismas, confirmar que había depósito y poder ver la uniformidad del mismo.

Con el apoyo del Dr. Armando Encinas del centro de investigación IPICyT, se enviaron las muestras con resultados más relevantes, respecto a los resultados del análisis EDS, para caracterizarlas en el XRD y, de esta manera, confirmar la estequiometría de las mismas.

- Plan de trabajo

El presente proyecto se realizó en el semestre de otoño 2022, de manera presencial, en los laboratorios de síntesis química y microscopías del ITESO. Asimismo, se llevaron a cabo, de manera virtual, reuniones de equipo y asesorías semanales con la profesora Yenni Guadalupe Velázquez. Las actividades realizadas, el tiempo invertido en cada una de las etapas y los recursos empleados se presentan en la tabla 1 a continuación.

Tabla 1. Cronograma general de actividades

Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Actividad																
Revisión de bibliografía	Y B	Y B	Y B	Y B	Y B	Y B	Y B	Y B	Y B	Y B	Y B	Y B	Y B	Y B	Y B	Y B
Electrodeposición de un solo metal a 3 electrodos.			P t E C D K O	Pt E C D F 22												
Electrodeposición Galfenol a 3 electrodos.						Pt E C D F 22	Pt E C Z F 22	Pt E C Z F 22	Pt E C Z F 22	Pt E C Z F 22	Pt E C Z F 22	Pt E C Z F 22 I M	Pt E C Z F 22 I M	Pt E C Z F 22		
Caracterización deposiciones					S A				S		S		S		S	
Entrega previo reporte								Q B					Q B			
Entregables de habilidades adquiridas																
Reporte final								Q B				Q B	Q B	Q B	Q B	Q B
Presentación PAP																

																		Y B Q
Recursos Humanos: Dra. Yenni Guadalupe Velázquez (Y), Técnico Guillermo González (G). Técnico Óscar Charles (O).																		
Recursos Materiales: Bibliografía y materiales de consulta (B), Electrodo de Pt (EP), Electrodo de Cu (EC). Electrodo Plata - Plata Cloruro (D), Electrodo de platino (Pt), Electrodo Plata-Cloruro de Plata saturado (Z), Resultados cualitativos y cuantitativos (Q), Membrana (M), Celda impresión 3D (I)																		
Recursos Tecnológicos: Microscopio Óptico de Barrido (S), Fuente Keithley 2200-30-5 (F22), Fuente Keithley 2410 (K) Microscopio de Fuerza Atómica (A). Espectroscopia de fotoelectrones emitida por rayos x (X)																		

- Desarrollo de propuesta de mejora

En esta sección se presenta evidencia del trabajo realizado durante las 16 semanas del proyecto de aplicación profesional. El trabajo y la experimentación fueron realizados presencialmente en los laboratorios de ITESO con los equipos de AFM de Agilent Technologies (Figura 10), SEM Jeol JSM-6010 (Figura 11).

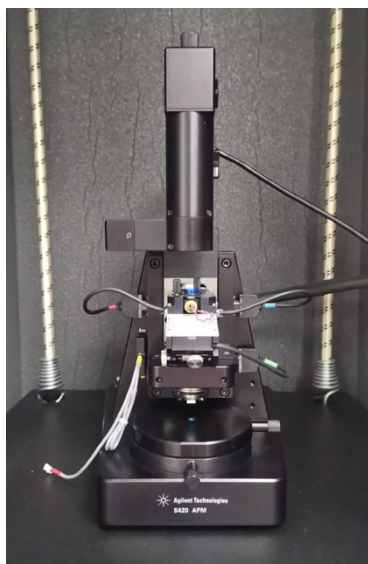


Figura 10. AFM.



Figura 11. SEM.

La preparación de los electrolitos y el montaje para la celda electroquímica fue realizada en el laboratorio de síntesis química. Un vaso de precipitados fue utilizado como celda, las fuentes de poder Keithley funcionaron como potenciostato, los electrodos fueron fijados por caimanes haciendo contacto y conectados a la fuente, y los electrodos fueron sujetos en un soporte universal y acercados entre ellos con cinta, tal como se muestra en la figura 12.



Figura 12. Montaje experimental de los electrodos.

Durante las pruebas experimentales, específicamente en las electrodeposiciones realizadas, se utilizó una lámina de cobre (Cu) como contraelectrodo y un alambre de platino (Pt) como electrodo de trabajo. Se implementaron dos electrodos de referencia, un electrodo de Ag/AgCl y un electrodo de Ag/AgCl saturado, ambos se muestran en la figura 13 y 14, respectivamente. Este último fue el que se terminó implementando a lo largo del proyecto debido a que este implica un mejor control del potencial durante el proceso y una medición más precisa de la corriente. Los electrodos Ag/AgCl son de naturaleza no polarizable, lo que permite que las cargas crucen fácilmente la interfaz electrodo-electrolito y proporciona una transmisión precisa y clara de los potenciales (Healthcare, 2022). Está formado por un hilo de Ag sobre el cual se deposita AgCl, generalmente por vía electroquímica, en una solución de NaCl o KCl, en la cual el hilo de Ag actúa como ánodo (Ávila & Genescá, 1995)



Figura 13. Electrodo de Ag/AgCl.



Figura 14. Electrodo de Ag/AgCl saturado.

La conexión de los electrodos y la fuente se realizó como se muestra en la figura 15. El electrodo de trabajo en la terminal negativa. Mientras que el electrodo de referencia y el contraelectrodo a la terminal positiva, conectados de manera paralela, de la fuente Keithley 2200.



Figura 15. Conexión fuente- electrodos.

Las muestras resultantes se almacenaron en bomba de vacío para evitar su oxidación y contaminación, como se muestra en la figura 16. Puesto que, en las pruebas experimentales, se comprobó que las muestras duran en buenas condiciones una semana o más cuando se encuentran almacenadas en vacío. Al contrario, cuando están expuestas al ambiente al paso de dos días se oxidan con facilidad, dañando la película.

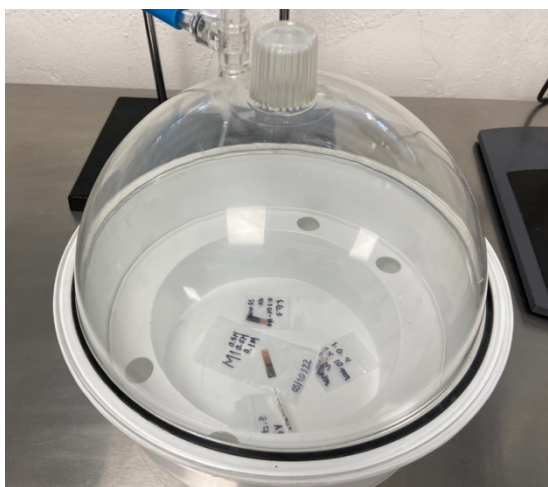


Figura 16. Almacenamiento de muestras en bomba de vacío.

3. Resultados del trabajo profesional

Como se mencionó en la sección 2.1 Sustento teórico y metodológico, para una deposición por electrodeposición se requiere de un electrolito. Este es una sustancia que al disolverse en agua, da lugar a la formación de iones (Argentina, s.f.), los cuales se depositarán en el contraelectrodo. Las concentraciones de los reactivos necesarias para la preparación de los electrolitos empleados en la experimentación de este trabajo se describen en la tabla 2. A continuación, se describe el papel de los reactivos utilizados en las diferentes recetas que se presentaron en dicha tabla.

Durante este proceso, una parte de la corriente es consumida para formar hidrógeno, lo cual provoca que disminuya la eficiencia de la corriente, aumente el pH y afecta la cinética de reducción en el sistema. El ácido bórico (H_3BO_3) incrementa el rango de potencial necesario sin formar hidróxido, disminuye el aumento de pH en la superficie del cátodo y

mejora la apariencia de la película depositada y disminuye la fragilidad del depósito (Torabinejad, 2016).

Por otro lado, se utiliza citrato de sodio (Cit-Na) como agente complejante de los iones de Fe y Ga. La estabilidad de estos iones decrece, y al añadir citrato de Na al baño de sulfatos, el contenido de iones metálicos en el cátodo aumenta, sin embargo, la densidad de corriente decrece significativamente. Además, resultados indican aumento de pH en la superficie del cátodo, y es en este momento que el citrato se descompone para provisionar suficientes portones y mantener una buena eficiencia catódica (Torabinejad, 2016). Cuando no se quiere formación de hidróxido, la cantidad de Ga y/o Fe en el depósito disminuye y se quedan los iones Fe^{2+} y Ga^{3+} en la disolución. El efecto complejante de los iones de citrato cambia el potencial de reducción de la aleación de Fe-Ga al potencial más negativo e incrementa la corriente de difusión (Torabinejad, 2016). El Cit-Na como agente complejante producía depósitos metálicos brillantes.

Asimismo, el ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) previene la oxidación de los iones de Fe^{2+} , Fe^{3+} y Ga^{3+} durante el proceso de electrodeposición (Torabinejad, 2016).

Tabla 2. Electrolitos utilizados; condiciones y concentraciones empleadas.

Electrolito	Electrodeposición	Concentraciones	PH Utilizados	Observaciones
N1	Electrodeposición de níquel.	0.5 M H_3BO_3	No se midió	Electrolito de color verde. Con este, se corroboró el buen uso y conexión de la fuente Keithley 2200. Además, de que ayudo a familiarizarnos con la técnica a tres electrodos.
		1 M NiSO_4		
G1	Electrodeposición de Galfenol.	0.03 M FeSO_4	3.28, 3.55 y 3.94	Con este electrolito hubo depósitos en 2.5 V por 30 min y una hora. Se obtuvieron depósitos uniformes, en
		0.5 M H_3BO_3		
		0.15 Cit-Na		

		0.04 M $C_6H_8O_6$		toda el área de depósito y por ambos lados de color gris oscuro.
		0.06 M $Ga_2(SO_4)_3$		Es importante mencionar, que solo en el caso de pH 3.28 por una hora. Obteniendo una composición de 60% Ga y 39.81% Fe.
G2	Electrodeposición de Galfenol.	0.003 M $FeSO_4$	3.15 y 4.18	Se decidió disminuir la cantidad de $FeSO_4$ con el fin de aumentar la proporción de iones metálicos $Ga^{3+}:Fe^{2+}$ debido a que, según la bibliografía, esto significaría un aumento en la reactividad de los iones Ga^{3+} en relación con los iones Fe^{2+} en el sistema de electrolito de codeposición. Puesto que se supone que la reducción de la concentración de iones Fe^{2+} y el aumento del pH dan lugar a un aumento significativo del contenido de galio en el depósito (H.G. Ng, y otros, 2015). Esto se debe a que el Fe^{2+} puede ser acomplejado por un solo ion sulfato, pero el Ga^{3+} necesita tres sulfatos por cada dos iones de Ga^{3+} . Esto quiere decir que el Fe^{2+} se deposita con mayor facilidad que el Ga^{3+} (Kay , Hoyd-Gigg, Popov, Record, & Desmulliez, sf)
		0.5 M H_3BO_3		
		0.15 Cit-Na		
		0.04 M $C_6H_8O_6$		
		0.06 M $Ga_2(SO_4)_3$		
G3		0.1 M Cit-Na	2.76	El ion complejante del citrato tiene la misma valencia que el Ga^{3+} .

	Electrodeposición de Galfenol.	0.04 M FeSO_4		Simultáneamente, este inhibe la oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+}. La formación de Fe^{3+} provoca la formación de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ que no es deseable durante la deposición (Kay , Hoyd-Gigg, Popov, Record, & Desmulliez, sf) Para este electrolito, solo se confirmó la presencia de iones Fe en los depósitos obtenidos.
		0.05 M $\text{Ga}_2(\text{SO}_4)_3$		
G4	Electrodeposición de Galfenol.	0.2 M Cit-Na	2.30, 2.48, 5.15, 5.21 y 5.24	Según la bibliografía, al hacer que la concentración de Ga^{3+} sea el doble de la concentración de sulfato de galio, la relación de formulación del baño de $\text{Fe}^{2+}:\text{Ga}^{3+}$ será de 1:4 para este electrolito (Kay , Hoyd-Gigg, Popov, Record, & Desmulliez, sf). Por ello, se aumentó la concentración de Cit-Na, para observar el efecto de este en la deposición de la aleación de interés. Este es el electrolito que mejores resultados se obtuvieron, por lo que se continuó trabajando con este variando parámetros como el pH, el potencial y el tiempo de deposición para poder concluir bajo cuáles resulta la apariencia y composición deseada (Fe:80%, Ga:20%). En todos los casos se confirmó la presencia de iones Ga y Fe, y la correcta codeposición. Los resultados
		0.04 M FeSO_4		
		0.05 M $\text{Ga}_2(\text{SO}_4)_3$		

				obtenidos se presentarán a continuación.
--	--	--	--	--

Posterior a la preparación de los electrolitos se procedió a llevar a cabo las electrodeposiciones variando los parámetros del tiempo, distancia entre electrodos, valores de pH, corriente y potencial.

Se fue variando el valor del pH, en los diferentes casos, debido a que existen pocas combinaciones de pH y potencial en las que los iones de Ga permanecen estables en soluciones acuosas. Además, otro problema que nos enfrentamos fue la formación de hidróxidos y óxido de galio en el electrolito. Por ello, se estudió el efecto del pH en dicho problema. De igual manera, durante las pruebas experimentales, se dedujo que, a menor valor de pH, se disminuye la velocidad de depósito. Por ello, se requerirá de un mayor potencial y/o mayor tiempo de deposición.

Asimismo, se fue variando el potencial. Puesto que cada electrolito codeposita a distintos valores. Además de que se confirmó un efecto directo del mismo en la apariencia, morfología y composición de la aleación. Con las pruebas experimentales, se concluyó que el Fe se deposita a menores potenciales que el Ga, por lo que se puede esperar que la tasa de deposición del Fe sea mucho mayor en comparación con la del Ga.

La coloración y apariencia, a simple vista, de los depósitos en los que se logró depositar Galfenol correctamente era más oscura y opaca, en comparación a cuando no se depositaban iones Ga, dando como resultado una película color gris oscuro. En la figura 17 se muestra una película sin presencia de Ga y en la figura 18 una película de Galfenol. Lo mencionado anteriormente, se puede confirmar con dichas imágenes.



Figura 17. Película sin presencia de Ga.



Figura 18. Película de Galfenol.

Entre mayor era el tiempo de deposición, la muestra se veía más oscura, pero menos uniforme, como se puede observar en la figura 19 y en la 20. Ambas muestras fueron depositadas bajo el mismo potencial, utilizando el mismo electrolito G4.



Figura 19. Muestra realizada por 5 min.



Figura 20. Muestra realizada por 40 min.

De las diferentes películas se obtuvieron micrografías para poder analizar la morfología de cada una de ellas.

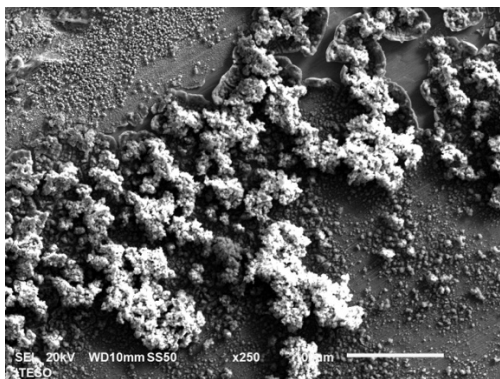


Figura 21, Muestra realizada por electrodeposición en modo pulsado con 4 V durante 30 min.

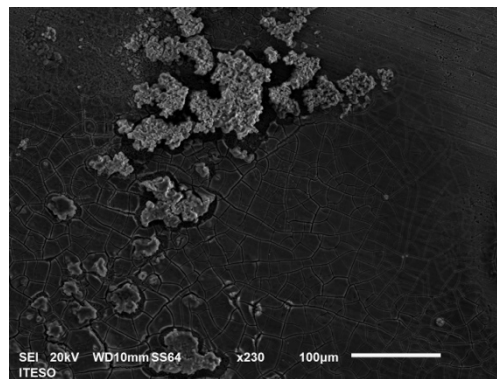


Figura 22, Muestra realizada por electrodeposición con 3.9 V durante 30 min.

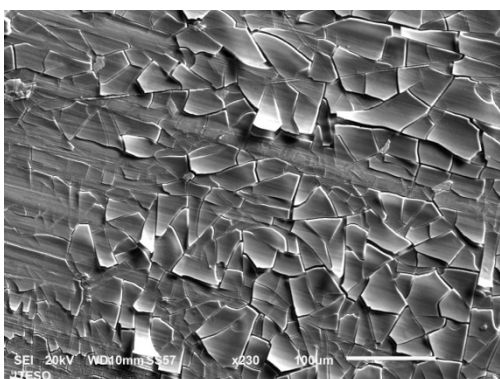


Figura 23, Muestra realizada por electrodeposición en modo pulsado con 3.9 V por 40 min. .

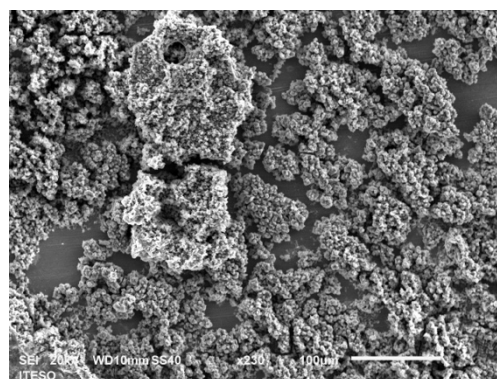


Figura 24, Muestra realizada por electrodeposición con 3.9 V por 10 min. .

De las figuras 21, 23 y 24 podemos observar que cuando se lograba depositar Galfenol su morfología parecía ser de aglomeraciones superficiales en donde el depósito es uniforme. Por otro lado, en la figura 22, la cual corresponde a un depósito de mayor tiempo, notamos que se tenía un problema de adherencia. Esto quiere decir que a mayor tiempo de deposición, menor adherencia en el depósito. Lo cual se podía confirmar también a simple vista, puesto que al cortar las muestras para montaje del SEM, se desprendía parte del depósito.

Además, haciendo uso del microscopio SEM, se midió el espesor de dos muestras para comparar la uniformidad del crecimiento del depósito con relación al tiempo de deposición.



Figura 25, Muestra realizada por electrodeposición con 3.9 V durante 5 min.

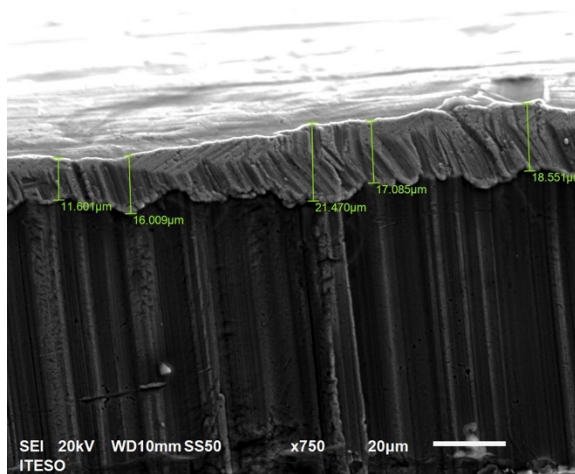


Figura 26, Muestra realizada por electrodeposición con 3.9 V durante 20 min.

De las figuras 25 y 26 podemos notar que a menor tiempo (5 min) se obtiene un espesor uniforme y constante a lo largo del depósito. Por el contrario, cuando el depósito se realiza por un tiempo mayor (20 min) el espesor varía a lo largo del mismo, disminuyendo su uniformidad y homogeneidad.

A continuación, de la tabla 3 a la 8, se presentan los resultados cuantitativos más contundentes para las muestras resultantes en ambos casos. Las cuales fueron caracterización aprovechando el SEM, específicamente el análisis EDS, composición de estas.

Tabla 3. Comparación de potencial y composición resultante.

Muestra	Fecha	Electrolito	Potencial [V]	% Fe	% Ga
1	13/09/22	G1	2.5	39.86	60.14
8	20/10/22	G4	3.5	88.99	11.01
9	20/10/22	G4	3.8	91.25	8.74
10	20/10/22	G4	3.9	80.69	19.3
11	20/10/22	G4	4	82.36	17.64
12	20/10/22	G4	4.5	90.18	9.82

Específicamente para el electrolito G4, se observó un cambio significativo en el porcentaje de ambos iones metálicos al utilizar potenciales de pocos volts de diferencias (un volt o hasta décimas de volt de diferencia). Además, de la tabla 3, podemos concluir que la muestra 10 es aquella que tiene la composición más aproximada a la que se desea obtener en este proyecto (Fe:80%, Ga:20%). Por lo que, se infiere que para dicho electrolito se debe de trabajar bajo un potencial de 3.9 V.

Tabla 4. Comparación de potencial, pH y composición resultante.

Muestra	Fecha	Electrolito	pH	Potencial [V]	% Fe	% Ga
4	13/10/22	G4	2.3	4	82.87	17.13
5	13/10/22	G4	2.3	5	69.45	30.55
13	25/10/22	G4	2.48	4	94.45	5.54
14	25/10/22	G4	2.48	4.5	89.28	10.72
15	25/10/22	G4	2.48	5	89.9	10.6
2	06/10/22	G4	5.15	4	78.31	21.68
3	06/10/22	G1	5.15	5	71.62	28.37
11	20/10/22	G4	5.24	4	82.36	17.64
12	20/10/22	G4	5.24	4.5	90.18	9.82

De la tabla 4 se concluye que para el electrolito G4, a bajos valores de pH, hay una notable disminución en el porcentaje de iones Ga en la muestra. Esto ocurre específicamente a potenciales relativamente bajos (4 V y 4.5 V). Por lo que se infiere que se requiere de un alto voltaje (5 V) para obtener el porcentaje de Ga deseado bajo pH. Es importante recalcar que, para los valores de pH iguales o próximos a 5.24, sucede el inverso. A potenciales altos, es menor la proporción de Ga en el depósito (muestra 12), obteniendo mayor porcentaje de iones Ga en potenciales alrededor de 4 V (muestra 11).

Lo mencionado en el párrafo anterior, nos lleva a la conclusión de que efectivamente hay una importante relación entre el pH y el potencial. Para pH bajos, próximos a 2.3, el potencial que resultara en la composición deseada debe de ser muy próximo a 5 V. Mientras que, para valores de pH de aproximadamente 5.2, requerirán de potenciales muy próximos a 4 V. Es por ello, como muestra la tabla 3, cuando se trabajó con un potencial de 3.9 V a 5.24 se logró 80.69 % Fe y 19.3 % Ga, casi nuestra composición de interés para este proyecto.

Tabla 5. Potenciales utilizados y valores de pH correspondientes, y concentración resultante.

Muestra	Fecha	Electrolito	pH	Potencial [V]	% Fe	% Ga	% O
13	25/10/22	G4	2.48	4	51.71	3.03	45.26
14	25/10/22	G4	2.48	4.5	67.5	8.1	24.4
11	20/10/22	G4	5.24	4	75.64	16.2	8.16
12	20/10/22	G4	5.24	4.5	69.66	7.58	22.76

Para el caso específico del electrolito G4, como muestra la tabla 5, podemos inferir que, a bajos valores de pH, mayor era la presencia de oxígeno en el depósito. Esto se podría traducir a una mayor formación de hidróxidos y óxidos de galio durante el proceso. Lo mismo ocurre a altos pH utilizando un alto voltaje.

La oxidación del electrolito se puede notar en el cambio de coloración de este, como se muestra en la figura 27. Puesto que inicialmente tenía un color amarillo casi imperceptible, que, al ir realizando las diferentes electrodeposiciones y con el paso del tiempo, se tornaba de una tonalidad amarillo fuerte.

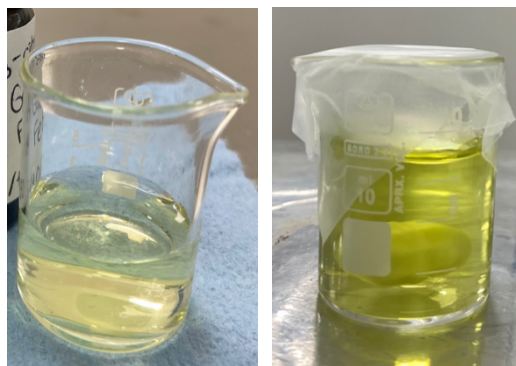


Figura 27. a) Electrolito G4 inicialmente. b) Electrolito G4 después de electrodeposiciones.

Tabla 6. Comparación modo continuo y pulsado.

Muestra	Fecha	Electrolito	Modo	Potencial [V]	% Fe	% Ga
11	20/10/22	G4	Continuo	4	82.36	17.64
3	06/10/22	G4	Continuo	5	71.62	28.37
6	18/10/22	G4	Pulsado	4	82.87	17.13
7	18/10/22	G4	Pulsado	5	69.45	30.55

Como se muestra en la tabla 6, en términos de composición no hay una diferencia determinante. Puesto que, en ambos casos, la composición de las muestras es bastante próxima para el mismo caso del potencial aplicado. Por ejemplo, las muestras 11 y 6, las cuales se realizaron a 4 V por 30 min, pero en diferente modo, tienen una composición relativamente igual, 82.36 % Fe y 82.87 % Fe, respectivamente.

Aunque, durante las pruebas experimentales, se demostró que el modo pulsado ayuda a que el proceso electroquímico sea más controlado, lo que resulta en películas más homogéneas. Según la bibliografía consultada, se logra un contenido de oxígeno significativamente bajo mediante el uso de pulsos (H.G. Ng, y otros, 2015). Esto no ocurre en el caso de este proyecto, ya que como se puede inferir en la tabla 7, hay mayor presencia de oxígeno en el caso de las muestras 6 y 7 realizadas por modo pulsado.

Tabla 7. Comparación modo continuo y pulsado para efecto de oxidación del depósito.

Muestra	Fecha	Electrolito	Modo	Potencial [V]	% Fe	% Ga	% O
11	20/10/22	G4	Continuo	4	73.06	20.23	6.71
3	06/10/22	G4	Continuo	5	50.39	36.64	12.97
6	18/10/22	G4	Pulsado	4	58.17	12.03	29.8
7	18/10/22	G4	Pulsado	5	37.33	16.42	46.25

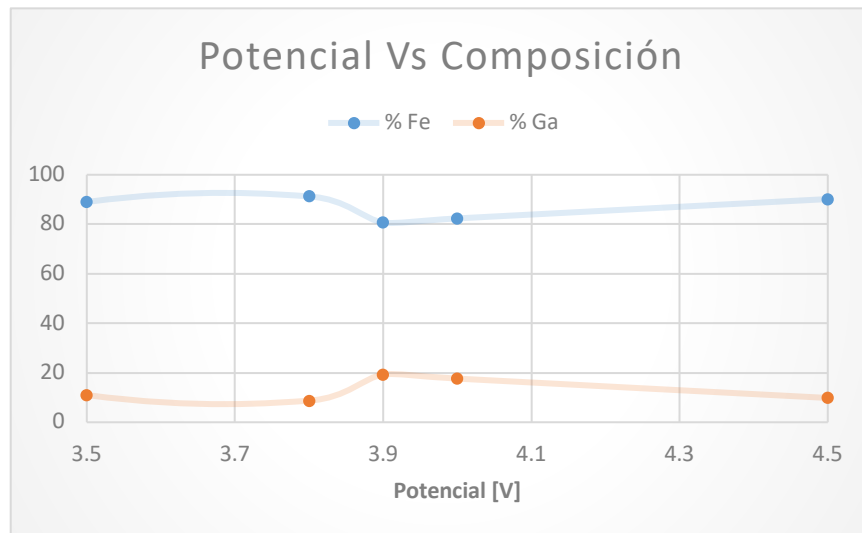
La técnica de pulsos se llevó a cabo en la fuente Keithley 2200 con potenciales de depósito (E_1) en el rango de 4 V y 5 V con un tiempo t_1 igual a 5 s. En todos los casos, el potencial “off” (E_2) y el tiempo aplicado t_2 fue el mismo, 0.9 V y 3.9 s. Para el caso de la muestra 6, se realizaron 203 ciclos, es decir, un tiempo total de deposición de 30 min. Por el contrario, para la muestra 7, se llevaron a cabo 68 ciclos lo que equivale a 10 min.

Tabla 8. Comparación del tiempo de deposición y composición resultante.

Electrolito	Tiempo [min]	% Fe	% Ga
G1	5	42.20	57.80
G4	10	82.85	23.93
G4	20	94.98	5.02
G4	30	80.69	19.3
G4	40	75.27	24.73

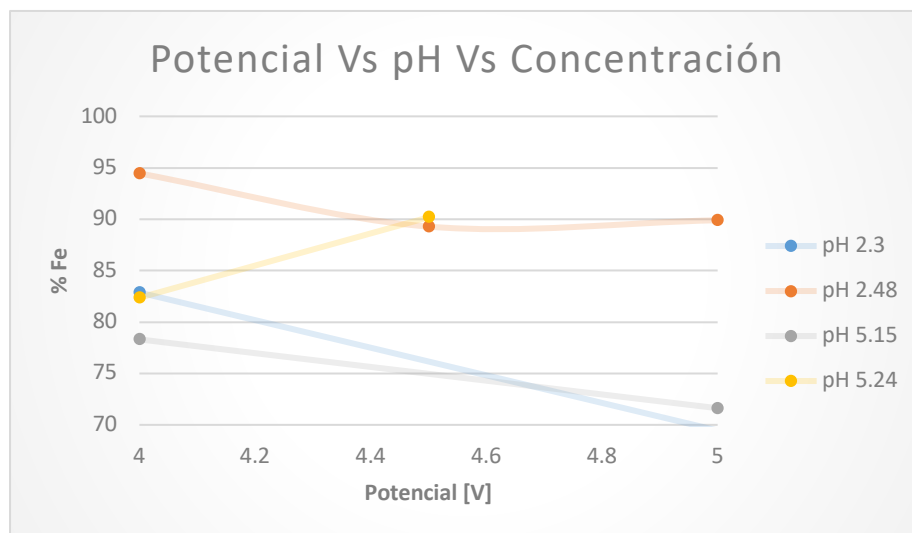
Como se mencionó anteriormente, cuando se comparó la apariencia y el espesor de una muestra realizada a menor tiempo con una de mayor, se concluyó que en términos de adherencia y uniformidad la de menor tiempo resulta mejor. Por el contrario, se obtiene una mejor composición a tiempos altos de deposición. Como se puede observar en la tabla 8, en el caso de 30 y 40 minutos, se obtiene una estequiometría muy aproximada a la que se desea (Fe:80%, Ga: 20%).

Gráfica 1. Comparación de potencial y composición resultante.



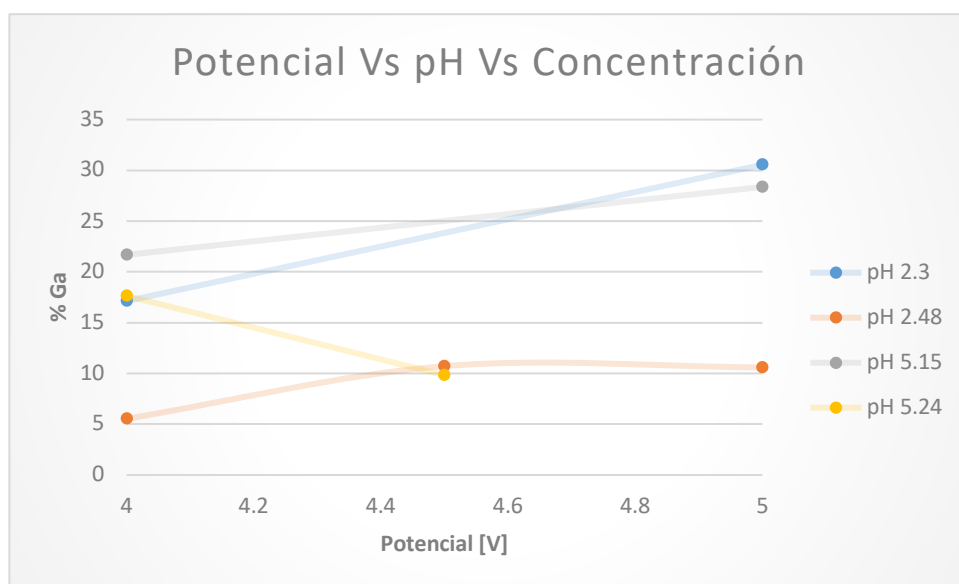
De la gráfica 1 se puede analizar la deposición de cada uno de los iones de interés con relación al potencial. Además, se puede inferir el comportamiento “dependiente” de uno con el otro, si se obtiene un alto porcentaje de iones Fe, el porcentaje de iones Ga será menor y viceversa. De igual manera, del gráfico 1, se confirma que a un potencial de 3.9 V resulta en una aproximación casi perfecta a la composición que se desea y exhibe las propiedades de deseadas (Fe:80%, Ga:20%).

Gráfica 2. Comparación de potencial, pH utilizado y % Fe resultante.



A partir del gráfico 2, se podría decir que el comportamiento del porcentaje de Fe es muy variante. A unas pocas décimas de diferencia de valores de pH, la conducta es muy diferente, por ejemplo, en el caso de un pH de 5.24 el porcentaje de Fe aumenta a medida que lo hace el potencial, y, por lo contrario, a un pH de 5.15 ocurre exactamente lo contrario, es decir, a mayor potencial, menor porcentaje del ion.

Gráfica 3. Comparación de potencial, pH utilizado y % Ga resultante.

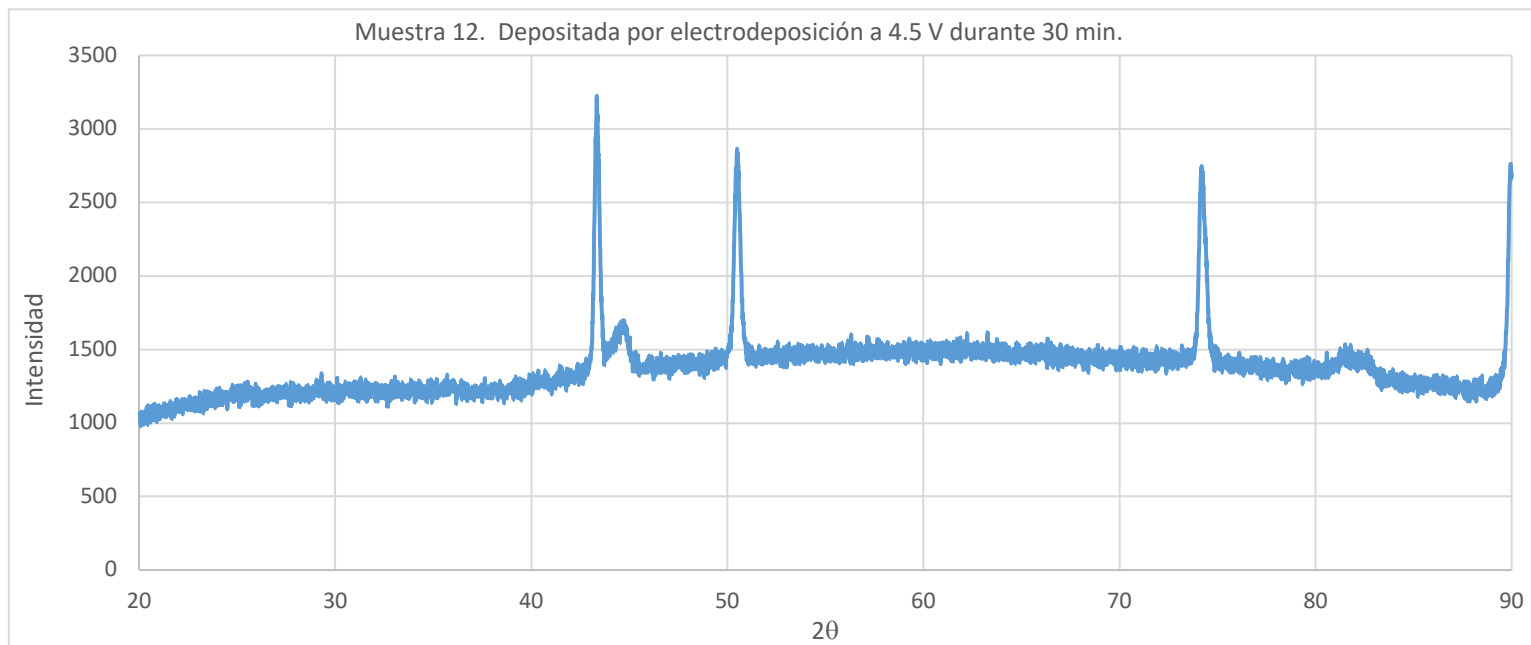


Lo mismo ocurre en el comportamiento del porcentaje de Ga depositado, como se puede notar de la gráfica 3. A unas cuantas décimas de diferencia de pH, esta varía bastante. A un pH de 2.3, a mayor potencial se obtiene mayor porcentaje del ion. Pero, en el caso de pH 2.48, se podría decir que al llegar a un potencial de aproximadamente 4.5 V, la composición de Ga no varía relativamente, manteniendo un comportamiento casi lineal.

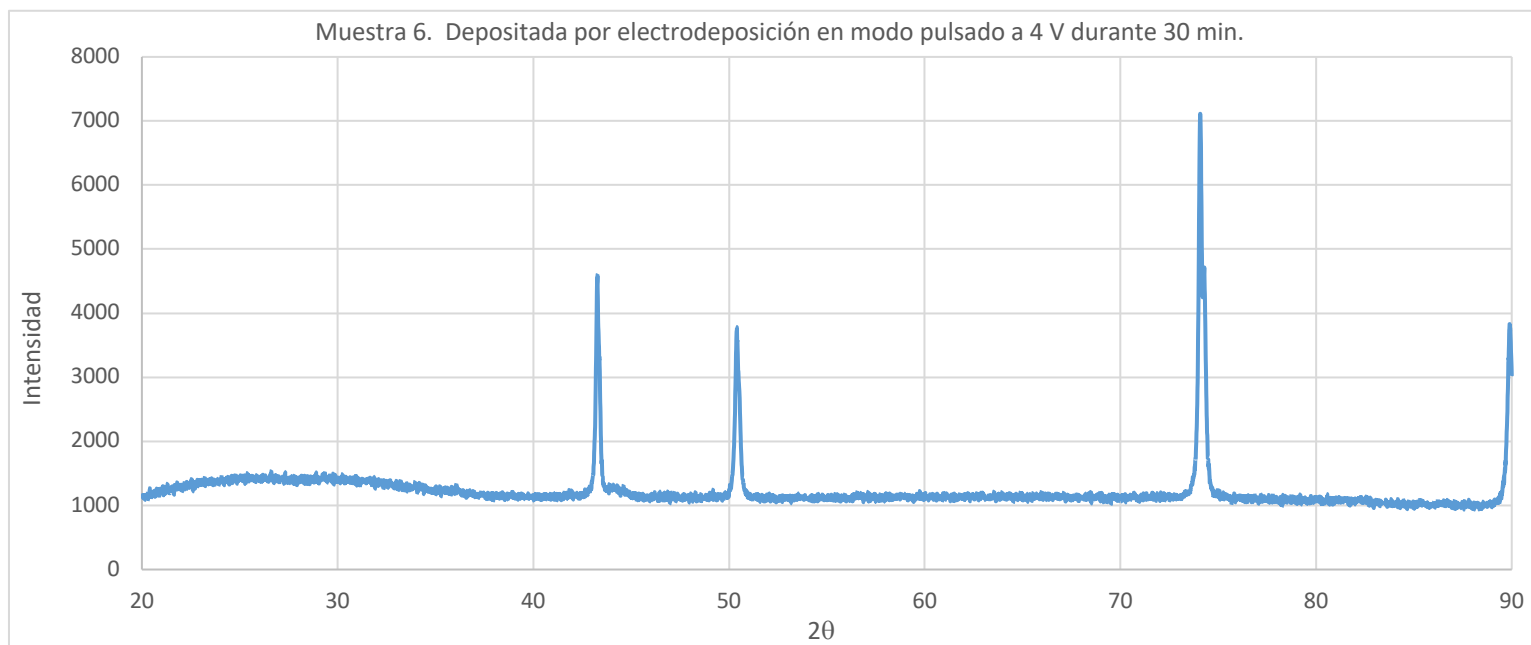
De las gráficas 1, 2 y 3 se puede inferir que la deposición de los iones está relacionada y tienen un comportamiento dependiente.

Asimismo, las muestras 2, 6, 7, 10, 11 y 12 se caracterizaron por XRD para confirmar la estequiometría del depósito. A continuación, se muestran los gráficos con los datos que se obtuvieron a partir de dicho análisis.

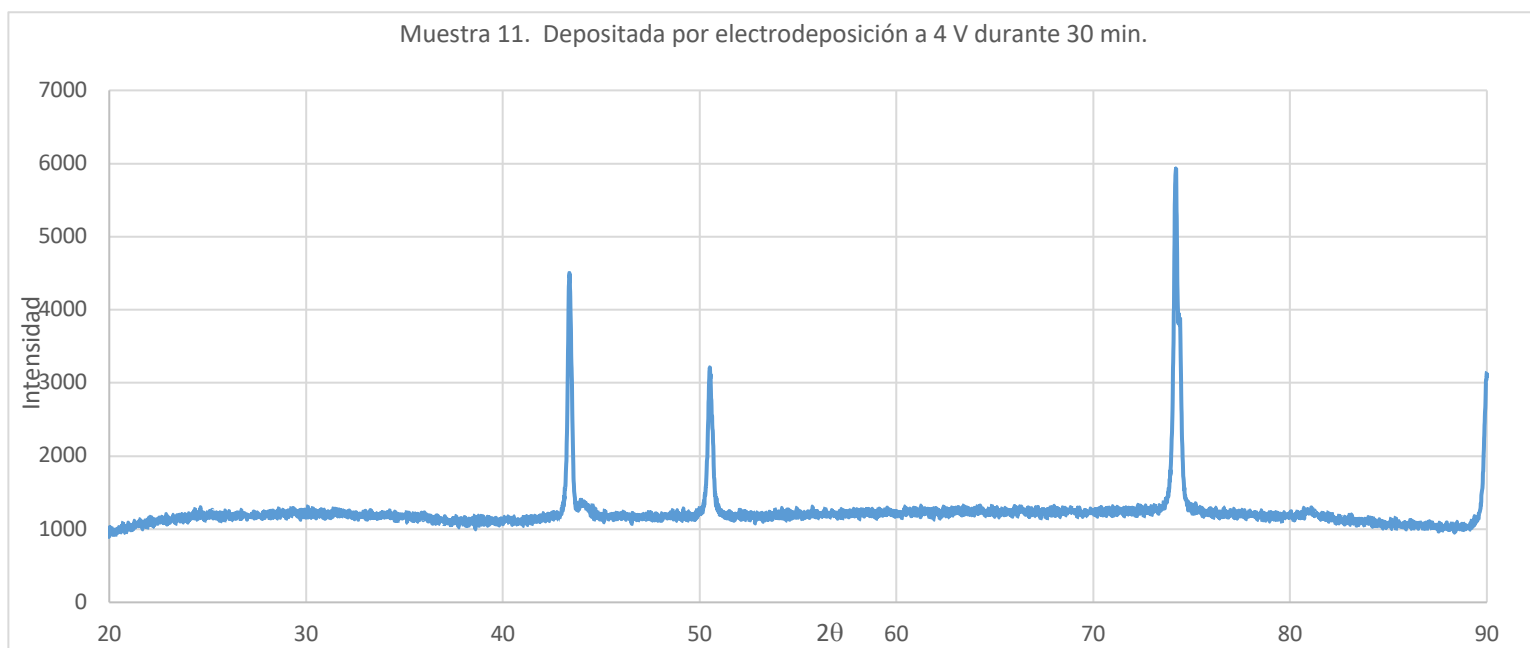
Gráfica 4. Intensidad Vs 2θ de la muestra 12.



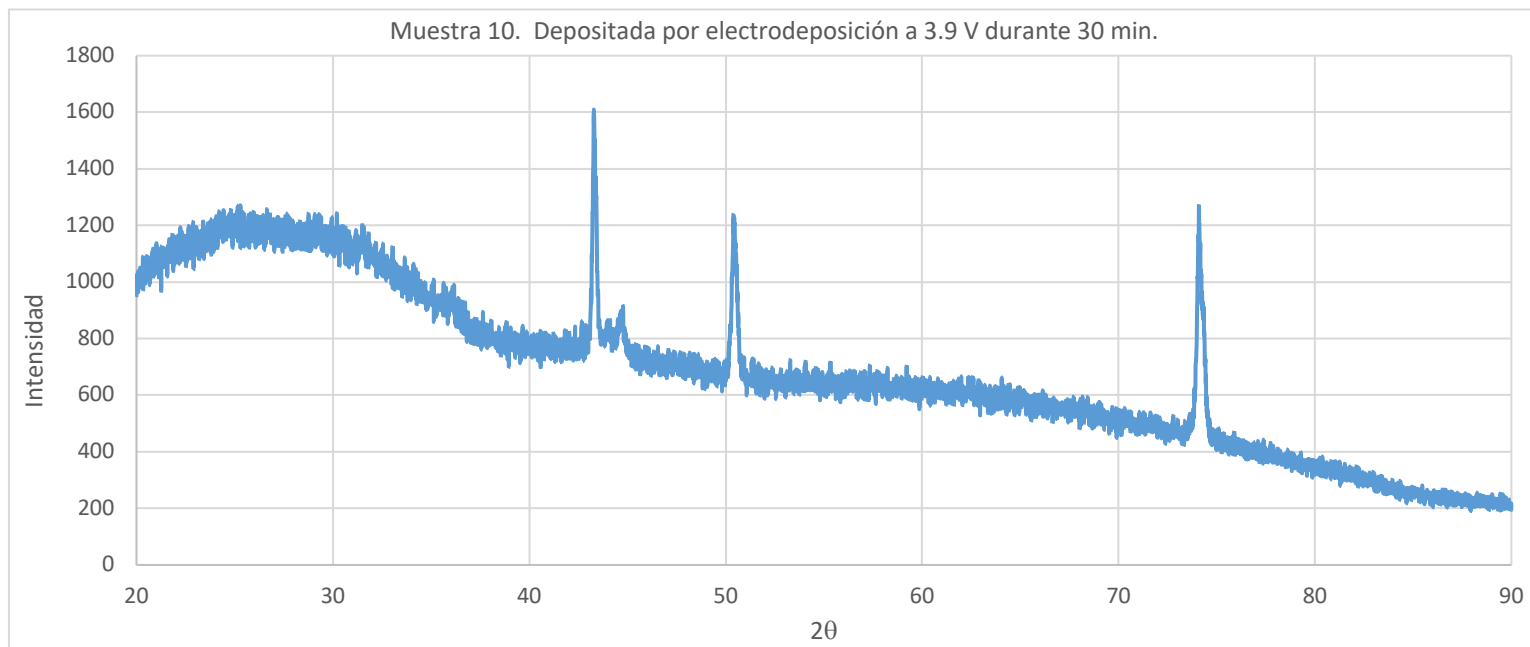
Gráfica 5. Intensidad Vs 2θ de la muestra 6.



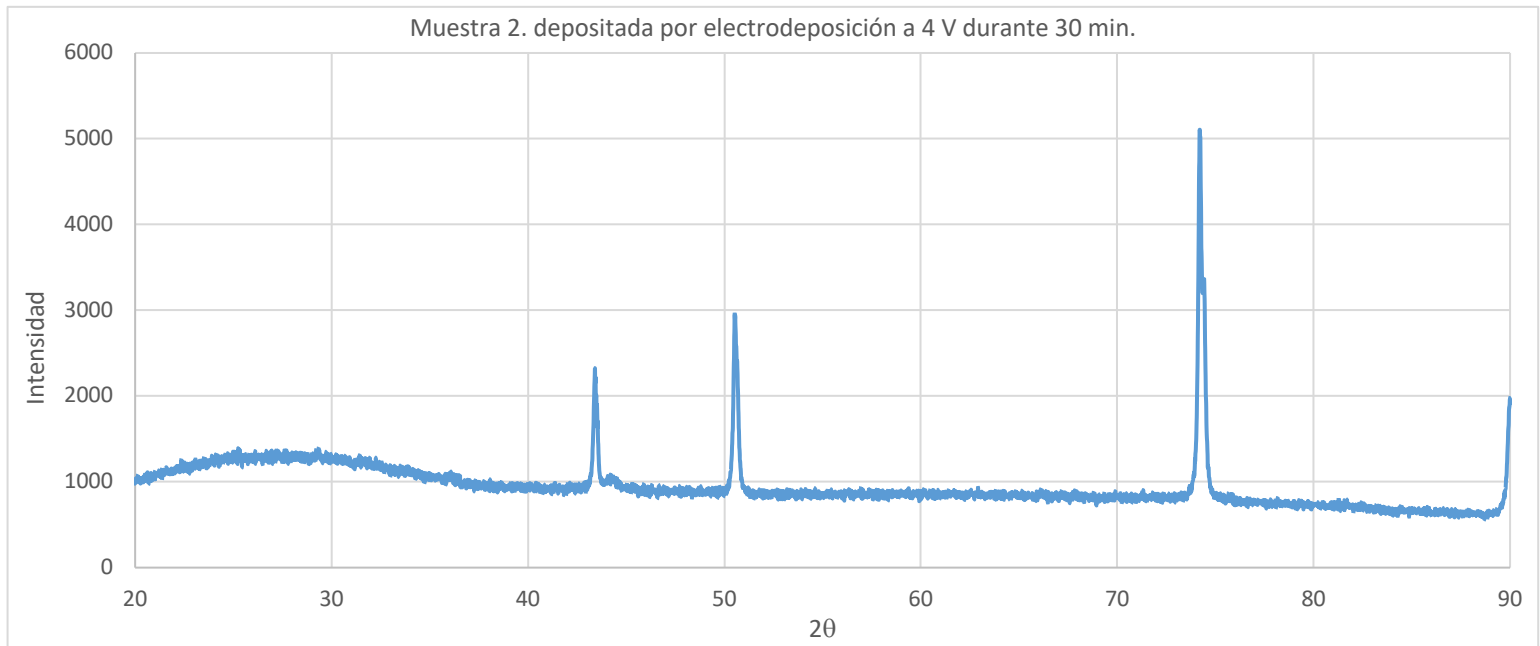
Gráfica 6. Intensidad Vs 2θ de la muestra 11.



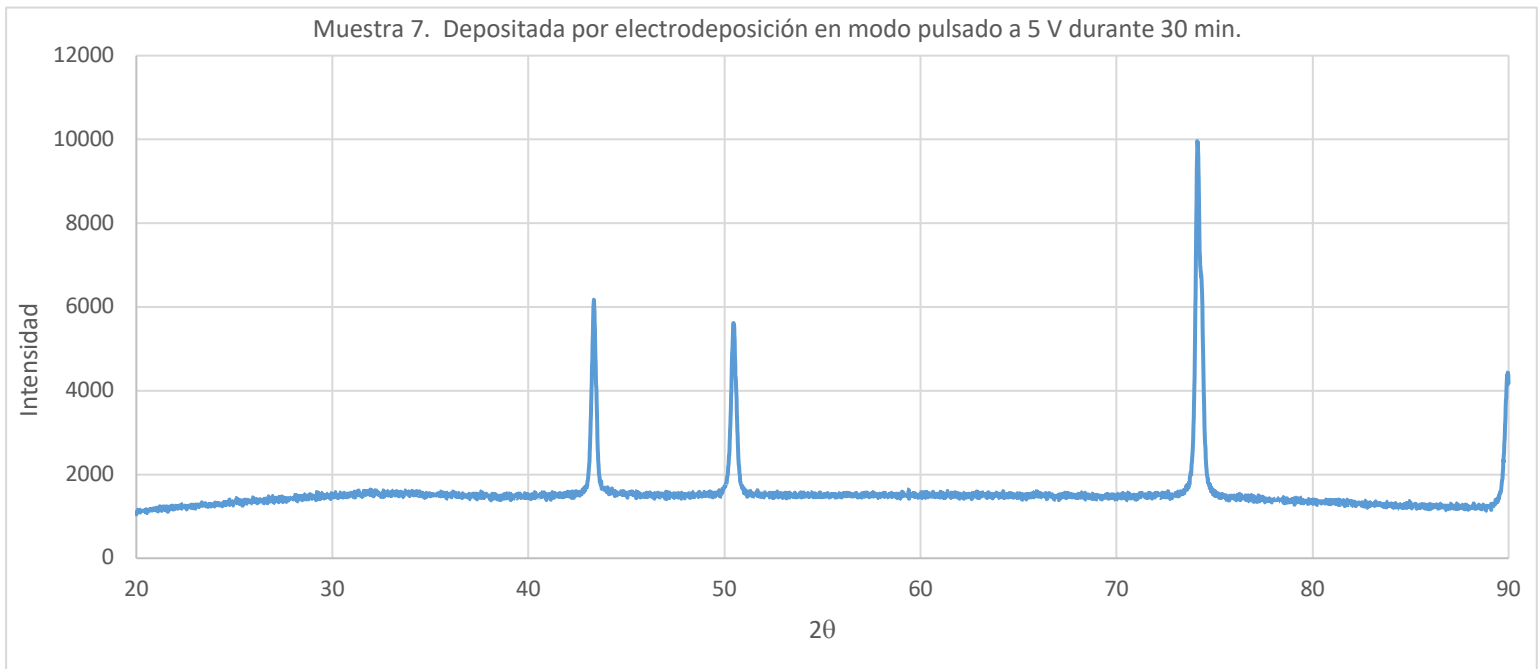
Gráfica 7. Intensidad Vs 2θ de la muestra 10.



Gráfica 8. Intensidad Vs 2θ de la muestra 2.



Gráfica 9. Intensidad Vs 2θ de la muestra 7.



De la gráfica 4 a la 9, se puede observar el pico a 44.4° corresponde a la dirección (110) en el Galfenol con estructura cristalina BCC, mientras que los otros picos presentes se deben a la lámina de cobre en la que fue depositado (Estrine, Hein, Robbins , & Stadler, 2014).

4. Reflexiones del alumno o alumnos sobre sus aprendizajes, las implicaciones éticas y los aportes sociales del proyecto

- Aprendizajes profesionales

A través de este proyecto tuve la oportunidad de implementar y adquirir habilidades profesionales que considero serán de suma importancia en mi desarrollo profesional. El poder entender cuáles son los requerimientos básicos para poder construir y organizar un plan de trabajo que vaya dirigido a un fin en específico, un resultado deseado, es mucho más complejo que una lista de pasos al que le das check y dejas en el pasado. La recopilación y análisis bibliográfico, la resolución de problemas, la correcta ejecución de pruebas experimentales, la interpretación de resultados cuantitativos y cualitativos, y su clara presentación, fueron unas de las muchas habilidades que fui desarrollando durante el tiempo de este proyecto. Pude dar cuenta que cada uno de ellos es importante y se requiere, en distintos puntos del proyecto, para poder ir perfeccionando el método, entendiendo los resultados y planteando los pasos siguientes a seguir.

La elaboración de un proyecto de investigación no es un proceso lineal, se necesita de mucho trabajo y tiempo, pero sobre todo, de dejar la frustración a un lado y hacer uso de todas las herramientas que se tienen y el desarrollo de nuevas, para poder ir resolviendo los problemas a los que se enfrenta e ir planteando nuevas rutas. La investigación no es una receta que leas en las bibliografías y resulte exactamente igual, es una variable que te permite desarrollar nuevas formas de hacer las cosas y de pensar. Este proyecto me ayudo a tener un acercamiento real con lo que significa realizar una investigación científica, también a dar cuenta de la importancia de tener una buena base de información, organización y paciencia. Pero sobre todo, me ayudo a ver que es lo que realmente me

apasiona profesionalmente, y así dirigir mi campo laboral a lo que realmente me apasiona y me hace sentir plena.

Específicamente, tuve la oportunidad de manejar el SEM y el AFM, los cuales son equipos a los que no muchos tienen acceso, pero son muy interesantes e importantes en el campo de la investigación. En resumen, este proyecto me dio la oportunidad de conocer técnicas que me posicionaran profesionalmente y me darán competencias valiosas.

- Aprendizajes sociales

Creo verdaderamente que todo proyecto tiene que ser dirigido hacia la resolución de una problemática a la que hoy en día se enfrenta la humanidad. Siempre buscando la mejora de la tecnología y la vida misma, pero sin dejar a un lado a ningún grupo social y al medio ambiente. La ciencia y la investigación nos dan la oportunidad de generar alternativas innovadoras e importantes. Pero todo avance trae consigo un cambio cultural y social e impacta en el medio ambiente, por ello, esta parte no se puede dejar a un lado.

Gracias a este proyecto nos damos cuenta de que, aunque sea a menor o gran escala, la ciencia no está peleada con lo social. Puede ser un reto que como sociedad se acepten las nuevas tecnologías, pero si el fin de ella es a beneficio de los y las personas, solo queda informar a todos para que se pueda ver el panorama completo, se eliminen tabús y la ciencia empiece a mejorar vidas. Por ejemplo, específicamente este proyecto, tiene una amplia área de aplicación que atacan directamente a problemáticas actuales y pretenden la mejora de la calidad de vida de la humanidad. Desde un avance importante en tratamientos médicos y biosensado hasta generar un menor impacto en el medio ambiente y el rendimiento de tecnologías de bajo potencial, cambiando las baterías comunes, las cuales conllevan un sinnúmero de consecuencias para la salud y el ecosistema, por sistemas autosustentables y autónomos.

Creo que el reto al actual de la ciencia en la sociedad es que todos los grupos sociales tengan acceso a dichos avances innovadores y benéficos, no solo las personas que gozan de privilegios y cierta posición económica.

- Aprendizajes éticos

Después de tener la oportunidad y el privilegio de estudiar en una universidad como lo es el ITESO y de haber sido parte de un proyecto de investigación como lo es este, no puedo evitar dar cuenta de la importancia de dar un enfoque ético a sea lo que sea que uno desee generar. Es ahora cuando me cuestiono de que enfoque le deseo dar a mi vida profesional y personal. Al final del día, nos debemos de cuestionar y reflexionar cuál de las opciones será la más ética, es decir, cuál de todas considera realmente las consecuencias y a los involucrados. Se trata de crear un cambio, una solución y una oportunidad.

Verdaderamente creo que es más rico el dar sentido a un proyecto para generar un bien común y un avance que solucione una problemática específica, que caer en este círculo vicioso de adquirir bienes materiales y ganancias económicas. Actualmente, la sociedad y el mundo se enfrenta a consecuencias catastróficas que se dieron a partir de la explotación de recursos, el egoísmo, la sobreproducción y el consumo incontrolable de productos. Al notar que hasta el momento esa actitud y comportamiento solo nos dirigen a una muy posible autodestrucción, es imposible no dar cuenta de la necesidad de cambiar la manera de pensar y hacer las cosas, por lo que reafirmo que la ciencia y la tecnología, aplicada de manera ética, nos puede aportar aún más y resultar en beneficios verdaderos para la humanidad.

- Aprendizajes en lo personal

Gracias a este proyecto, pude dar cuenta de mis propias capacidades y de que, si me lo propongo, puedo lograr un resultado que me hace sentir verdaderamente satisfecha. Pero

aún más importante, di cuenta de la importancia del trabajo en equipo y de tener personas que te apoyen, y que está bien dejarse ayudar. Un equipo aporta diferentes maneras de pensar y hacer las cosas, la oportunidad de aprender de ello, tener una red de apoyo, y obtener más y mejores resultados que si se estuviera trabajando solo. En un proyecto de investigación es benéfico el contar con un equipo, eso hace que el avance en las metas se dé y se logren. Estoy muy agradecida con mis compañeras Isaura Rodríguez y Angélica Monge, al igual que con la maestra Yenni Velázquez, porque en todo momento me ayudaron y aportaron para que todo lo que se logró a lo largo de este proyecto fuera posible. Sé que, si no hubiera contado con ello, el resultado sería muy diferente. Me considero una persona que no estaba acostumbrada a pedir ayuda, pero gracias a este proyecto, cambié mi mentalidad y di cuenta de lo equivocado que era mi manera de ver las cosas.

5. Conclusiones

- Se probó el método de síntesis de electrodeposición química y se logró la deposición correcta de Galfenol.
- Se estudió y analizó el efecto de parámetros como el tiempo de deposición y el pH del electrolito en la estequiometría de los depósitos.
- Se hizo uso de las diferentes técnicas de caracterización para conocer la morfología, espesor y composición de las muestras obtenidas durante las pruebas experimentales.
- Se planteó la receta del electrolito, el potencial y el valor de pH con las que se obtuvo un depósito de Galfenol en las proporciones deseadas e:80%, Ga:20%.
- Se proponen perspectivas para el seguimiento y avance del proyecto.

6. Bibliografía

- Liu, J.-Q., Fang, H.-B., Xu, Z.-Y., Mao, X.-H., Shen, X.-C., Chen, D., . . . Cai, B.-C. (2008). A MEMS-based piezoelectric power generator array for vibration energy harvesting. *Microelectronics Journal*, 39, 802-806.
- Lopes, L. (2020). *Diseño de un sensor de corriente basado en una fbg recubierta de galfenol por electrodeposición y con elevada magnetostricción [PDF]*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/156880/Lopez%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20un%20sensor%20de%20co>
- Lupu, N., Chiriac, H., & Pascariu, P. (2008). Electrochemical deposition of FeGa/NiFe magnetic multilayered films and nanowire arrays. *Journal of Applied Physics*. doi:DOI:10.1063/1.2832353
- Estrine, E., Hein, M., Robbins, W., & Stadler, B. (2014). Composition and crystallinity in electrochemically deposited magnetostrictive galfenol (FeGa). *Journal of Applied Physics*, 115.
- Kopyla, S., Surmenev, R., Surmeneva, M., Fetisov, Y., & Kholkin, A. (2021). Magnetolectric effect: principles and applications in biology and medicine—a review. *Materials Today Bio*.
- Summers, E., Thomas A., L., Snodgrass, J., & Slaughter, J. (2004). *Magnetic and mechanical properties of polycrystalline Galfenol*. Obtenido de <https://doi.org/10.1117/12.539781>
- Velázquez Galván, Y., de la Torre Medina, J., Piraux, L., & Encinas Oropesa, A. (2019). Robustness of the enhanced magnetic anisotropy in Ni nanowires regardless of the deposition potential. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 497.
- Ávila, J., & Genescá, J. (1995). *Electrodos de referencia*. Obtenido de La lucha contra la corrosión: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_5.htm
- Ahmad, N., Khan, S., Arman liaqat, M., Awais, M., Shah, S., Ahmed, I., . . . Iqbal, J. (2016). Influence of voltage variation on structure and magnetic properties of Co₁₂xSn_x (X 5 0.3–0.7) nanowire alloys in alumina by electrochemical deposition. *Applied Physics*, 123.
- Argentina, C. (s.f.). *Propiedades Físicas y Químicas*. Obtenido de Artículo Técnico - AT004: <https://www.ciquime.org/files/at004.pdf>
- Augustin, A., Huilgol, P., Udupa, K., & Bhat K, U. (2016). Effect of current density during electrodeposition on microstructure and hardness of textured Cu coating in the application of antimicrobial Al touch surface. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 63, 352–360.
- Babu, S., Rajalakshmi, T., Dhanasekaran, R., & Ramasamy, P. (1991). Electrodeposition of CdS;Te_{1-x} by periodic pulse technique. *Journal of Crystal Growth*, 423-428.
- Bard, A., & Faulkner, L. (2001). *Electrochemical methods: Fundamentals and Applications*. New York: Wiley.
- Bard, A. J. (2001). *Electrochemical methods: Fundamentals and Applications*. Nueva York: 2.

- Dos Santos, L. (2020). *Guía de introducción XRD: ¿Cómo funciona la tecnología XRD?* Obtenido de Evident: <https://www.olympus-ims.com/es/insight/x-ray-diffraction-primer-how-does-xrd-work/>
- Guan, H., Zhong, T., He, H., Zhao, T., Xing, L., Zhang, Y., & Xue, X. (2019). A self-powered wearable sweat-evaporation-biosensing analyzer for buildingsports big data. *Nano Energy*.
- H.G. Ng, J., Record, P., Shang, X., Wlodarczyk, K., Hand, D., Schiavone, G., . . . Desmilliez, M. (2015). Optimised co-electrodeposition of Fe–Ga alloys for maximum magnetostriction effect. *Sensors and Actuators A: Physical*, 223, 91-96.
- HANNA Instruments. (s.f.). *Electrodo inalámbrico de pH Halo® para mediciones en campo*. Obtenido de <https://hannainst.com.mx/productos/electrodos-y-sondas/electrodo-inalambrico-de-ph-halo-para-mediciones-en-campo/>
- Hauser, P., Chang, H.-M., Yanagawa, N., & Hamon, M. (2021). Nanotechnology, Nanomedicine, and the Kidney. *Applied Science*.
- Healthcare, G. (2022). *ELECTRODOS NMT, GEL SÓLIDO, AG-AGCL*. Obtenido de <https://co.services.gehealthcare.com/gehcstorefront/p/57268-HELv>
- Hein, M., Park, J., Cozzo, J., Flatau, A., & Stadler, B. (sf). *Electrodeposited Fe-Ga Alloy Films for Directly Coupled Noncontact Torque Sensing*.
- Ibero. (2005). *Reaccion REDOX*. Obtenido de <https://ibero.mx/campus/publicaciones/quimanal/pdf/7reaccionesredox.pdf>
- Kambale, R. C. (2013). Magneto-Mechano-Electric (MME) Energy harvesting properties of piezoelectric macro-fiber composite/Ni magnetoelectric generator. *Energy Harvesting and Systems*. doi:doi 10.1515/ehs-2013-0026
- Kay , R., Hoyd-Gigg, J., Popov, C., Record, P., & Desmulliez, M. (sf). *Electrochemical deposition of Galfenol*.
- Kopyl, S., Surmenev, R., Surmeneva, M., Fetisov, Y., & Kholkin, A. (2021). Magnetolectric effect: principles and applications in biology and medicine—a review. *Materials Today Bio*.
- Malvern Panalytical. (s.f.). *Difracción de rayos X (XRD)*. Obtenido de <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/xray-analysis/x-ray-diffraction>
- Nivedita, L., Manivel, P., Pandian, R., & et al. (2018). Enhancement of magnetostrictive properties of Galfenol thin films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 451. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.030>
- Ortega , N., Kumar , A., Scott, J., & Katiyar, R. (sf). *Multifunctional Magnetoelectric Materials for Device Applications*.
- Quimica.es. (s.f.). *Electrolito*. Obtenido de <https://www.quimica.es/enciclopedia/Electrolito.html>
- Tikhonova, .., Evdokimov, P., Filippov, Y., Safronova, T., Garshev, A., Shcherbakov, I., . . . Putlyaev, V. (2020). Electro- and magnetoactivematerials in medicine: a review of existing and potential areas of application. *Inorg. Mater*, 56.
- Torabinejad, V. A. (2016). *Electrodeposition of Ni-Fe alloys, composites, and nano coatings*. doi:10.1016/j.jallcom.2016.08.329
- Torres , D., Rosales Rivera, A., & Gómez Peña, A. (2012). *ISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN POTENCIOSTATO PARA PROCESOS DE SINTESIS DE MATERIALES USANDO ELECTRODEPOSICIÓN QUÍMICA*. Colombia.

- Twenergy. (19 de 01 de 2016). *Twenergy*. Obtenido de Centro de investigación mexicano desarrolla cosechadores de energía: <https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/medio-ambiente/centro-de-investigacion-mexicano-desarrolla-cosechadores-de-energia-2087/>
- Vargas Sanchez, C. (2019). Cosechador de Energía Piezo-inductivo de Baja Potencia para Vibraciones de Baja Frecuencia. *Magister en Ingeniería, Universidad Autónoma de Manizalez*.
- Venkateswarlu , A., Haribabu , P., Geon-Tae , H., Mahesh, P., & Dae-Yong , J. (2017). Magnetic energy harvesting with magnetoelectrics: an emerging technology for self-powered autonomous systems. *Sustainable Energy & Fuels*, *1*, 2031–2182.
- Yu, Z., Chu, Z., Yang, J., Asl, M., & Yuan , X. (2020). A magneto-mechano-electric (MME) energy harvester based on rectangular cymbal structure. *Sensors and Actuators*, *316*. doi:doi:10.1016/j.sna.2020.112400
- Zhao, Y., Pu, M., Wang, Y., Yu, L., Song, X., & He, Z. (2021). Application of nanotechnology in acute kidney injury: From diagnosis to therapeutic implications . *Journal of Controlled Release* .

Anexos