



Universidad Nacional Autónoma de México



Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales

Instituto de Investigaciones en Materiales,
Unidad Morelia

Asignatura:

Estancia de investigación

Alumna:

Selene Aguilar Campos

Asesor:

Dr. Alberto Beltrán Morales

Morelia, Michoacán a 28 de febrero de 2018

1. **Datos personales:**

Nombre: Selene Aguilar Campos.

Materias cursadas:

Asignatura	Calificación
Fundamentos de matemáticas para materiales	10
Termodinámica de los materiales	10
Mecánica de fluidos y transferencia de calor	10
Mecánica de medios continuos	10
Propiedades mecánicas de materiales	10
Temas selectos de materiales complejos dinámica de fluidos computacional	10
Proyecto de investigación	10
Promedio	10

Título del proyecto de investigación:

“Flujo generado electromagnéticamente en un sistema estratificado de dos fluidos conductores”

Asesor:

Dr. Alberto Beltrán Morales

Dependencia:

Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia.

ANTECEDENTES

Actualmente el aumento de la demanda continua de electricidad ha impulsado al sistema energético a apostar por energías renovables, las cuales requieren del apoyo de tecnologías de almacenamiento para garantizar la estabilidad y calidad del sistema eléctrico.

El almacenamiento de energía es, básicamente, la capacidad de acumular energía para su uso posterior. Idealmente y debido a que la energía producida es mayor a la requerida, se necesita de un dispositivo para almacenar el exceso cuando el consumo es bajo, dado que las baterías de metal líquido (BML) hoy en día son un tema de discusión, se contemplan como opción de almacenamiento estático a gran escala y a un costo económico relativamente bajo.

Las BML operan de una manera eficiente sin perder capacidad o degradarse mecánicamente, problemas comunes que se presentan en las baterías actuales con electrodos sólidos; están constituidas, principalmente, por dos electrodos de metal líquido (EML) separados por un electrolito de sal fundida que se estratifican en tres capas en función de la densidad y la inmiscibilidad, como se muestra en la Figura 1 [1].

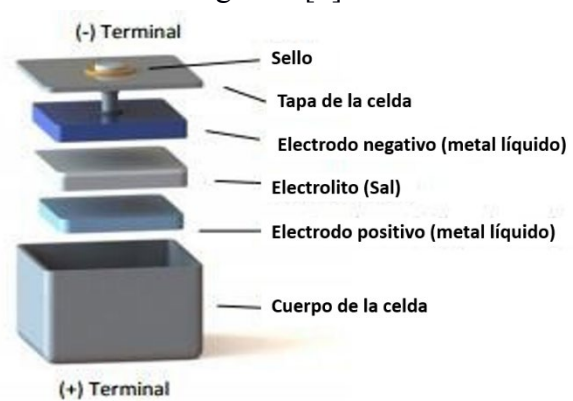


Figura 1. Esquema representativo de una BML y sus componentes.

Sin embargo, son susceptibles a perturbaciones magnetohidrodinámicas (MHD) producto de la fuerza de Lorentz generada por la interacción de la corriente eléctrica de carga/descarga con su propio campo magnético; adicionalmente, y debido a la generación de calor por efecto Joule también se presenta un movimiento convectivo en el sistema estratificado [2]. En particular, en el trabajo experimental de Kelley & Sadoway se estudia el efecto de la fuerza de Lorentz y su interacción con recirculaciones convectivas, donde a pesar de densidades de corriente eléctricas extremas, hay una organización en el flujo convectivo que genera una ganancia de velocidad, por lo que produce una mayor eficiencia en la batería.

En estudios recientes, se ha puesto especial atención a las posibles recirculaciones en un sistema de tres capas y aunque dichos movimientos pueden ayudar a una mejor transferencia de carga, en casos extremos es posible la generación de una mezcla de los componentes y, por ende, un cortocircuito en la batería; tal como se muestra en la Figura 2 [3].

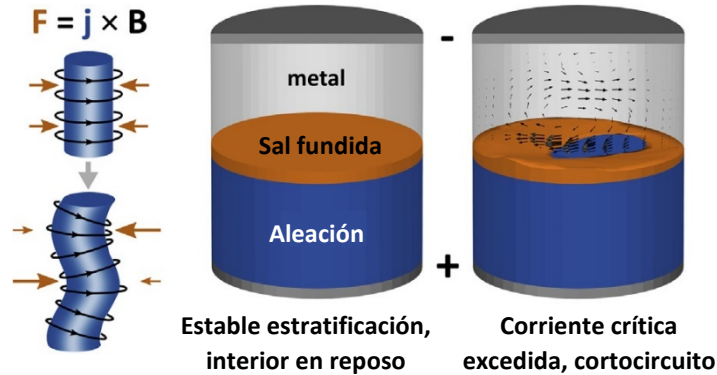


Figura 2. Posibles recirculaciones de flujo al interior de una BML.

Dada la relevancia de las recirculaciones en configuraciones de EML y BML, es necesario el uso de técnicas de medición de flujo, dentro de las cuales destacan la de velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés) y una segunda como la de velocimetría por efecto Doppler (UDV, por sus siglas en inglés).

El método óptico PIV analiza fluidos translúcidos y se utiliza para medir la velocidad en planos del flujo iluminados mediante una hoja de luz láser. Básicamente, la técnica consiste en adquirir imágenes a partir de partículas finas en el flujo a un delta de tiempo constante y mediante el software DynamicStudio 5.1 es posible pos-procesar dichas imágenes (en pares) y obtener campos y perfiles de velocidades [4], mientras que la técnica UDV analiza fluidos opacos que consiste en un transductor que funciona como emisor y receptor, el transductor envía un pulso ultrasónico que choca con las partículas contenidas en el fluido provocando ecos que regresan al transductor y por medio de la diferencia de tiempo en que salió el pulso tardaron en llegar los ecos, es posible conocer el perfil de velocidades [5].

De los estudios anteriormente mencionados, es claro que un entendimiento de patrones de flujo al interior de las BML es fundamental para el correcto entendimiento de las condiciones de operación óptima o incluso de fallo, el presente trabajo se enfoca en el estudio experimental de un flujo generado por una fuerza de Lorentz en una capa de fluido conductor constituida por un electrolito débil.

Objetivo general

Medir el campo de velocidad en planos de un flujo de electrolito generado electromagnéticamente en una cavidad y relacionarlo con la diferencia de potencial medida en electrodos del sistema; con miras a entender el comportamiento magnetohidrodinámico basados en un escalar como el potencial eléctrico.

Objetivos específicos

1. Diseñar y construir un dispositivo experimental para el estudio de flujos de electrolitos.
2. Caracterizar experimentalmente la fuerza de Lorentz para agitar electrolitos. Se usarán imanes permanentes y una corriente eléctrica directa.
3. Implementar la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV) para flujos a bajas velocidades de un electrolito.

Hipótesis

1. La diferencia de potencial del sistema está relacionada con el patrón de flujo.
2. Mediciones de perfiles de velocidad obtenidos mediante la técnica UDV son comparables con los perfiles extraídos de campos de velocidad de PIV.
3. El patrón de flujo está fuertemente influenciado no solo por la intensidad del campo magnético sino también por su distribución espacial (imanes de distinto tamaño).

Justificación

Contribuir al estudio de patrones de flujo en configuraciones relacionadas a las baterías de metal líquido, adicionalmente se trabaja en el desarrollo e implementación de técnicas experimentales de medición en fluidos conductores de la electricidad como PIV y UDV.

METODOLOGÍA

Se considera de importancia conocer la dinámica generada por la interacción de campos magnéticos y corrientes en dichas configuraciones con el fin de estudiar las recirculaciones en el electrolito. Por tal motivo se realizó un análisis en el electrolito (componente de la BML) que consistió en probar distintas sales a base de agua destilada como cloruro de sodio (NaCl) 99.80% puro, bicarbonato de sodio (NaHCO_3) 100.1% puro y cloruro de potasio KCl 99.9% puro (J.T. Baker), y a su vez, a partir de mediciones registradas por un conductímetro marca Thermo SCIENTIFIC, modelo ORION STAR A212, se seleccionó al KCl como el electrolito de mayor conductividad. Además, se probaron distintas concentraciones (8.6%, 17% y 30% en peso), se caracterizó cada una de ellas en función de la conductividad eléctrica y se observó que el incremento de concentración causa un aumento en la conductividad.

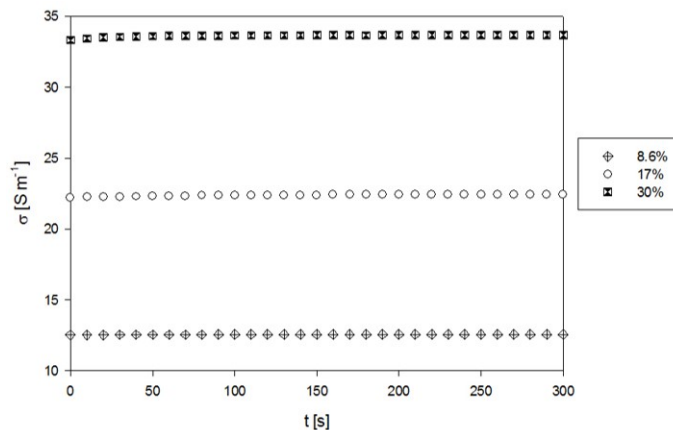


Figura 3. Conductividades a distinta concentración de KCl.

Con base a los resultados de los análisis reflejados en la Figura 3, se muestra un mejor resultado con concentración de 30% de KCl, alcanzando una conductividad del 34.72 S/m. Cabe mencionar que se eligió una concentración al 30% debido a que la solución salina presenta un punto de saturación de 34.218 g a 20 °C [6].

Campo magnético

Las mediciones tridimensionales de campos magnéticos fueron hechas con una probeta de efecto Hall ZOA3-3208-10 conectada a un gaussmetro 8030 FW Bell. Para ello, se utilizan imanes cuadrados de aleación de neodimio (NdFeB) de distintos tamaños con polo norte y polo sur en dos caras opuestas.

Se determinó un eje de referencia a trabajar, mismo que se muestra en la Figura 4, así como sus respectivas características mostradas en la Tabla 1; también partir de resultados preliminares, se optó por que el polo positivo del imán fuera el lado más conveniente para trabajar ya que a diferencia con el polo negativo, el positivo alcanza ordenes de magnitud más altos.

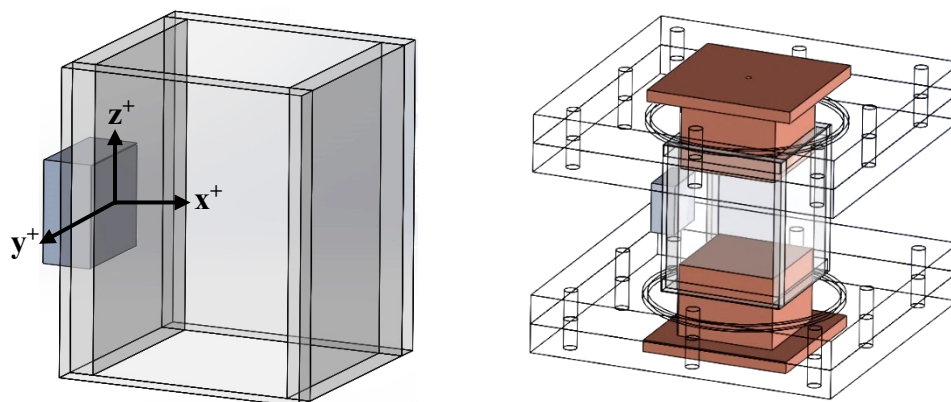




Figura 4. Ejes de referencia fijados en el sistema.

Tabla 1. Imanes de NdFeB

Imanes	Características
	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones. 2.54 x 2.54 x 1.27 cm • Intensidad de campo magnético en la superficie. 0.35 T
	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones. 5.08 5.08 x 1.27 cm • Intensidad de campo magnético en la superficie. 0.23 T

Prototipo experimental

Se diseñó un CAD de una configuración de sección transversal cuadrada en Solidworks 2017, posteriormente se manufacturó, se ensambló y se revisó para evitar fugas; dicha configuración consiste en una cavidad de 5 x 5 x 5 cm; las cuatro paredes están hechas de vidrio, donde dos de ellas miden 5 x 6 x 7.6 cm mientras que las otras dos cuentan con medidas de 6.2 x 6 x 7.6 cm. La cavidad está sellada a dos bases de acrílico con dimensiones de 16 x 16 x 1.4 cm; una se encuentra en la parte inferior y la otra en la parte superior. Los dos electrodos de cobre están fijos a dos tapas de acrílico con medidas iguales a las de las bases, los electrodos tienen un espesor de 0.6 cm cada uno, estos están conectados a una fuente de alimentación de voltaje. Se utilizan dos imanes dipolo de neodimio-hierro-boro (NdFeB) de geometría cuadrada, uno con dimensiones de 5.08 cm de largo, 5.08 cm de ancho y 1.27 cm de alto y el otro con dimensiones de 2.54 cm de largo, 2.54 cm de ancho y 1.27 cm de alto; el imán se coloca en el lado izquierdo de la cavidad con el polo positivo tocando la pared lateral de vidrio. El imán se magnetiza en dirección horizontal con una fuerza máxima de 0.35 T en la superficie del imán pequeño y 0.23 T en la superficie del imán grande. La celda se llena con una solución electrolítica débil de KCl al 30% en peso con un volumen total de 125 cm³. El prototipo se puede apreciar en la Figura 5.

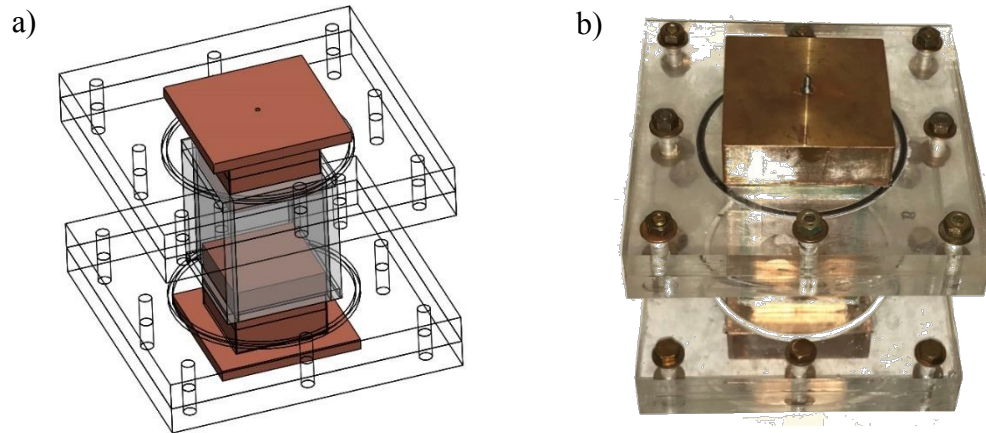


Figura 5. a) Diseño CAD y b) Prototipo experimental.

Densidad de corriente eléctrica

En el experimento se inyecta una corriente en dirección axial por un tiempo de 3 min y donde dicha corriente eléctrica fue variada a un rango ya determinado a distintas cantidades como 20, 40, 60 y 80 mA; usando una fuente de poder marca KEITHLEY 2200-32-3, misma que es controlada mediante un programa desarrollado en el software LabView en el que se fijan parámetros a la par de medir variaciones de voltaje con objeto de relacionarlas con las mediciones de velocidad.

Campo de velocidades

El montaje experimental se lleva a cabo para caracterizar el patrón de flujo del electrolito por la técnica PIV, véase en la Figura 6. Sobre una mesa óptica de la marca Thorlabs nivelada, donde cada uno de los componentes se encuentran alineados de manera estratégica donde primeramente se tiene un láser de marca Z-LASER, modelo ZM18GF029, el cual genera un haz de luz de 0.75 mm de espesor que emite una onda con magnitud de 532 nm; iluminando el plano central de la cavidad que contiene el electrolito y a su vez partículas trazadoras de poliamida con distribución de tamaño de un 60%, en seguida se suministra un flujo de corriente eléctrica directa a distintos valores, que circula desde el polo positivo (inferior) al negativo (superior) a través de los electrodos de cobre pasando por el electrolito para interactuar con el campo magnético no uniforme del imán como primer caso, y un campo magnético uniforme como segundo caso; de manera que el flujo se ve agitado por la fuerza de Lorentz, en dirección perpendicular al campo magnético, mientras una cámara monocromática digital de marca The Imaging Source, modelo DMK 23U618 con una resolución espacial VGA (640 x 480 píxeles), consta de un sensor CCD Sony de píxeles cuadrado (H:5.6 μm , V:5.6 μm) y de un lente de marca Pentax, modelo C31630KP con distancia focal de 16 mm; obtiene imágenes a blanco y negro, tal como se muestra en la Figura 7; con velocidad de captura de 30 fps con la ayuda del software IC Imaging Control 2.4, las imágenes son procesadas en una computadora con el software DynamicStudio 5.1, obteniendo campos y perfiles de velocidad.

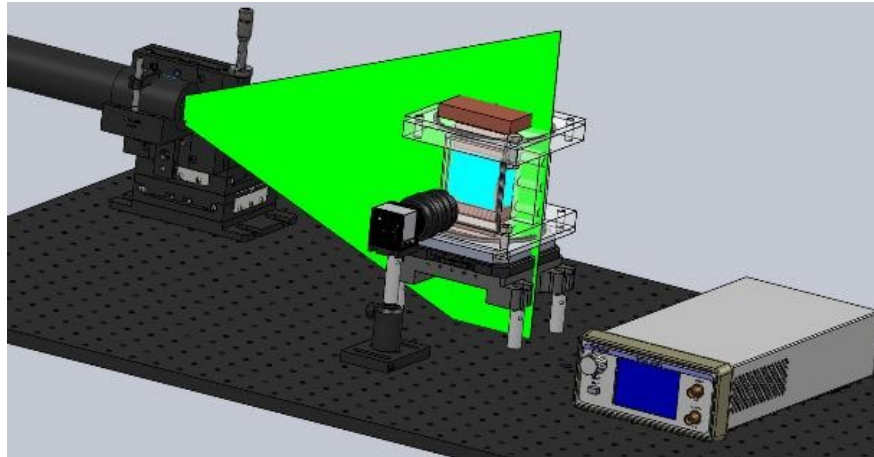


Figura 6. Montaje experimental para la técnica PIV en 2D.

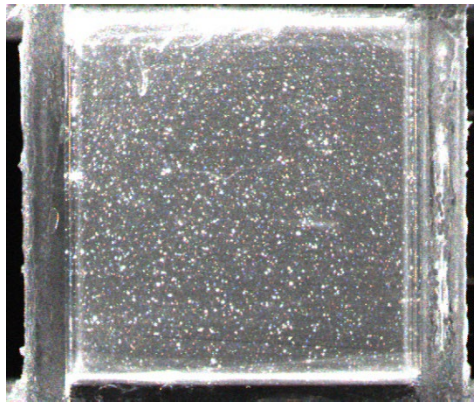


Figura 7. Imagen capturada durante una de las pruebas experimentales con la técnica PIV a 4×10^{-2} A.

Se esperan complementar los resultados experimentales con algunas simulaciones para casos particulares usando un software comercial.

RESULTADOS

Las mediciones tridimensionales de campo magnético fueron realizadas a un punto medio de la cavidad (3.1 cm) en dos tamaños de imanes diferentes, considerando el espesor del vidrio de 0.6 cm, más la distancia hasta el centro de la cavidad de 2.5 cm. Las mediciones son presentadas en la Figura 8 y 9, donde en el eje “x”, se observa que conforme se tiene un alejamiento en dirección x, el campo decae, mientras que en los ejes “y” y “z”, tienden a tener un comportamiento parabólico y los órdenes de magnitud se ven casi simétricos.

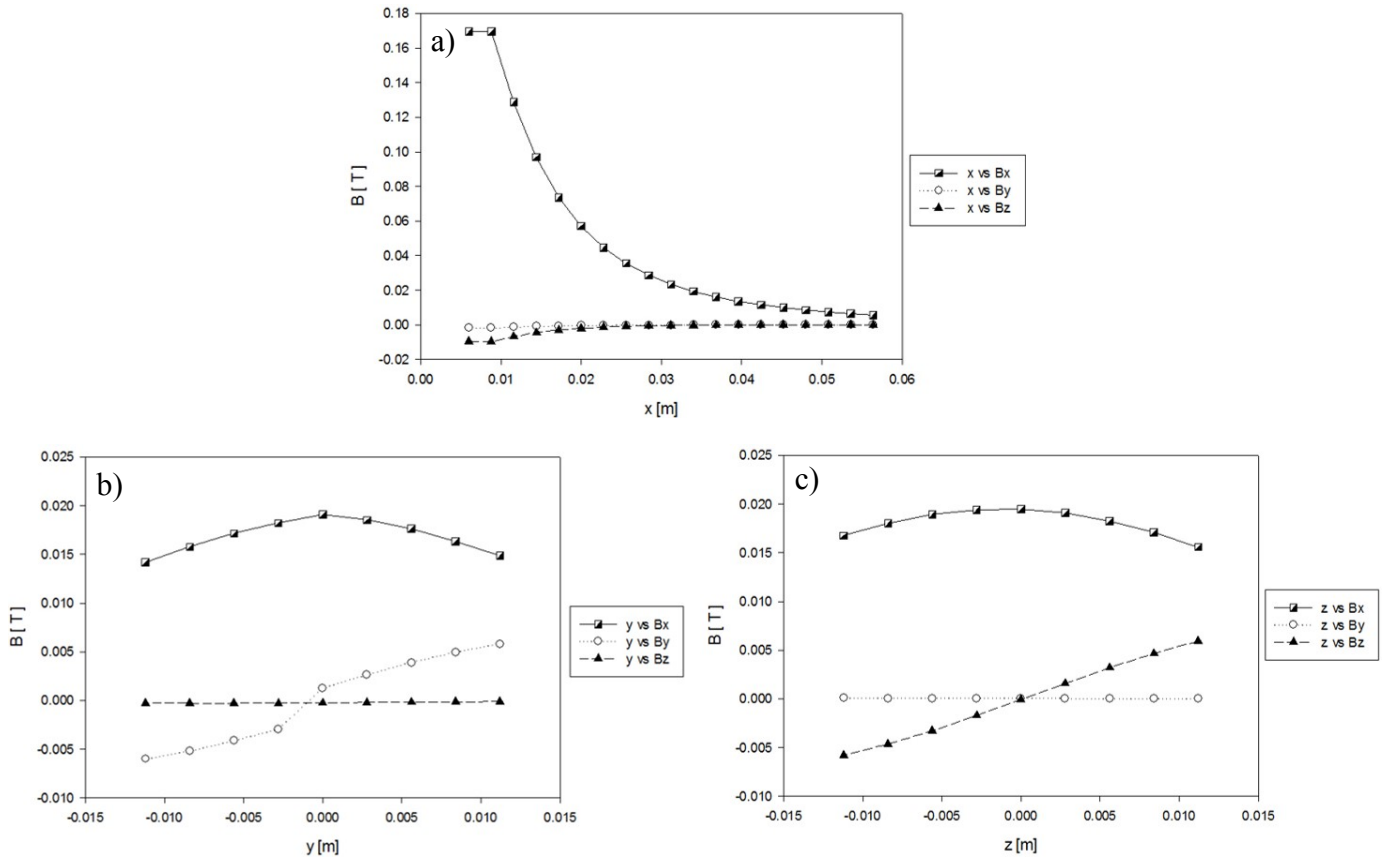


Figura 8. Campo magnético al centro de la cavidad vs. posición a) en el eje “x”, b) en el eje “y”, c) en el eje “z” del imán cuadrado de 2.54 x 2.54 x 1.27 cm.

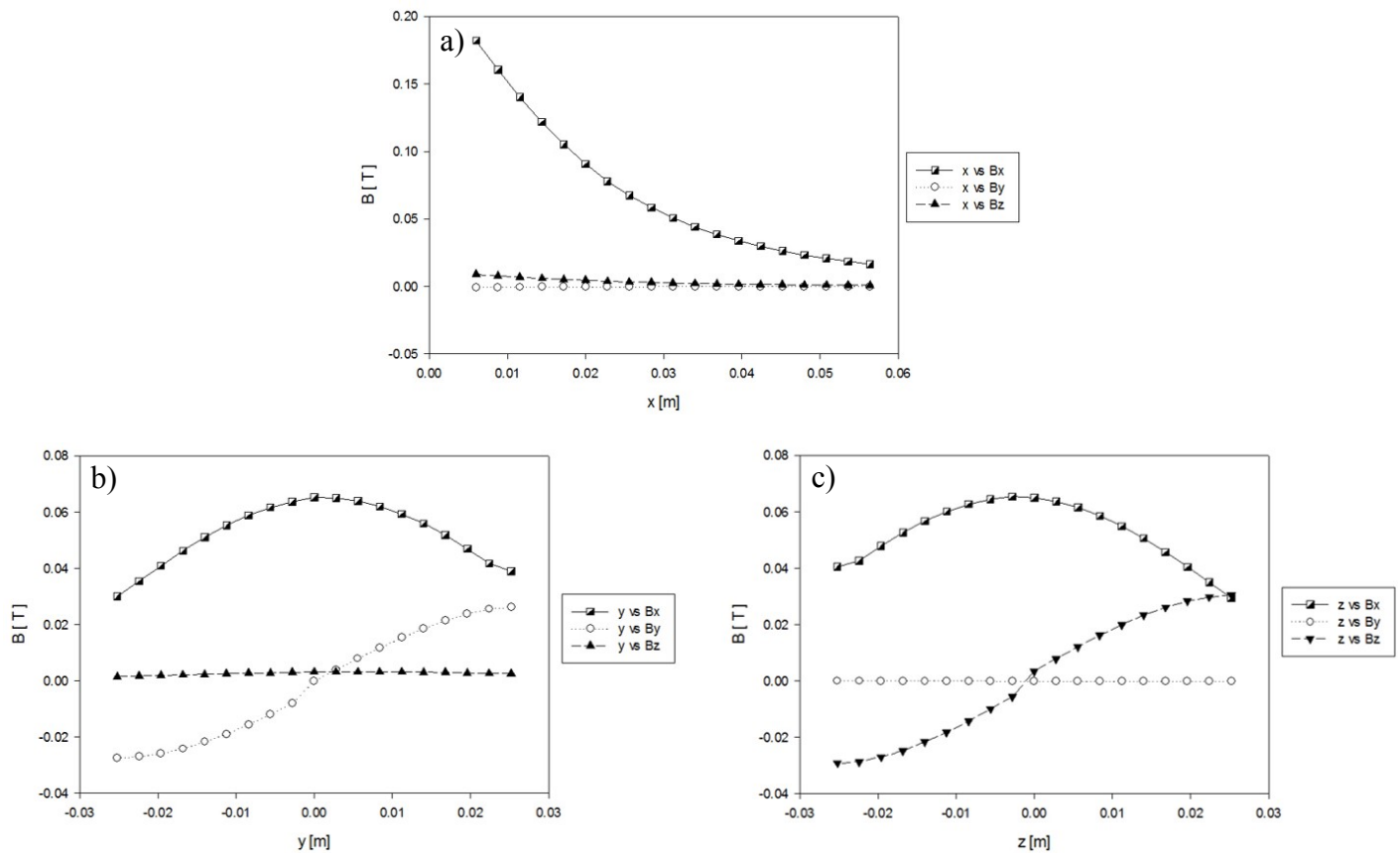


Figura 9. Campo magnético al centro de la cavidad vs. posición a) en el eje “x”, b) en el eje “y”, c) en el eje “z” del imán cuadrado de 5.08 x 5.08 x 1.27 cm.

Las Figuras 8 y 9 reflejan los campos magnéticos medidos en los ejes x, y, z, mismos que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Intensidad de campo magnético

Imanes	x [m]	y [m]	z[m]
2.54 cm	0.17	0.019	0.019
5.08 cm	0.18	0.065	0.065

Adicionalmente, a las mediciones de PIV, se mide la diferencia de potencial como función del tiempo y para distintos valores de corriente, mediciones preliminares muestran que, usando el imán pequeño, el flujo evoluciona dependiendo de la corriente, es decir, en la Figura 10, se observa que, a 20 mA, el voltaje tarda en estabilizarse, es decir, a mayor corriente el flujo alcanza un estado estacionario en instantes de tiempo más cortos, resultando un flujo más inercial.

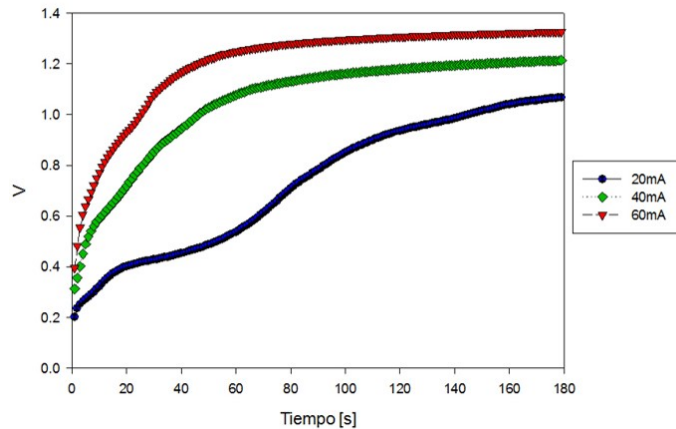


Figura 10. a) Voltaje vs. tiempo a distintos valores de corriente usando un imán de 2.54 x 2.54 x 1.27 cm.

Hasta ahora, se han realizado varias pruebas a distintos valores de corriente, 20 y 40 mA, obteniendo campos y perfiles de velocidad.

En la Figura 11, se observan resultados después del análisis con el programa DynamicStudio 5.1 con el filtro de estadísticas de vectores, el cual muestra un promedio de los vectores de velocidad de las partículas en un fotograma determinado. Trabajos preliminares con una concentración de KCl más baja, presentaron velocidades de 0.2 mm/s, en cambio al aumentar la concentración de KCl hasta el 30%, se obtuvieron velocidades para 20 y 40 mA de 0.5 mm/s y 0.607 mm/s, respectivamente.

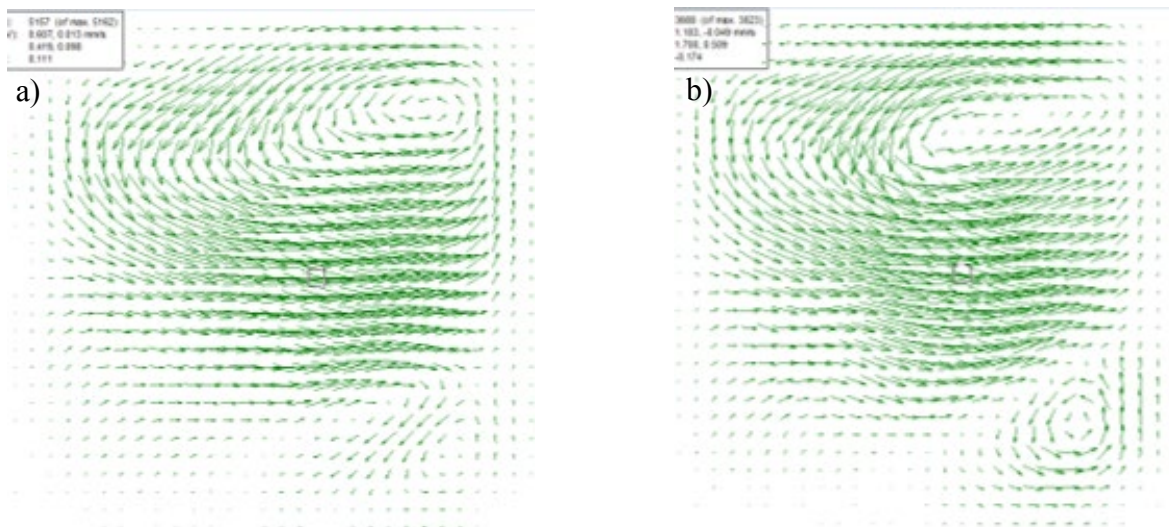


Figura 11. Campo de velocidades a corrientes de a) 20 mA y b) 40 mA usando un imán de 2.54 x 2.54 x 1.27 cm.

Los perfiles de velocidad se extraen de los campos promedio de velocidad para analizar la magnitud de las velocidades U y V en las direcciones “x” y “y”.

En la Figura 12, se aprecian los perfiles de velocidad para la solución electrolítica de KCl, notando que en ambos casos se observa que, en presencia de un campo magnético, existe un decaimiento en magnitud conforme nos alejamos de la zona de mayor influencia del campo magnético y en zonas cercanas a la pared de la cavidad, los perfiles tienden a cero, debido a la condición de no deslizamiento.

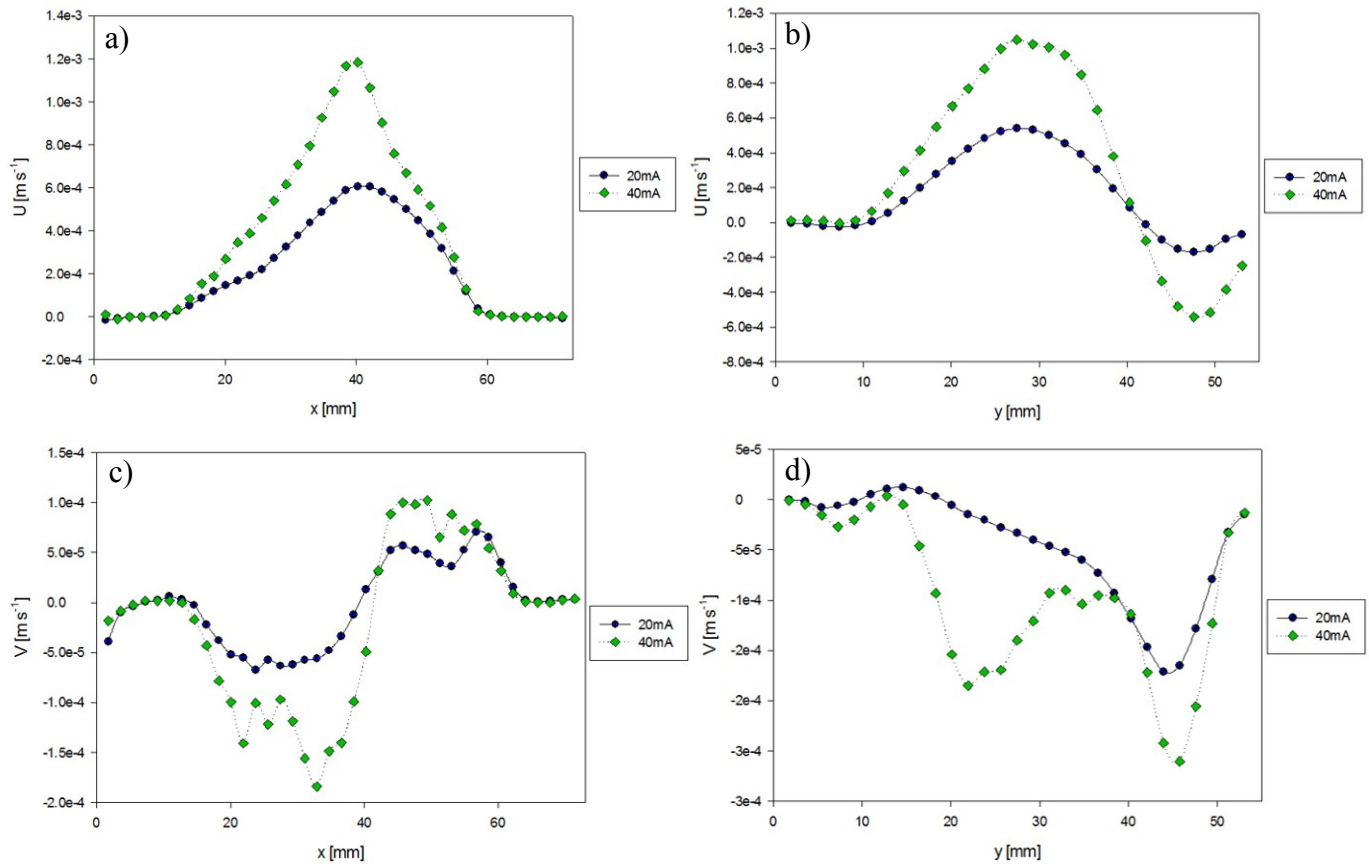


Figura 12. Perfiles de velocidad obtenidos en el electrolito KCl induciéndole un campo magnético no uniforme de dimensiones 2.54 x 2.54 x 1.27 cm: a) U vs. x , b) U vs. y , c) V vs. x , d) V vs. y .

Etapa actual:

1. Se han realizado pruebas experimentales a valores de corriente de 10, 20, 40, 50, 60, 80, 90, 100, 200 y 300 mA, por consiguiente, se ha determinado un rango de corriente considerando que a una cantidad de corriente mayor se presenta electrolisis más fácilmente, afectando a los resultados.
2. Por lo pronto, se estudia el componente electrolítico en presencia de un imán cuadrado de medidas de 2.54 x 2.54 x 1.27 cm.

Problemas específicos:

1. Sostener con cuidado el prototipo al trasladarlo de un punto a otro, debido que el prototipo tiene un peso considerable que puede ocasionar que se deslice y se estrellen las paredes de vidrio como paso en una ocasión con una de las paredes, por lo que se cambió para seguir adelante con la experimentación.
2. Debido a que el electrolito KCl tiene una elevada concentración, tiende a desgastar el pegamento con el que se encuentra sellada la cavidad del prototipo, causando problemas de fuga.
3. Una vez que el prototipo es llenado con la solución electrolítica, debe permanecer libre de burbujas, sin embargo, se hacen presentes cuando se tapa completamente, por lo que el paso debe de ser repetido.
4. Existen problemas de corrosión, por tanto, se debe de realizar la prueba experimental en el menor tiempo posible.
5. El preparar el electrolito implica un alto consumo de la sal.
6. La fragilidad de los imanes, causa que al golpearse o romperse tienden a desmagnetizarse.

Referencias:

- [1] Ambri Inc. Ambri brochure. <https://goo.gl/bXshK3>.
- [2] Kelley, D. H. and Sadoway D. R. Mixing in a liquid metal electrode. *Physics of Fluids* **26**, 057102 (2014).
- [3] Weber, N. and Galindo, V. Current-driven flow instabilities in large-scale liquid metal batteries, and how to tame them. *Journal of Power Sources* (102), 166-173 (2014).
- [4] R.J. Adrian and J. Westerweel. Particle Image Velocimetry. Cambridge University Press, 2010.
- [5] Perez A. and Kelley, D. H. Ultrasound Velocity Measurement in a Liquid Metal Electrode. *J. Vis. Exp.* (102), 1-11 (2015).
- [6] Rawajfeh K. and Saidan M. Upgrading of Commercial Potassium Chloride by Crystallization: Study of Parameters Affecting the Process. *Life Sci J*, 8-15 (2014).

Cronograma

Tercer semestre (2019-2)

Mes	Actividades
Febrero	<ul style="list-style-type: none">• Montaje experimental para el desarrollo de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV).• Mediciones de conductividad del electrolito de trabajo, así como la exploración y determinación de un rango de corriente a inyectar a través de él.• Redacción de tesis.
Marzo	<ul style="list-style-type: none">• Desarrollo de experimentos utilizando un imán pequeño de geometría cuadrada de 2.54 cm de lado, en rangos de corriente estudiados.• Procesamiento de imágenes capturadas con ayuda del software DynamicStudio 5.1, además de un pos-procesamiento de datos para la obtención de campos y perfiles de velocidad.• Repetición de pruebas experimentales con base a resultados erróneos.
Abril	<ul style="list-style-type: none">• Pruebas experimentales usando un imán grande cuadrado de 5.08 cm de lado, a un determinado rango de corriente.• Procesamiento de imágenes y pos.procesamiento de datos.• Repetición de pruebas fallidas.• Participación en el 7º simposio anual de estudiantes del IIM y a la 5ª reunión anual del capítulo estudiantil IIM-SMM.
Mayo	<ul style="list-style-type: none">• Análisis de datos obtenidos con el imán pequeño y grande.• Comparación de las mediciones de perfiles de velocidad obtenidos medianteUDV con los perfiles extraídos de campos de velocidad de PIV.• Reportar resultados en el avance de tesis.
Junio	<ul style="list-style-type: none">• Trabajo experimental sobre dos capas, el electrolito y una aleación de metal líquido Galio/ Indio / Estaño (GaInSn) en presencia de un imán localizado pequeño, aplicando la técnica PIV para el estudio del electrolito y UDV para el estudio del metal líquido.• Análisis de datos por medio de los softwares correspondientes de cada técnica.
Julio	<ul style="list-style-type: none">• Continuar la experimentación en los dos fluidos considerando el imán grande.• Análisis de datos.

Cronograma

Cuarto semestre (2020-1)

Mes	Actividades
Agosto	<ul style="list-style-type: none">• Repetición de pruebas fallidas.• Participación en el XXVIII International Materials Research Congress, Cancún, Quintana Roo.
Septiembre	<ul style="list-style-type: none">• Análisis y discusión de los resultados obtenidos durante los semestres.• Reportar resultados en la tesis.
Octubre	<ul style="list-style-type: none">• Borrador final de tesis.
Noviembre	<ul style="list-style-type: none">• Mandar tesis a sinodales para su revisión.• Realizar los trámites necesarios para la obtención del grado de estudios.



Dr. Alberto Beltrán Morales
Tutor principal