



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES, UNIDAD MORELIA

“CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL FLUJO
DE UN ELECTROLITO EN UNA CAVIDAD CÚBICA”

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

PRESENTA:

I.Q. SELENE AGUILAR CAMPOS

TUTOR PRINCIPAL:

DR. ALBERTO BELTRÁN MORALES
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES, UNIDAD MORELIA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

DR. ISMELI ALFONSO LÓPEZ
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES, UNIDAD MORELIA,
UNAM

DR. JOSÉ NÚÑEZ GONZÁLEZ
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA,
UNAM

MORELIA, MICHOACÁN, JULIO, 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

Dedico esta tesis a cada una de las personas que amo y admiro, las cuales han sido parte fundamental en mi vida, el motor para salir adelante y mi fortaleza para hacer este sueño posible, pero sobre todo doy gracias a Dios por ser mi guía en esta travesía y bendecirme día con día.

Agradecimientos institucionales

A mi tutor y guía de esta tesis, al Dr. Alberto Beltrán Morales por darme la oportunidad de trabajar con él y ser parte de mi formación académica, por su paciencia para ayudarme y por el conocimiento transmitido.

Agradezco a mis tutores, el Dr. Ismeli Alfonso López y el Dr. José Núñez González por sus consejos, críticas y comentarios aportados, y especialmente al Dr. Michel Alejandro Rivero Corona por apoyarme en mejorar este trabajo de tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca proporcionada con el número de becario 896607, la cual representó un gran apoyo económico para concluir con mis estudios de maestría.

A los proyectos que financiaron este trabajo: UNAM-DGAPA-PAPIIT IN108619, Flujo en un Electrodo de Metal Líquido Efecto de la Velocidad en el Potencial Eléctrico; UNAM-DGAPA-PAPIIT IA 102017, Estudio de campos magnéticos inducidos en flujos Magnetohidrodinámicos y SENER-CONACYT 2014 246911, Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación Térmica y Eléctrica.

A la Unidad Morelia del Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México, por las facilidades otorgadas para realizar esta investigación en su laboratorio de ahorro y almacenamiento de energía.

A la Coordinación de Estudios de Posgrado (CEP), a través de su Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado (PAEP) en la UNAM, por el apoyo para la compra de materiales y reactivos, para la participación en el XXVIII International Materials Research Congress, llevado a cabo en Cancún, Quintana Roo, así como para la asistencia al XXV Congreso de la División de Dinámica de Fluidos realizado en Querétaro.

Agradecimientos personales

A mis padres, Sergio y Etelvina, por su amor, apoyo incondicional y por los valores inculcados que me enseñaron a ser mejor persona. Gracias porque ustedes son mi motivo para cumplir con mis objetivos, espero siempre esten orgullosos. Los amo con todo mi corazón y siempre viviré eternamente agradecida de cuanto han hecho por mí.

A mis hermanos, Roberto Carlos y Ana Lilia, por estar conmigo en los momentos importantes de mi vida, por preocuparse por mí, por las muestras de cariño que siempre me dan, pero sobre todo gracias por sus regaños que me ayudan a crecer como persona.

A mi novio Fabián, quién es parte importante en mi vida. Gracias por el gran amor que me tienes y demuestras todos los días, por escucharme, por estar conmigo en los momentos buenos y no tan buenos, por ayudarme a creer más en mí y motivarme a continuar con la realización de mis sueños. ¡Te amo!

A mi amiga y compañera de maestría, Tania, con la que llevo casi siete años de amistad. Gracias por todo los momentos que hemos pasado juntas en los que a veces reímos y otras veces lloramos, por esos momentos de estrés en los que en ocasiones no sabemos que hacer pero que sin embargo ahí estamos para apoyarnos.

A mis amigos Christian, Carlos y Yovany, quienes conocí en la maestría. Gracias por sus pláticas tan amenas, el apoyo que me dieron y los momentos compartidos durante este tiempo, espero nuestra amistad continúe por más años.

Contenido

Resumen	I
Abstract	II
Lista de Figuras	III
Lista de Tablas	VI
Objetivos	VII
Hipótesis	VIII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
2. Diseño y montaje experimental	8
3. Metodología	13
3.1. Propiedades físicas del electrolito	13
3.2. Campo magnético	16
3.3. Densidad de corriente eléctrica	17
3.4. Técnica de medición PIV	17
3.4.1. Campo de velocidades	19
3.4.2. Pos-procesamiento de imágenes	21
3.5. Técnica de medición UDV	22
3.6. Medición en un sistema de dos capas	23
4. Resultados y discusión	26
4.1. Perfiles de campos magnéticos	26
4.2. Flujo del electrolito	29
4.2.1. Campos de velocidad	29

4.2.2. Perfiles de velocidad	32
4.2.3. Diferencia de potencial	34
4.2.4. Energía cinética del flujo	36
4.3. Perfiles de velocidad usando la técnica UDV	38
4.4. Sistema estratificado de fluidos conductores	39
4.4.1. Patrones de flujo	40
4.4.2. Perfiles de velocidad	40
4.4.3. Diferencia de potencial	43
4.4.4. Energía cinética	44
5. Conclusiones y trabajo futuro	45
5.1. Conclusiones	45
5.2. Trabajo futuro	47
A. Dispositivo experimental	48
B. Propiedades de los fluidos de trabajo	51
B.1. Metodología para medir la conductividad	52
C. Campo magnético	55
D. Técnica UDV	58

Resumen

En este trabajo, se caracteriza el flujo de un electrolito débil a base de agua destilada y cloruro de potasio (KCl) a una concentración del 30 % en masa, confinado en una cavidad cúbica y agitado electromagnéticamente por una fuerza de Lorentz. La cavidad está compuesta de paredes laterales aislantes y un par de electrodos de cobre que funcionan como tapas superior e inferior; a través de ellos y usando una fuente de poder se inyecta una corriente eléctrica directa en la dirección ascendente; en particular, se usan valores de 20, 40, 60 y 80 mA. En contacto con una de las caras laterales de la cavidad se pone un imán permanente cuyo campo magnético interactúa con la corriente eléctrica generando una fuerza de Lorentz capaz de agitar al electrolito. Los experimentos se realizan para dos imanes de tamaño diferente, con dimensiones de lado de 2.54 y 5.08 cm. Un segundo conjunto de experimentos (y sólo para el imán más pequeño) consistió en llenar la mitad del fondo de cavidad con la aleación eutéctica de GaInSn (metal líquido a temperatura ambiente), ocupando ahora el electrolito solo la mitad superior. Mediante la técnica óptica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés) fue posible caracterizar el flujo del electrolito en un plano central de la cavidad, perpendicular a la superficie del imán. Las mediciones fueron comparadas con perfiles de velocidad obtenidos con el equipo de velocimetría por efecto Doppler (UDV, por sus siglas en inglés). Las variaciones del voltaje (diferencia de potencial) por efecto del flujo es también medida en las terminales de los electrodos. Nuestros principales resultados indican que la velocidad del flujo aumenta monótonicamente con la corriente; sin embargo, lo hace con distinta funcionalidad dependiendo del tamaño del imán; la diferencia de potencial también aumenta de forma no lineal como función de la corriente.

Abstract

In this work, the flow of a weak electrolyte based on distilled water and potassium chloride (KCl) at a concentration of 30 % by mass is characterized; it is confined into a cubic cavity and electromagnetically stirred by a Lorentz force. The cavity has insulating side walls and a pair of copper electrodes that functions as upper and lower covers; through them and using a dc power supply, it is injected an electric current in the ascendant direction; in particular, 20, 40, 60 and 80 mA values are used. A permanent magnet is located in contact with one of the side walls of the cavity and its magnetic field interacts with the electric current generating a Lorentz force that stirs the electrolyte. The experiments were carried out for two magnets of different size, with side dimensions of 2.54 and 5.08 cm. Finally, and only of the smallest magnet, a second set of experiments was performed by filling the bottom half of the cavity with the GaInSn eutectic alloy (liquid metal at room temperature) and the rest of the cavity with the electrolyte. By using the particle image velocimetry technique (PIV) it was possible to characterize the flow of the electrolyte on a central plane of the cavity, perpendicular to the surface of the magnet. In order to validate our results, a good comparison is observed between PIV measurements and velocity profiles obtained with a ultrasonic Doppler velocimeter (UDV) equipment. The potential difference variation by effect of the flow is also measured in the terminals of the electrodes. Our main findings are that: the velocity increases monotonically with the current; however, this increasing non-linear behavior depends on the dimensions of the magnet; the potential difference also increases in a non-linear way as a function of the current.

Lista de Figuras

1.1.	Selección de los elementos para una BML.	2
1.2.	Esquema ilustrativo de una BML en los procesos de (a) descarga y (b) carga.	4
1.3.	Representación esquemática de una BML en: (a) estratificación estable y (b) cortocircuito debido a la deformación de la capa de electrolito.	4
2.1.	(a) CAD del prototipo con dimensiones principales en centímetros y (b) prototipo construido.	9
2.2.	Imanes de NdFeB (a) M1 y (b) M2; con dimensiones de lado de 2.54 y 5.08 cm, respectivamente.	10
2.3.	Sistema de referencia colocado sobre la superficie de los imanes identificada con el polo positivo, para las mediciones de campo magnético en los imanes: (a) M1 y (b) M2, unidades en centímetros.	10
2.4.	Configuraciones experimentales para los imanes M1 y M2. (a) y (b), CAD. (c) y (d) Prototipo fabricado.	11
3.1.	Montaje para mediciones de conductividad eléctrica.	14
3.2.	Montaje experimental para la medición del campo magnético de los imanes.	16
3.3.	Montaje experimental (a) CAD y (b) montaje real para el estudio del flujo usando PIV 2D.	18
3.4.	Representación de la fuerza de Lorentz \mathbf{F} perpendicular a la densidad de corriente \mathbf{J} y al campo magnético \mathbf{B}	19
3.5.	Imágenes de partículas en el plano de medición para: (a) M1 y (b) M2.	20
3.6.	Esquema representativo del plano de análisis de la técnica PIV 2D.	20
3.7.	Interfaz del software DynamicStudio 5.1.	21
3.8.	Montaje experimental (a) CAD y (b) montaje real para el estudio de la capa electrolítica aplicando la técnica UDV.	23
3.9.	Montaje experimental (a) CAD y (b) montaje real para el estudio de dos capas, metal líquido y electrolito.	24
3.10.	Vista lateral del contenedor confinado a las dos capas, metal líquido (GaInSn) y electrolito.	25

4.1. Ejes de simetría para las configuraciones experimentales con imanes: (a) M1 y (b) M2.	27
4.2. Magnitudes de las componentes del campo magnético para el imán M1 medidas en los ejes de simetría de la cavidad a lo largo de las coordenadas: (a) x , (b) y y (c) z	28
4.3. Magnitudes de las componentes del campo magnético para el imán M2 medidas en los ejes de simetría de la cavidad a lo largo de las coordenadas: (a) x , (b) y y (c) z	28
4.4. Campos de velocidad, vorticidad y líneas de corriente para el imán M1 y valores de corriente de: (a) $I = 20$ mA, (b) $I = 40$ mA, (c) $I = 60$ mA y (d) $I = 80$ mA.	30
4.5. Campos de velocidad, vorticidad y líneas de corriente para el imán M2 y valores de corriente de: (a) $I = 20$ mA, (b) $I = 40$ mA, (c) $I = 60$ mA y (d) $I = 80$ mA.	31
4.6. Componentes de la velocidad a lo largo de los ejes de simetría de la cavidad para M1 y para los distintos valores de corriente. (a) u vs. x , (b) u vs. z , (c) w vs. x y (d) w vs. z	33
4.7. Componentes de la velocidad a lo largo de los ejes de simetría de la cavidad para M2 y para los distintos valores de corriente. (a) u vs. x , (b) u vs. z , (c) w vs. x y (d) w vs. z	34
4.8. Diferencia de potencial vs. tiempo de flujo para los distintos valores de corriente y para los imanes: (a) M1 y (b) M2.	35
4.9. Diferencia de potencial promedio vs. corriente eléctrica para los campos M1 y M2, las líneas representan los respectivos ajustes polinomiales.	36
4.10. Parámetro E_c como función del tiempo de flujo para los distintos valores de corriente y configuraciones de campo: (a) M1 y (b) M2.	37
4.11. Energía cinética promedio vs. corriente eléctrica para los campos M1 y M2, las líneas representan los respectivos ajustes polinomiales.	38
4.12. Componente u de la velocidad vs. x para el campo M1 medidos con la técnica: (a) PIV y (b) UDV.	39
4.13. Campos de velocidad, vorticidad y líneas de corriente para el campo M1 y densidades de corriente de: (a) 20 mA y (b) 60 mA.	40
4.14. Componente u de la velocidad para un sistema estratificado de dos capas (a) y (c), y para el electrolito (b) y (d); usando un campo M1.	41
4.15. Componente w de la velocidad para un sistema estratificado de dos capas (a) y (c), y para el electrolito (b) y (d); usando un campo M1.	42

4.16. Diferencia de potencial para el sistema de capas estratificadas de fluidos conductores.	43
4.17. Parámetro de energía cinética para el campo M1 en el sistema estratificado. .	44
A.1. Esquema representativo de la cavidad de vidrio, dimensiones en centímetros.	49
A.2. Esquema representativo de los electrodos de cobre, dimensiones en centímetros.	49
A.3. Esquema representativo de las bases de acrílico, dimensiones en centímetros.	50
A.4. Esquema representativo de las tapas de acrílico, dimensiones en centímetros.	50
B.1. Gráfico de (a) densidad y (b) viscosidad dinámica.	52
B.2. Conductividad eléctrica del KCl a diferentes concentraciones.	53
C.1. Ejes de simetría para las configuraciones experimentales cerca y lejos del imán: (a) M1 y (b) M2.	55
C.2. Magnitudes de las componentes del campo magnético para el imán M1 medidas en los ejes de simetría de la cavidad cerca del imán a lo largo de las coordenadas: (a) x , (b) y y (c) z	56
C.3. Magnitudes de las componentes del campo magnético para el imán M2 medidas en los ejes de simetría de la cavidad cerca del imán a lo largo de las coordenadas: (a) x , (b) y y (c) z	56
C.4. Magnitudes de las componentes del campo magnético para el imán M1 medidas en los ejes de simetría de la cavidad lejos del imán a lo largo de las coordenadas: (a) x , (b) y y (c) z	57
C.5. Magnitudes de las componentes del campo magnético para el imán M2 medidas en los ejes de simetría de la cavidad lejos del imán a lo largo de las coordenadas: (a) x , (b) y y (c) z	57
D.1. Equipo DOP 4000.	59

Lista de Tablas

3.1. Conductividad eléctrica de electrolitos preparados con distintas sales a diferentes concentraciones.	15
3.2. Intensidades de campo magnético al centro de la cavidad que confina al electrolito.	17
4.1. Propiedades para el imán M1 a diferentes valores de corriente.	44
B.1. Propiedades físicas del KCl a 20 °C.	51
B.2. Soluciones del KCl a diferentes concentraciones.	53
B.3. Propiedades físicas del GaInSn a 20 °C.	54
D.1. Parámetros de operación.	59

Objetivos

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 hidrodinámico 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 PIV para flujos a bajas velocidades de un electrolito.

Hipótesis

1. 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).
2. Mediciones de perfiles de velocidad obtenidos mediante UDV son consistentes con los perfiles extraídos de campos de velocidad de PIV.
3. La diferencia de potencial del sistema está relacionada con el patrón de flujo.

Introducción

El calentamiento global ha ido en incremento en los últimos años, una de las razones es la quema de combustibles fósiles para abastecer la demanda actual de electricidad, lo que lleva a tomar medidas al respecto para la generación de energía. Las energías renovables son consideradas como alternativa para la producción de energía sin causar daño al medio ambiente, entre ellas, destacan energías como la eólica y la solar; sin embargo, en algunas ocasiones las condiciones climáticas pueden llegar a ser desfavorables, como la falta de viento o la presencia de nubes, ocasionado que estas energías por sí solas no sean capaces de abastecer la demanda eléctrica, por tanto, para que esto sea posible es necesario contar con sistemas de almacenamiento robusto que permitan mantener el suministro de energía. Las baterías como sistema de almacenamiento de electricidad representan la opción más viable ([Beltrán, 2016](#); [Whittingham, 2012](#); [Yang et al., 2011](#)).

Actualmente, existen baterías para diferentes aplicaciones, algunas de ellas son: las baterías de Níquel–Cadmio (2,000 ciclos), Níquel–Metal Hidruro (2,000 ciclos), Ácido–Plomo ($\approx 1,000$ ciclos) y Iones de Litio (4,500 ciclos), siendo estas últimas las más utilizadas pero limitadas para satisfacer los requerimientos energéticos de dispositivos electrónicos de uso cotidiano como celulares, computadoras portátiles y demás ([Chalamala, 2007](#)). Aunque han tenido mejoras, dichas baterías presentan un corto ciclo de vida asociado al deterioro de los componentes sólidos que las conforman; y su escalamiento a sistemas de mayor capacidad eleva considerablemente su costo de manufactura ([Ning et al., 2015](#)).

En este contexto, recientemente se han propuesto las baterías de metal líquido (BML) como sistemas de almacenamiento estáticos y a gran escala de energía eléctrica provenientes de energías renovables como la eólica o la solar fotovoltaica. Una BML está constituida de materiales abundantes en la Tierra y de larga duración (mayor a 10,000 ciclos), lo que implica que sea de un costo relativamente bajo; opera de manera eficiente sin perder capacidad

o degradarse mecánicamente y no presenta problemas comunes que presentan las baterías convencionales compuestas por electrodos sólidos (Li et al., 2016; Stauffer, 2016). En su interior, están compuestas por tres capas estratificadas de fluidos conductores de electricidad, considerados inmiscibles entre sí; en particular, son dos capas de metales líquidos separadas por una sal fundida. Las dos capas de metal líquido funcionan como electrodo positivo y negativo, y la capa de sal fundida como electrolito que actúa como medio conductor entre los electrodos de metal líquido (EML). Los EML se comportan como el ánodo (metal líquido A) y cátodo (metal líquido B) de la batería, seleccionados de acuerdo a la electronegatividad de los metales, siendo los metales más electropositivos de baja densidad los candidatos para ser el electrodo negativo y los más electronegativos incluyendo los semimetales de alta densidad los candidatos para ser el electrodo positivo (Kim et al., 2013). Conceptualmente la BML se representa en la **Figura 1.1**.

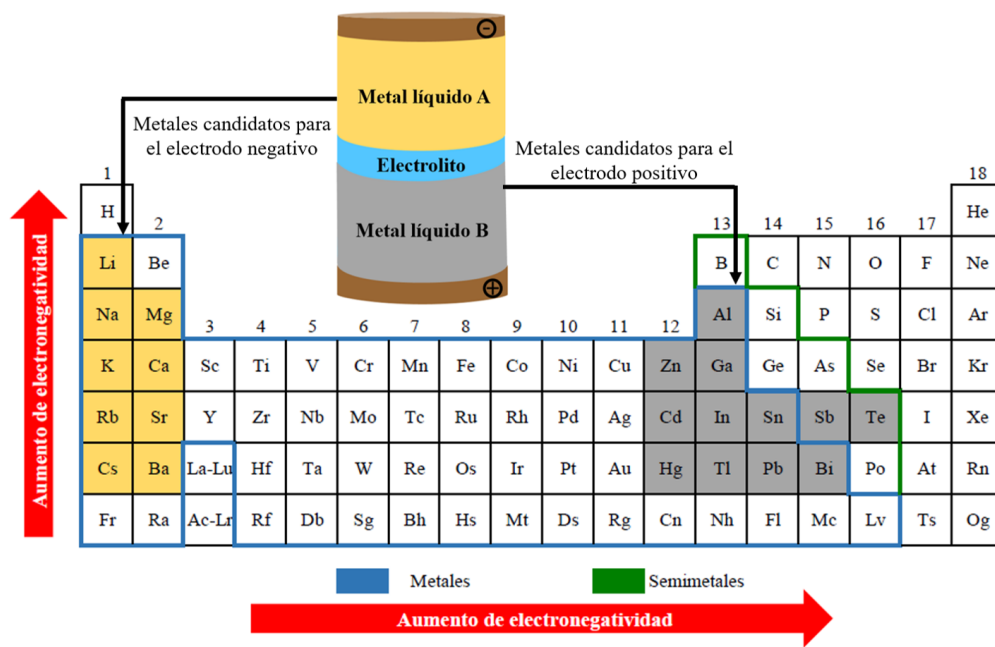


Figura 1.1: Selección de los elementos para una BML.

1.1. Antecedentes

La primera celda electroquímica líquida data de principios del siglo XX con el desarrollo de la celda de Hoopes (William, 1925), propuesta en el año 1925 para la producción electrolítica de aluminio de alta pureza. Estas celdas tienen gran similitud física a las BML pero difieren en cuanto a su funcionamiento y propósito. Años más tarde, las celdas electroquímicas tuvieron nuevas aplicaciones en sistemas de almacenamiento y conversión de

energía; específicamente, se desarrollaron sistemas electroquímicos regenerativos térmicamente (SERT) (Weber, Galindo, Stefani, y Weier, 2014), mismos que eran capaces de convertir el calor en electricidad. En seguida aparecieron las celdas bimetálicas, propuestas por Agruss en el año de 1960 (Kelley y Weier, 2018) con el objetivo de suministrar electricidad a las SERT. Para el siglo XXI, durante el año de 2005 en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), Sadoway se enfocó en las BML para el almacenamiento de energía a gran escala, pensadas para estar compuestas por electrodos internos económicos, abundantes y de larga duración. Primero desarrolló una BML de sodio–bismuto ($\text{Na} \parallel \text{Bi}$) que consistía en un electrolito de sal fundida ($\text{NaF}-\text{NaCl}-\text{NaI}$) y cuya celda operaba a una temperatura de $560\text{ }^\circ\text{C}$; sin embargo, fueron descontinuadas por la constante autodescarga y elevado costo del bismuto. Posteriormente, continuó con el estudio de celdas compuestas por electrodos de magnesio–antimonio ($\text{Mg} \parallel \text{Sb}$) separados por una sal eutéctica ($\text{MgCl}_2-\text{KCl}-\text{NaCl}$) que opera a $700\text{ }^\circ\text{C}$ (Bradwell, Kim, Sirk, y Sadoway, 2012), pero debido al bajo voltaje y baja capacidad de velocidad de la celda, tampoco fueron aprobadas. Por último, trabajó con celdas de litio–plomo–antimonio ($\text{Li}-\text{Pb}-\text{Sn}$) donde se empleó un electrolito de sal fundida ($\text{LiF}-\text{LiCl}-\text{LiI}$) y su temperatura de operación fue de $450\text{ }^\circ\text{C}$, pero su funcionamiento no fue el esperado debido a la alta descarga que implicó pérdida de capacidad. A partir de los resultados de Sadoway, se han desarrollado más trabajos explorando otros electrolitos y diferentes metales líquidos, además de aleaciones para los electrodos con el objetivo de encontrar los componentes adecuados bajo condiciones óptimas de operación. Actualmente, la compañía Ambri se encuentra trabajando en las BML, aunque no ha revelado información acerca de los componentes que usa y de las condiciones con las que opera, se ha reportado que su prototipo de BML cuenta con 2,500 celdas de sección transversal cuadrada de 10 y 20 cm (Kelley y Weier, 2018; Stauffer, 2016) con las que han logrado miles de ciclos de carga/descarga, confirmando la posibilidad de tener una vida útil de aproximadamente 15 años.

En general, una BML es una celda electroquímica que genera energía eléctrica a partir de reacciones químicas, por tanto, es evidente que al interior de este dispositivo ocurran procesos electroquímicos que se llevan a cabo por las distintas electronegatividades dadas entre los EML (Li et al., 2016). Durante el proceso de descarga la capa del electrodo negativo (metal más ligero encontrado en la parte superior) disminuye su grosor, debido a que el metal líquido A se oxida, y los cationes atraviesan la capa electrolítica para finalmente llegar al electrodo positivo (metal más denso ubicado en la parte inferior) a medida que los electrones son liberados por un circuito externo para proveer energía eléctrica. Cuando ocurre la carga de la batería, la capa del electrodo positivo aumenta en espesor, ya que los cationes del metal B son reducidos para formar una aleación líquida A–B (Kim et al., 2013), tal como se ilustra

en la **Figura 1.2**.

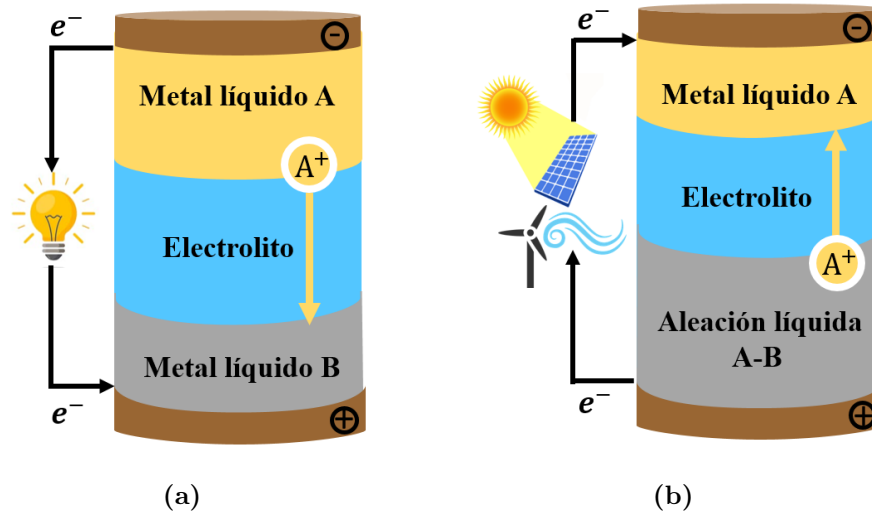


Figura 1.2: Esquema ilustrativo de una BML en los procesos de (a) descarga y (b) carga.

Las BML tienen la desventaja de ser altamente susceptibles a inestabilidades interfaciales dadas entre el metal líquido y el electrolito durante el proceso de carga/descarga. Además, al estar compuestas de fluidos conductores y sujetas a corrientes eléctricas elevadas de carga/descarga, es posible la presencia de recirculaciones al interior, pudiendo incluso mezclar las capas de fluidos y causar un cortocircuito en la batería (Horstmann, Weber, y Weier, 2018; Weier et al., 2017), ver **Figura 1.3**.

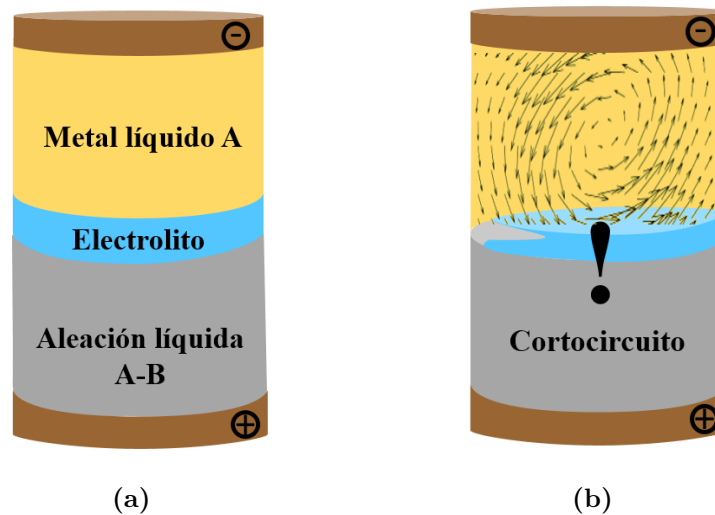


Figura 1.3: Representación esquemática de una BML en: (a) estratificación estable y (b) cortocircuito debido a la deformación de la capa de electrolito.

En trabajos recientes sobre la dinámica de fluidos, se han identificado varias inestabilidades que pueden surgir en las BML. Principalmente, la inestabilidad de Tayler (IT) (Stefani, Weier, Gundrum, y Gerbeth, 2011; Weber, Galindo, Priede, Stefani, y Weier, 2015; Weber, Galindo, Stefani, Weier, y Wondrak, 2013) que ocurre cuando la densidad de corriente suministrada excede un valor crítico que supera el efecto estabilizador de la resistividad y viscosidad de los fluidos propiciando la deformación de la capa de electrolito. Este fenómeno aparece primeramente en la capa del metal superior y posteriormente cuando el flujo se vuelve más fuerte, elimina la capa de electrolito ocasionando un cortocircuito en la celda. Con base en estudios, se conoce que la IT es un limitante para escalar las BML, ya que, la corriente crítica a la que se origina depende de la relación de altura/diámetro, pues entre más alargada, la batería se vuelve más susceptible a dicha inestabilidad.

Otra inestabilidad que presentan estos dispositivos, es la inestabilidad de chapoteo o almohadilla metálica (Weber, Beckstein, Galindo, et al., 2017; Weber, Beckstein, Herreman, et al., 2017; Zikanov, 2015) que se produce debido a la diferencia de conductividades que existe entre la sal y el metal líquido, de baja ($\sim 10^2$ S/m) y alta conductividad ($\sim 10^6$ S/m), respectivamente, la cual propicia que el metal líquido de baja resistencia y la sal fundida de alta resistencia generen una corriente vertical en la capa de electrolito conduciendo a su deformación. Dicha inestabilidad también sucede en celdas de reducción de aluminio.

Mantener los componentes de las BML en estado líquido requiere de trabajar a elevadas temperaturas, por lo que la convección térmica puede surgir por un gradiente de temperatura entre el electrolito caliente y los metales más fríos, producto del calentamiento de Joule, también conocido como calentamiento óhmico, generado durante la operación de carga/descarga de una BML. Debido a que la capa de electrolito tiene mayor resistencia, el calentamiento generalmente comienza en la parte de arriba del metal inferior y desde abajo del metal superior. Tal inestabilidad conocida como inestabilidad de Rayleigh-Bénard, está presente en BML de gran tamaño e inclusive en modelos de pequeña escala a nivel laboratorio. La inestabilidad de convección composicional, es otra inestabilidad similar, la cual se origina por variaciones en la concentración química dando lugar también a variaciones de densidad de los componentes. Sin embargo, esta inestabilidad aún no ha sido estudiada debido a la complejidad que representa de trabajar con diagramas de fases (Beltrán, 2017; Kelley y Sadoway, 2014; Shen y Zikanov, 2016).

Otra inestabilidad que se puede dar en las BML es la llamada convección térmica de Marangoni (Köllner, Boeck, y Schumacher, 2017) que se da en la interfase del metal líquido-electrolito y la cual es causada debido a variaciones en la tensión superficial del fluido, donde las zonas de alta tensión superficial atraen a las zonas de baja tensión superficial, pudiendo ser

motivo de variaciones en la composición química. Esta inestabilidad, así como la convección compositiva también permanece sin explorar.

El flujo de electro-vórtice (FEV) ([Ashour et al., 2018](#); [Herreman et al., 2019](#); [Shercliff, 1970](#)) es otra inestabilidad común en las BML, que afecta el sistema estratificado y que de ser lo suficientemente fuerte, puede deformar la interfaz de metal líquido-electrolito y en el peor de los casos cortocircuitar la celda. Los FEV se originan en las capas superior e inferior de metal líquido y cerca de los colectores de corriente (electrodos sólidos) conduciéndose lejos de las paredes. Un FEV se manifiesta cuando una densidad de corriente eléctrica pasa de un dominio sólido a una capa de fluido donde las líneas de campo de la corriente eléctrica se propagan divergiendo radialmente, mismas que en presencia de un campo magnético azimutal generan una fuerza de Lorentz responsable de empujar al metal líquido lejos de las paredes.

A la fecha, existen numerosos estudios tanto numéricos como experimentales enfocados en la correcta selección de materiales y distintas configuraciones para las BML; sin embargo, para lograr un diseño óptimo e integral es necesario conocer los fenómenos físicos involucrados en su funcionamiento. La magnetohidrodinámica (MHD) constituye un área de estudio centrada en comprender las interacciones entre el flujo de fluidos conductores y campos electromagnéticos; por lo que dada la configuración de las BML, resulta fundamental entender los fenómenos MHD presentes. En la dirección de flujos MHD existen diversos estudios teóricos y experimentales que involucran el uso de fluidos conductores como electrolitos y metales líquidos (MLs) a temperatura ambiente. Para el presente trabajo, es de interés describir brevemente estudios acerca del uso de electrolitos como fluidos de trabajo. Por ejemplo, para capas delgadas de electrolito en las que se hace circular una corriente eléctrica en presencia de campos magnéticos, se logra la generación de vórtices capaces de agitar al fluido y que son de importancia para aplicaciones de mezclado. En varios trabajos ([Figueroa, Cuevas, y Ramos, 2011, 2017](#); [Figueroa, Demiaux, Cuevas, y Ramos, 2009](#); [Salas, Cuevas, y Ramos, 2001](#)) se reportan mediciones experimentales del campo de velocidad en planos de flujos cuasi-bidimensionales, obtenidos mediante técnicas ópticas como la de velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés). Existen trabajos en cavidades cilíndricas ([Antar, Lalti, y Habchi, 2019](#); [Pérez-Barrera, Pérez-Espinoza, Ortiz, Ramos, y Cuevas, 2015](#); [Suslov, Pérez-Barrera, y Cuevas, 2017](#)), en los que se describe el flujo de una capa de electrolito impulsado por una fuerza azimutal de Lorentz. También han sido reportados estudios de flujos tridimensionales (3D) en cavidades de sección transversal cuadrada y generados electromagnéticamente, por ejemplo, en los trabajos de [Akkermans et al. \(2008\)](#); [Cieřlik, Kamp, Clercx, y Van Heijst \(2010\)](#), se estudian patrones de flujo 3D mediante la técnica de velocimetría estereoscópica por imágenes de partículas (SPIV, por sus siglas en

inglés).

La agitación electromagnética también se ha llevado a cabo en sistemas estratificados de un metal líquido y un electrolito con la finalidad de estudiar los patrones de flujo de ambos fluidos, particularmente para metales líquidos (Domínguez-Lozoya, Cuevas, Rivero, y Ramos, 2017; Kolesnichenko, Khripchenko, Buchenau, y Gerbeth, 2005; Liu, Stefani, Weber, Weier, y Li, 2004; Rivero, Cuevas, y Ramos, 2016). El estudio de flujos de metales líquidos ha sido poco explorado, debido a que una de sus propiedades físicas es el ser opacos, impidiendo el análisis de los campos de velocidad mediante técnicas experimentales, motivo por el que las simulaciones numéricas basadas en modelos de estudio cuasi-bidimensional permiten apreciar la estructura del flujo del fluido; en el trabajo de Lara, Figueroa, y Cuevas (2017) se estudia el flujo de una aleación eutéctica de GaInSn y un electrolito de HCl contenidos en una cavidad rectangular y expuestos a una corriente eléctrica directa que interactúa con un campo magnético no uniforme producido por imán permante dipolar. Estos fluidos son caracterizados a través de técnicas de medición, UDV para el metal líquido y PIV para el electrolito, usando las burbujas que se generan en el ácido como partículas trazadoras. A diferencia de estudios realizados en electrolitos confinados a configuraciones similares, se encontró un vórtice dipolar dentro de dos recirculaciones externas.

En el grupo de trabajo, se tienen estudios experimentales y numéricos del flujo de electrolitos a base de distintas sales (cloruro de potasio y bicarbonato de sodio) a baja concentración (8.6%), por medio de la técnica PIV se hicieron mediciones del campo de velocidad en el plano central de una cavidad cilíndrica para un flujo generado electromagnéticamente (Acosta-Zamora, 2019; Aguilasocho-Acosta, 2018; Herrera-Ortega, 2017), aplicando un modelo MHD implementado en el software COMSOL, fue posible reproducir las características generales del flujo.

En el presente trabajo, se estudia el flujo de un electrolito a base de sal de cloruro de potasio disuelta en agua destilada a una concentración elevada (30% en masa), confinado en una cavidad cúbica. Se inyecta a través del electrolito una corriente eléctrica directa en la dirección ascendente de la cavidad y se coloca un imán permanente en una de las caras laterales, la interacción del campo magnético del imán con la corriente genera una fuerza de Lorentz responsable de mezclar al fluido. Mediante la técnica PIV se estudia el flujo en un plano central de la cavidad, como función de la corriente eléctrica y para dos distintos imanes, el estudio cobra relevancia ya que permite entender patrones de flujo en posibles configuraciones relacionadas a las BML.

Diseño y montaje experimental

En este capítulo se describe el dispositivo diseñado para la realización de pruebas experimentales así como su respectivo montaje. También se describen los distintos componentes e instrumentos usados.

Anteriormente, se contemplaron contenedores cilíndricos para las BML, sin embargo, motivados por los recientes desarrollos industriales de BML ([Ambri, 2015](#)), se optó por el cambio a un dispositivo de geometría cúbica. Por este motivo y con fines experimentales, se diseñó una configuración de sección transversal cuadrada con ayuda del software comercial SolidWorks. Básicamente, el dispositivo consiste en una cavidad cúbica con un volumen interno de 125 cm^3 ; las cuatro paredes del contenedor de 0.6 cm de espesor están fabricadas en vidrio para tener acceso visual del flujo al interior. Cuenta con dos bases y dos tapas de acrílico de 1.5 cm de espesor que actúan como aislantes eléctricos; las bases están selladas a la cavidad por la parte superior e inferior y las tapas se encuentran fijas a un par de electrodos de cobre, los cuales cubren por completo la cavidad. Cada base cuenta con una perforación con el tamaño y forma de los o-rings utilizados con objeto de evitar la fuga del fluido; además, las cuatro piezas de acrílico tienen 8 orificios donde a través de ellos se colocan tornillos, tuercas y rondanas de cobre que por presión permiten mantener al prototipo completamente cerrado. Tras la fabricación y ensamblado del dispositivo, se aseguró de que no tuviera fugas. En la **Figura 2.1** se ilustra tanto el modelo geométrico realizado en SolidWorks como el dispositivo construido. Las piezas se describen a detalle en el **Apéndice A**.

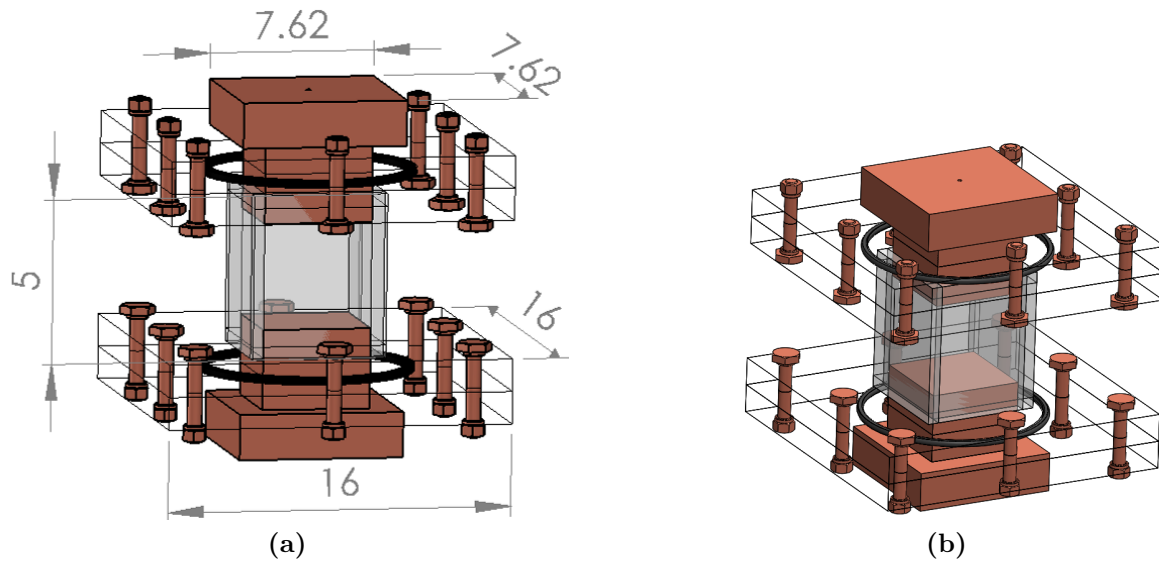


Figura 2.1: (a) CAD del prototipo con dimensiones principales en centímetros y (b) prototipo construido.

Una BML opera a elevadas corrientes eléctricas, resultados experimentales (Kelley y Weier, 2018) muestran que dichas corrientes al interactuar con su propio campo magnético generan una fuerza de Lorentz capaz de agitar a los fluidos. Para nuestro estudio experimental enfocado en el análisis del flujo en configuraciones relacionadas a las BML, la fuerza de Lorentz es debida a la interacción de la corriente inyectada con un campo magnético externo, generado por un imán permanente colocado en contacto con una de las caras laterales de la cavidad, la magnetización del imán es perpendicular a la corriente por lo que se espera que la fuerza de Lorentz sea máxima. Para estudiar el efecto del campo magnético en la dinámica del flujo se emplearon dos imanes permanentes de Neodimio–Hierro–Boro (NdFeB) de intensidades diferentes y sección transversal cuadrada con dimensiones de lado de 2.54 y 5.08 cm (ambos con un espesor de 1.27 cm), denominados M1 y M2, respectivamente.

Para caracterizar el flujo al interior de la cavidad, es necesario la medición del campo magnético producido por cada uno de los imanes. Imágenes de los imanes así como una presentación a escala del sistema de referencia usado en las mediciones para cada uno de ellos se muestra en la **Figura 2.2** y **2.3**, respectivamente.

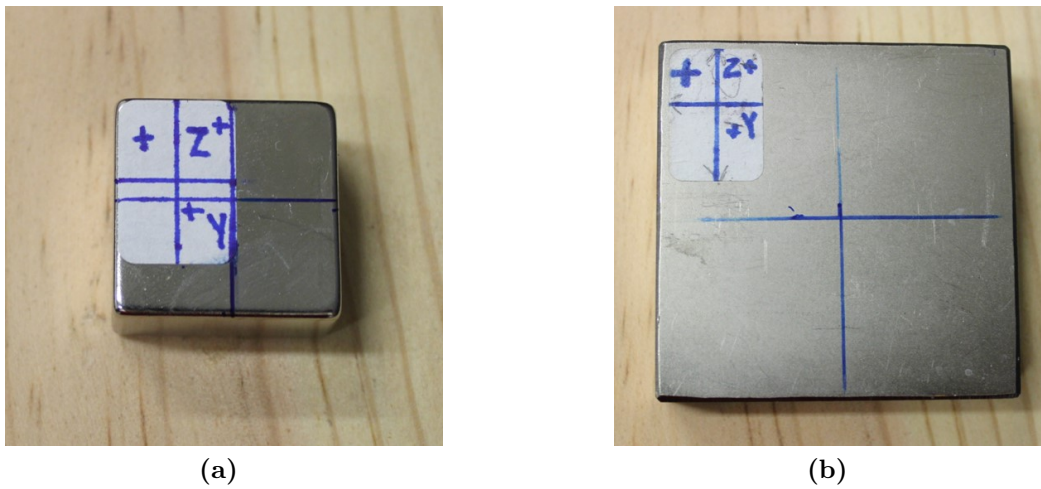


Figura 2.2: Imanes de NdFeB (a) M1 y (b) M2; con dimensiones de lado de 2.54 y 5.08 cm, respectivamente.

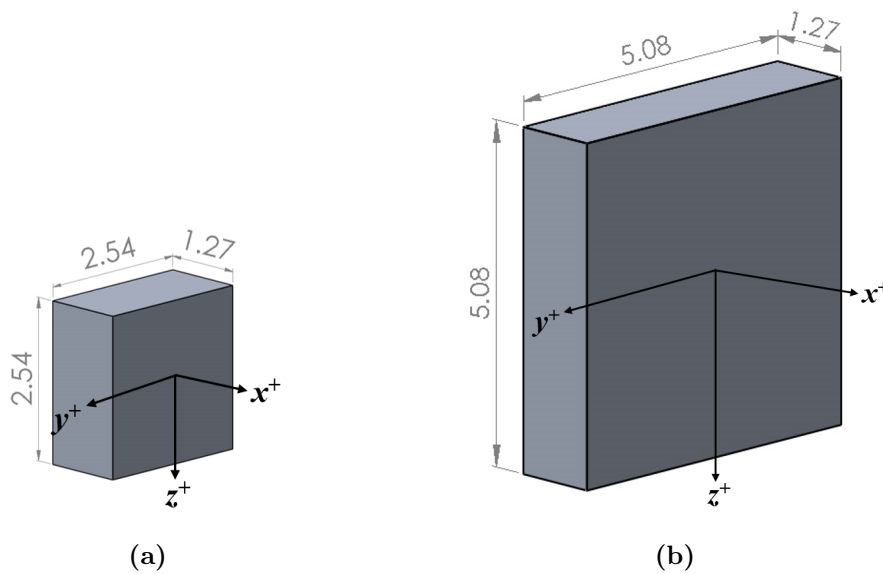


Figura 2.3: Sistema de referencia colocado sobre la superficie de los imanes identificada con el polo positivo, para las mediciones de campo magnético en los imanes: (a) M1 y (b) M2, unidades en centímetros.

Para centrar los imanes con su polo positivo en contacto con la superficie lateral del contenedor, se usa cinta doble cara, de tal forma que es posible tener dos configuraciones experimentales como las representadas en la **Figura 2.4**.

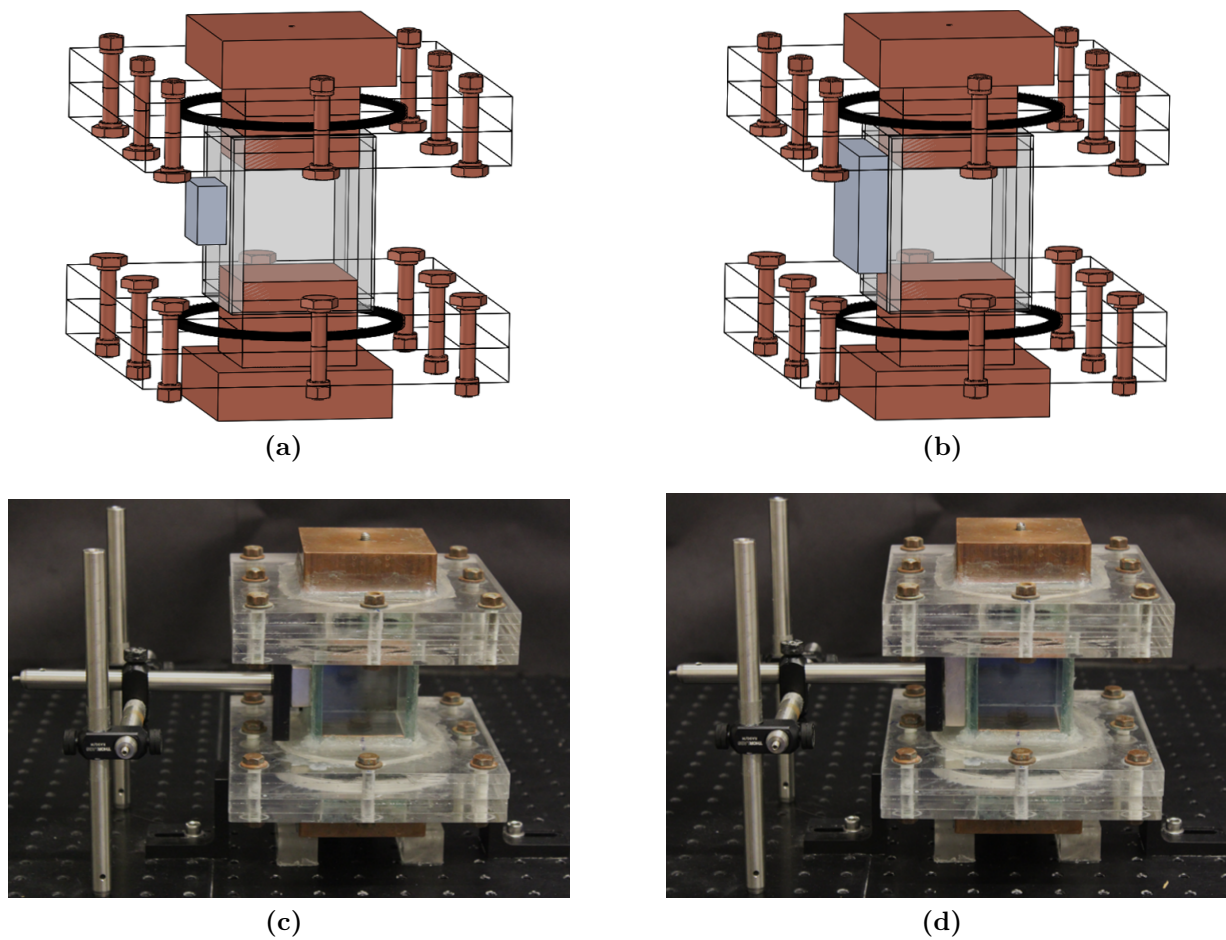


Figura 2.4: Configuraciones experimentales para los imanes M1 y M2. (a) y (b), CAD. (c) y (d) Prototipo fabricado.

Todos los montajes experimentales se realizaron sobre una placa perforada y usando distintos componentes de la marca Thorlabs, con objeto de garantizar una correcta alineación durante las mediciones experimentales, enfocadas en caracterizar el flujo al interior de la cavidad. En particular, los montajes fueron diseñados para poder hacer uso de técnicas de medición no intrusivas para la velocidad. La técnica óptica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés) fue usada para la medición de campos de velocidad en un plano del flujo. Adicionalmente, dichas mediciones fueron contrastadas con perfiles de velocidad obtenidos con el equipo de velocimetría de ultrasonido por efecto Doppler (UDV, por sus siglas en inglés). Se hicieron caracterizaciones del flujo en casos donde el electrolito llena por completo el contenedor y donde el electrolito solo ocupa la mitad superior de la cavidad, dado que el fondo es llenado por una aleación eutéctica de GaInSn, metal líquido a temperatura ambiente. Ambos fluidos se estratificaron en la cavidad por diferencia de densidades, por lo

que únicamente en la capa de electrolito por ser un fluido translúcido, fue posible usar la técnica óptica PIV y medir el campo de velocidad en un plano del flujo de electrolito, debido a que el GaInSn es un fluido opaco.

Para estudiar el flujo del fluido de trabajo, se usó un electrolito débil a base de agua y sal de cloruro de potasio (KCl). Después de probar diferentes concentraciones se decidió usar una concentración de 30 % en masa, que fue la que presentó un mayor valor para la conductividad eléctrica, ver **Apéndice B**. La corriente eléctrica inyectada en dirección axial es debida a la diferencia de potencial inducida en los electrodos de cobre de la cavidad mediante el uso de una fuente de poder (KEITHLEY 32–3). Para cada imán, se estudiaron cuatro distintos valores de corriente eléctrica: 20, 40, 60 y 80 mA. Para todos ellos el voltaje de la fuente se fijó en 32 V.

Es importante mencionar que durante el desarrollo de las pruebas experimentales (cada una con duración de 3 minutos) se enfrentó con el problema de la electrólisis, ya que el grado de concentración de la solución (30 % m) y la cantidad de corriente utilizada, propician el ataque electroquímico en los electrodos de cobre. Dicho ataque genera una capa de óxido que se mezcla con la solución e impide que la cámara logre captar las partículas inmersas en la solución, limitando el tiempo de análisis del flujo a no más de 30 segundos. Por esta razón el estudio del flujo se realiza antes de que ocurra el proceso de electrólisis en los electrodos.

Metodología

En esta sección se describe a detalle la metodología seguida para llevar a cabo las mediciones experimentales que permitan determinar el comportamiento del flujo en la cavidad. Primeramente se presentan las propiedades físicas del fluido de trabajo, posteriormente las mediciones de campo magnético de los imanes permanentes y de la diferencia de potencial en las terminales de los electrodos, como función de la corriente inyectada; finalmente, se describe la técnica PIV usada para las mediciones de campos de velocidad en un plano del flujo y el uso del equipo UDV para la medición de perfiles de velocidad.

3.1. Propiedades físicas del electrolito

Para el estudio de fluidos agitados de forma no intrusiva por medios electromagnéticos, la conductividad eléctrica del fluido de trabajo juega un papel fundamental dado que, limita la cantidad de corriente eléctrica que es posible hacer circular a través del fluido, típicamente los valores son órdenes de magnitud menores que los reportados para metales líquidos. En la BML, el electrolito que separa al cátodo y ánodo representa el fluido con la mayor resistividad, por lo que es en esta región en donde se presenta la mayor disipación de energía debido al calentamiento por efecto Joule (Xiang y Zikanov, 2019). En el presente estudio, la conductividad del electrolito se midió usando un conductímetro marca Termo Scientific, modelo Orion Star A212, que conectado a una computadora se controla por medio del software Star Com 1.0, el cual permite tomar mediciones de conductividad en tiempo real, además de conocer la temperatura a la que se encuentra la solución. El tiempo entre las lecturas sucesivas fueron tomadas cada 10 segundos por un lapso de tiempo de 5 minutos. En la **Figura 3.1** se muestra el montaje para la realización de mediciones de conductividad eléctrica.

Cabe mencionar que se hicieron mediciones de conductividad antes y después de cada corrida experimental obteniendo una diferencia de 0.75 % entre ambos valores.



Figura 3.1: Montaje para mediciones de conductividad eléctrica.

Las mediciones de conductividad se hicieron para distintos electrolitos, particularmente, para una mezcla de agua destilada con una conductividad de 3.155×10^{-4} S/m; y sales como: cloruro de sodio (NaCl), bicarbonato de sodio (NaHCO₃) y cloruro de potasio (KCl), todas de la marca J.T. Baker. En la **Tabla 3.1** se presenta el registro de las conductividades promedio de los tres distintos electrolitos a tres distintas concentraciones de porcentaje en masa (% m): 8.6, 17 y 30 %. Los resultados obtenidos, muestran que al incrementar la concentración, la conductividad aumenta de manera proporcional; presentando mayor conductividad el KCl y consecuentemente considerado como el electrolito de trabajo. Las conductividades a las concentraciones de 17 y 30 % para el NaHCO₃ no se reportaron debido a que la sal deja de ser soluble en agua a una concentración superior al 9.6 % en masa a una temperatura de 20 °C, motivo por el cual la solución presentaba sal no disuelta obteniendo valores bajos de conductividad eléctrica.

Tabla 3.1: Conductividad eléctrica de electrolitos preparados con distintas sales a diferentes concentraciones.

Sal	% m	σ (S/m)
KCl	8.6	12.032 ± 0.044
	17	21.755 ± 0.069
	30	34.689 ± 0.070
NaHCO ₃	8.6	5.121 ± 0.037
	17	-
	30	-
NaCl	8.6	11.239 ± 0.006
	17	18.110 ± 0.034
	30	23.931 ± 0.019

Dado que el límite de solubilidad del KCl en agua es de 34.218 % en masa a una temperatura de 20 °C (Rawajfeh, Al-Hunaidi, Saidan, y Al-Hamamre, 2014), se fija un valor de concentración estándar del 30 % en masa para la realización de pruebas experimentales.

Los datos de las propiedades de densidad y viscosidad dinámica fueron encontrados en la literatura, reportados en un rango de 0.5 – 24 % m (Lide, 2005) y con base en dichos datos fue posible obtener polinomios de ajuste para ambas propiedades, ver **Apéndice B**. Los polinomios resultantes para la densidad y la viscosidad dinámica son presentados por la **Ecuación (3.1)** y **(3.2)**. Para nuestra concentración de 30 % obtenemos valores de $\rho = 1.2 \times 10^3$ kg/m³ y $\mu = 1.002 \times 10^{-3}$ kg/m·s, respectivamente.

$$\rho [\% \text{ m}] = 6.808 (\% \text{ m}) + 996.434, \quad (3.1)$$

$$\mu [\% \text{ m}] = 6.714 \times 10^{-9} (\% \text{ m})^3 - 3.353 \times 10^{-8} (\% \text{ m})^2 - 1.468 \times 10^{-6} (\% \text{ m}) + 1.002. \quad (3.2)$$

Tras caracterizar el electrolito se procede con la preparación de la solución (37.5 g de sal de KCl en un volumen de 125 ml), la cual produce una reacción endotérmica de manera instantánea alcanzando una temperatura interna de 12 °C que requiere de esperar a que la solución llegue a su temperatura ambiente. Posteriormente, al electrolito se le agregan 1 g de partículas de copoliamida marca Griltex 2A P1, con un diámetro promedio de 60 μm . Finalmente, el llenado de la cavidad debe hacerse con especial cuidado, asegurándose de no dejar burbujas al interior, pues es un factor que influye tanto en el desarrollo del experimento como en los resultados de las mediciones.

3.2. Campo magnético

Un parámetro de importancia para el estudio de patrones de flujo generados por la fuerza Lorentz, es el campo magnético producido por los imanes permanentes. Mediciones tridimensionales de campos magnéticos fueron realizadas con una probeta de efecto Hall ZOA3–3208–10, que conectada a un gaussmetro FW Bell 8030, permite obtener mediciones de las tres componentes del campo magnético: B_x , B_y , B_z sobre los ejes de simetría de cada imán. El montaje para la caracterización de los imanes se muestra en la **Figura 3.2**.

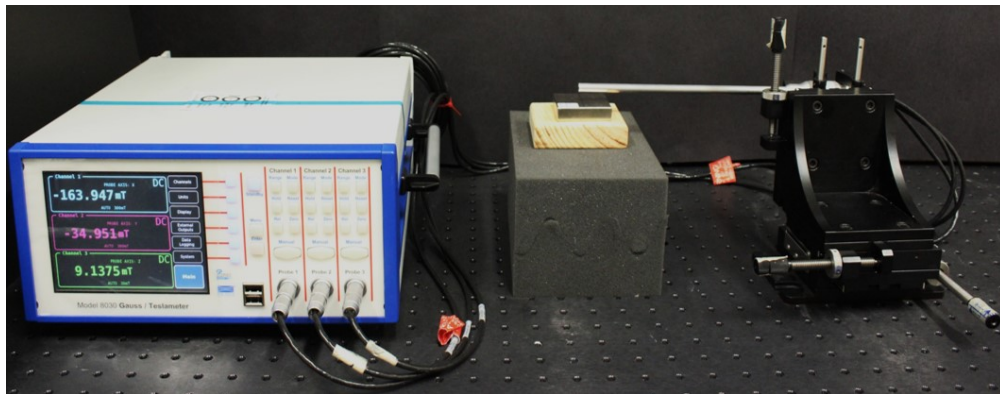


Figura 3.2: Montaje experimental para la medición del campo magnético de los imanes.

Las mediciones fueron realizadas en los ejes de simetría de tres distintos planos paralelos a la superficie del imán, y a lo largo del eje que parte del centro de la superficie del imán y hasta una altura de 5.6 cm. Los tres planos fueron medidos a una distancia de 0.6, 3.1 y 5.6 cm, que representan el primer plano (después de la pared de vidrio), el plano central y el último plano de la cavidad ocupado por el fluido (antes de la pared de vidrio contraria). Para mayores detalles, ver el **Apéndice C**.

Es importante mencionar que dado el tipo de imanes usados y su disposición con respecto a la cavidad, la magnetización de ellos se encuentra a lo largo del eje x , por lo que la componente B_x del campo es la de mayor magnitud. En la **Tabla 3.2** se presentan los valores de intensidad de campo magnético al centro de la cavidad. Dichos valores denotan una mayor magnitud de poco más del triple para el imán M2 en comparación con el imán M1.

Tabla 3.2: Intensidades de campo magnético al centro de la cavidad que confina al electro-lito.

Imán	$ Bx \times 10^{-3}$ [T]
M1	19.462
M2	65.330

3.3. Densidad de corriente eléctrica

Una vez realizado el montaje experimental, caracterizados los electrolitos y medidos los campos magnéticos de imanes, se realizan las corridas experimentales que consisten en inyectar una corriente eléctrica directa en la dirección $-z$ (simulando la carga de la batería) mediante la fuente de poder conectada a las terminales de los electrodos. Es importante mencionar que al invertir la corriente el fenómeno de electrólisis se hace presente de forma casi inmediata, limitando los tiempos de medición del flujo, por lo que no se realizaron para dicho caso. La corriente eléctrica aplicada fue de 20, 40, 60 y 80 mA. Pruebas experimentales para magnitudes menores de corriente mostraron movimiento del flujo a muy bajas velocidades y para corrientes mayores la electrólisis se hizo presente al instante.

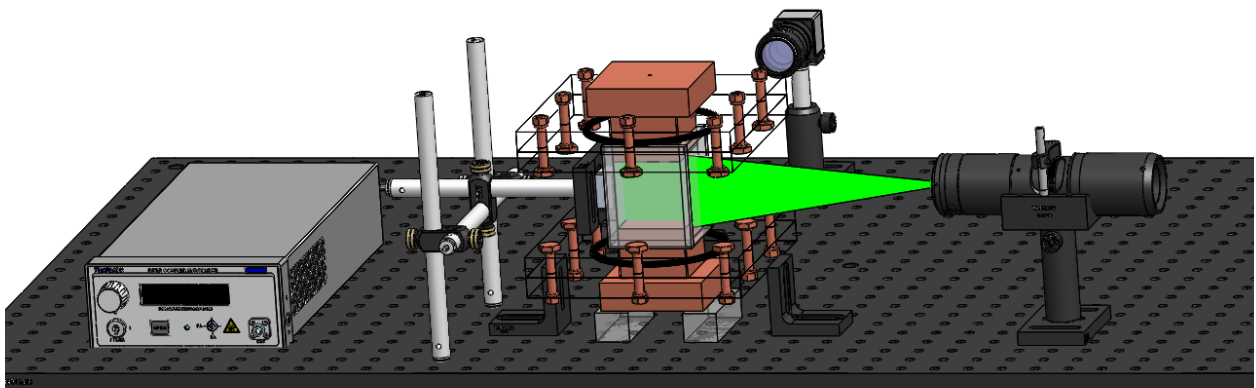
Para todos los experimentos, la fuente de voltaje es controlada mediante un programa desarrollado en el software LabView 2016 a fin de medir la diferencia de potencial en tiempo real y relacionar dichas mediciones con las de velocidad para distintos casos de corriente. Las lecturas de voltaje se estandarizaron a un intervalo de tiempo constante de 1 segundo durante 3 minutos, de los cuales después de un proceso de filtrado se usaron solo 30 segundos en los que se tuvo un estado estacionario.

3.4. Técnica de medición PIV

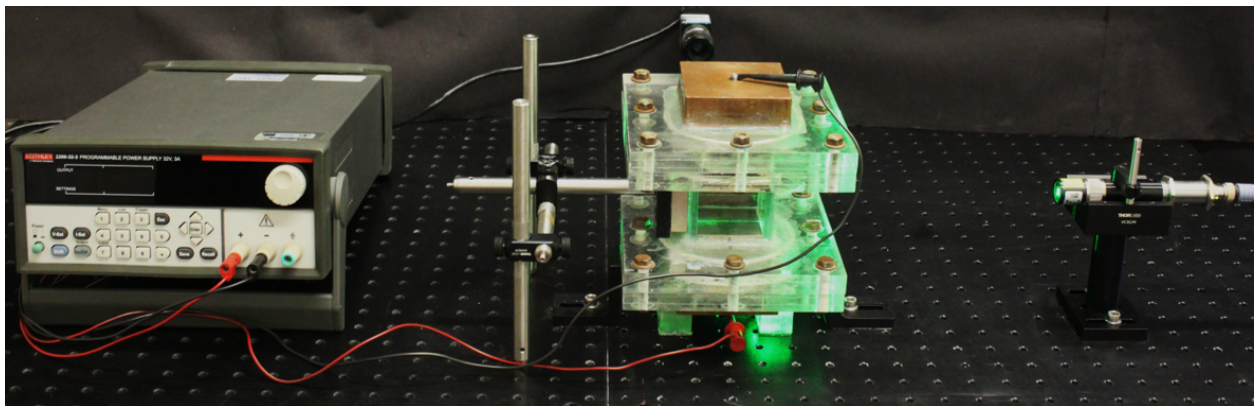
Debido a que visualmente no somos capaces de seguir la trayectoria del flujo que nos permite describir y entender la dinámica del fluido; es necesario la aplicación de técnicas ópticas, una comúnmente utilizada y que se empleó para estas pruebas experimentales, la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés) en dos dimensiones (2D), la cual se aplica a fin de analizar fluidos translúcidos y obtener mediciones de vectores de velocidad en la que dos componentes de velocidad son capturados a través de la sección transversal de un flujo ([Raffel, Willert, Wereley, y Kompenhans, 2007](#)). La caracterización del electrolito mediante esta técnica consiste básicamente en adquirir imágenes de las partículas suspendidas en el flujo a un intervalo de tiempo constante y mediante

el software DynamicStudio 5.1 es posible pos-procesar dichas imágenes (en pares) para la obtención de campos de velocidad que permiten explicar el comportamiento del fluido.

En la **Figura 3.3** se muestra la implementación de un sistema PIV 2D, el cual comprende de un láser continuo, marca Z-laser, modelo ZM18GF029 de 0.75 mm de espesor y longitud de onda de 532 nm (verde), localizado al costado derecho del prototipo a una distancia de 21.5 cm y una altura de 10.7 cm de la mesa al filo del lente. Por otro lado, en la parte posterior del prototipo y apartir del plano de medición a una longitud de 35.5 cm y altura de 10.5 cm de la mesa al filo del lente se encuentra una cámara monocromática digital de marca The Imaging Source, modelo DMK 23U618, de alta resolución espacial VGA (640×480 píxeles) con sensor integrado CCD Sony (H: $5.6 \mu\text{m}$, V: $5.6 \mu\text{m}$) que obtiene en promedio 120 fps. Además, a fin de obtener un mejor enfoque se adapta un lente de marca Pentax, modelo C31630KP con distancia focal de 16 mm. Esta configuración logra visualizar el plano objetivo (hoja de luz láser) centrado, de modo que todas las partículas en la lámina de luz están bien enfocadas.



(a)



(b)

Figura 3.3: Montaje experimental (a) CAD y (b) montaje real para el estudio del flujo usando PIV 2D.

En particular, el láser genera un plano que incide en el centro de la cavidad e ilumina las partículas sembradas en el fluido, las cuales se considera no alteran el flujo o inducen un movimiento adicional; mientras la cámara visualiza la región de medición y graba múltiples imágenes de las partículas trazadoras capaces de seguir con precisión el flujo. Dicha cámara es controlada mediante el software IC Capture 2.4, programa en el que manualmente se fijan parámetros como la velocidad de obturación determinada a 30 fps y tiempo estimado de grabación de 3 minutos.

3.4.1. Campo de velocidades

De acuerdo al sistema de referencia usado, se asume que la corriente eléctrica se encuentra en la dirección $-z$ y la componente principal del campo en la dirección x , por tanto, se espera que la fuerza de Lorentz apunte principalmente en la dirección $-y$, ver **Figura 3.4**. En general, dadas las condiciones experimentales se obtiene un complejo patrón de flujo tridimensional (3D) que después de cierto tiempo alcanza un estado estacionario.

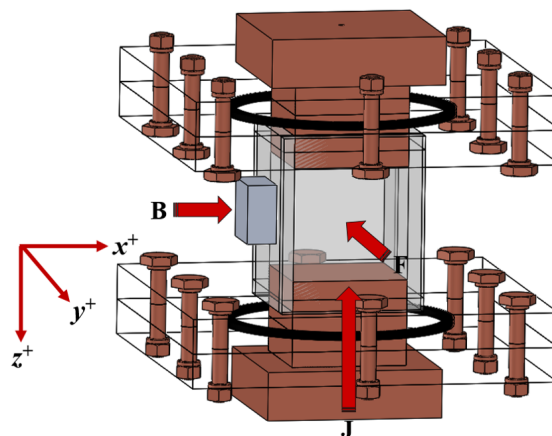


Figura 3.4: Representación de la fuerza de Lorentz F perpendicular a la densidad de corriente J y al campo magnético B .

Dada la dirección principal de la fuerza, el plano de estudio para los patrones de flujo es el definido por los ejes $x - z$. En la **Figura 3.5** se observa una de las imágenes tomadas por la cámara, claramente se aprecian las partículas iluminadas, además es posible observar el imán localizado en el lado izquierdo de la cavidad.

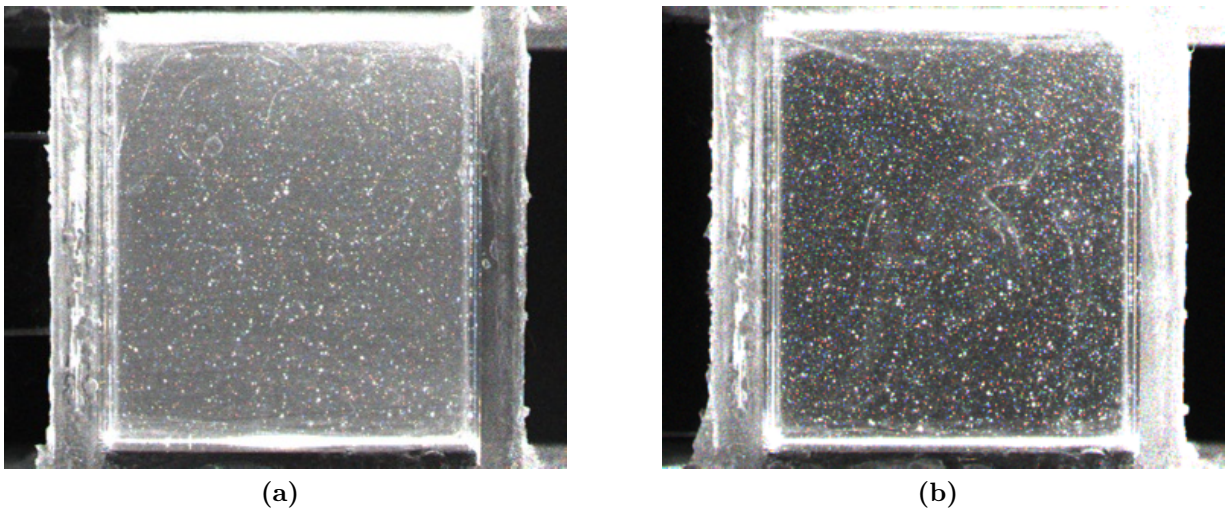


Figura 3.5: Imágenes de partículas en el plano de medición para: (a) M1 y (b) M2.

Cada par de imágenes a analizar se divide en un conjunto de celdas pequeñas que se conocen como regiones de interrogación, de las cuales se obtiene, de cada una de ellas el vector de desplazamiento que permite determinar la posición de las partículas suspendidas en el fluido. La medición de la velocidad se calcula comparando las posiciones de las partículas en dos imágenes consecutivas a un tiempo determinado. En la **Figura 3.6** se puede apreciar más claramente este concepto.

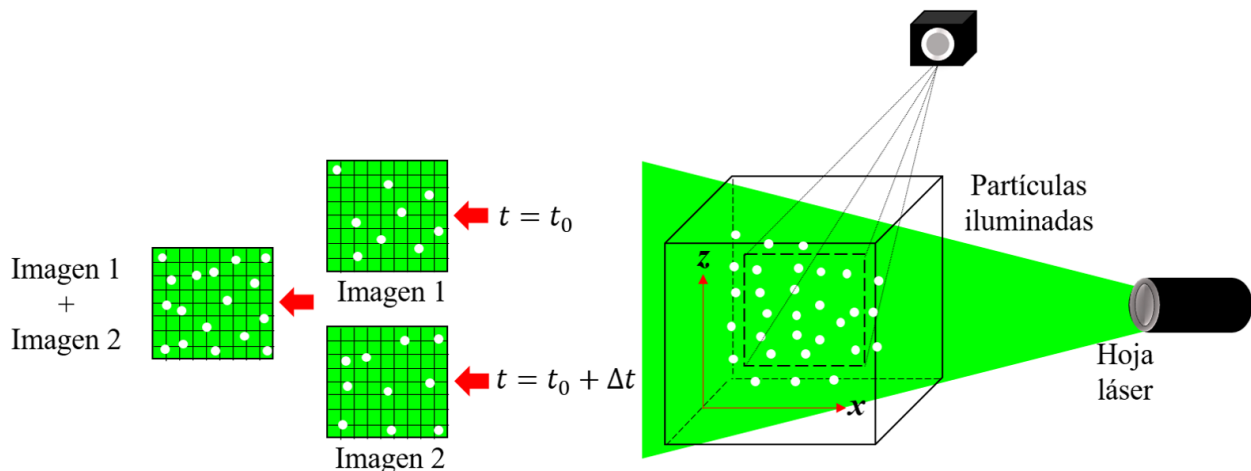


Figura 3.6: Esquema representativo del plano de análisis de la técnica PIV 2D, adaptada de Longo et al. (2004).

3.4.2. Pos-procesamiento de imágenes

Para iniciar con el pos-procesamiento de imágenes, primeramente se ingresa al software DynamicStudio 5.1 y se dirige a la ventana de PIV Setup Assistant de Tools donde se registran los parámetros que previamente son identificados contemplando cierta información del láser y la distancia de la cámara determinada a partir del área de interés (plano central $x - z$) así como el tamaño de partícula considerado para trazar el patrón de flujo y demás. Estos datos son ingresados manualmente y podemos encontrarlos en la **Figura 3.7**.

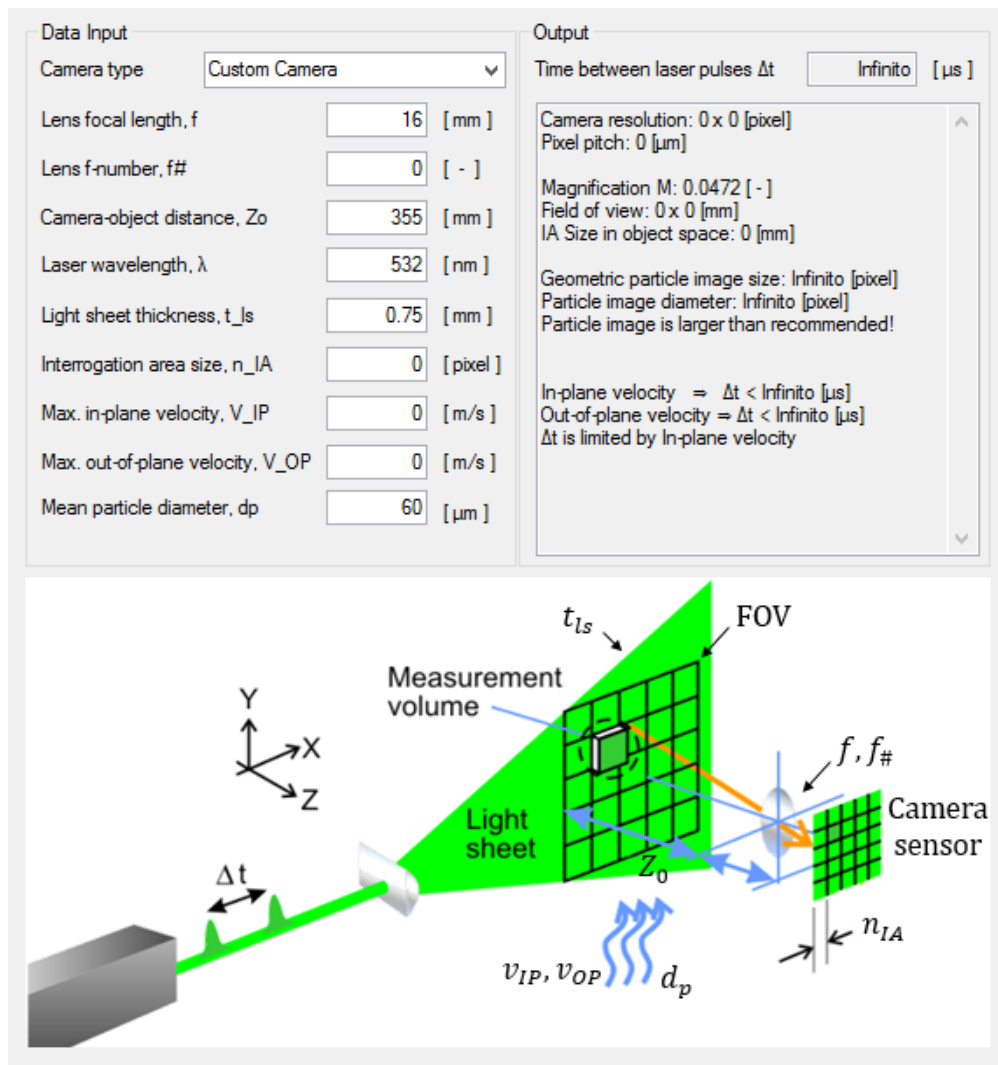


Figura 3.7: Interfaz del software DynamicStudio 5.1.

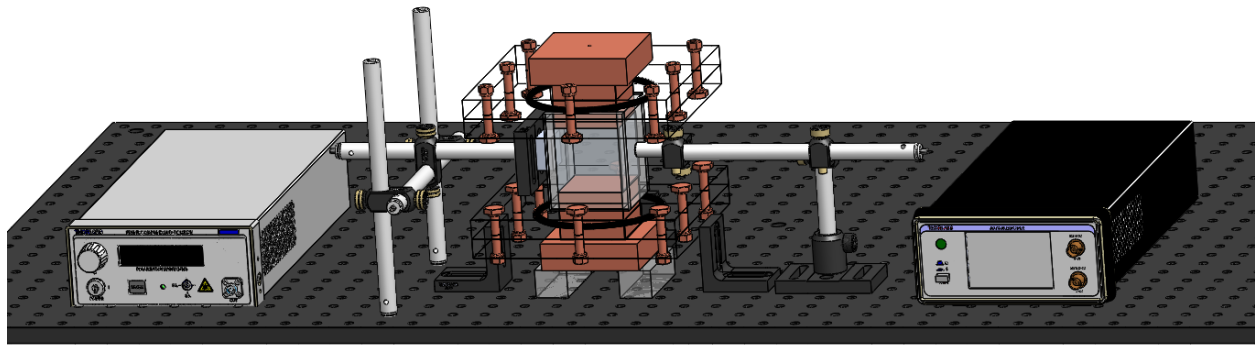
Posterior a esto, las imágenes obtenidas durante la prueba experimental para cada caso de corriente y para ambas distribuciones de campo magnético (no uniforme y uniforme) son importadas a un solo cuadro y a una tasa de disparo de 30 Hz.

En la pestaña Field of View ubicada en la parte de New Calibration se colocan las medidas de ancho y alto de la cara a observar, 73.33 y 55 mm, respectivamente, obteniendo un factor de escala del campo de visión de 20.46. Con base a estudios del grupo de investigación realizados en configuraciones experimentales relacionadas, el área de interrogación para el pos–procesamiento de imágenes fue de 32×32 píxeles con una superposición de áreas del 50%. Después de fijar los parámetros, se realiza una secuencia de análisis de las imágenes con el software DantecDynamics para la obtención de los patrones de flujo.

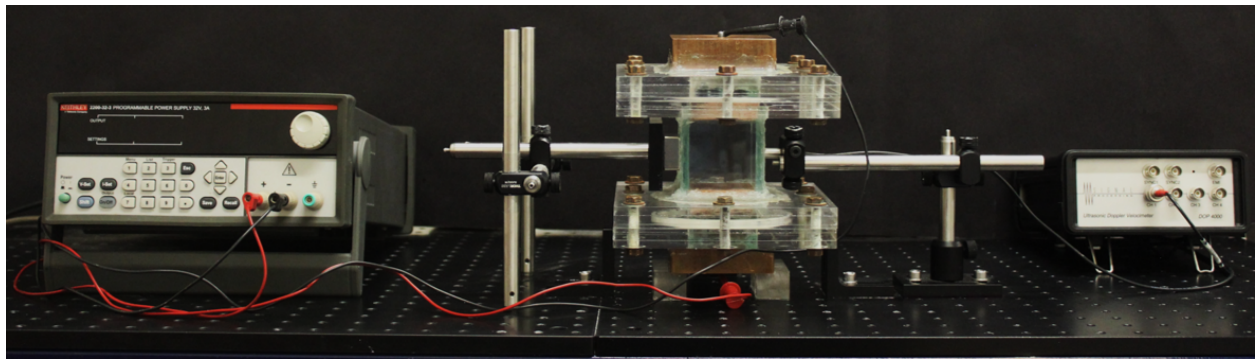
Como se ha mencionado anteriormente para todas las pruebas se tiene un análisis de 3 minutos de flujo; sin embargo, dependiendo de la magnitud de corriente eléctrica el flujo presenta un estado transitorio para después alcanzar un estado estacionario. Adicionalmente, para todos los casos después del estado estacionario se presenta el fenómeno de electrólisis que eventualmente vuelve a desestabilizar al flujo, por lo que es importante poder reportar los patrones de flujo y demás mediciones durante el estado estacionario. Para los rangos de corriente: 20, 40 y 60 mA se tomó un rango que comprende de los 70 – 100 segundos, en cambio para 80 mA fue desde los 30 – 60 segundos para los dos imanes usados en el estudio.

3.5. Técnica de medición UDV

Otra técnica de medición empleada para el estudio del flujo del electrolito, fue la técnica UDV, utilizada comúnmente para estudiar fluidos opacos como metales líquidos ([Perez y Kelley, 2015](#)). Básicamente la aplicación de la técnica consistió en repetir algunos de los experimentos y ahora medir perfiles de velocidad al centro del plano iluminado por el láser, dichos perfiles fueron comparados con los extraídos de los campos de velocidad del PIV. Para la medición de perfiles al centro sobre el eje x , se usa una probeta (transductor) TR0805SS de ultrasonido con frecuencia de 8 MHz y diámetro de 5 mm, en cuya área se aplica gel conductivo transparente para un acoplamiento ultrasónico, posterior a un contacto sobre una de las caras de la cavidad paralela a la pared del imán. La probeta está conectada a un equipo DOP 4000 que se controla a través del software UDOP en el que se definen parámetros ultrasónicos para la aplicación de la técnica UDV y posteriormente obtener mediciones de velocidad a lo largo del pulso ultrasónico emitido por el transductor. El montaje para la técnica UDV se ve ilustrado por la **Figura 3.8**, para una mayor descripción de la técnica, consultar el **Apéndice D**.



(a)



(b)

Figura 3.8: Montaje experimental (a) CAD y (b) montaje real para el estudio de la capa electrolítica aplicando la técnica UDV.

Cabe mencionar que otros estudios llevados a cabo por el grupo de trabajo ayudaron a determinar la frecuencia adecuada para el transductor y por tanto, la realización de las pruebas experimentales.

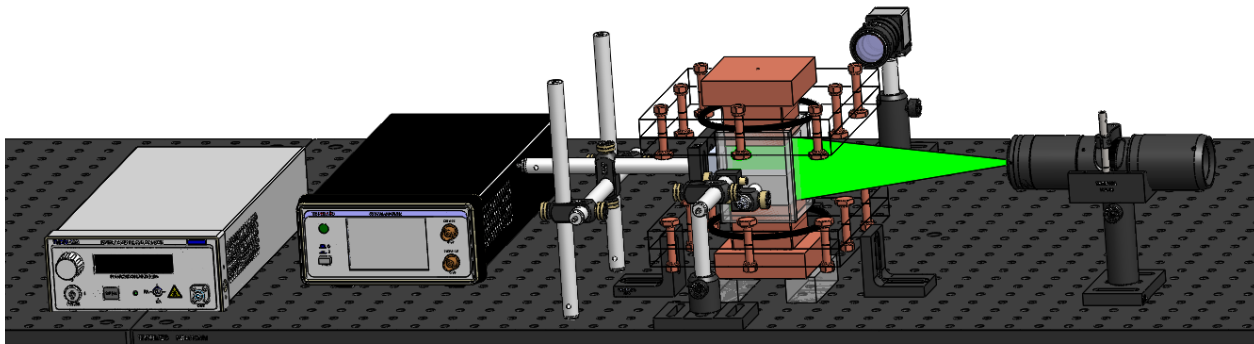
El equipo UDV es sensible a vibraciones, por lo que antes de iniciar con las mediciones, es importante cerciorarse que no haya ruido, pues puede influir afectando en las lecturas de velocidad.

3.6. Medición en un sistema de dos capas

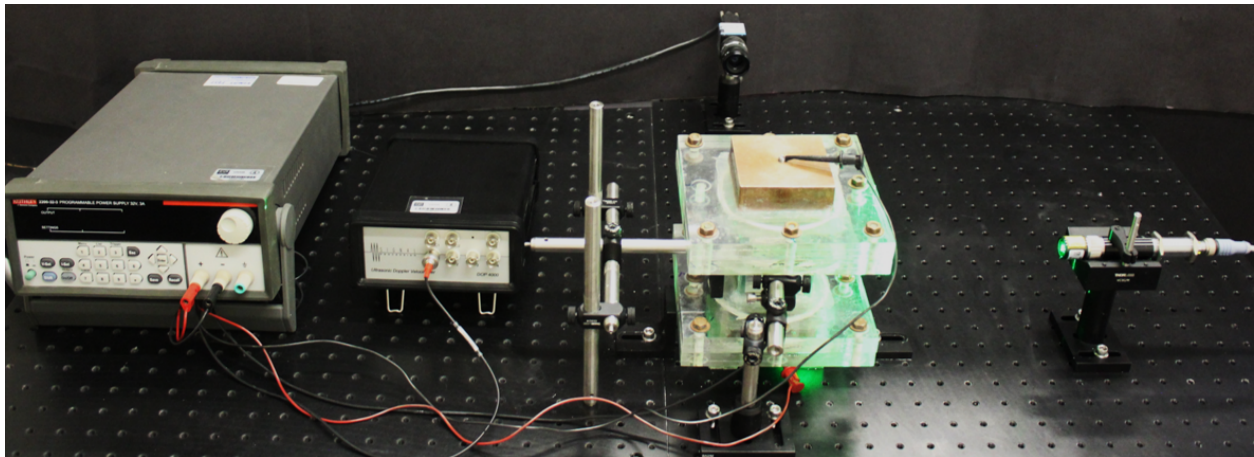
Por último, se consideró una tercera configuración de montaje experimental, donde se emplearon dos técnicas de medición, PIV y UDV, esto a fin de estudiar la interacción de dos capas de fluidos conductores estratificadas por diferencia de densidad y en presencia de una fuerza de Lorentz, con miras a entender posibles patrones de flujo presentes en las BML. Los fluidos de trabajo utilizados fueron: una aleación eutéctica de Galio–Indio–Estaño (Ga:In:Sn = 68.5 % : 21.5 % : 10 %), por ser líquido a temperatura ambiente y no tóxico (a diferencia

del mercurio), y el electrolito de KCl. Las mediciones de la capa de metal líquido realizadas por la técnica UDV fueron reportadas en el trabajo de [Aguilar-García \(2020\)](#).

En la **Figura 3.9** se presenta el montaje experimental, así como la ubicación de los componentes utilizados. Tal como se aprecia, el láser está alineado y situado en el mismo lugar y dirección que se usó en el montaje de PIV visto en la **Figura 3.3**.



(a)



(b)

Figura 3.9: Montaje experimental (a) CAD y (b) montaje real para el estudio de dos capas, metal líquido y electrolito.

Primeramente, el contenedor se llena parcialmente de la aleación de metal líquido GaInSn ($\rho = 6,440 \text{ kg/m}^3$) hasta la mitad, mientras la parte restante se cubre completamente con el electrolito, ambos fluidos se mantienen estratificados debido a la diferencia de densidades, ver **Figura 3.10**.

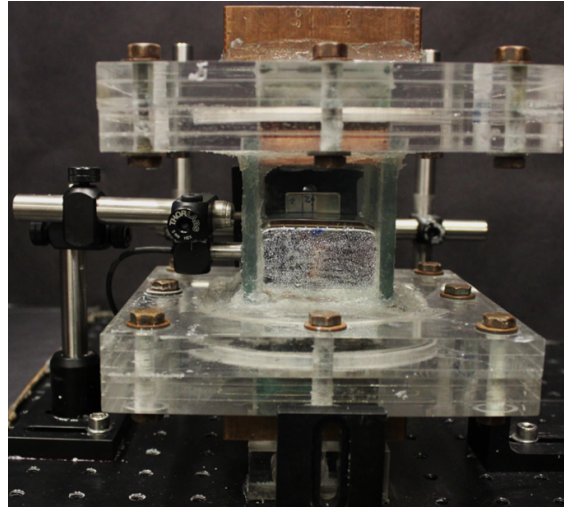


Figura 3.10: Vista lateral del contenedor confinado a las dos capas, metal líquido (GaInSn) y electrolito.

Es importante asegurarnos que el metal líquido esté limpio del óxido que se crea al instante de entrar en contacto con el aire. Para evitar la formación de óxidos en el metal líquido, se almacenó en una solución de etanol (C_2H_5OH) y ácido clorhídrico al 10% ([Brito, Nataf, Cardin, Aubert, y Masson, 2001](#)). Las propiedades del metal líquido, se pueden consultar en el **Apéndice B**.

Resultados y discusión

Este capítulo muestra los principales resultados de las mediciones realizadas para caracterizar el flujo de electrolito al interior de la cavidad. Primeramente, se presentan las mediciones de campo magnético sobre los ejes de simetría de la cavidad, para cada uno de los dos imanes. Posteriormente, se muestran los campos de velocidad en un plano central de la cavidad para cada valor de corriente eléctrica. De dichos campos se extraen los perfiles de velocidad a lo largo de los ejes de simetría. Finalmente, se calcula la energía cinética y las mediciones de diferencia de potencial.

4.1. Perfiles de campos magnéticos

Una correcta caracterización del campo magnético resulta fundamental dado su papel en el cálculo de la fuerza de Lorentz responsable de generar el flujo del electrolito al interior de la cavidad. El campo magnético generado por ambos imanes ocupa una región tanto del electrolito confinado por la cavidad como la región fuera de ella (aire); sin embargo, para el estudio de la dinámica del flujo, sólo es necesario determinar su comportamiento en la primera región. La **Figura 4.1** muestra los ejes de simetría de la cavidad en los que se realizaron mediciones de las componentes del campo magnético. Para cada uno de los imanes se midieron las componentes B_x , B_y y B_z de la densidad de campo magnético a lo largo de los ejes x , y y z . La **Figura 4.2** y **4.3** muestran dichas mediciones para el imán M1 y M2, respectivamente.

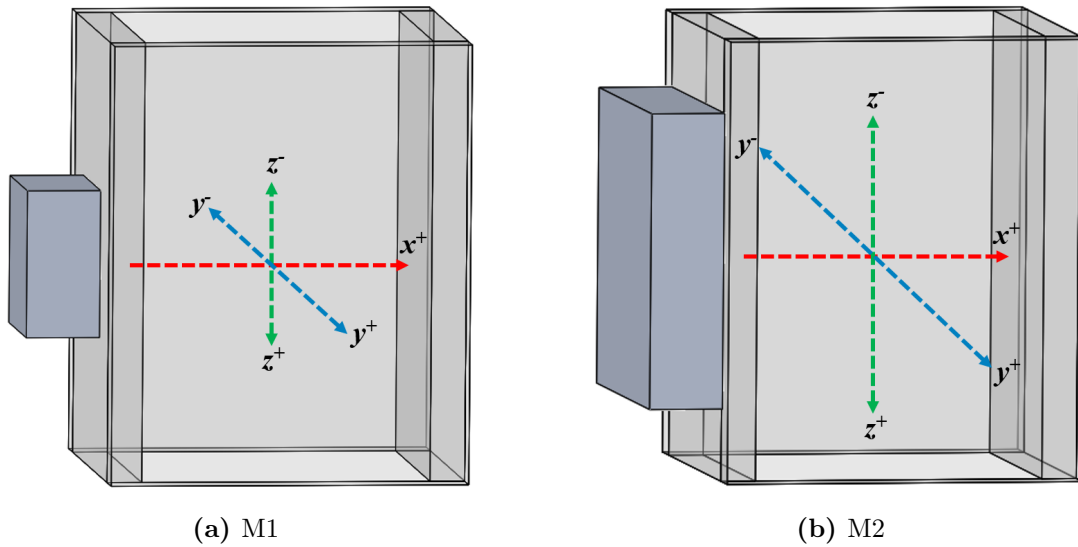


Figura 4.1: Ejes de simetría para las configuraciones experimentales con imanes: (a) M1 y (b) M2.

De las mediciones de campo magnético para los imanes M1 y M2, es claro que: la componente B_x es la de mayor magnitud, el imán M2 es más intenso que el M1, al centro de la cavidad el campo es cercano a 19 mT para M1 mientras que para M2 es de 65 mT, tres veces más intenso. En general, las tres componentes decaen de forma muy rápida conforme nos alejamos de la superficie del imán (dirección x), B_x es más simétrica en las direcciones y y z ; mientras que, las componentes B_y y B_z muestran un comportamiento alternado y antisimétrico. Es importante mencionar que el campo M1 tiene un carácter más localizado en el dominio del electrolito, en comparación con el M2 que es más uniforme, por lo que se espera se haga notar en los patrones de velocidad.

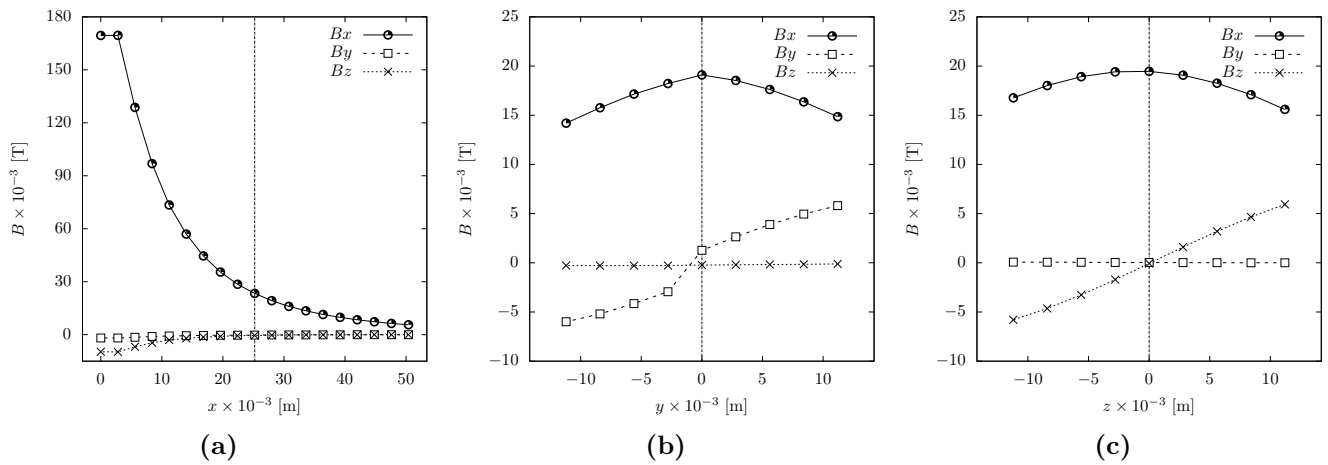


Figura 4.2: Magnitudes de las componentes del campo magnético para el imán M1 medidas en los ejes de simetría de la cavidad a lo largo de las coordenadas: (a) x , (b) y y (c) z .

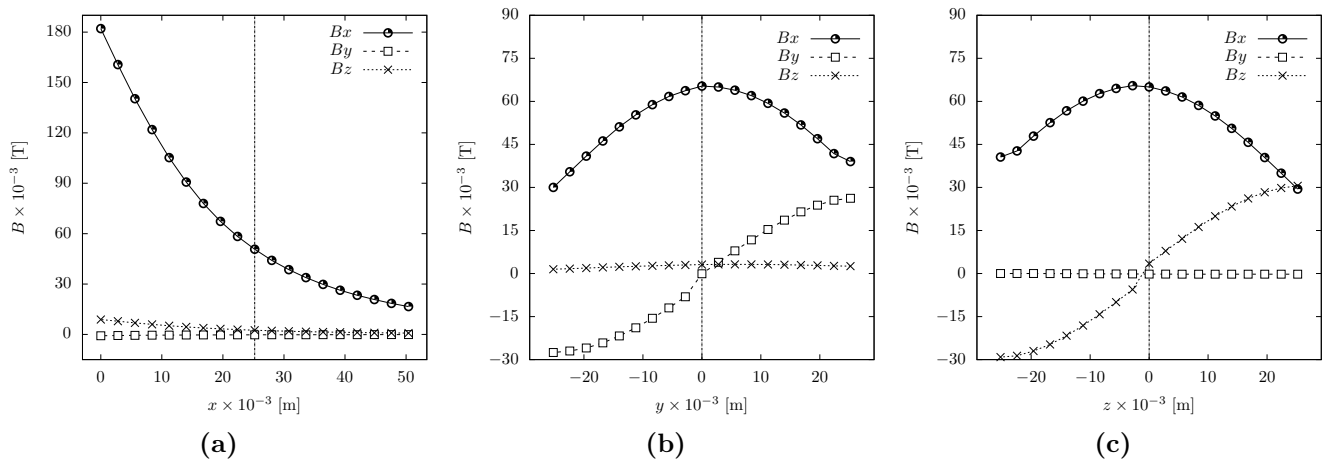


Figura 4.3: Magnitudes de las componentes del campo magnético para el imán M2 medidas en los ejes de simetría de la cavidad a lo largo de las coordenadas: (a) x , (b) y y (c) z .

4.2. Flujo del electrolito

Con base en la descripción de la configuración experimental y asumiendo que la dirección de la corriente inyectada sea en la dirección $-z$ y la componente principal del campo (B_x) apunta en la dirección x , se espera que la fuerza de Lorentz agite al fluido principalmente en la dirección $-y$. Es importante hacer notar que dado que el campo magnético es tridimensional (3D) y la corriente eléctrica no es exactamente axial en la interface electrolito–electrodo de cobre, el patrón del flujo resultante es también tridimensional. El estudio del patrón de flujo en un plano central de la cavidad mediante la técnica PIV, permite identificar algunas de las características más importantes del flujo del electrolito.

4.2.1. Campos de velocidad

Como se mencionó, mediante el pos–procesamiento de imágenes es posible determinar el campo de velocidades en el plano central del flujo y con éste es posible calcular parámetros relacionados como la vorticidad y líneas de corriente. Para todos los casos de corriente y las dos configuraciones de campo magnético fue posible identificar un intervalo de tiempo de flujo estacionario, ver **Subsección 4.2.4**. La **Figura 4.4** y **4.5** muestran el campo de velocidad, la vorticidad y líneas de corriente para el flujo en estado estacionario generado por los imanes tipo M1 y M2, respectivamente.

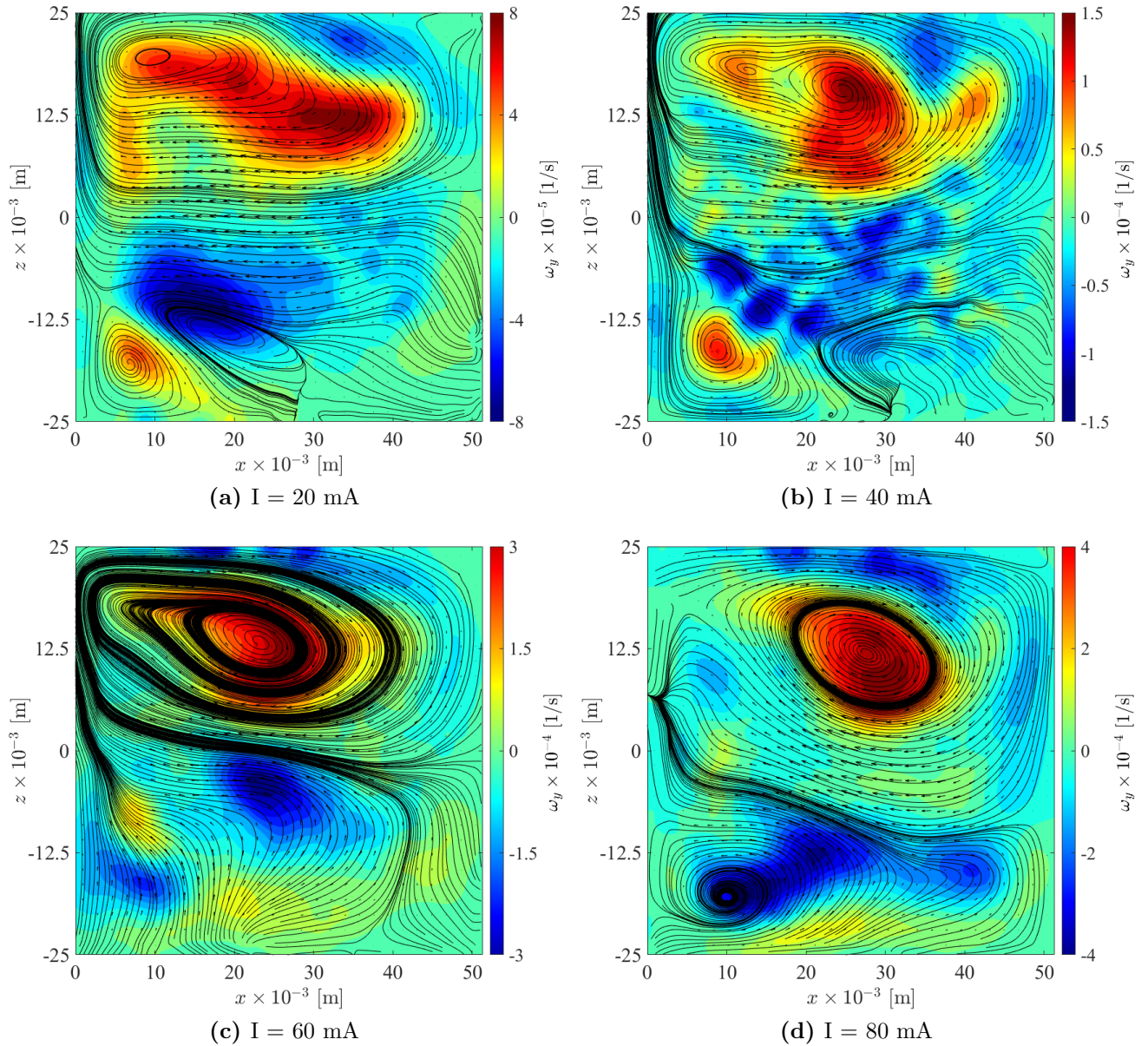


Figura 4.4: Campos de velocidad, vorticidad y líneas de corriente para el imán M1 y valores de corriente de: (a) $I = 20$ mA, (b) $I = 40$ mA, (c) $I = 60$ mA y (d) $I = 80$ mA.

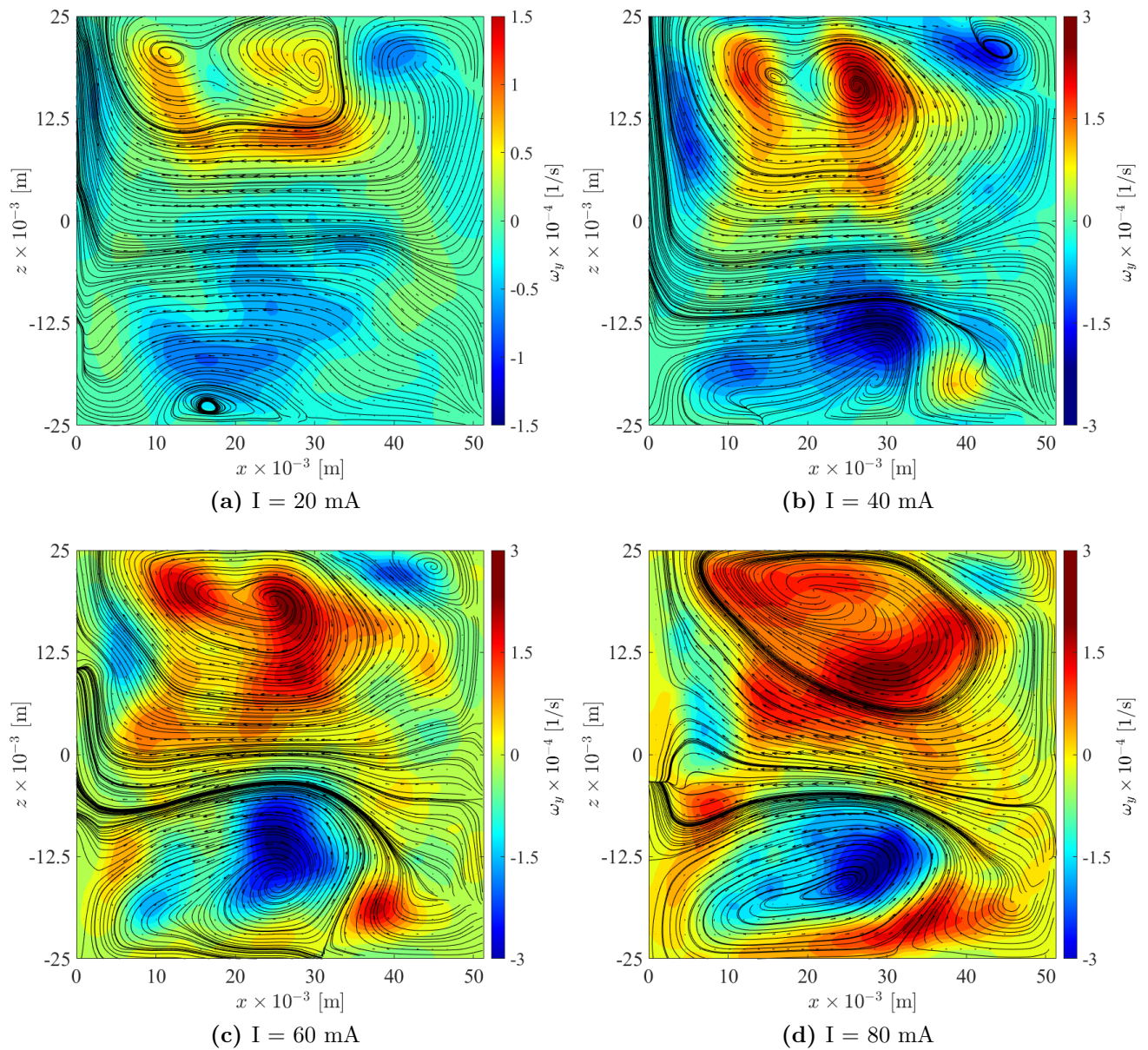


Figura 4.5: Campos de velocidad, vorticidad y líneas de corriente para el imán M2 y valores de corriente de: (a) $I = 20$ mA, (b) $I = 40$ mA, (c) $I = 60$ mA y (d) $I = 80$ mA.

En general, ambas distribuciones de campo magnético muestran un flujo dominante de derecha a izquierda en los campos de velocidad, es decir, el flujo se mueve de la cara más alejada a la cara más cercana al imán. Para el caso de una campo magnético localizado (M1), y para la corriente de menor magnitud, los campos de velocidad muestran la aparición de recirculaciones (similares a un vórtice dipolar) cercanas a la pared donde se localiza el imán, conforme aumenta la corriente el tamaño e intensidad de las recirculaciones aumenta y penetra hacia el centro del electrolito, no se observa simetría en ninguno de los patrones, ver **Figura 4.4**.

Para el caso de un campo magnético (M2) más uniforme en el dominio del electrolito, los campos medidos muestran un flujo menos localizado y más distribuido en la cavidad aunque de menor intensidad que los obtenidos para M1. Nuevamente, las recirculaciones aparecen en la pared donde se encuentra el imán y para todos los casos se muestra un par de vórtices dipolares asimétricos, ver **Figura 4.5**.

4.2.2. Perfiles de velocidad

Con objeto de evaluar cuantitativamente el efecto de parámetros como corriente eléctrica y campo magnético en los patrones de flujo de los campos de velocidad, es posible extraer perfiles de las componentes de velocidad a lo largo de los ejes de simetría de la cavidad. La **Figura 4.6** y **4.7**, muestran perfiles para las componentes u y w de la velocidad a lo largo de los ejes x y z , como función de la corriente para los campos magnéticos M1 y M2, respectivamente.

De los perfiles de velocidad se observa para ambos imanes que conforme aumenta la corriente también lo hace la magnitud de los perfiles. Dada la dirección preferencial del flujo, la componente u de la velocidad es la dominante y con valores negativos; en lo que respecta a la componente w de la velocidad, ésta alcanza magnitudes de menos de la mitad o menores que u . Por ejemplo, los valores máximos de las componentes de velocidades para el campo M1 son $u = 2.441 \times 10^{-3}$ y $w = 0.983 \times 10^{-3}$ m/s, respectivamente; mientras que para M2 se tiene $u = 1.875 \times 10^{-3}$ y $w = 0.465 \times 10^{-3}$ m/s. Para el caso del campo M1, u a lo largo del eje x muestra un comportamiento relativamente simétrico, interesantemente conforme aumenta la corriente los valores máximos se mueven al centro del dominio y a lo largo del eje z (altura de la cavidad) un comportamiento más asimétrico, como se ve en la **Figura 4.6(a)** y **4.6(b)**. En cuanto a la componente w de la velocidad a lo largo de ambas direcciones (x y z) muestra un comportamiento asimétrico y no presenta un comportamiento definido conforme aumenta la corriente, como se observa en la **Figura 4.6(c)** y **4.6(d)**.

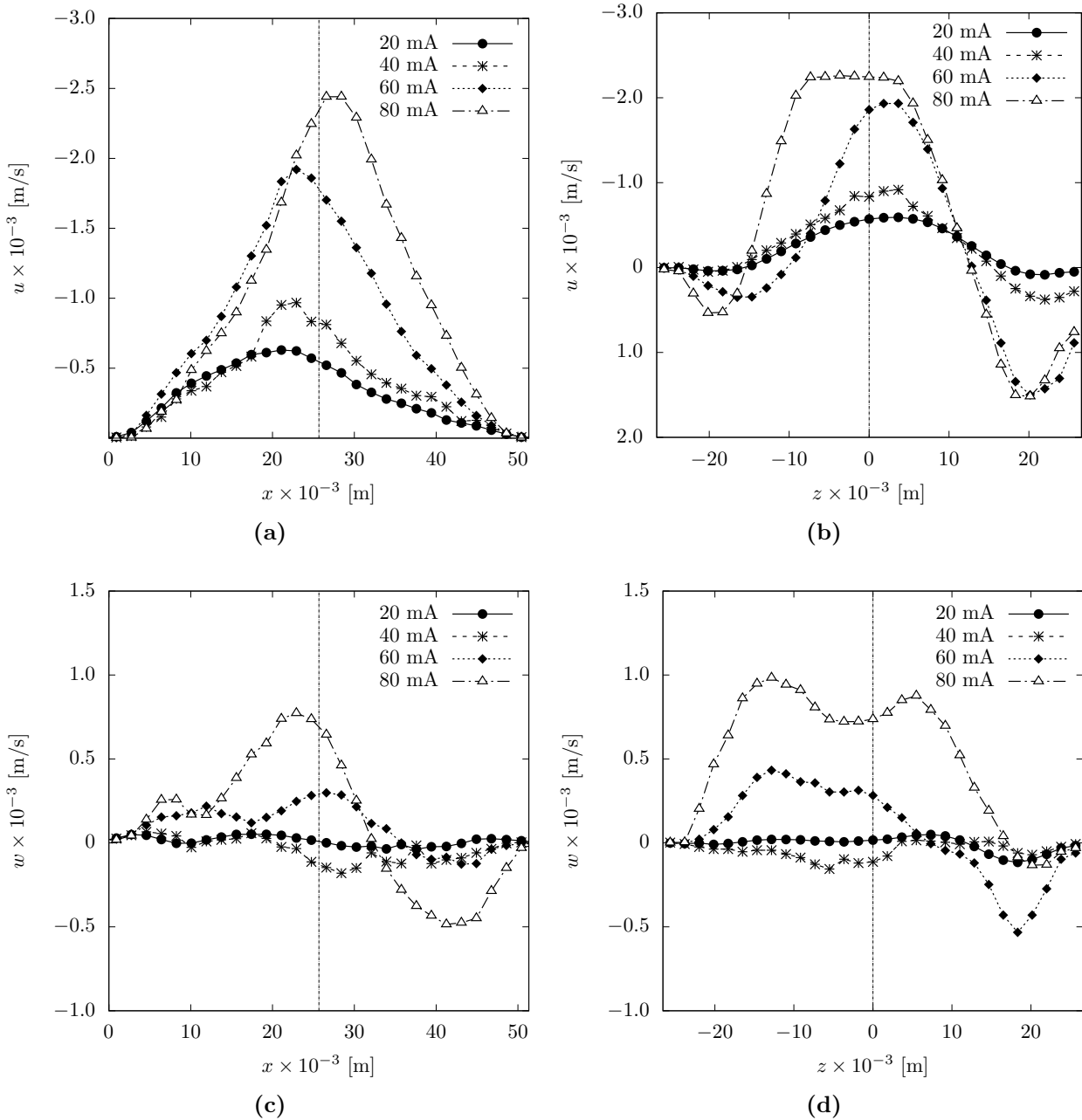


Figura 4.6: Componentes de la velocidad a lo largo de los ejes de simetría de la cavidad para M1 y para los distintos valores de corriente. (a) u vs. x , (b) u vs. z , (c) w vs. x y (d) w vs. z .

En el caso de las componentes de velocidad para el campo M2 mostradas en la **Figura 4.7**, se tiene un comportamiento muy similar al observado para el caso M1; sin embargo y a pesar de la mayor intensidad del campo M2, los perfiles de velocidad alcanzan menores magnitudes que los medidos para M1, lo cual se había puesto de manifiesto en los campos de velocidad. Adicionalmente, el efecto de la corriente en los perfiles es menos notorio.

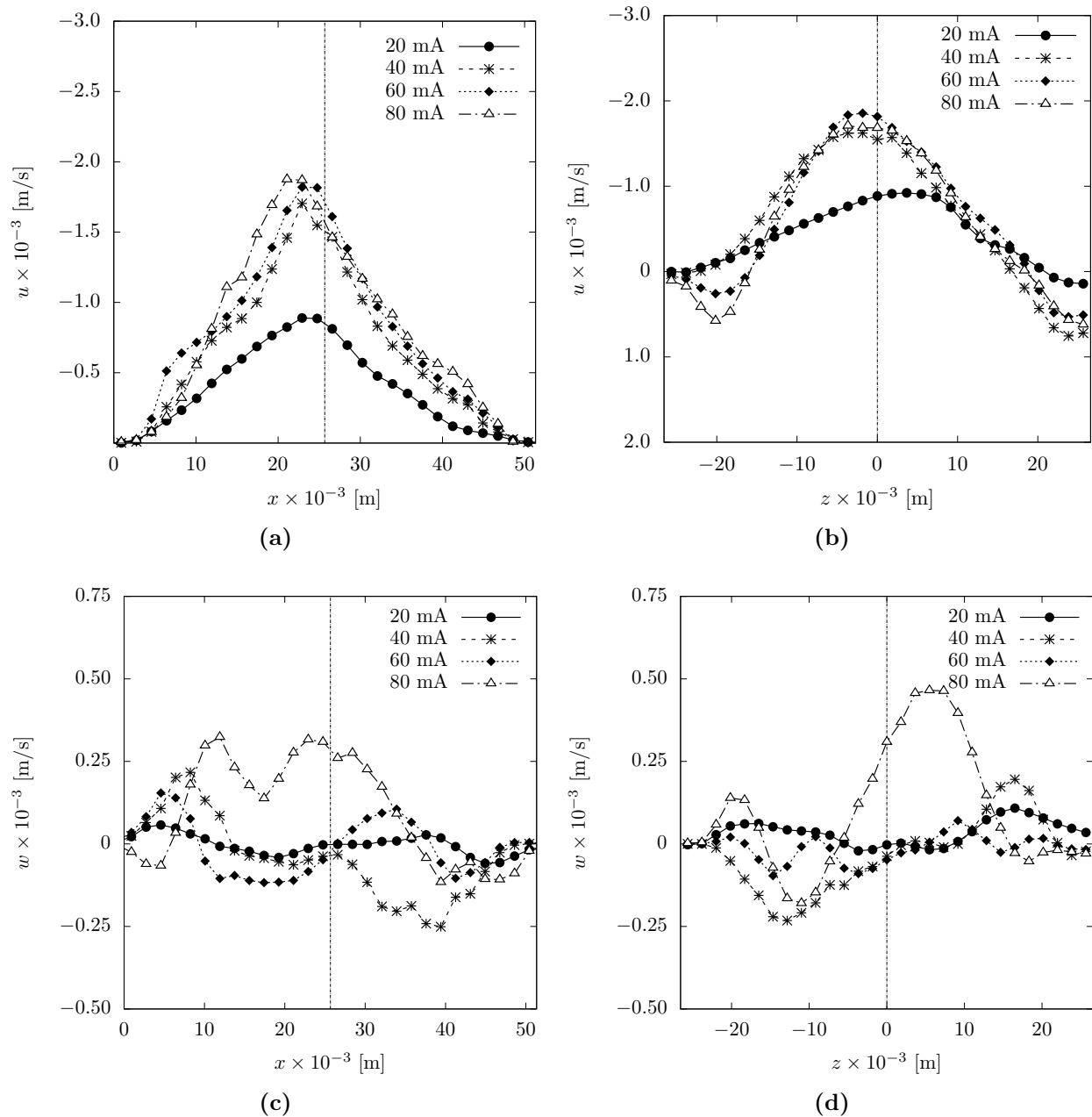


Figura 4.7: Componentes de la velocidad a lo largo de los ejes de simetría de la cavidad para M2 y para los distintos valores de corriente. (a) u vs. x , (b) u vs. z , (c) w vs. x y (d) w vs. z .

4.2.3. Diferencia de potencial

Durante la realización de los experimentos y a través del desarrollo de un código que permite controlar la fuente de poder usada para inyectar corriente eléctrica, fue posible medir la diferencia de potencial en tiempo real. Lo anterior y con objeto de complementar la

caracterización de los patrones de flujo usando una variable electromagnética en lugar de las tradicionales variables hidrodinámicas (velocidad y presión) y de comparar con el comportamiento reportado en estudios similares donde hacen uso de metales líquidos como fluidos de trabajo (Aguilar-García, 2020); para cada configuración de campo y valores de corriente, se midió la diferencia de potencial como función del tiempo de flujo. La **Figura 4.8(a)** y **4.8(b)**, muestran los resultados para los campos M1 y M2, respectivamente. Para ambos campos, los voltajes son mayores a 0.6 V y menores de 1.5 V. Las curvas crecen de forma monótona con la corriente y todas muestran un comportamiento prácticamente con líneas como función del tiempo, observándose una menor variación para M2.

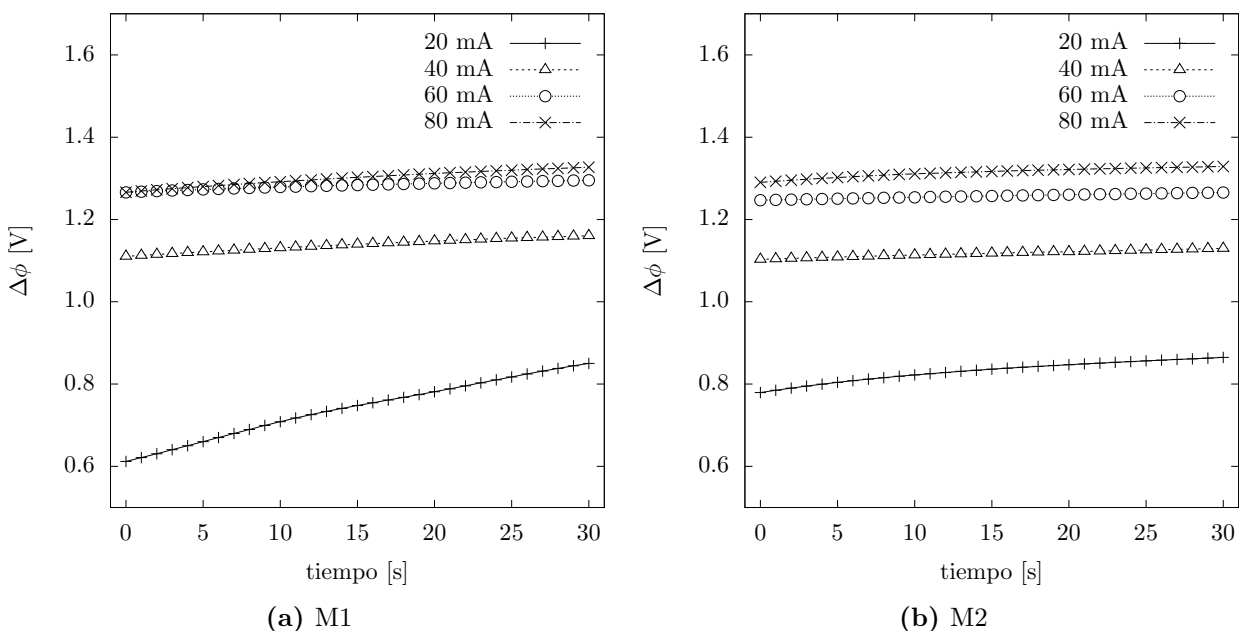


Figura 4.8: Diferencia de potencial vs. tiempo de flujo para los distintos valores de corriente y para los imanes: (a) M1 y (b) M2.

En general, el comportamiento es muy parecido para los campos M1 y M2, situación que se confirma al promediar el tiempo de la diferencia de potencial ($\overline{\Delta\phi}$) para cada uno de los valores de corriente. La **Figura 4.9** muestra la $\overline{\Delta\phi}$ como función de la corriente para los campos M1 y M2, así como el ajuste polinomial, se observa un comportamiento no lineal como función de la corriente y valores muy similares para ambos campos. La **Ecuación (4.1)** y **(4.2)**, representan los ajustes polinomiales de la $\overline{\Delta\phi}$ como función de la corriente para los campos M1 y M2, respectivamente. Con base en la diferencia de potencial medida a través de los electrodos, no es posible distinguir entre los patrones de flujo obtenidos para una u otra configuración de campo magnético.

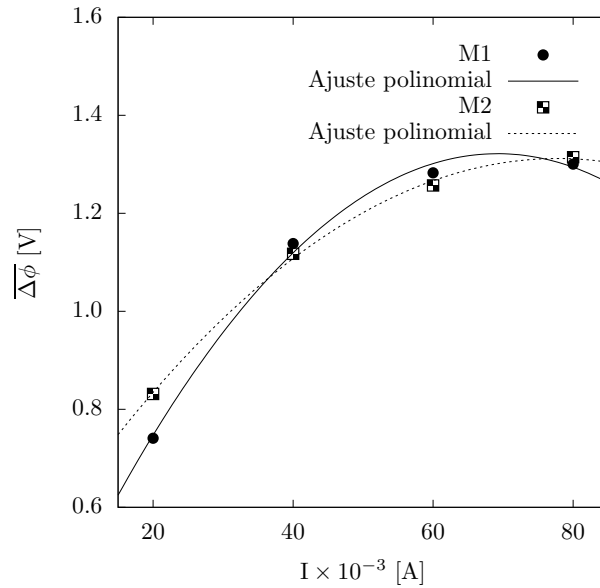


Figura 4.9: Diferencia de potencial promedio vs. corriente eléctrica para los campos M1 y M2, las líneas representan los respectivos ajustes polinómicos.

$$\overline{\Delta\phi} [I] = -2.371 \times 10^{-4} (I)^2 + 3.283 \times 10^{-2} (I) + 0.186 \quad R = 0.996, \quad (4.1)$$

$$\overline{\Delta\phi} [I] = -1.428 \times 10^{-4} (I)^2 + 2.223 \times 10^{-2} (I) + 0.447 \quad R = 0.999. \quad (4.2)$$

4.2.4. Energía cinética del flujo

Con base en los campos de velocidad, es posible extraer un parámetro global que se puede relacionar con la energía cinética (Ec) del flujo en el plano medido. Dicho parámetro le llamaremos energía cinética y se define por la **Ecuación (4.3)**:

$$Ec = \sum_{i=1}^{nx} \sum_{k=1}^{nk} (u_{i,k}^2 + w_{i,k}^2)^2 \quad (4.3)$$

donde $(nx \times nz)$ representa el número total de puntos en la dirección nx y en la dirección nz y son las mediciones de velocidad obtenidas en la zona de flujo 812 (28×29).

El valor de Ec fue calculado para los 3 minutos de experimentación, el cual permitió identificar el intervalo de tiempo de flujo estacionario (30 segundos) para cada uno de los valores de corriente eléctrica. Los resultados para los campos M1 y M2, se muestran en la **Figura 4.10(a)** y **4.10(b)**, respectivamente. Para ambos campos es claro que en promedio Ec aumenta con la corriente y tiene valores mayores para M1. En particular, para M1 y M2 y una corriente de 80 mA, se tienen valores promedio de 4.485×10^{-7} y $2.073 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$,

respectivamente. En la **Figura 4.10(a)** se observa que para M1 el efecto de la corriente en los valores de E_c es notorio para los tres últimos valores de corriente, mientras que para 20 y 40 mA los valores se encuentran sobrepuestos; es decir, indicando que el flujo gana mayor velocidad para valores mayores de 40 mA. De la **Figura 4.10(b)** se aprecia que para el caso de M2 el comportamiento de E_c es menos uniforme en los 30 segundos del flujo en comparación con M1, lo que puede deberse a la menor velocidad del flujo para el caso M2.

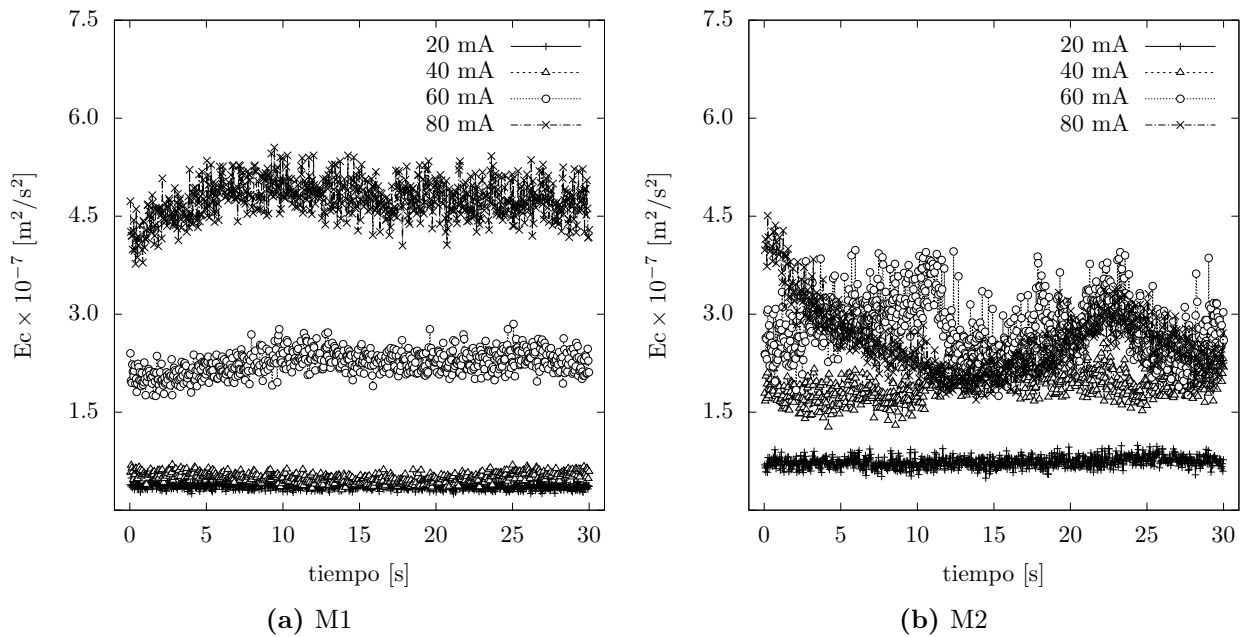


Figura 4.10: Parámetro E_c como función del tiempo de flujo para los distintos valores de corriente y configuraciones de campo: (a) M1 y (b) M2.

Los valores promedio de energía cinética para M1 y M2 durante los 30 segundos de flujo estacionario, se muestran en la **Figura 4.11**. Se observa que para 20 y 40 mA, la energía cinética promedio ($\overline{E_c}$) es mayor en el caso M2 que en el M1; sin embargo, $\overline{E_c}$ aumenta cada vez menos conforme aumenta la corriente, por lo que para 60 y 80 mA, los valores son menores. La $\overline{E_c}$ para M1 aumenta de forma prácticamente lineal después de 40 mA.

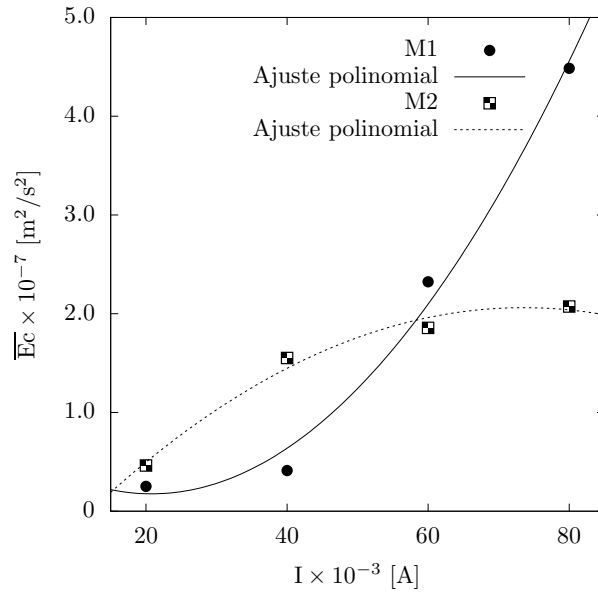


Figura 4.11: Energía cinética promedio vs. corriente eléctrica para los campos M1 y M2, las líneas representan los respectivos ajustes polinomiales.

Con base en los valores $\overline{E_c}$, es posible ajustar polinomios como función de la corriente para los campos M1 y M2, los cuales están dados por la **Ecuación (4.4)** y **(4.5)**, respectivamente.

$$\overline{E_c}[I] = 1.251 \times 10^{-10} (I)^2 - 5.202 \times 10^{-9} (I) + 7.170 \times 10^{-8} \quad R = 0.990, \quad (4.4)$$

$$\overline{E_c}[I] = -5.453 \times 10^{-11} (I)^2 + 8.023 \times 10^{-9} (I) - 8.892 \times 10^{-8} \quad R = 0.984. \quad (4.5)$$

4.3. Perfiles de velocidad usando la técnica UDV

Con el propósito de validar las mediciones de velocidad obtenidas con el PIV, se realizaron mediciones utilizando el equipo DOP 4000 de la marca Signal Processing, para la comparación, se repitieron experimentos usando el campo M1 y valores de corriente de 20 y 60 mA, bajo dichas condiciones se obtuvieron perfiles de velocidad al centro de la cavidad y a lo largo de la dirección x con objeto de contrastar con los perfiles para la componente u de la velocidad extraída al centro de los campos de velocidad ($z = 0$). En la **Figura 4.12(a)** se presentan nuevamente los perfiles para la componente u de la velocidad para el campo M2 mostrados anteriormente, pero ahora solamente para las corrientes de 20 y 60 mA, mientras que en la **Figura 4.12(b)** se muestran los perfiles obtenidos con el UDV para la misma componente. Interesantemente, con ambas técnicas se obtiene el mismo orden de magnitud y la forma de las señales es parecida, sobre todo para la corriente menor.

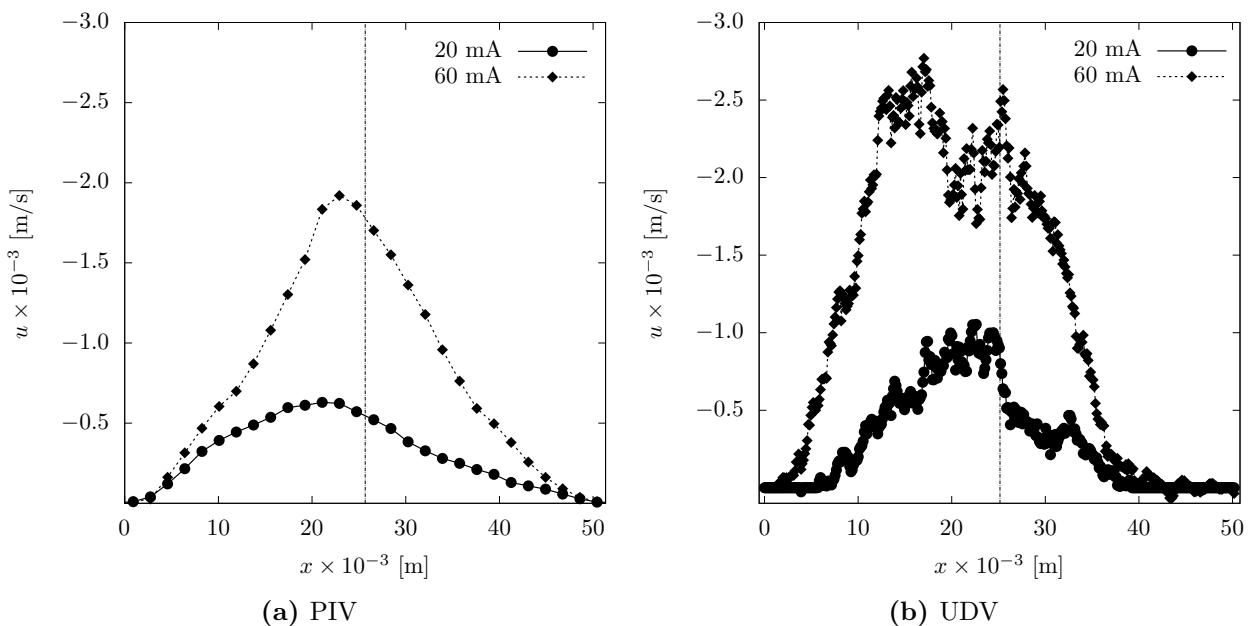


Figura 4.12: Componente u de la velocidad vs. x para el campo M1 medidos con la técnica: (a) PIV y (b) UDV.

Es claro que los valores medidos con UDV son mayores que los de PIV, por ejemplo, para el UDV se tienen valores máximos de $u = 1.05 \times 10^{-3}$ y $u = 2.76 \times 10^{-3}$ m/s; mientras que para el PIV, $u = 0.63 \times 10^{-3}$ y $u = 1.92 \times 10^{-3}$ m/s, para 20 y 60 mA, respectivamente. La razón por la que se obtienen velocidades distintas, consiste en el principio de medición de cada técnica, puesto que, mientras que la técnica PIV calcula el promedio de las velocidades sobre un plano de 0.75 mm de espesor (en el cual se obtienen campos de velocidades de los que se extraen perfiles de velocidades); el UDV mide sobre un haz con diámetro de 5 mm, que además abre en forma de cono promediando las velocidades de esa región y obteniendo perfiles de velocidad en x con magnitudes mayores a las obtenidas por el PIV. Adicionalmente, para estos valores de corriente y usando estas dos técnicas, se observa que los perfiles de velocidad tienen un cierto inclinamiento hacia la zona donde se localiza el imán, presentando también las velocidades más altas.

4.4. Sistema estratificado de fluidos conductores

En la siguiente sección se presentan los campos de velocidad, energía cinética y diferencia de potencial para el caso de un sistema estratificado de fluidos conductores formado por el metal líquido GaInSn y el electrolito, discutido en secciones anteriores. En el caso del campo de velocidad y energía cinética, los resultados corresponden solamente a la capa de electrolito.

4.4.1. Patrones de flujo

Al igual que para el estudio aplicando la técnica UDV, para los patrones de flujo en un sistema estratificado de dos capas de fluidos con GaInSn al fondo de la cavidad y electrolito arriba se usa el campo M1 así como densidades de corriente de 20 y 60 mA. El estudio de campos de velocidad usando PIV se llevó a cabo únicamente para la zona del electrolito. La **Figura 4.13(a)** y **4.13(b)**, muestran los campos de velocidad, vorticidad y líneas de corriente para 20 y 60 mA, respectivamente.

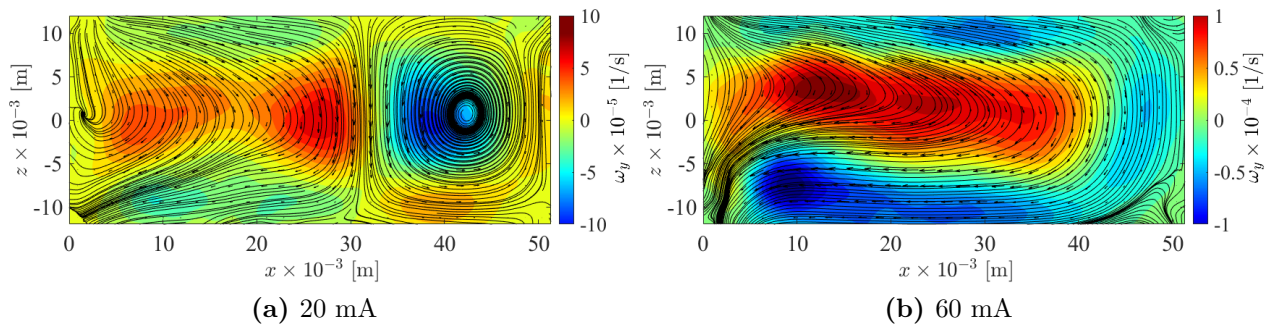


Figura 4.13: Campos de velocidad, vorticidad y líneas de corriente para el campo M1 y densidades de corriente de: (a) 20 mA y (b) 60 mA.

Para la corriente de 20 mA se observa una recirculación alejada de la zona del imán, la cual ocupa poco menos de la mitad de la cavidad; conforme aumenta la corriente a 60 mA, el flujo aumenta de velocidad y no se percibe ninguna recirculación. Cerca de la interface se observa que la componente horizontal de la velocidad domina, siendo más claro el efecto para la corriente mayor. Cabe destacar que las velocidades son al menos un orden de magnitud menor y ahora la dirección es principalmente de izquierda a derecha en contraste con el obtenido para el caso de una fase continua de electrolito bajo las mismas condiciones.

4.4.2. Perfiles de velocidad

La **Figura 4.14** y la **Figura 4.15**, muestran un comparativo de las componentes de velocidad para el sistema estratificado (**Figura 4.14(a)**, **4.14(c)**, **4.15(a)** y **4.15(c)**) y del electrolito (**Figura 4.14(b)**, **4.14(d)**, **4.15(b)** y **4.15(d)**). Se aprecia como para el sistema estratificado las magnitudes son un orden de magnitud menor y como de nuevo la componente u presenta las magnitudes más altas en comparación con la componente w , en la interface entre ambos fluidos se tiene la condición de no deslizamiento y nuevamente conforme aumenta la corriente también lo hace la velocidad. El comportamiento de ambas componentes a lo

largo del eje z , es muy parecido entre ambas configuraciones. Las magnitudes máximas para cada una de las componentes son $u = 4.550 \times 10^{-4}$ y $w = 0.828 \times 10^{-4}$ m/s.

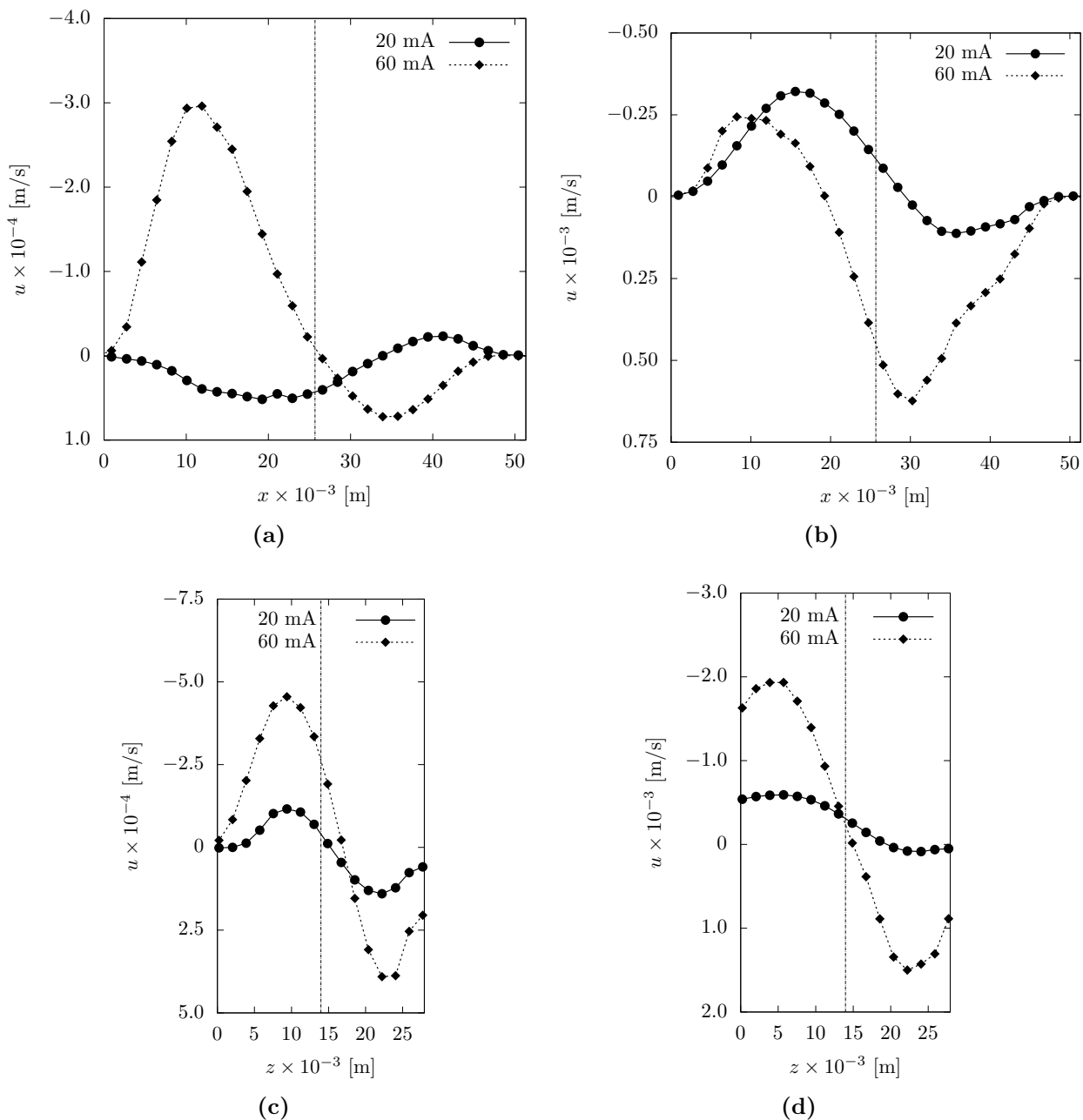


Figura 4.14: Componente u de la velocidad para un sistema estratificado de dos capas (a) y (c), y para el electrolito (b) y (d); usando un campo M1.

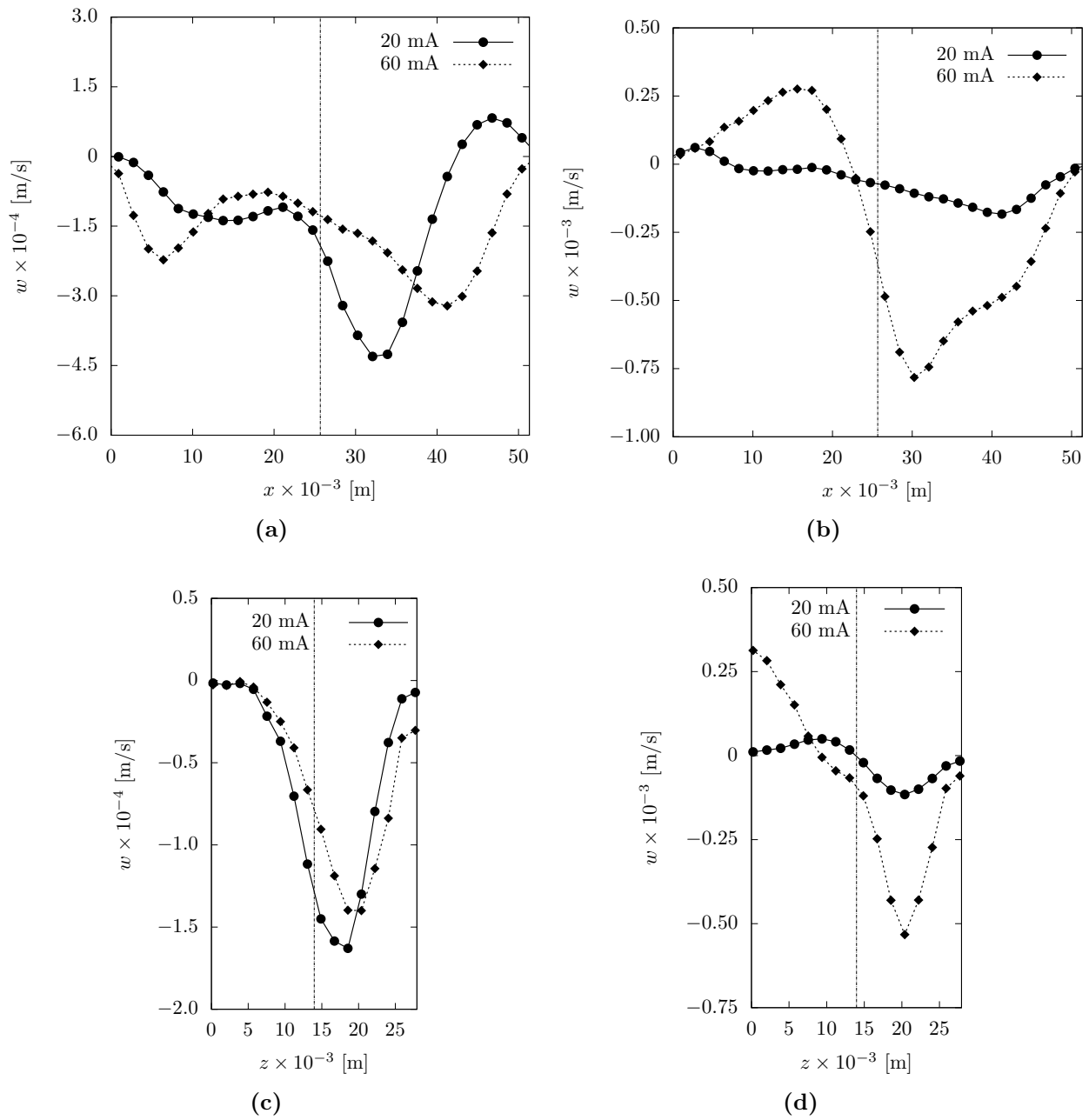


Figura 4.15: Componente w de la velocidad para un sistema estratificado de dos capas (a) y (c), y para el electrolito (b) y (d); usando un campo M1.

4.4.3. Diferencia de potencial

La conductividad del GaInSn es de 3.46×10^6 S/m mientras que la del electrolito es de 34.689 S/m, por lo que se espera que el sistema estratificado ofrezca una menor resistencia al paso de la corriente y por lo tanto se observen menores valores para la diferencia de potencial, los resultados mostrados en la **Figura 4.16** confirman dicha idea. El rango de voltaje ahora se encuentra entre 0.2 y 0.8 V, también aumenta en el tiempo, indicando asimismo la falta de un estado estacionario en el flujo. En la **Tabla 4.1** se presentan los valores promedios para ambas corrientes (20 y 60 mA), dichos valores muestran que a mayor corriente mayor la diferencia de potencial.

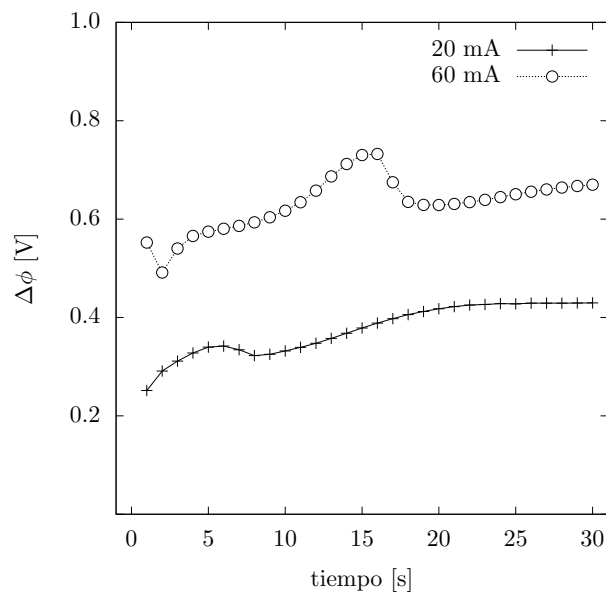


Figura 4.16: Diferencia de potencial para el sistema de capas estratificadas de fluidos conductores.

4.4.4. Energía cinética

Para el sistema estratificado se analizaron los primeros 30 segundos del flujo dado que la electrólisis se hizo presente más pronto comparado con el caso de una fase continua de electrolito. La **Figura 4.17** muestra los valores del parámetro de energía cinética para dos valores de corriente (20 y 60 mA) como función del tiempo. El valor de E_c es calculado mediante la **Ecuación (4.3)**, donde $(nx \times nz)$ representa el número total de puntos en la dirección nx y en la dirección nz y son las mediciones de velocidad obtenidas en la zona del flujo para el electrolito 448 (28×16). En esta figura se puede observar que la variación es significativa y se atribuye a los valores de velocidad tan pequeños obtenidos de las mediciones. Con base en dicho comportamiento es posible que el flujo aún no haya alcanzado el estado estacionario. Valores promedio de la energía cinética para ambos valores de corriente se muestran en la **Tabla 4.1**.

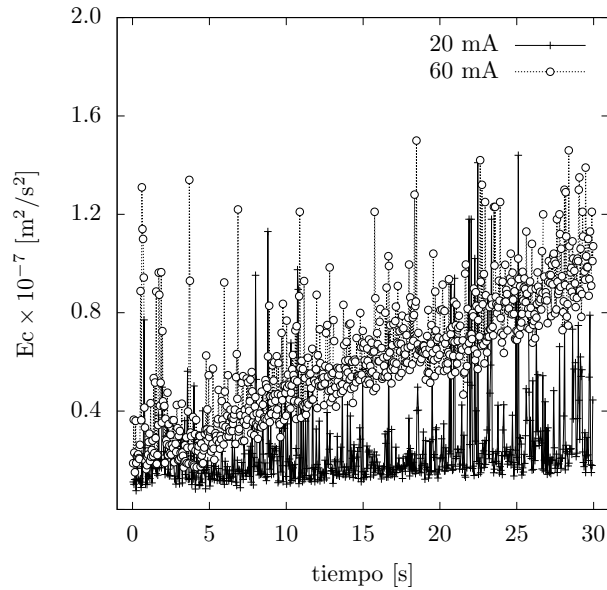


Figura 4.17: Parámetro de energía cinética para el campo M1 en el sistema estratificado.

Tabla 4.1: Propiedades para el imán M1 a diferentes valores de corriente.

I (mA)	$\overline{E_c}$ (m^2/s^2)	$\overline{\Delta\phi}$ (V)
20	8.540×10^{-9}	0.376
60	3.642×10^{-8}	0.631

Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones

El presente trabajo contempló el estudio de patrones de flujo de un electrolito débil confinado en una cavidad cúbica y agitado por una fuerza de Lorentz. En particular, mediante la inyección de una corriente eléctrica en la dirección axial y su interacción con un campo magnético generado por una imán permanente con magnetización perpendicular a la corriente, fue posible generar un movimiento en el fluido.

Se probaron dos configuraciones de campo, la primera relacionada a campos magnéticos localizados, para lo cual se hizo uso de un imán (M1) con área igual a un cuarto de la cara del contenedor con la que se encuentra en contacto; mientras que, la segunda configuración de campo representó un campo magnético más uniforme (y tres veces más intenso al centro de la cavidad que el primer imán), caso en el que se empleó un imán (M2) de un tamaño igual a la cara del contenedor. El campo magnético para ambos imanes fue caracterizado en términos de la magnitud de sus componentes, medidos en los ejes de simetría de la cavidad. Mediciones para el campo de velocidad del flujo del electrolito medido en un plano central (perpendicular a la superficie del imán) fueron obtenidas mediante la técnica óptica PIV, para corrientes eléctricas de 20, 40, 60 y 80 mA. Con base en los campos de velocidad fue posible evaluar un parámetro escalar relacionado con la energía cinética del flujo. Para ambas configuraciones de campo, la energía cinética aumentó como función de la corriente; sin embargo, lo hizo con distinta funcionalidad. Para el campo localizado crece más rápido y de forma lineal para corrientes mayores a 40 mA; contrario a un campo más uniforme en el que su crecimiento se da más lento.

Como forma de validar las mediciones de velocidad, se usó un equipo UDV para medir el perfil de velocidad al centro del plano medido con el PIV, al comparar las componentes respectivas se obtuvo el mismo orden de magnitud y comportamiento similar para dos magnitudes de corriente utilizando el campo magnético localizado, de forma que se corroboran los patrones de flujo dentro de la cavidad y mostrando que el sistema PIV aquí implementado resulta confiable para mediciones de campos de velocidad en dichas configuraciones.

Adicionalmente, se realizaron mediciones de diferencia de potencial en las terminales de los electrodos a través de los cuales se inyecta la corriente; interesantemente y para ambos campos, las mediciones como función de la corriente presentaron un comportamiento no lineal, lo que muestra un efecto del flujo; sin embargo, no es posible distinguir entre los patrones de flujo obtenidos para una u otra configuración de campo magnético.

Una extensión de trabajo consistió en estudiar un sistema estratificado de dos capas de fluidos conductores dentro de la cavidad, para llenar la mitad del fondo se usó el metal líquido GaInSn, mientras que para la mitad superior el electrolito. Nuevamente y mediante PIV, se estudió el flujo en el mismo plano central pero sólo fue posible hacerlo para la región del electrolito, debido al carácter opaco del metal líquido. Los campos de velocidad obtenidos fueron un orden de magnitud menor, mientras que valores para la diferencia de potencial fueron la mitad de los medidos para el caso de una fase continua de electrolito. A pesar de que los valores de diferencia de potencial se explican por una menor resistencia del sistema electrolito–metal líquido, resulta complicado entender el patrón de flujo para estar lejos del estado estacionario, lo anterior se justifica por la evolución que muestra el parámetro de energía cinética en el tiempo y se atribuye a que probablemente el sistema PIV implementado resulta ser no tan preciso para el rango de velocidades alcanzado con el imán M1.

Los resultados aquí presentados resultan de interés en el tema de baterías de metal líquido, ya que permiten mostrar el efecto del flujo en la diferencia de potencial requerida para mantener constante una corriente de carga o descarga en la batería; dicha diferencia de potencial a su vez se ve afectada también por las diferencias de conductividades eléctricas de los fluidos estratificados. Los patrones de flujo cambian considerablemente de una sola fase de fluido a un sistema de dos capas.

5.2. Trabajo futuro

Como trabajo a futuro y para la fase continua del electrolito, se plantea el medir en dos planos perpendiculares entre sí los campos de velocidad mediante la técnica PIV y/o colocar más probetas para medir simultáneamente perfiles de velocidad y de esta manera comparar o conjugar ambas mediciones para lograr una mayor comprensión de los patrones de flujo. En el caso del sistema estratificado se pretende medir mediante el UDV perfiles de velocidad en la capa de GaInSn simultáneamente de las mediciones de PIV en planos del electrolito, lo anterior con objeto de conocer la magnitud de la velocidad en el metal líquido.

Dispositivo experimental

A continuación se describe de una forma más detallada las partes que conforman el prototipo experimental. En la **Figura A.1** se observa la cavidad de vidrio de sección transversal cuadrada con sus diferentes vistas y respectivas longitudes; compuesta por dos pares de paredes de dimensiones de $5\text{ cm} \times 0.6\text{ cm} \times 7.6\text{ cm}$ y $6.2\text{ cm} \times 0.6\text{ cm} \times 7.6\text{ cm}$.

Para la fabricación de los electrodos, se maquinaron dos barras de cobre de acuerdo al diseño visto en la **Figura A.2**. Cada electrodo tiene dos rectángulos de medidas diferentes. El rectángulo más grande mide $7.62\text{ cm} \times 7.62\text{ cm} \times 2.1\text{ cm}$, cuenta con una perforación al centro de diámetro de 0.23 cm y profundidad de 0.6 cm ; mientras el rectángulo más pequeño tiene dimensiones de $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 3.7\text{ cm}$.

Para cubrir por completo la cavidad se usarón dos bases y dos tapas de acrílico cuadradas de $16\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ y grosor de 1.5 cm ; cada pieza tiene ocho orificios con diámetro de 0.68 cm y profundidad de 1.5 cm , a través de ellos se colocan tornillos con rondanas de cobre. Las tapas tienen un corte al centro con dimensiones de $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ donde se fijan los electrodos de cobre. Las bases están perforadas a un diámetro interno de 9.5 cm y diámetro externo de 10 cm para colocar o-rings que evitan el filtrado del agua, además de contar con un corte al centro por la parte inferior y superior en forma de cuadrado, de modo que la parte inferior donde se encuentra fija la cavidad, mide $6.2\text{ cm} \times 6.2\text{ cm} \times 0.6\text{ cm}$; mientras la parte superior donde se introducen los electrodos mide $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 0.9\text{ cm}$. Tales piezas se visualizan en la **Figura A.3** y **A.4**.

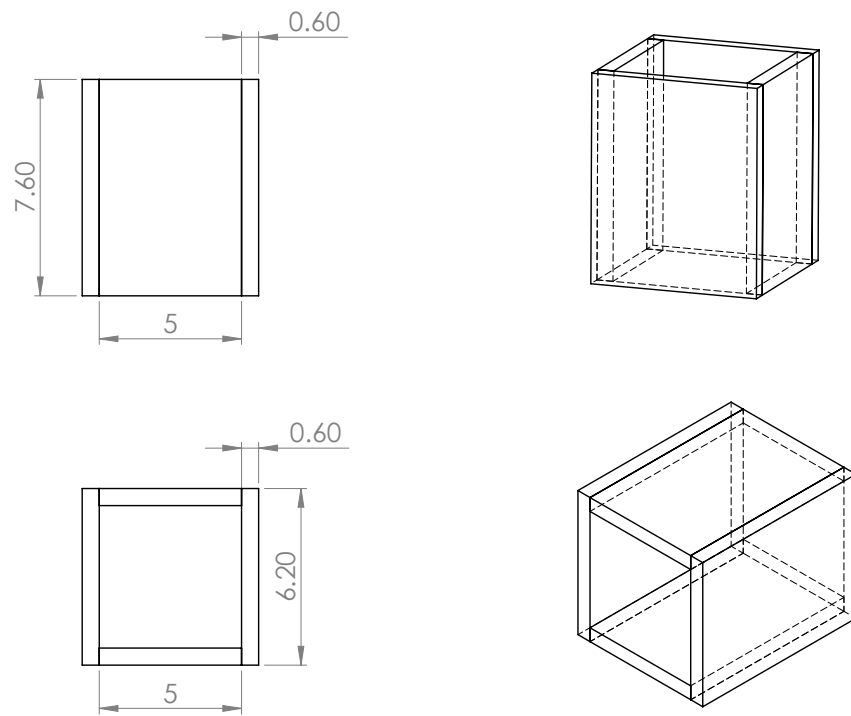


Figura A.1: Esquema representativo de la cavidad de vidrio, dimensiones en centímetros.

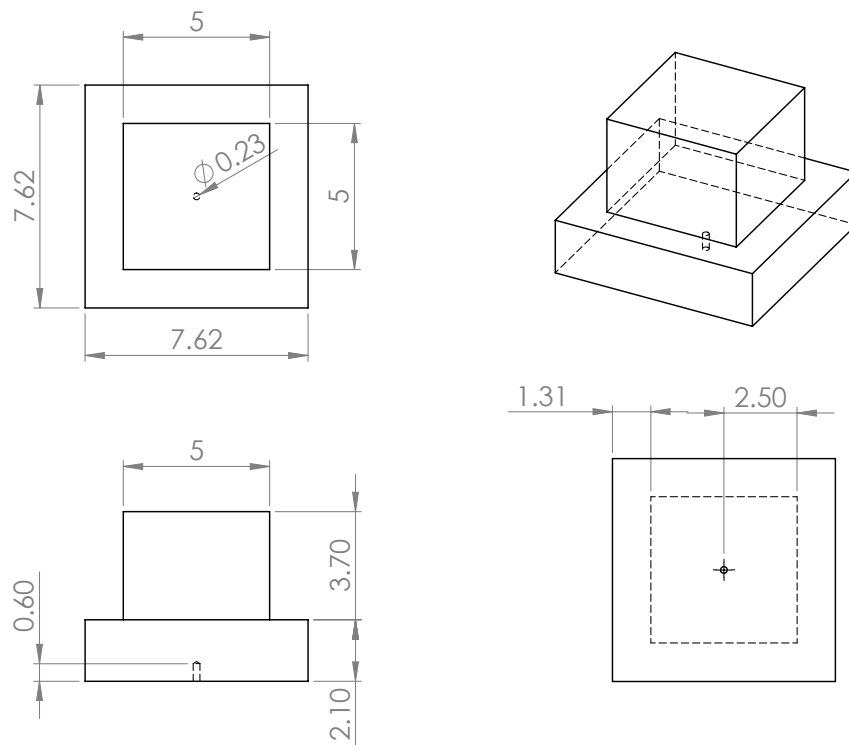


Figura A.2: Esquema representativo de los electrodos de cobre, dimensiones en centímetros.

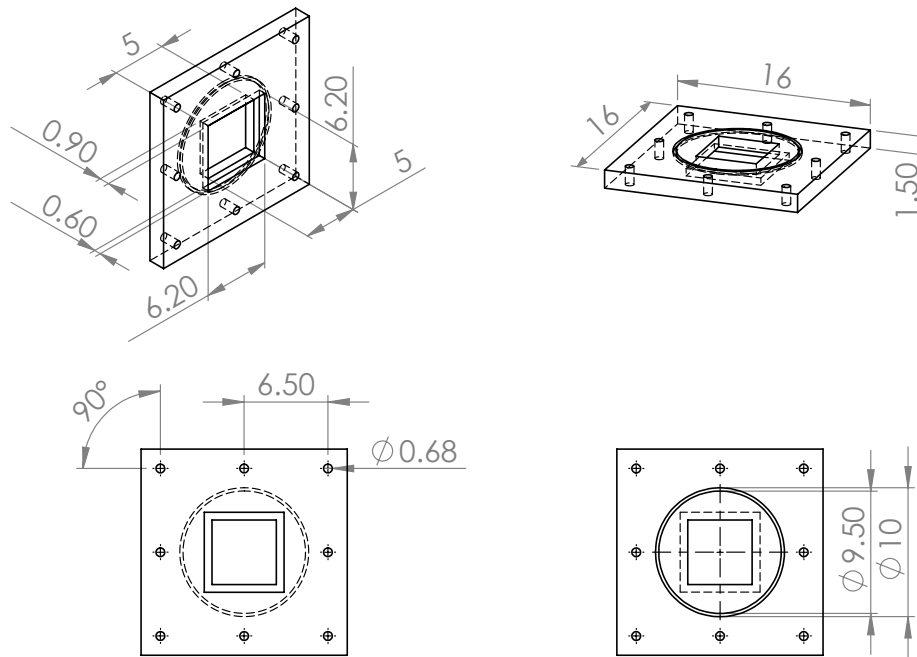


Figura A.3: Esquema representativo de las bases de acrílico, dimensiones en centímetros.

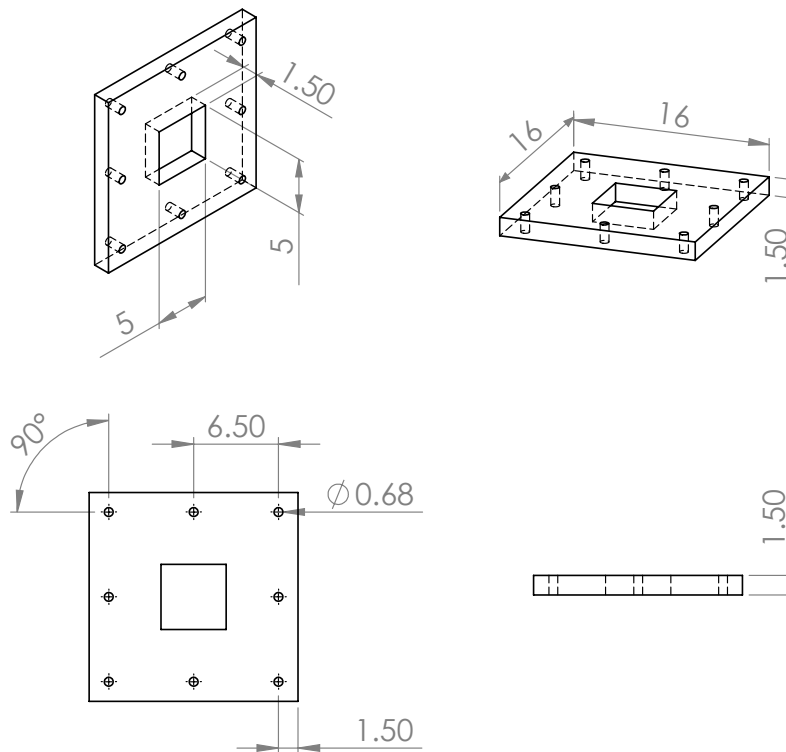


Figura A.4: Esquema representativo de las tapas de acrílico, dimensiones en centímetros.

Propiedades de los fluidos de trabajo

En la **Tabla B.1** se muestran las propiedades de transporte del electrolito KCl dentro de un rango de concentraciones. En la **Figura B.1(a)** y **B.1(b)** se observa la densidad y viscosidad dinámica como función de la concentración. Con base en los datos, se ajustan polinomios definidos por la **Ecuación (B.1)** y **(B.2)**, para la densidad y la viscosidad dinámica, respectivamente.

Tabla B.1: Propiedades físicas del KCl a 20 °C.

% m	$\rho \times 10^3$ (kg/m ³)	$\mu \times 10^{-3}$ (kg/m·s)
0.5	1.0014	1
1	1.0046	0.999
2	1.011	0.999
3	1.0174	0.998
4	1.0239	0.997
5	1.0304	0.996
6	1.0369	0.994
7	1.0434	0.992
8	1.050	0.99
9	1.0566	0.989
10	1.0633	0.988
12	1.0768	0.99
14	1.0905	0.994
16	1.1043	0.999
18	1.1185	1.004
20	1.1328	1.012
22	1.1474	1.024
24	1.1623	1.04

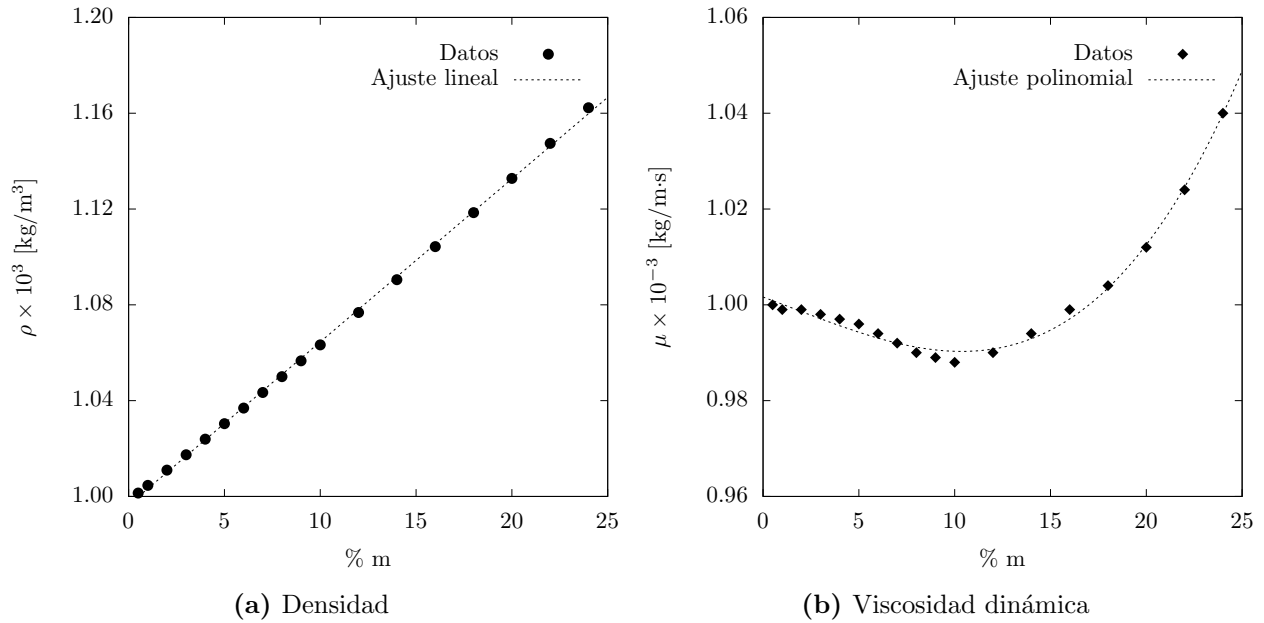


Figura B.1: Gráfico de (a) densidad y (b) viscosidad dinámica.

$$\rho [\% \text{ m}] = 6.808 (\% \text{ m}) + 996.434 \quad R = 0.999, \quad (\text{B.1})$$

$$\mu [\% \text{ m}] = 6.714 \times 10^{-9} (\% \text{ m})^3 - 3.353 \times 10^{-8} (\% \text{ m})^2 - 1.468 \times 10^{-6} (\% \text{ m}) + 1.002 \quad R = 0.992. \quad (\text{B.2})$$

B.1. Metodología para medir la conductividad

1. Asegurarse que el cable USB del medidor esté conectado a la entrada USB del ordenador.
2. Ingresar al software libre, Star Com 1.0 y fijar los parámetros con lecturas cada 10 segundos por un tiempo de 5 minutos.
3. Lavar la probeta con agua destilada antes y después de cada prueba de conductividad y secar con un paño libre de pelusa.
4. Introducir la probeta de conductividad en agua destilada, esperar a que se establezca el medidor hasta que deje de parpadear y medir la conductividad eléctrica del agua destilada con la que se trabaja.
5. Preparar soluciones de KCl a tres distintas concentraciones en un volumen de 125 ml de agua destilada. Los pesos para cada solución se pueden ver en la **Tabla B.2**.

Tabla B.2: Soluciones del KCl a diferentes concentraciones.

% m	m (g)
8.6	10.75
17	21.25
30	37.5

6. Vertir la solución preparada en un vaso de precipitado con volumen de 80 ml.
7. Repetir el paso 4 pero ahora para medir la conductividad de las soluciones de KCl.
8. Al finalizar con las mediciones, el registro se exporta como una extensión de archivo .xls.
9. Las mediciones de conductividad de las soluciones a las concentraciones establecidas son graficadas y presentadas en la **Figura B.2**.

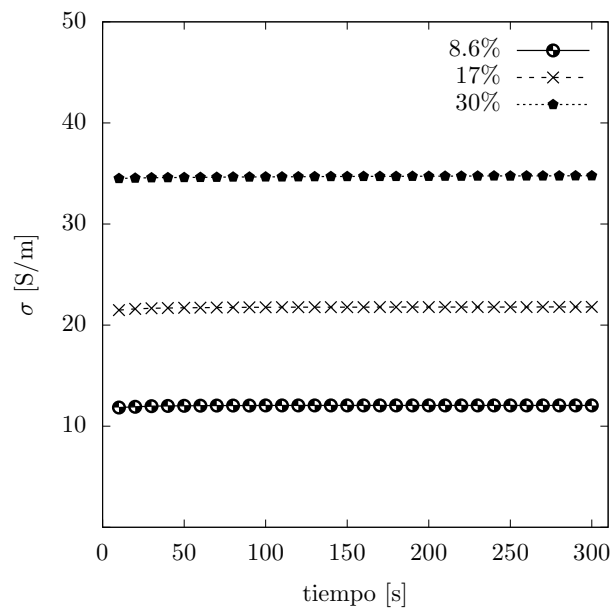


Figura B.2: Conductividad eléctrica del KCl a distintas concentraciones.

Para el estudio del flujo de un electrolito en un sistema estratificado de dos capas, se trabajó con una aleación de GaInSn. Las propiedades del metal líquido se presentan en la **Tabla B.3**.

Tabla B.3: Propiedades físicas del GaInSn a 20 °C.

Densidad	6440 kg/m ³
Conductividad térmica	31 W/m·K
Calor específico	370 J/kg·K
Resistividad	0.289 nΩ/m
Conductividad eléctrica	3.46 × 10 ⁶ S/m
Punto de fusión	6 – 10 °C
Punto de ebullición	Mayor a 1300 °C
Viscosidad	0.0024 Pa·s

Campo magnético

La **Figura C.1** muestra los ejes de simetría (x , y , z) de la cavidad en los que se hicieron mediciones de las componentes del campo magnético (B_x , B_y , B_z) para los imanes M1 y M2. Mediciones de campos magnéticos se obtuvieron cerca y lejos del imán. Las mediciones cerca del imán se observan en la **Figura C.2** y **C.3** para los imanes M1 y M2, respectivamente; mientras que las mediciones lejos del imán se muestran en la **Figura C.4** y **C.5** para los imanes M1 y M2, respectivamente.

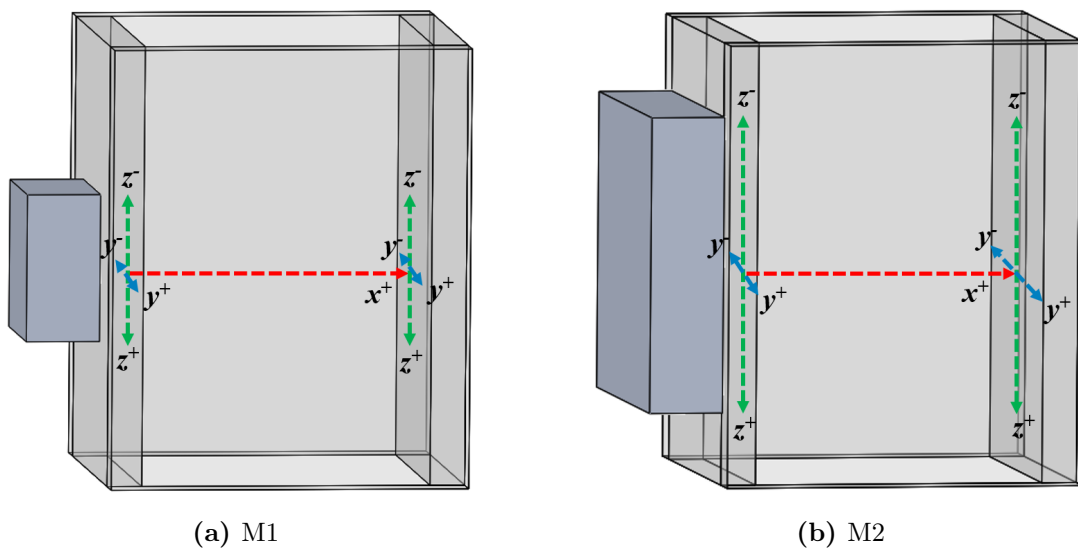


Figura C.1: Ejes de simetría para las configuraciones experimentales cerca y lejos del imán: (a) M1 y (b) M2.

El campo magnético en la componente principal B_x cerca del imán, alcanza una magnitud de 173 mT para M1 y 182 mT para M2, magnitudes de campo muy similares entre sí. Por otro lado, para las mediciones lejos del imán los valores obtenidos fueron más pequeños, de

5 mT para M1 y 17 mT para M2, tres veces más intenso que el registrado por el imán M1. En general, las tres componentes de campo decaen conforme nos alejamos de la superficie del imán en la dirección x , mientras que en las direcciones y , z la componente B_x muestra un comportamiento más simétrico y en forma de parábola, en cambio para las componentes B_y , B_z se observa un comportamiento alternado y antisimétrico.

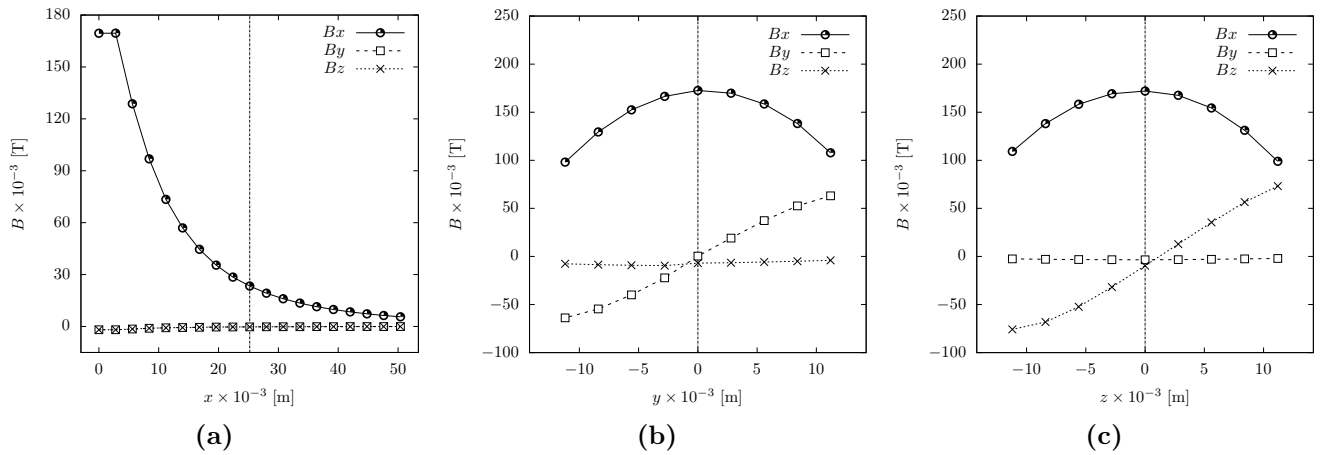


Figura C.2: Magnitudes de las componentes del campo magnético para el imán M1 medidas en los ejes de simetría de la cavidad cerca del imán a lo largo de las coordenadas: (a) x , (b) y y (c) z .

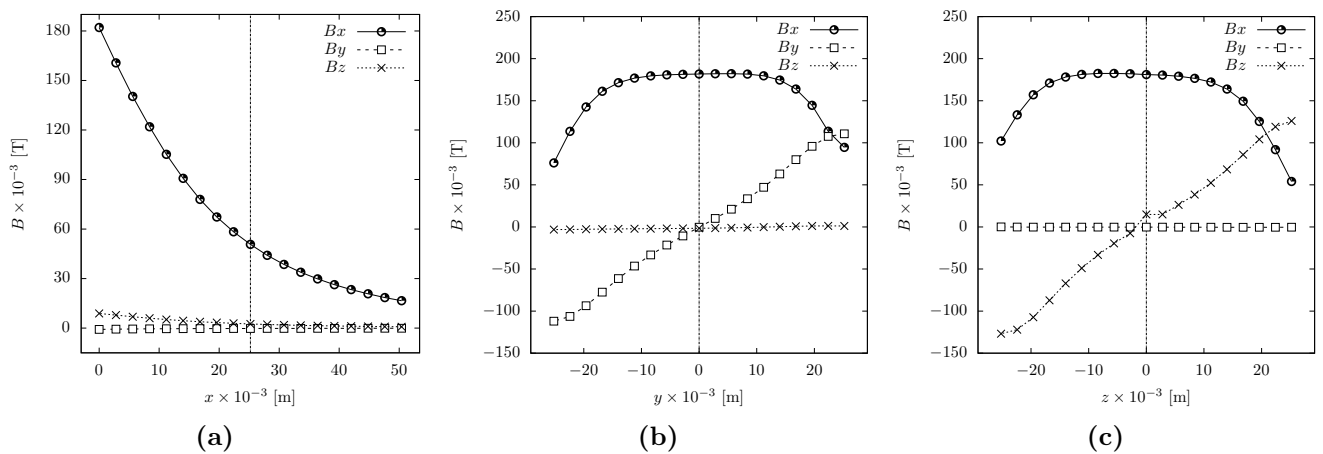


Figura C.3: Magnitudes de las componentes del campo magnético para el imán M2 medidas en los ejes de simetría de la cavidad cerca del imán a lo largo de las coordenadas: (a) x , (b) y y (c) z .

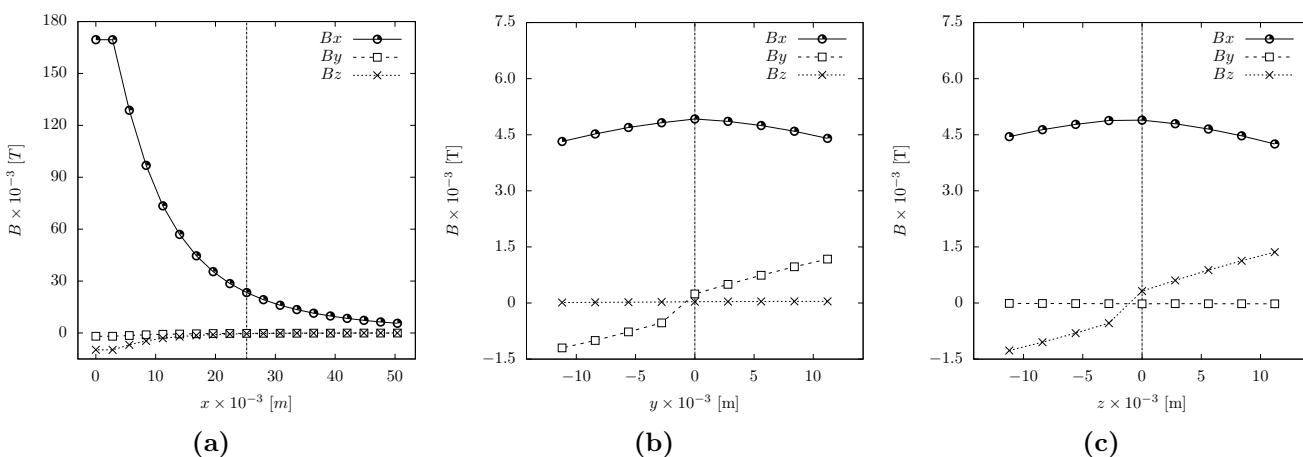


Figura C.4: Magnitudes de las componentes del campo magnético para el imán M1 medidas en los ejes de simetría de la cavidad lejos del imán a lo largo de las coordenadas: (a) x , (b) y y (c) z .

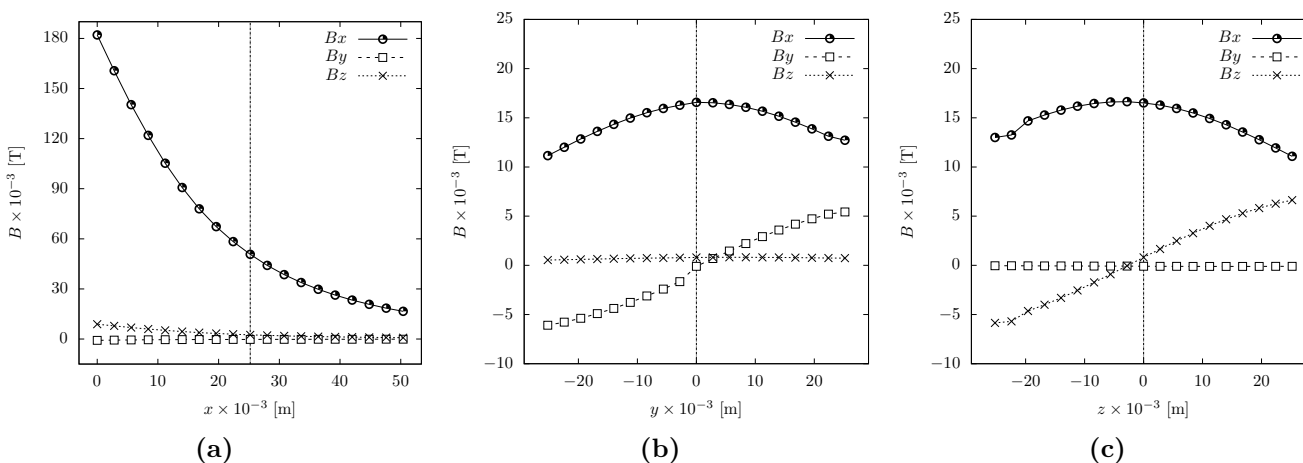


Figura C.5: Magnitudes de las componentes del campo magnético para el imán M2 medidas en los ejes de simetría de la cavidad lejos del imán a lo largo de las coordenadas: (a) x , (b) y y (c) z .

Técnica UDV

El velocímetro ultrasónico Doppler (DOP 4000), consta de un transductor que funciona como emisor y receptor, el cual manda pulsos ultrasónicos periódicos que chocan con las partículas inmersas en el fluido, capturando ecos sobre toda la trayectoria del haz ultrasónico. La velocidad de las partículas se puede calcular mediante los desplazamientos de éstas, considerando la diferencia de tiempo en que salió el pulso y tardaron en llegar los ecos.

La técnica UDV requiere que las partículas sean más pequeñas que la longitud de onda, de lo contrario la dirección de propagación y la intensidad de las ondas ultrasónicas se ven afectadas. La técnica UDV usualmente se emplea para fluidos opacos. Para este trabajo se utilizó una aleación eutéctica de GaInSn que al contacto con el aire forma rápidamente una fina capa de óxido insoluble que provoca un tamaño de partícula mayor a la longitud de onda. Motivo por el cual, el metal líquido necesita ser limpiado antes de iniciar con las mediciones.

El panel frontal del equipo cuenta con cuatro canales para probetas (CH1–CH4), un conector para el pulso emitido (EMI), dos conectores de sincronización (SYNC1 y SYNC2) y un LED rojo que indica el estado de la fuente de alimentación, ver **Figura D.1**. En el CH1 se conectó un transductor de 8 MHz y diámetro de 5 mm, que controlado mediante el software de medición UDOP, permite medir las velocidades de los líquidos que se acercan o se alejan del transductor, considerando una velocidad positiva cuando la partícula se aleja del transductor y negativa cuando se acerca a éste. Cabe señalar que entre más pequeño sea el diámetro del transductor, la divergencia del haz emitido será mayor.

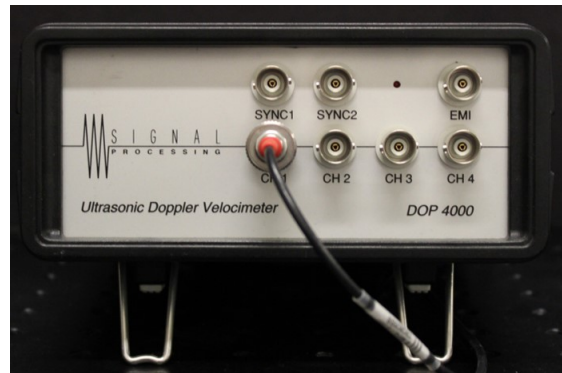


Figura D.1: Equipo DOP 4000.

Las mediciones dependen de los valores de los parámetros, los cuales se fijan de acuerdo al fluido y rango de corriente utilizado. Los parámetros operativos se muestran en la **Tabla D.1**.

Tabla D.1: Parámetros de operación.

Frecuencia	8333 kHz	Resolución	0.128 mm
Longitud de ráfaga	28	Emisiones/perfil	300
Potencia emisora	Medio	Ángulo Doppler	0
Tgc	35 dB	Sensibilidad	Baja
PRF	978 us	Factor de escala de velocidad	0.10
Profundidad de la primera puerta	6 mm	Velocidad del sonido en el líquido	1500 m/s
Número de puertas	400		

Tras fijar los parámetros, en la opción “Profile and echo”, se observa una ventana con dos gráficos. El gráfico de lado derecho se encuentra el eco capturado y el gráfico de lado izquierdo el registro del perfil de velocidad. Para la obtención de perfiles de velocidad, las mediciones tomadas con el UDV al igual que para el PIV, tuvieron una duración de 3 minutos, con un tiempo de análisis de 30 segundos.

Bibliografía

- Acosta-Zamora, K. P. (2019). *Modelado y simulación del flujo en una configuración de electrodo para baterías de metal líquido* (Tesis de Licenciatura). Ex Hacienda de San José de la Huerta, Morelia, Mich., México: UNAM.
- Aguilar-García, T. L. (2020). *Caracterización experimental de un fluido de metal líquido usando velocimetría por efecto Doppler* (Tesis de Maestría). UNAM.
- Aguilasocho-Acosta, G. (2018). *Diseño y pruebas de contenedores para el estudio de baterías de metal líquido* (Reporte Técnico). Ex Hacienda de San José de la Huerta, Morelia, Mich., México: UNAM.
- Akkermans, R., Cieslik, A., Kamp, L., Triefling, R., Clercx, H., y Van Heijst, G. (2008). The three-dimensional structure of an electromagnetically generated dipolar vortex in a shallow fluid layer. *Physics of Fluids*, 20(11), 116601.
- Ambri. (2015). *Liquid metal battery cell technology*. Descargado de <http://www.ambri.com/technology/> (Consultado en febrero de 2019)
- Antar, G., Lalti, A., y Habchi, C. (2019). The spontaneous breaking of axisymmetry in shallow rotating flows. *Physics of Fluids*, 31(7), 074104.
- Ashour, R. F., Kelley, D. H., Salas, A., Starace, M., Weber, N., y Weier, T. (2018). Competing forces in liquid metal electrodes and batteries. *Journal of Power Sources*, 378, 301-310.
- Beltrán, A. (2016). Nuevos sistemas de almacenamiento de energía: Baterías de metal líquido. *Boletín de la UNAM Campus Morelia*(59), 1-3.
- Beltrán, A. (2017). MHD natural convection flow in a liquid metal electrode. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1203-1212.
- Bradwell, D. J., Kim, H., Sirk, A. H., y Sadoway, D. R. (2012). Magnesium-antimony liquid metal battery for stationary energy storage. *Journal of the American Chemical Society*, 134(4), 1895-1897.
- Brito, D., Nataf, H. C., Cardin, P., Aubert, J., y Masson, J. P. (2001). Ultrasonic Doppler

- velocimetry in liquid gallium. *Experiments in fluids*, 31(6), 653-663.
- Chalamala, B. R. (2007). Portable electronics and the widening energy gap. *Proceedings of the IEEE*, 95(11), 2106-2107.
- Cieřlik, A., Kamp, L., Clercx, H., y Van Heijst, G. (2010). Three-dimensional structures in a shallow flow. *Journal of hydro-environment research*, 4(2), 89-101.
- Domínguez-Lozoya, J., Cuevas, S., Rivero, M., y Ramos, E. (2017). Instabilities in swirling liquid metal flows driven by rotating permanent magnets. *Magnetohydrodynamics*, 53(1), 79-88.
- Figueroa, A., Cuevas, S., y Ramos, E. (2011). Electromagnetically driven oscillatory shallow layer flow. *Physics of Fluids*, 23(1), 013601.
- Figueroa, A., Cuevas, S., y Ramos, E. (2017). Lissajous trajectories in electromagnetically driven vortices. *Journal of Fluid Mechanics*, 815, 415-434.
- Figueroa, A., Demiaux, F., Cuevas, S., y Ramos, E. (2009). Electrically driven vortices in a weak dipolar magnetic field in a shallow electrolytic layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 641, 245-261.
- Herreman, W., Nore, C., Ramos, P. Z., Capanera, L., Guermond, J.-L., y Weber, N. (2019). Numerical simulation of electrovortex flows in cylindrical fluid layers and liquid metal batteries. *Physical Review Fluids*, 4(11), 113702.
- Herrera-Ortega, M. (2017). *Flujo forzado electromagnéticamente en una cavidad cilíndrica* (Tesis de Licenciatura). Ex Hacienda de San José de la Huerta, Morelia, Mich., México: UNAM.
- Horstmann, G. M., Weber, N., y Weier, T. (2018). Coupling and stability of interfacial waves in liquid metal batteries. *Journal of Fluid Mechanics*, 845, 1-35.
- Kelley, D. H., y Sadoway, D. R. (2014). Mixing in a liquid metal electrode. *Physics of Fluids*, 26(5), 057102.
- Kelley, D. H., y Weier, T. (2018). Fluid mechanics of liquid metal batteries. *Applied Mechanics Reviews*, 70(2).
- Kim, H., Boysen, D. A., Newhouse, J. M., Spatocco, B. L., Chung, B., Burke, P. J., ... others (2013). Liquid metal batteries: past, present, and future. *Chemical reviews*, 113(3), 2075-2099.
- Kolesnichenko, I., Khripchenko, S., Buchenau, D., y Gerbeth, G. (2005). Electro-vortex flows in a square layer of liquid metal. *Magnetohydrodynamics*, 41(1), 39-51.
- Köllner, T., Boeck, T., y Schumacher, J. (2017). Thermal rayleigh-marangoni convection in a three-layer liquid-metal-battery model. *Physical Review E*, 95(5), 053114.
- Lara, C., Figueroa, A., y Cuevas, S. (2017). Nested dipolar vortices driven by electromagnetic forces in a thin liquid metal layer. *Magnetohydrodynamics*, 53(1).

- Li, H., Yin, H., Wang, K., Cheng, S., Jiang, K., y Sadoway, D. R. (2016). Liquid metal electrodes for energy storage batteries. *Advanced Energy Materials*, 6(14), 1600483.
- Lide, D. R. (2005). Concentrative properties of aqueous solutions: density, refractive index, freezing point depression, and viscosity. *CRC Handb. Chem. Phys*, 85, 8-78.
- Liu, K., Stefani, F., Weber, N., Weier, T., y Li, B. (2004). Numerical and experimental investigation of electro-vortex flow in a cylindrical container. *Magnetohydrodynamics*, 40(1), 1-16.
- Longo, J., Gui, L., y Stern, F. (2004). Ship velocity fields. En *PIV and Water Waves* (p. 119-179). World Scientific.
- Ning, X., Phadke, S., Chung, B., Yin, H., Burke, P., y Sadoway, D. R. (2015). Self-healing Li-Bi liquid metal battery for grid-scale energy storage. *Journal of Power Sources*, 275, 370-376.
- Perez, A., y Kelley, D. H. (2015). Ultrasound velocity measurement in a liquid metal electrode. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*(102), e52622.
- Pérez-Barrera, J., Pérez-Espinoza, J., Ortiz, A., Ramos, E., y Cuevas, S. (2015). Instability of electrolyte flow driven by an azimuthal lorentz force. *Magnetohydrodynamics*, 51(2), 203-213.
- Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S. T., y Kompenhans, J. (2007). *Particle image velocimetry: a practical guide* (2.^a ed.). Springer.
- Rawajfeh, K., Al-Hunaidi, T., Saidan, M., y Al-Hamamre, Z. (2014). Upgrading of commercial potassium chloride by crystallization: Study of parameters affecting the process. *Life Science Journal*, 11(6s).
- Rivero, M., Cuevas, S., y Ramos, E. (2016). Magnetohydrodynamic flow induced by arrays of rotating permanent magnets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 78, 30-40.
- Salas, H., Cuevas, S., y Ramos, E. (2001). Electrically driven vortices in a dipolar magnetic field. *Magnetohydrodynamics*, 37(1-2), 38-44.
- Shen, Y., y Zikanov, O. (2016). Thermal convection in a liquid metal battery. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 30(4), 275-294.
- Shercliff, J. (1970). Fluid motions due to an electric current source. *Journal of Fluid Mechanics*, 40(2), 241-250.
- Stauffer, N. (2016). *New battery made of molten metals may offer low-cost, long-lasting storage for the grid*. Descargado de <https://phys.org/news/2016-01-battery-molten-metals-low-cost-long-lasting.html> (Consultado en noviembre de 2019)
- Stefani, F., Weier, T., Gundrum, T., y Gerbeth, G. (2011). How to circumvent the size limitation of liquid metal batteries due to the tayler instability. *Energy conversion and management*, 52(8-9), 2982-2986.

- Suslov, S. A., Pérez-Barrera, J., y Cuevas, S. (2017). Electromagnetically driven flow of electrolyte in a thin annular layer: axisymmetric solutions. *Journal of Fluid Mechanics*, 828, 573-600.
- Weber, N., Beckstein, P., Galindo, V., Herreman, W., Nore, C., Stefani, F., y Weier, T. (2017). Metal pad role instability in liquid metal batteries. *Magnetohydrodynamics*, 53(1), 129-140.
- Weber, N., Beckstein, P., Herreman, W., Horstmann, G. M., Nore, C., Stefani, F., y Weier, T. (2017). Sloshing instability and electrolyte layer rupture in liquid metal batteries. *Physics of Fluids*, 29(5), 054101.
- Weber, N., Galindo, V., Priede, J., Stefani, F., y Weier, T. (2015). The influence of current collectors on tayler instability and electro-vortex flows in liquid metal batteries. *Physics of Fluids*, 27(1), 014103.
- Weber, N., Galindo, V., Stefani, F., y Weier, T. (2014). Current-driven flow instabilities in large-scale liquid metal batteries, and how to tame them. *Journal of Power Sources*, 265, 166-173.
- Weber, N., Galindo, V., Stefani, F., Weier, T., y Wondrak, T. (2013). Numerical simulation of the tayler instability in liquid metals. *New Journal of Physics*, 15(4), 043034.
- Weier, T., Bund, A., El-Mofid, W., Horstmann, G., Lalau, C., Landgraf, S., ... Weber, N. (2017). Liquid metal batteries-materials selection and fluid dynamics. En *Iop conference series: Materials science and engineering* (Vol. 228, p. 012013).
- Whittingham, M. S. (2012). History, evolution, and future status of energy storage. *Proceedings of the IEEE*, 100(Special Centennial Issue), 1518-1534.
- William, H. (1925, abril 21). *Electrolytically-refined aluminum and articles made therefrom*. (US Patent 1,534,315)
- Xiang, L., y Zikanov, O. (2019). Numerical simulation of rolling pad instability in cuboid liquid metal batteries. *Physics of Fluids*, 31(12), 124104.
- Yang, Z., Zhang, J., Kintner-Meyer, M. C., Lu, X., Choi, D., Lemmon, J. P., y Liu, J. (2011). Electrochemical energy storage for green grid. *Chemical reviews*, 111(5), 3577-3613.
- Zikanov, O. (2015). Metal pad instabilities in liquid metal batteries. *Physical Review E*, 92(6), 063021.