



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES, UNIDAD
MORELIA

“CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UN FLUJO DE
METAL LÍQUIDO USANDO VELOCIMETRÍA POR EFECTO
DOPPLER”

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

PRESENTA:

I.Q. TANIA LIZET AGUILAR GARCÍA

TUTOR PRINCIPAL:

DR. ALBERTO BELTRÁN MORALES
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

DR. JOSÉ NÚÑEZ GONZÁLEZ
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES **U. Morelia**

DR. JOAQUÍN DE LA TORRE MEDINA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

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.

*Dedicado a mi familia,
en especial a mi madre y hermano,
así como a todas las personas que me aman
y me han acompañado a lo largo de este camino.*

Agradecimientos institucionales

A la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial al Instituto de Investigaciones en Materiales Unidad Morelia donde me brindaron todos los medios necesarios para culminar este trabajo.

A CONACyT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) por darme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría..

Se agradece el apoyo para el desarrollo de las actividades que brindaron los siguientes proyectos: UNAM-DGAPA-PAPIIT IN108619, Flujo en un Electrodo de Metal Líquido Efecto de la Velocidad en el Potencial Eléctrico; UNAM-DGAPA-PAPIIT IA102017, 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 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, así como el apoyo para la asistencia a congresos.

Al Dr. Alberto Beltrán Morales por compartir todo su invaluable conocimiento y ser guía a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Michel Alejandro Rivero Corona, por su apoyo incondicional, por el tiempo brindado y todo el conocimiento compartido para que este proyecto pudiera ser llevado a cabo.

Al Dr. José Núñez González y al Dr. Joaquín de la Torre Medina, por sus consejos, conocimiento y críticas que ayudaron a mejorar el trabajo de tesis, así como por ser parte importante de mi comité tutor y centrar parte de su tiempo en la revisión de este proyecto.

A Arely y Livier que forman parte de la administración del instituto, que llevaron todos los procesos administrativos que conlleva la maestría.

Agradecimientos personales

A Dios por permitirme cumplir una meta más.

A mi madre por brindarme todo su apoyo y amor incondicional ya que sin sus cuidados y enseñanzas no sería la persona que soy.

A Chuy por el apoyo y cariño que me ha demostrado como padre.

A mi hermano por todo el aprendizaje y amor que obtuve de él, por cuidarme y por los momentos buenos y malos que pasé con él, porque sé que ahora será mi ángel por siempre.

A mi familia que de alguna forma ha estado a lo largo de mi crecimiento.

A mi prometido Cristian por el amor y las atenciones que tiene hacia mí, por apoyarme y motivarme a seguir.

A Selene, mi amiga con quien compartí esta experiencia, quien se volvió como una hermana por todas las noches de desvelo que pasamos juntas, por escucharme y darme consejos, por el cuidado durante estos dos años y por todo el apoyo y conocimiento que compartimos.

A Christian por todo su apoyo no solo como compañero de laboratorio sino como el buen amigo con el que siempre puedes contar, un amigo que puedes considerar parte de tu familia.

A mis compañeros de grupo Yovany, por esas pláticas que hacían más divertidos los días de escuela en medio del estrés, a Gibran, Saúl, Axel y amigos que han sido parte de este grupo en algún momento, gracias por el conocimiento, las anécdotas y los recuerdos compartidos.

A Coronita, por ayudarme a rescatar mi dedo de en medio de dos imanes, por los chocolates y golosinas compartidas, por los recordatorios y avisos de la escuela, por las pláticas y el apoyo cuando nos visitaba en nuestro laboratorio, y sobre todo por ser un buen amigo.

Resumen

En el presente trabajo, y con objeto de contribuir al entendimiento de los patrones de flujo en configuraciones relacionadas a las baterías de metal líquido (BML), en particular; en electrodos de metal líquido (EML), se estudia experimentalmente el flujo de GaInSn (metal líquido) confinado en una cavidad cúbica y agitado de forma no intrusiva por una fuerza de Lorentz generada por la interacción de una corriente eléctrica directa y el campo magnético de imanes permanentes. La cavidad, con 5.1 cm de cada lado, está construida de acrílico y como tapas superior e inferior electrodos de cobre, todo el sistema se encuentra sellado, libre de fugas y burbujas de aire. Primeramente, se estudia el flujo generado por dos tipos de imanes de distinto tamaño en contacto con una de las caras de la cavidad y con intensidades al centro de ésta de 0.34 y 0.23 T, respectivamente. Para un segundo grupo de experimentos, se coloca un segundo imán (similar al primero) pero en una cara contraria de forma que se atraigan mutuamente y generen un campo más uniforme al interior del volumen ocupado por el GaInSn. Para cada una de las configuraciones anteriores, se explora el efecto de corrientes eléctricas en la dirección axial de la cavidad con valores de: 1, 1.5, 2, 2.5 y 3 A. Se presentan mediciones experimentales de las distribuciones de campo; así como, la caracterización del flujo empleando un equipo de velocimetría por efecto Doppler (UDV, por sus siglas en inglés) con el cual se miden perfiles de velocidad del flujo. Adicionalmente, se reporta la diferencia de potencial en las terminales de los electrodos como función del tiempo de evolución del flujo. Los resultados indican que para todas las condiciones de flujo se tiene un estado estacionario. Interesantemente, las velocidades mayores se obtienen para las configuraciones de imanes pequeños, los cuales presentan campos menos intensos al centro de la cavidad, pero más localizados espacialmente, a diferencia de los imanes grandes con campos más intensos pero también más uniformemente distribuidos. Para el caso de las configuraciones con pares de imanes, los perfiles de velocidad medidos muestran simetrías. El estudio se extendió para considerar un sistema estratificado de dos capas, con la aleación de GaInSn al fondo y un electrolito débil arriba, depositados en volúmenes iguales dentro de una cavidad similar. Finalmente, y para el caso del flujo de un electrolito débil, perfiles de velocidad obtenidos mediante la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés) fueron comparados con los medidos con el equipo UDV, encontrándose una buena comparación tanto cuantitativa como cualitativa.

Abstract

Experimental characterization of a liquid metal flow using ultrasonic Doppler velocimetry

In this work and in order to contribute to the understanding of the flow patterns in the liquid metal batteries (LMB) configurations; in particular, in liquid metal electrodes (LME), a GaInSn (liquid metal) flow confined in a cubic cavity is experimentally studied, it is set in motion by a non intrusive Lorentz force generated by the interaction of a direct electrical current and a magnetic field generated by permanent magnets. The cuboid vessel, with sides of 5.1 cm, is made of plexiglass, the upper and lower parts of the container are solid copper rods, the whole system is sealed, free of leaks and air bubbles. Firstly, we study the fluid flow generated by two types of magnets of different sizes in contact with a lateral face of the cavity, the magnetic field intensity at the center of the cavity is 0.34 and 0.23 T, respectively. For a second experiments group, a second magnet similar to the first one is placed on an opposite face, in way that they attract each other and generate a more uniform field within the volume occupied by the GaInSn. For each of the above configurations, the effect of electric currents in the axial direction of the cavity with values of: 1, 1.5, 2, 2.5 and 3 A is explored.

Experimental measurements of field distributions are presented; as well as the characterization of the flow using an ultrasonic Doppler velocimetry (UDV) equipment it is used to measure velocity profiles. In addition, the potential difference at the electrode terminals is measured to contribute to the characterization of the fluid flow. Results indicate the presence of stationary fluid flow patterns for all the configurations. Interestingly, the higher velocities are obtained for the configurations with the smaller magnets, whose magnetid fields are less intense at the center of the cavity; but, more spatially located, unlike larger magnets with more intense fields but also more evenly distributed.

In the case of configurations with magnets pairs, the measured velocity profiles show more symmetries. The study was extended to consider a two-layer stratified system, with the GaInSn alloy at the bottom and a weak electrolyte above, deposited in equal volumes within a similar cavity. Finally and in the case of the flow of a weak electrolyte, velocity profiles obtained using the particle images-velocimetry (PIV) technique, were compared with those measured with the UDV equipment, finding an overall good agreement.

Contenido

Resumen	IX
Abstract	XI
Índice de Figuras	XVIII
Índice de Tablas	XIX
Nomenclatura	XX
Objetivos	XXI
Hipótesis	XXII
1. Introducción	1
1.1. Baterías de metal líquido	2
2. Diseño experimental	7
2.1. Diseño del prototipo experimental	7
2.2. Configuraciones experimentales	8
2.3. Prototipo experimental	12
2.4. Montaje experimental	13
3. Metodología experimental	16
3.1. Campo magnético de imanes permanentes	16
3.2. Voltaje y corriente eléctrica	17
3.3. Medición de los perfiles de velocidad	18
4. Resultados y discusión	23
4.1. Campos magnéticos	23
4.2. Perfiles de velocidad	27
4.2.1. Configuración con un imán M1	27
4.2.2. Configuración con par de imanes M1	31
4.2.3. Configuración con un imán M2	34
4.2.4. Configuración con par de imanes M2	37
4.3. Diferencia de potencial	40
4.4. Comparación de las técnicas experimentales PIV y UDV	42

5. Conclusiones y trabajo futuro	45
5.1. Electrolito KCl, una sola capa	46
5.2. Trabajo futuro	46
A. Dimensiones de las piezas del prototipo experimental	49
B. Campos magnéticos	52
C. Velocímetro ultrasónico Doppler	57
D. Voltaje	61

Índice de Figuras

1.1. Representación esquemática de una batería de metal líquido.	2
1.2. Elementos que son candidatos para electrodos negativos color amarillo y positivos color verde. Figura tomada de Kim y cols. (2013).	3
1.3. Proceso de carga y descarga de las BML.	3
1.4. GaInSn.	5
2.1. Ensamble completo de la cavidad con dimensiones principales.	8
2.2. Imanes de Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB), a) M1, b) M2.	9
2.3. Esquema general de imanes usados.	9
2.4. Configuraciones de estudio usando imanes de tipo: a) M1, b) par M1, c) M2, d) par M2.	10
2.5. Soporte de acrílico para imán M1.	10
2.6. Sistema de coordenadas empleado para las mediciones.	11
2.7. Ejes de medición de velocidad en configuraciones con un imán.	11
2.8. Ejes de medición de velocidad en configuraciones con pares de imanes.	11
2.9. Prototipo experimental que confina la aleación de GaInSn.	12
2.10. Montaje experimental considerando un imán, cuyos componentes son identificados como: 1. Estaciones métricas de posicionamiento XYZ, 2. Prototipo experimental montado con un imán M1, 3. Soporte para transductor, 4. Equipo DOP 4000 y 5. Fuente de poder KEITHLEY 2200-32-3.	13
2.11. Montaje experimental ya implementado para configuraciones con un solo imán, cuyos componentes son identificados como: 1. Estaciones métricas de posicionamiento XYZ, 2. Prototipo experimental montado con un imán M1, 3. Soporte para transductor, 4. Equipo DOP 4000 y 5. Fuente de poder KEITHLEY 2200-32-3.	14
2.12. Montaje experimental considerando pares de imanes cuyos componentes son identificados como: 1. Estaciones métricas de posicionamiento XYZ, 2. Prototipo experimental montado con un imán M1, 3. Soportes para transductor, 4. Equipo DOP 4000 y 5. Fuente de poder KEITHLEY 2200-32-3.	14
2.13. Montaje experimental ya implementado para configuraciones con pares de imanes cuyos componentes son identificados como: 1. Estaciones métricas de posicionamiento XYZ, 2. Prototipo experimental montado con un imán M1, 3. Soportes para transductor, 4. Equipo DOP 4000 y 5. Fuente de poder KEITHLEY 2200-32-3.	14

3.1.	Montaje experimental para la medición de campos magnéticos de los imanes permanentes, los componentes son numerados como: 1. Gauss/Tesla meter 8030, 2. Imán M2, 3. Sonda 3D Z0A83-3208-10-T y 4. Estación de posicionamiento XYZ.	16
3.2.	Sistema de coordenadas empleado para las mediciones de los imanes permanentes.	17
3.3.	a) Equipo DOP 4000, b) transductores TR0805SS de 8 MHz.	18
3.4.	Pantalla principal del software UDOP 604_2.	19
3.5.	Prototipo experimental con dos transductores bajo la influencia del imán M2.	19
3.6.	Esquema de la dirección de la fuerza producida en el sistema, en base a la dirección de la corriente eléctrica y del campo magnético usados. . .	19
3.7.	Perfil de velocidad y eco usando dos transductores en el prototipo experimental de GaInSn.	20
3.8.	Ventana de acceso al software UDOP 604_2.	20
3.9.	Parámetros de operación.	21
3.10.	Barra de control de grabado.	21
4.1.	Acomodo de par de imanes M2 lado positivo y negativo en la cavidad. .	24
4.2.	Densidad de campo magnético para los imanes: a) M1 positivo, b) M1 negativo, c) M2 positivo, d) M2 negativo.	25
4.3.	Densidad de campo magnético a lo largo de los ejes y y z para $x = 0.6$ cm, y para los imanes: a) M1 eje y , b) M1 eje z , c) M2 eje y , d) M2 eje z . .	26
4.4.	Puntos de medición de cada transductor para la configuración con un imán M1.	27
4.5.	Perfiles de velocidad para todas las corrientes, configuración con un imán M1, a) T1, b) T2, c) T3, d) T4.	28
4.6.	Dirección y velocidad de movimiento para cada transductor usando 3 A de corriente eléctrica, configuración con un imán M1.	29
4.7.	U_y vs. tiempo medida a lo largo del eje y con coordenadas en $x = 0.9$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T1 y $x = 3.1$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T2, para la configuración con un imán M1 y para las corrientes eléctricas: a) 1 A, b) 3 A.	30
4.8.	U_x vs. tiempo medida a lo largo del eje x con coordenadas en $x = 6.3$ cm, $y = 2.25$ cm y $z = 0$ cm para T3 y $x = 6.3$ cm, $y = -2.25$ cm y $z = 0$ cm para T4, para la configuración con un imán M1 y para las corrientes eléctricas: a) 1 A, b) 3 A.	30
4.9.	Puntos de medición de cada transductor para la configuración con par de imanes M1.	31
4.10.	Perfiles de velocidad para todas las corrientes, configuración con par de imanes M1, a) T1, b) T2, c) T3.	32
4.11.	U_y vs. tiempo medida a lo largo del eje y con coordenadas en $x = 0.9$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T1, $x = 3.1$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T2 y $x = 5.4$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T3, para la configuración con par de imanes M1 y para las corrientes eléctricas: a) 1 A, b) 3 A.	33
4.12.	Dirección y velocidad de movimiento para cada transductor usando 3 A de corriente eléctrica, configuración con par de imanes M1.	33

4.13. Puntos de medición de cada transductor para la configuración con un imán M2.	34
4.14. Perfiles de velocidad para todas las corrientes, configuración con un imán M2, a) T1, b) T2, c) T3, d) T4.	35
4.15. Dirección y velocidad de movimiento para cada transductor usando 3 A de corriente eléctrica, configuración con un imán M2.	35
4.16. U_y vs. tiempo medida a lo largo del eje y con coordenadas en $x = 0.9$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T1 y $x = 3.1$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T2, para la configuración con un imán M2 y para las corrientes eléctricas: a) 1 A, b) 3 A.	36
4.17. U_x vs. tiempo medida a lo largo del eje x con coordenadas en $x = 6.3$ cm, $y = 2.25$ cm y $z = 0$ cm para T3 y $x = 6.3$ cm, $y = -2.25$ cm y $z = 0$ cm para T4, para la configuración con un imán M2 y para las corrientes eléctricas: a) 1 A, b) 3 A.	36
4.18. Puntos de medición de cada transductor para la configuración con par de imanes M2.	37
4.19. Perfiles de velocidad para todas las corrientes, configuración con par de imanes M2, a) T1, b) T2, c) T3.	38
4.20. Dirección y velocidad de movimiento para cada transductor usando 3 A de corriente eléctrica, configuración con par de imanes M2.	38
4.21. U_y vs. tiempo medida a lo largo del eje y con coordenadas en $x = 0.9$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T1, $x = 3.1$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T2 y $x = 5.4$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T3, para la configuración con par de imanes M2 y para las corrientes eléctricas: a) 1 A, b) 3 A.	39
4.22. Diferencia de potencial como función del tiempo y para distintos valores de corriente: a) imán M1, b) par de imanes M1.	40
4.23. Diferencia de potencial como función del tiempo y para distintos valores de corriente: a) imán M2, b) par de imanes M2.	41
4.24. Diferencia de potencial promedio como función de la corriente para las distintas configuraciones de imanes.	41
4.25. Montaje experimental usando la técnica PIV, se muestran los componentes: 1. Fuente de poder KEITHLEY 2200-32-3, 2. Soporte para imán, 3. Cámara, 4. Prototipo experimental contenido con electrolito y 5. Láser.	42
4.26. Montaje experimental usando la técnica UDV, se muestran los componentes: 1. Fuente de poder KEITHLEY 2200-32-3, 2. Soporte para imán, 3. Prototipo experimental contenido con electrolito, 4. Soporte para transductor y 5. Equipo DOP 4000.	43
4.27. Perfiles de velocidad de un electrolito para las corrientes eléctricas de 0.02 y 0.06 A, usando las técnicas: a) PIV, b) UDV.	43
4.28. Parámetros de medición usados para el flujo de un electrolito.	44
4.29. Voltajes obtenidos para todas la corrientes usadas en un electrolito, usando las técnicas: a) PIV, b) UDV.	44
5.1. Prototipo experimental con capas de: 1. GaInSn y 2. Electrolito.	47
5.2. Montaje experimental para el estudio con dos capas, dónde se observan: 1. Fuente de poder KETHLEY 2200-32-3, 2. Equipo DOP 4000, 3. Cámara, 4. Soporte para imán, 5. Soporte para transductor, 6. Láser.	47

5.3.	Perfil de velocidad al centro de la capa de GaInSn en una configuración de dos capas de fluidos conductores.	48
5.4.	Diferencia de potencial en terminales de la cavidad.	48
A.1.	Tapas del prototipo con medidas expresadas en cm, a) parte superior, b) parte inferior.	49
A.2.	Soportes para tapas con medidas expresadas en cm: a) superior, b) inferior	50
A.3.	Piezas del prototipo con medidas expresadas en cm. a) Electrodo, b) cavidad cúbica.	50
A.4.	Ensamble de las piezas del prototipo experimental.	51
B.1.	Planos de medición de campos magnéticos.	52
B.2.	Densidad de campo magnético del imán M1 sobre los ejes del Plano 1, a) eje x , b) eje y , c) eje z	53
B.3.	Densidad de campo magnético del imán M2 sobre los ejes del Plano 1, a) eje x , b) eje y , c) eje z	54
B.4.	Densidad de campo magnético del imán M1 sobre los ejes del Plano 2, a) eje y , b) eje z	55
B.5.	Densidad de campo magnético del imán M2 sobre los ejes del Plano 2, a) eje y , b) eje z	55
B.6.	Densidad de campo magnético del imán M1 sobre los ejes del Plano 3, a) eje y , b) eje z	56
B.7.	Densidad de campo magnético del imán M2 sobre los ejes del Plano 3, a) eje y , b) eje z	56
D.1.	Pantalla de interfaz de LabVIEW para ajuste de parámetros.	62
D.2.	Pantalla de interfaz de LabVIEW para control del equipo.	62

Índice de Tablas

1.1.	Conductividad eléctrica de elementos que participan en las BML. . . .	5
1.2.	Propiedades del GaInSn a 20 °C.	6
2.1.	Dimensiones imanes de Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB).	9
4.1.	Densidad de campo magnético para la componente B_x en las coordenadas $x = 0.6, 3.1$ y 5.6 cm ($y = z = 0$) para imanes M1 y M2.	24

Nomenclatura

BML	—	Batería de metal líquido
CAD	—	Diseño asistido por computadora
EML	—	Electrodo de metal líquido
FPS	—	Frames per second (por sus siglas en inglés)
MHD	—	Magnetohidrodinámica
UDV	—	Velocimetría por efecto Doppler Ultrasónico
B	—	Densidad de campo magnético
B_x	—	Componente de la densidad de campo magnético en la dirección del eje x
B_y	—	Componente de la densidad de campo magnético en la dirección del eje y
B_z	—	Componente de la densidad de campo magnético en la dirección del eje z
P	—	Posición
$P_{máx}$	—	Profundidad máxima
T_m	—	Temperatura de fusión
T_b	—	Temperatura de ebullición
U	—	Velocidad
U_x	—	Velocidad en la dirección del eje x
U_y	—	Velocidad en la dirección del eje y
U_z	—	Velocidad en la dirección del eje z
$V_{máx}$	—	Velocidad máxima
c	—	Velocidad de la luz en el vacío (m/s)
s	—	Segundos
f_d	—	Frecuencia de cambio Doppler
f_{prf}	—	Frecuencia de repetición de pulso
j	—	Densidad de corriente eléctrica
σ	—	Conductividad eléctrica
ϕ	—	Potencial eléctrico
Ω	—	Ohms
$\Delta\varphi$	—	Diferencial de potencial
$\overline{\Delta\varphi}$	—	Diferencial de potencial promedio

Objetivos

Objetivo general

Medir perfiles de velocidad de un flujo generado electromagnéticamente del metal líquido GaInSn y caracterizar el patrón de flujo en función de parámetros como la magnitud de corriente eléctrica y la presencia de distintas distribuciones de campos magnéticos externos.

Objetivos específicos

1. Medir los perfiles de velocidad del sistema de GaInSn usando el equipo DOP 4000, en cuatro puntos a lo largo de la cavidad.
2. Tomar mediciones de los perfiles de velocidad en el sistema de GaInSn usando corrientes de 1, 1.5, 2, 2.5 y 3 A.
3. Usar imanes de Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB) con dimensiones de $2.54 \times 2.54 \times 1.27 \text{ cm}^3$ y $5.08 \times 5.08 \times 1.27 \text{ cm}^3$ con intensidades de campo magnético que van desde 0.01 a 0.4 T, en configuraciones con un imán, así como de pares de imanes.

Hipótesis

1. La diferencia de potencial en terminales del sistema está relacionada con la distribución del flujo de GaInSn.
2. La tendencia del flujo a ser bidimensional está influenciada por la presencia de campos magnéticos uniformes (imanes grandes), mientras que la tridimensionalidad dominará para campos magnéticos localizados (imanes pequeños).
3. Mediante las mediciones UDV es posible cuantificar la agitación del fluido de metal líquido GaInSn confinado en el contenedor.
4. Son comparables los perfiles obtenidos con técnicas UDV y PIV.

Introducción

La quema de combustibles fósiles usados como suministro actual de electricidad, ha provocado un incremento en el calentamiento global durante los últimos años. Esto nos hace pensar en nuevas formas de generación de energía como alternativa para la producción de energía sin causar daño al medio ambiente, tal es el caso de las energías renovables. La energía solar y la eólica destacan como las principales fuentes de energía renovable, el problema más grande que existe con ellas es que no siempre se tienen las condiciones adecuadas para su óptimo funcionamiento, por ejemplo, la falta de viento o la presencia de nubes, por lo que es necesario contar con sistemas de almacenamiento robustos que permitan mantener el suministro de energía (Beltrán, 2017; Beltrán, 2016; Whittingham, 2012).

En general las baterías como sistema de almacenamiento de electricidad a gran escala representan la opción más viable.

Existen diferentes tipos de baterías, como lo son: las baterías de Níquel-Cadmio (NiCd), Níquel-Metal Hidruro (NiMH), ácido-Plomo y de iones de Litio. Día a día la demanda que tienen estos dispositivos crece de manera significativa ya que cada vez existen dispositivos que cuentan con más funciones y requieren de mayor energía para su funcionamiento, tal es el caso de la electrónica portátil (celulares, laptops, tabletas, cámaras, carros eléctricos, etc. (Chalamala, 2007; Holubowitch y cols., 2016; Van Noorden, 2014). Hasta mediados de los noventa, las baterías recargables de Níquel-Cadmio y Níquel-Metal Hidruro eran la tecnología preferida para la electrónica móvil. En una década, las baterías de iones de Litio se apoderaron de este mercado (Chalamala, 2007). Las limitaciones en el rendimiento general de las baterías de iones de Litio dependen del rendimiento intrínseco de los materiales (ánodo, cátodo y electrolito) y de los aspectos tecnológicos (procesamiento de materiales, fabricación de electrodos y concepción de la batería), teniendo en cuenta el entorno de cada material en la celda completa. Aunque han tenido mejoras, dichas baterías presentan un corto ciclo de vida asociado al deterioro de los componentes sólidos que la conforman; y su escalamiento a sistemas de mayor capacidad eleva considerablemente su costo de manufactura (Ning y cols., 2015). Conforme han pasado los años la demanda que tienen las baterías de iones Litio de alto rendimiento para la electrónica portátil, ha incrementado de tal manera que se han tenido que investigar diversos materiales para aumentar el tiempo de vida de la batería así como la capacidad de almacenamiento y suministro de energía.

1.1. Baterías de metal líquido

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 (Kim y cols., 2013). Una BML esta 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 y cols., 2016; Stauffer, 2015). El desarrollo de la BML tiene como antecedente la

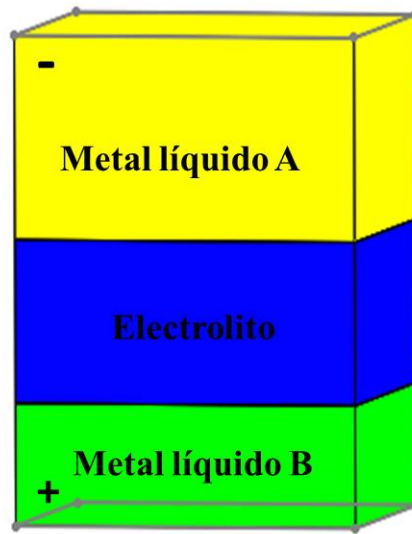


Figura 1.1. Representación esquemática de una batería de metal líquido.

celda electroquímica totalmente líquida (Kim y cols., 2013), cuya historia comienza hace casi un siglo con los avances en la producción electrolítica de aluminio de alta pureza. Cuatro décadas después el gobierno de los Estados Unidos de América (EUA), financió trabajos pioneros para desarrollar células alquídicas para aplicaciones de almacenamiento de energía. Durante la siguiente década e impulsados por la guerra fría, continuaron las investigaciones sobre estas celdas de almacenamiento, pero fueron olvidadas ya que el enfoque iba hacia celdas recargables de mayor densidad de energía con componentes inmovilizados más adecuado para aplicaciones automotrices.

Una BML está compuesta por tres capas de fluidos conductores; dos electrodos de metal líquido (EML) que constituyen el ánodo y cátodo separados por un electrolito de sal fundida, los fluidos se auto segregan en tres capas debido a la diferencia de densidad e inmiscibilidad que presenta cada fluido (AMBRI, 2015; Kim y cols., 2013). Una representación esquemática de la BML se muestra en la **Figura 1.1**, donde el metal líquido A es el ánodo y el B el cátodo; mientras que, la **Figura 1.2** muestra los elementos candidatos a ser usados en su fabricación. Para ser considerados dichos elementos deben ser líquidos a temperaturas prácticas, es decir, la temperatura de fusión (T_m) debe ser inferior a 1000°C y el punto de ebullición (T_b) superior a 25°C , eléctricamente conductores, con una conductividad eléctrica mínima mayor que la conductividad iónica de un electrolito típico de sal fundida ($\sigma > 1 \text{ S cm}^{-1}$), no ser radiactivo, es decir, disponible en forma de un isótopo estable natural y de acuerdo a su electronegatividad, los metales más electropositivos de baja densidad son los candidatos

para ser el electrodo negativo y los más electronegativos incluyendo los semimetales de alta densidad, los candidatos para ser el electrodo positivo (Holubowitch y cols., 2016; Kelley y Sadoway, 2014; Kim y cols., 2013).

1																	18
H	2											13	14	15	16	17	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

Figura 1.2. Elementos que son candidatos para electrodos negativos color amarillo y positivos color verde. Figura tomada de Kim y cols. (2013).

Las BML generan energía a partir de reacciones electroquímicas (Li y cols., 2016). Durante el proceso de descarga de la batería la capa del electrodo negativo o ánodo (metal más ligero) disminuye su grosor, debido a la oxidación del metal líquido A, cationes atraviesan el electrolito para llegar al electrodo positivo o cátodo (metal más pesado) 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 AB (Kim y cols., 2013), como se muestra en la **Figura 1.3**.

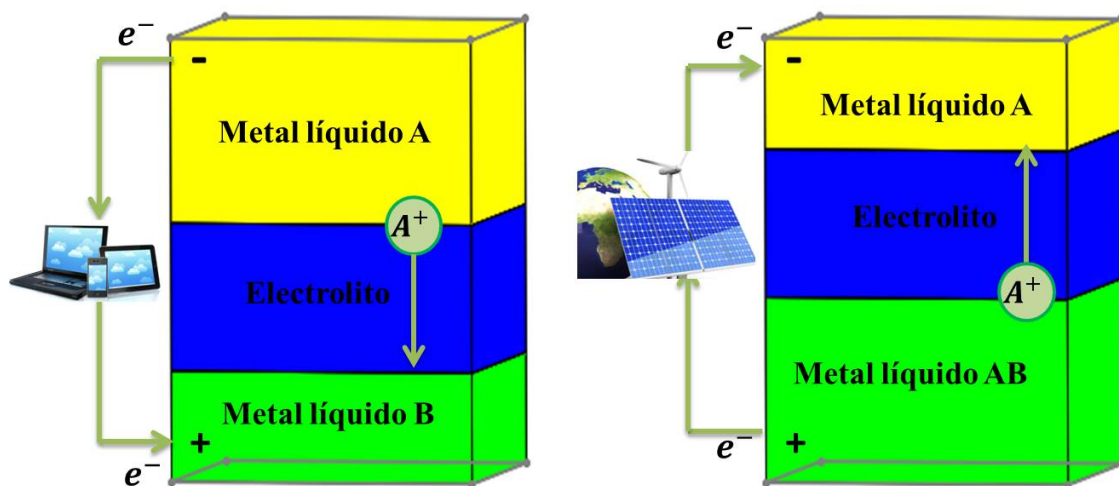


Figura 1.3. Proceso de carga y descarga de las BML.

Al estar compuestas de líquidos conductores y sujetas a corrientes eléctricas elevadas de carga/descarga, las BML son susceptibles de presentar distintas inestabilidades de flujo que pueden causar recirculaciones al interior, pudiendo incluso generar un mezclamiento de las capas estratificadas y por lo tanto un cortocircuito del sistema (Kelley y

Weier, 2017). Una de las posibles causas de mezclado en configuraciones de BML, puede ser la aparición de una fuerza de Lorentz generada por la interacción de la corriente eléctrica de carga/descarga con su propio campo magnético. Estudios teórico-numéricos y experimentales reportados en la literatura analizan el comportamiento del flujo de fluidos en configuraciones relacionadas a las BML y debido a distintos fenómenos como la fuerza de Lorentz, flotación, gradientes de concentración, entre otros (Andreev, Kolesnikov, y Thess, 2009; Beltrán, 2017; Brito, Cardin, Nataf, y Marolleau, 1995; Brito, Nataf, Cardin, Aubert, y Masson, 2001; Domínguez-Lozoya, Cuevas, Rivero, y Ramos, 2017; Eckert, Franke, Gundrum, Gerbeth, y Willemetz, 2015; Herreman y cols., 2019; Holubowitch y cols., 2016; Horstmann, Weber, y Weier, 2018; Kelley y Sadoway, 2014; Kelley y Weier, 2017; Ning y cols., 2015; Perez y Kelley, 2015; Ricou y Vives, 1982; Takeda, 1986, 1987; Weber y cols., 2017; Weber, Galindo, Priede, Stefani, y Weier, 2015; Weber, Nimtz, Personnetaz, Weier, y Sadoway, 2020; Weier y cols., 2017).

Medir la distribución del flujo al interior de las BML presenta varios obstáculos como las altas temperaturas y que se trata de fluidos opacos, por lo que no es posible el uso de técnicas ópticas (Andreev y cols., 2009; Brito y cols., 2001; Ricou y Vives, 1982). Para los fluidos transparentes clásicos como el agua o algunos electrolitos traslúcidos existe una variedad de técnicas bien desarrolladas para su estudio como lo son: Doppler láser y velocimetría de imágenes de partículas, óptica Schlieren, técnicas interferométricas, etc. Si hablamos de fluidos opacos se pueden reconocer dos tipos de técnicas: las invasivas, significa la inserción de una unidad de envío en el medio bajo investigación, y las no invasivas, como los métodos ultrasónicos (Eckert, Cramer, y Gerbeth, 2007).

El método Doppler de ultrasonido, a menudo llamado velocimetría Doppler ultrasónica (UDV, por sus siglas en inglés) o monitor de perfil de velocidad ultrasónico (UVP, por sus siglas en inglés), se aplicó originalmente en el campo médico y se remonta a más de 30 años. El uso de emisiones pulsadas y gracias al trabajo pionero de Takeda (1987) esta técnica se ha extendido a otros campos como en física e ingeniería de fluidos y ha abierto el camino a nuevas técnicas de medición en dinámica de fluidos y magnetohidrodinámica (Signal Processing S.A., 2020).

El principio de medición se basa en la técnica de eco pulsado, para que esta técnica funcione es necesario que haya micropartículas suspendidas en el fluido a estudiar. Periódicamente una ráfaga ultrasónica corta es emitida desde el transductor y viaja a lo largo de la línea de medición, es decir, se puede usar para medir la velocidad de un fluido, no solo en puntos aislados, sino a lo largo de una línea con una buena resolución temporal (Nauber y cols., 2018; Signal Processing S.A., s.f.). Si tal ráfaga de pulsos golpea las micropartículas suspendidas en el líquido, una parte de la energía ultrasónica se dispersa. Se puede recibir utilizando un segundo transductor o por el mismo transductor que funciona como emisor y receptor de emisiones. Toda la información del perfil de velocidad a lo largo del haz ultrasónico está contenida en el eco. Si se conoce la velocidad del sonido del líquido, la posición espacial a lo largo de la línea de medición puede ser determinada a partir del retraso de tiempo detectado entre la emisión de ráfaga de pulsos y la recepción de sus ecos (Eckert y cols., 2007; Signal Processing S.A., 2020; Takeda, 2012), es decir, con un solo transductor ultrasónico y una señal de pulso, uno obtiene un perfil de la componente de velocidad del flujo en la dirección del disparo ultrasónico (Takeda, 1986). El movimiento de un conjunto de partículas dispersas dentro del volumen de medición dará como resultado un pequeño cambio de tiempo de la estructura de la señal entre dos ráfagas consecutivas. Durante las últimas dos décadas, el método UDV se ha convertido en una herramienta muy po-

Elementos	Conductividad eléctrica
Ga	6.78×10^6 S/m
Bi	0.867×10^6 S/m
Mg	22.6×10^6 S/m
Sb	2.5×10^6 S/m

Tabla 1.1: Conductividad eléctrica de elementos que participan en las BML.

derosa para investigar la estructura de velocidad de los flujos de metal líquido. (Eckert y cols., 2015) Existen numerosos trabajos donde se utiliza esta técnica de medición sobre fluidos opacos tales son los casos de Takeda (1987) para mercurio, Brito y cols. (2001) para galio líquido, así como actualmente encontramos trabajos como el de Weier y cols. (2017), quienes constantemente realizan trabajo de investigación sobre del tema.

En particular, para la caracterización experimental del flujo en BML se han logrado obtener distintas magnitudes de velocidad como función de la corriente de carga tal es el caso del trabajo reportado por Kelley y Sadoway (2014).

En el presente trabajo y motivados por el estudio de BML, se presenta la caracterización experimental del flujo de la aleación eutéctica de GaInSn confinada en una cavidad cúbica. Las paredes laterales son de acrílico; mientras que las tapas superior e inferior hacen la función de electrodos y fueron fabricados en cobre, a través de ellos se inyecta una corriente eléctrica en la dirección axial, la cual interacciona con un campo magnético generado por cuatro distintas configuraciones de imanes localizados en caras laterales de la cavidad. Nuestro fluido de trabajo tiene valores de conductividad eléctrica muy cercanos a los de los elementos usados en las BML, como se muestra en la **Tabla 1.1**, por lo que se espera que el efecto de la fuerza de Lorentz sea similar. La **Figura 1.4** muestra la aleación GaInSn usada en los experimentos.



Figura 1.4. GaInSn.

El GaInSn es una aleación eutéctica de galio, indio y estaño cuya concentración no es específica, pero para nuestro estudio manejamos una concentración de Ga 68.5%, In 21.5% y Sn 10% en peso, cuyo nombre comercial es galinstan. Algunas de las propiedades del GaInSn se encuentran representadas en la **Tabla 1.2**, estas propiedades fueron obtenidas de las siguientes referencias Changsha Rich Nonferrous Metals CO

(2019); Changsha Santech Materials CO (2017). Cabe resaltar que la conductividad eléctrica para esta aleación líquida tiene seis órdenes de magnitud de diferencia en referencia a un electrolito débil.

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

Tabla 1.2: Propiedades del GaInSn a 20 °C.

Para el fin práctico de entender la dinámica de fluidos en configuraciones relacionadas a las BML, el GaInSn es una buena opción por las propiedades antes mencionadas y por su facilidad de manipulación. Un inconveniente es la generación de óxido en este metal ya que el galio líquido tiene una afinidad muy alta con el oxígeno. El óxido de galio cubre la superficie del galio líquido en pocos minutos cuando este está en contacto con la atmósfera. Existen dos métodos para evitar que se genere óxido; trabajar con una atmósfera libre de oxígeno o retirar el óxido del metal. Para la primer opción se puede usar una atmósfera de argón o nitrógeno, pero cabe recordar que incluso con solo un minuto de exposición ante el oxígeno comienza la oxidación (Brito y cols., 2001). Para la segunda opción podemos usar una solución ácida, en éste proyecto se usó una solución al 10 % en peso de HCl en etanol (Brito y cols., 1995), es posible dejar sumergido el GaInSn en esta solución por un largo tiempo para evitar oxidación.

En los siguientes capítulos del presente trabajo se esboza el diseño experimental del prototipo, mostrado en el Capítulo 2. En el Capítulo 3 se describe la metodología seguida para la realización de todas la pruebas, por otro lado el Capítulo 4 muestra los principales resultados de perfiles de velocidad y diferencia de potencial obtenidos para las cuatro distintas configuraciones con las que se estará trabajando. Finalmente en el Capítulo 5 se encuentran las conclusiones y un avance del trabajo futuro que se sugiere para continuidad del proyecto.

Diseño experimental

En este capítulo se presenta la configuración experimental diseñada y construida para el estudio de un flujo de la aleación de GaInSn generado por una fuerza de Lorentz. Estudios relacionados reportados en la literatura, se enfocan en geometrías cilíndricas (Aguilasocho-Acosta, G, 2018; Beltrán, 2017; Brito y cols., 1995, 2001; Domínguez-Lozoya y cols., 2017; Holubowitch y cols., 2016; Liu, Stefani, Weber, Weier, y Li, 2004); sin embargo, recientemente las configuraciones relacionadas al tema de BML, exploran configuraciones similares a la aquí presentada (Xiang y Zikanov, 2019).

Se muestra a detalle el diseño de la cavidad, los imanes empleados para generar distintas configuraciones de campo, así como los equipos empleados para inyectar corriente eléctrica y hacer mediciones de perfiles de velocidad del flujo.

2.1. Diseño del prototipo experimental

Como primer paso se realizó el diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) de cada una de las piezas del prototipo experimental usando el software SolidWorks, con el fin de obtener una cavidad cúbica de dimensión interna de 5.1 cm de lado y un volumen interno de 132.651 cm^3 , dimensiones cercanas a las de los prototipos de BML de la compañía AMBRI (2015). Las caras laterales se fabricaron en acrílico; mientras que, para sellar la cavidad en la tapa superior e inferior se diseñaron dos piezas de cobre montadas en bases de acrílico que ensamblan con la cavidad. Al centro de cada electrodo y en la cara externa se colocó un tornillo que permite conectar una fuente de poder. El prototipo en su conjunto mide 12 cm de ancho por 12.1 cm de alto. El ensamble final de tapas y cavidad se muestra en la **Figura 2.1**, como puede observarse se usan tornillos de cobre para la sujeción de tapas y cavidad. Las medidas de cada una de las piezas se muestran en el **Apéndice A**.

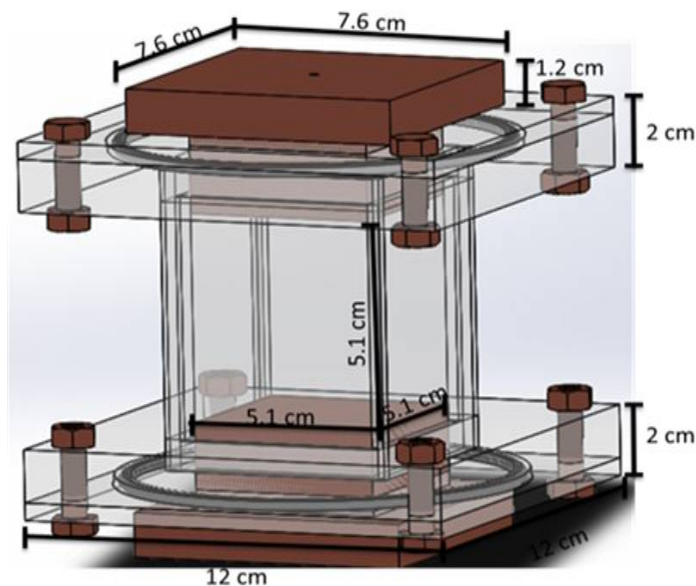


Figura 2.1: Ensamble completo de la cavidad con dimensiones principales.

2.2. Configuraciones experimentales

Una vez construida la cavidad, es posible diseñar cuatro distintas configuraciones experimentales en función de las distribuciones de campo magnético. Como se ha mencionado, para los campos magnéticos se usan imanes de Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB), identificados como: M1, mostrado en la **Figura 2.2(a)**, con dimensiones $1.27 \times 2.54 \times 2.54 \text{ cm}^3$, y M2, mostrado en la **Figura 2.2(b)**, con dimensiones $1.27 \times 5.08 \times 5.08 \text{ cm}^3$. Las dimensiones exactas de los imanes M1 y M2 se muestran en la **Tabla 2.1** y la nomenclatura usada se ilustra en la **Figura 2.3**.

En particular, se tiene una primera configuración con un imán M1, ver **Figura 2.4(a)**, una segunda con un imán M2, ver **Figura 2.4(c)** y finalmente, las configuraciones tercera y cuarta con pares de imanes de tipo M1 y M2, mostradas en las **Figuras 2.4(b)** y **2.4(d)**, respectivamente.

Como se aprecia en la **Figura 2.4**, para las configuraciones con pares de imanes, éstos se colocan en caras opuestas de la cavidad (uno frente al otro). En general, para todas las configuraciones los imanes se pegan de su lado con el área mayor y polo positivo, centrado en las caras laterales de la cavidad.

Con objeto de centrar los imanes M1 en la cara de la cavidad, es necesario usar un soporte de acrílico como el mostrado en la **Figura 2.5**. Cada soporte fue etiquetado con un signo negativo para el imán M1 negativo y un signo positivo para el imán M1 positivo, agregando una flecha como símbolo para colocar de la misma forma la base en la cavidad, así como los imanes en los soportes y asegurar la misma posición del imán para todos los casos donde son usados.

Una vez definidas las posiciones de los imanes, seleccionamos los puntos en que se estarán realizando las mediciones de los perfiles de velocidad. Es posible ocupar 3 o 4 puntos de estudio dependiendo de la configuración a estudiar, cabe señalar que en cada uno de estos puntos será colocado un transductor ultrasónico (descrito más adelante), es posible colocar un mayor número de transductores pero el equipo de UDV nos limita a un máximo de 4.



Figura 2.2. Imanes de Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB), a) M1, b) M2.

Imán	x_l [cm]	y_l [cm]	z_l [cm]
M1	1.27	2.54	2.54
M2	1.27	5.08	5.08

Tabla 2.1: Dimensiones imanes de Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB).

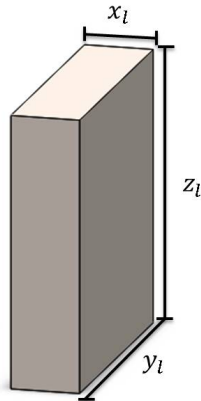


Figura 2.3. Esquema general de imanes usados.

En base al sistema de coordenadas que se muestra en la **Figura 2.6** son descritas las posiciones de los puntos de medición

En la **Figura 2.7**, se observa el arreglo de los ejes de medición para los casos de estudio con un solo imán, se observa que son definidos 4 puntos de medición identificados por número de transductor, el transductor T1, ubicado de forma tangencial a la cara donde se encuentra el imán, el transductor T2 colocado en la cara paralela al transductor T1 justo en el punto medio de la cavidad, este par de transductores miden en dirección del eje y , y por último los transductores T3 y T4 en la cara paralela al imán de modo que las paredes laterales de la cavidad sean tangenciales al transductor, midiendo en dirección del eje x , cabe señalar que todos los puntos de medición son a la mitad de la cavidad sobre el eje z .

El arreglo mostrado en la **Figura 2.8** es considerado para las mediciones donde se emplean pares de imanes, debido a esto solo se definen 3 puntos de medición en las caras perpendiculares a las caras de los imanes, los transductores T1 y T2 permanecen

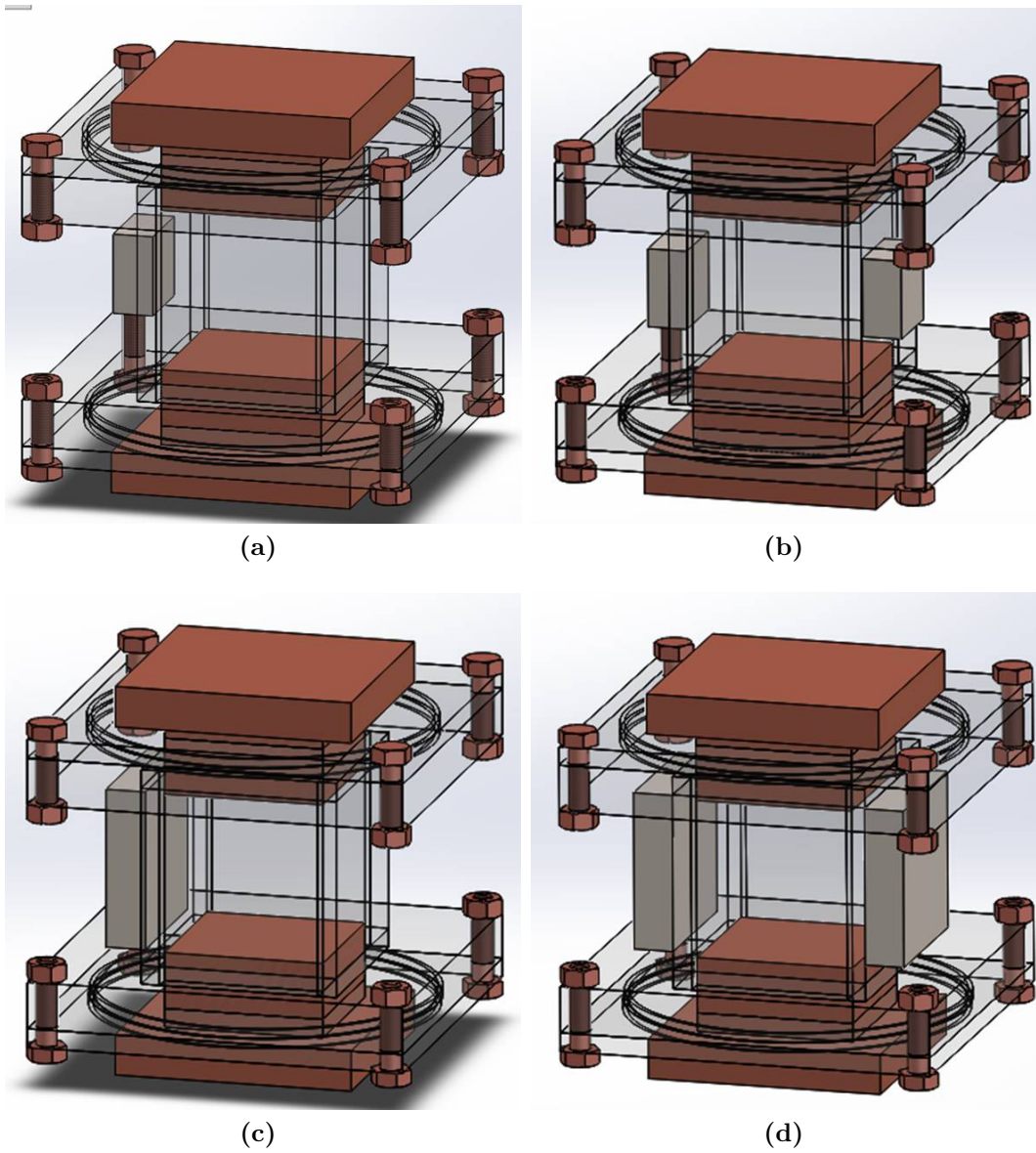


Figura 2.4. Configuraciones de estudio usando imanes de tipo: a) M1, b) par M1, c) M2, d) par M2.

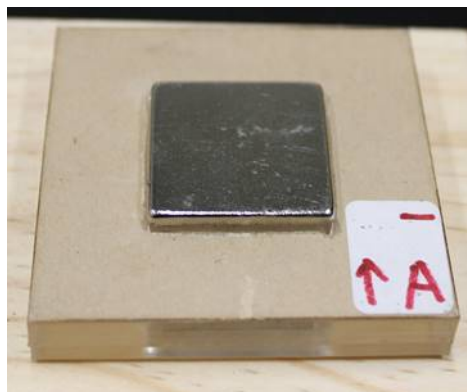


Figura 2.5. Soporte de acrílico para imán M1.

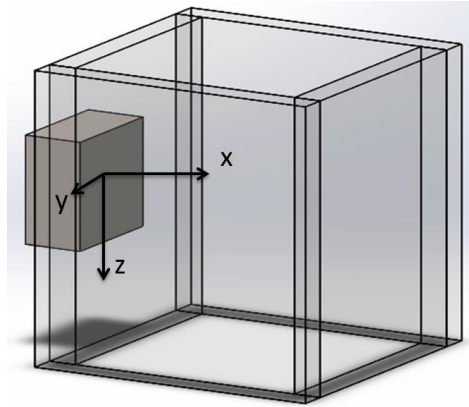


Figura 2.6. Sistema de coordenadas empleado para las mediciones.

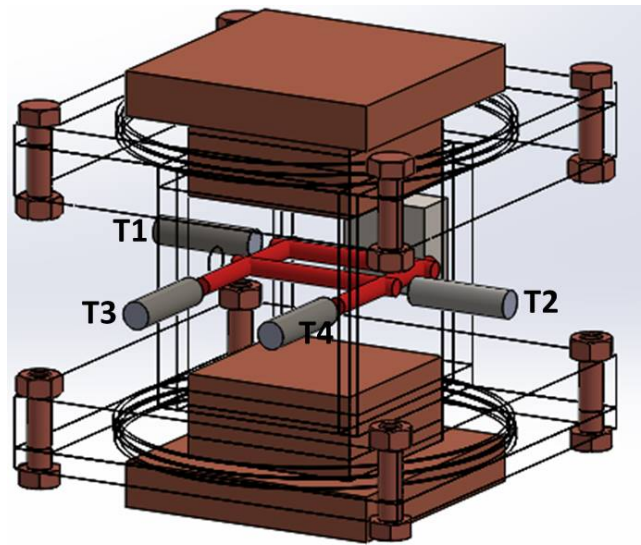


Figura 2.7. Ejes de medición de velocidad en configuraciones con un imán.

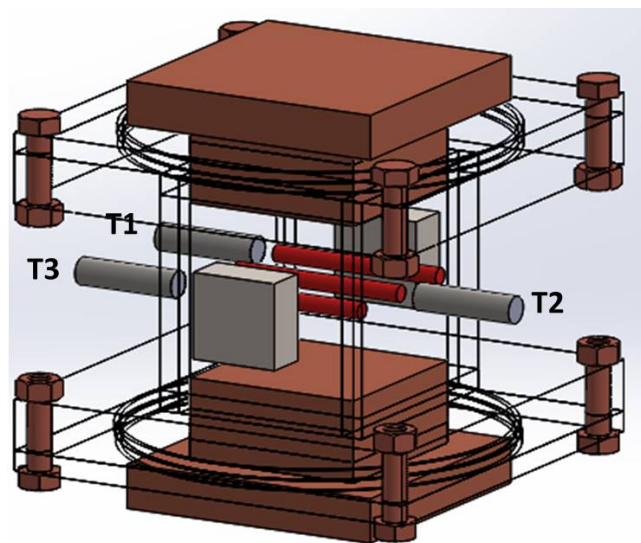


Figura 2.8. Ejes de medición de velocidad en configuraciones con pares de imanes.

en las posiciones descritas anteriormente para el caso con un solo imán, mientras que el transductor T3 ahora se encuentra de manera análoga al T1 pero en la pared frontal de la cavidad.

Estas posiciones fueron seleccionadas en base a un análisis de simulación para estos casos de estudio, realizados por el equipo de trabajo.

2.3. Prototipo experimental

Una vez diseñado el prototipo e identificadas las configuraciones experimentales a estudiar, se procedió a su fabricación, armado y montaje. La **Figura 2.9** muestra la cavidad que confina a la aleación de GaInSn.

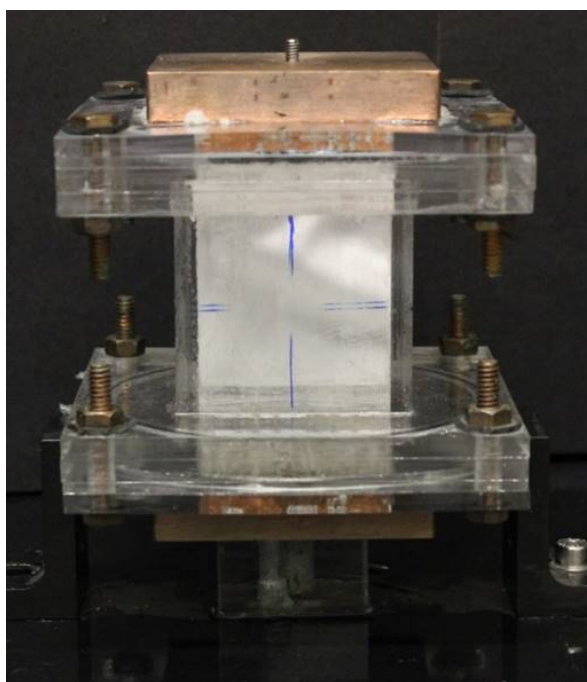


Figura 2.9. Prototipo experimental que confina la aleación de GaInSn.

Todas las paredes del prototipo están fabricadas en acrílico con un espesor de 0.6 cm, son no conductoras de la electricidad y aislantes de calor. Los electrodos en las tapas superiores e inferiores fueron fabricados en cobre, mismo material para los tornillos de sujeción, con objeto de evitar perturbaciones del campo magnético de los imanes.

El diseño permite confinar la aleación eutéctica GaInSn de manera confiable sin tener fugas ni burbujas de aire atrapado.

El proceso de llenado de la cavidad con GaInSn es muy importante ya que es aquí donde tenemos que asegurar que no haya burbujas de aire y que el metal líquido esté haciendo contacto con los electrodos. Como primer paso es lijar la superficie de los electrodos de cobre, con el fin de retirar el óxido que pueda haber, una vez listos los electrodos, se fija la tapa inferior a la cavidad cerciorándose que los tornillos estén lo suficientemente apretados para que no haya orificios y se tenga buen contacto, como se mencionó anteriormente para evitar este tipo de espacios se colocó un empaque circular en cada tapa. Posteriormente, se vierte el metal líquido dentro de la cavidad, se llena un poco más del volumen de la cavidad para asegurar que el metal líquido haga contacto con los electrodos y que no haya burbujas de aire dentro. Como medida

de prevención al cerrar el prototipo éste es colocado en un recipiente de vidrio ya que al tener mayor volumen de metal líquido es posible que haya derrames. Al cerrar la cavidad primero se coloca un poco de metal líquido sobre el electrodo de cobre para que al momento de cerrar ambas partes hagan contacto, se ajusta la tapa superior con los tornillos de cobre y se quita el exceso de metal líquido que pudiera haber quedado entre la tapa y la base de la cavidad usando un pedazo de hoja ya que es muy delgada y logra entrar en ese espacio. Una vez sellado el prototipo se limpia y ya está listo para usarse. Algunos inconvenientes de este proceso es que al momento de sellar la cavidad se pueden producir fugas por la presión del metal líquido, para esto hay que ajustar bien cada tornillo del prototipo.

2.4. Montaje experimental

Para los experimentos se lleva a cabo el montaje de la cavidad que confina al GaInSn, en conjunto con un sistema que sujeta los transductores usados para las mediciones, con objeto de poder posicionarlos de forma precisa en las posiciones de medición. Dicho sistema consiste en dos estaciones métricas de posicionamiento XYZ.

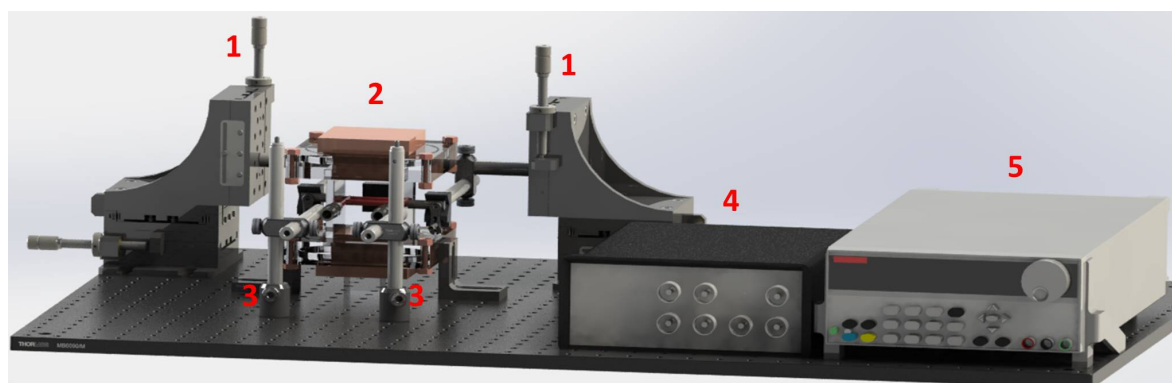


Figura 2.10. Montaje experimental considerando un imán, cuyos componentes son identificados como: 1. Estaciones métricas de posicionamiento XYZ, 2. Prototipo experimental montado con un imán M1, 3. Soporte para transductor, 4. Equipo DOP 4000 y 5. Fuente de poder KEITHLEY 2200-32-3.

La **Figura 2.10** muestra el montaje experimental para mediciones con un solo imán, se observan los dos dispositivos de posicionamiento 3D colocados uno frente al otro. Cada uno sujeta un transductor, éstos son identificados como T1 y T2, cuyas posiciones fueron descritas en la sección anterior al igual que para los transductores T3 y T4 que son soportados con la ayuda de dos bases que se muestran al frente del prototipo experimental.

La cavidad al igual que los dispositivos de posicionamiento y demás equipos involucrados en los experimentos se encuentran fijos a una mesa óptica para garantizar una correcta alineación de todos los componentes durante el proceso de medición.

Para todos los experimentos se usan transductores con una frecuencia ultrasónica de 8 MHz, modelo TR0805SS, conectados a un equipo DOP 4000, todo de la marca Signal Processing, permitiendo obtener perfiles de velocidad a lo largo de la dirección axial del transductor. La corriente que se inyecta a la celda experimental toma valores de 1, 1.5, 2, 2.5 y 3 A y se obtiene de una fuente de poder de la marca Keithley modelo

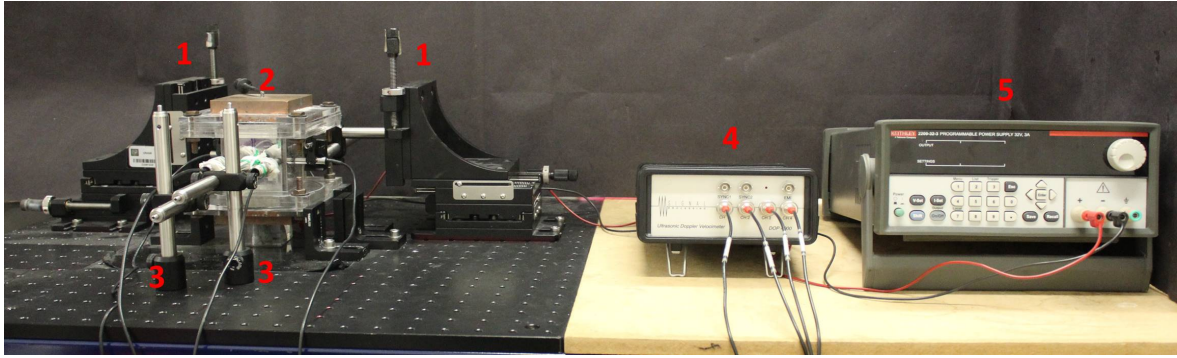


Figura 2.11. Montaje experimental ya implementado para configuraciones con un solo imán, cuyos componentes son identificados como: 1. Estaciones métricas de posicionamiento XYZ, 2. Prototipo experimental montado con un imán M1, 3. Soporte para transductor, 4. Equipo DOP 4000 y 5. Fuente de poder KEITHLEY 2200-32-3.

2200-32-2. En la **Figura 2.11** se muestra el montaje experimental ya implementado para esta configuración, contemplando las piezas descritas.

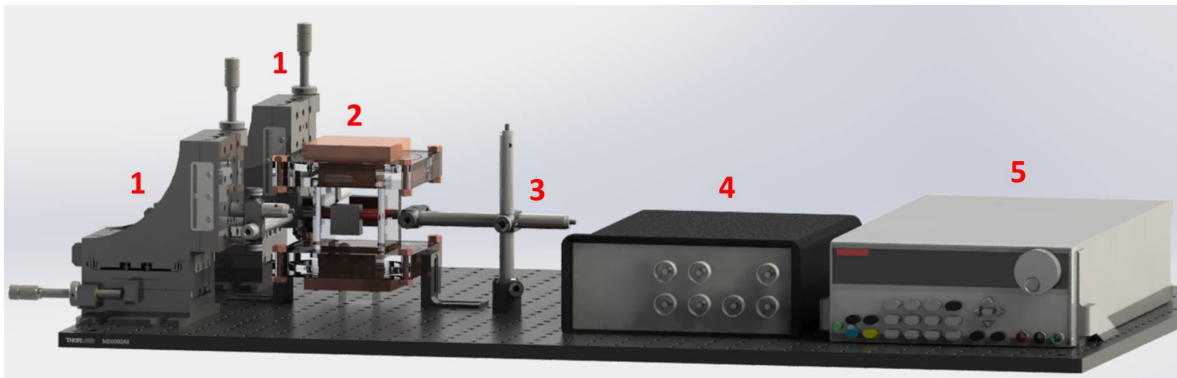


Figura 2.12. Montaje experimental considerando pares de imanes cuyos componentes son identificados como: 1. Estaciones métricas de posicionamiento XYZ, 2. Prototipo experimental montado con un imán M1, 3. Soportes para transductor, 4. Equipo DOP 4000 y 5. Fuente de poder KEITHLEY 2200-32-3.

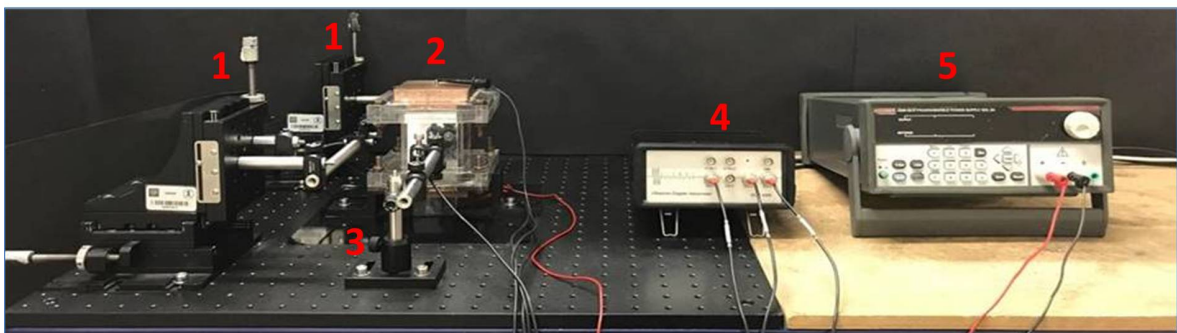


Figura 2.13. Montaje experimental ya implementado para configuraciones con pares de imanes cuyos componentes son identificados como: 1. Estaciones métricas de posicionamiento XYZ, 2. Prototipo experimental montado con un imán M1, 3. Soportes para transductor, 4. Equipo DOP 4000 y 5. Fuente de poder KEITHLEY 2200-32-3.

Para los experimentos llevados a cabo con pares de imanes, es necesario reubicar los sistemas de posicionamiento, tal como se muestra en la **Figura 2.12**. Los equipos de posicionamiento ahora se encuentra del lado de una de las caras libres de la cavidad soportando cada uno los transductores T1 y T3, respectivamente; mientras que para el transductor T2, localizado en la cara opuesta se usa un soporte en forma de T. En la **Figura 2.13** se aprecia el montaje experimental ya implementado para las configuraciones con pares de imanes.

Una vez teniendo el prototipo experimental, los montajes experimentales, los puntos de medición y los equipos necesarios, se procede a la caracterización de los imanes a usar así como a realizar las mediciones de los perfiles de velocidad y el diferencial de potencial, las metodologías seguidas son mostradas en el **Capítulo 3**.

Capítulo 3

Metodología experimental

Una vez realizado el montaje experimental, se procede a la realización de mediciones de: perfiles de velocidad y diferencia de potencial en terminales de los electrodos de cobre. Es importante mencionar que, primeramente se caracterizó el campo magnético producido por los imanes permanentes M1 y M2; posteriormente se procedió a la realización de experimentos en la cavidad, para cada una de las cuatro configuraciones mencionadas anteriormente se realizó un estudio del flujo como función de cinco valores de corriente eléctrica directa. En las siguientes secciones se detalla la metodología experimental implementada.

3.1. Campo magnético de imanes permanentes

El movimiento al interior de la cavidad es producido por una fuerza de Lorentz generada por la interacción de la corriente que circula en el GaInSn y el campo magnético externo, impuesto mediante imanes permanentes; por lo anterior y para una correcta caracterización de los perfiles de velocidad presentes en el flujo, se realizaron mediciones del campo magnético de los imanes M1 y M2. Las mediciones se realizaron de forma individual. El montaje para las mediciones se muestra en la **Figura 3.1**, donde se aprecia una sonda 3D Z0A83-3208-10-T conectada a un equipo Gauss/Tesla meter 8030 de la marca F. W. Bell.

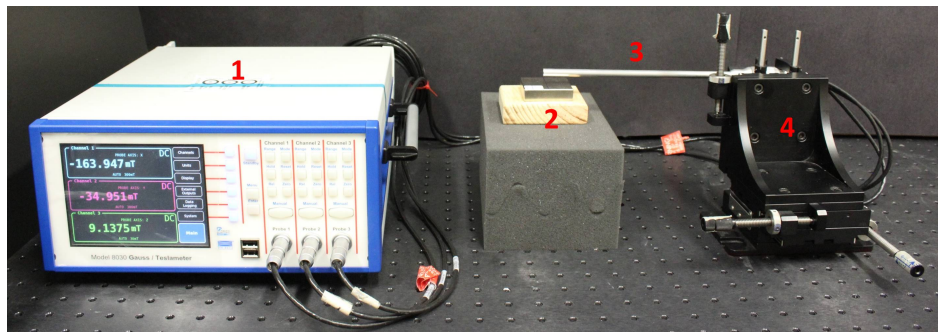


Figura 3.1. Montaje experimental para la medición de campos magnéticos de los imanes permanentes, los componentes son numerados como: 1. Gauss/Tesla meter 8030, 2. Imán M2, 3. Sonda 3D Z0A83-3208-10-T y 4. Estación de posicionamiento XYZ.

Mediciones para cada una de las componentes del campo magnético fueron reali-

zadas en direcciones de los ejes de simetría de la cavidad y ajustadas de acuerdo al sistema de referencia de la sonda (F. W. Bell., 2016). La sonda está montada en una estación de posicionamiento 3D mediante el cual es posible moverla a lo largo de varios puntos sobre los ejes, la separación entre mediciones es de 0.28 cm y para cada punto se reportan mediciones promediadas de 30 segundos para cada una de las componentes del campo.

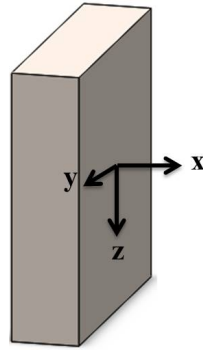


Figura 3.2. Sistema de coordenadas empleado para las mediciones de los imanes permanentes.

Como sistema de coordenadas de referencia es usado el mostrado en la **Figura 3.2**, con la finalidad de que sean consistentes las mediciones en cada uno de los imanes y poder identificar con claridad qué parte del imán está siendo medida, qué intensidad de campo magnético tiene y en qué posición será colocado en la cavidad.

Las mediciones fueron realizadas sobre los ejes de simetría de tres distintos planos, el primero a 0.6 cm de la superficie de los imanes, es decir, primer punto de fluido dentro de la cavidad (tomando en cuenta el espesor de la pared), mientras que el segundo y tercer planos están a 3.1 y 5.6 cm, respectivamente.

Las intensidades de campo magnético obtenidos son mostradas en el **Capítulo 4** de resultados.

3.2. Voltaje y corriente eléctrica

Al igual que el campo magnético, la corriente eléctrica desempeña un papel importante pues en conjunto y en presencia de un fluido conductor podemos generar movimiento del fluido debido a la fuerza de Lorentz.

Para cada configuración experimental, se usan 5 valores de corriente eléctrica que estén en el rango de 1 a 3 A y en intervalos de 0.5 A. Para cada valor se miden perfiles de velocidad y la variación de diferencia de potencial debida al flujo y registrada por la fuente de poder. Para dicha medición se emplea un programa desarrollado en el software LabVIEW 2015, los valores se almacenan de forma automática en una PC durante un tiempo de 6 minutos y en intervalos de 1 segundo, ver el **Apéndice D** para mejor entendimiento del proceso. Es importante hacer notar que de los 6 minutos de datos que se guardan (perfiles de velocidad y diferencia de potencial) se presentan valores promedio para los cuatro minutos intermedios, con objeto de desprestigiar el estado transitorio del flujo. Se obtienen resultados de diferencia de potencial como función del tiempo para cada configuración y valores promedio en el intervalo mencionado para

cada una de las configuraciones, poniendo especial interés en identificar un posible efecto del flujo en la diferencia de potencial.

Algunos resultados para voltaje y resistencia los observaremos más adelante en el **Capítulo 4** de resultados.

3.3. Medición de los perfiles de velocidad

El GaInSn es opaco, por lo que el uso de una técnica óptica para caracterizar su flujo al interior de la cavidad no es factible, tal y como se ha mencionado anteriormente. Para las mediciones de perfiles de velocidad se usaron transductores TR0805SS con una frecuencia de 8 MHz y un diámetro de piezo eléctrico de 0.5 cm, colocados en las posiciones descritas en el el **Capítulo 2** y conectados al equipo Doppler DOP 4000 de la marca Signal Processing SA, cuyo principio de funcionamiento es la técnica de velocimetría por efecto Doppler. Las **Figuras 3.3(a) y 3.3(b)** muestran fotos del equipo y transductores, respectivamente.

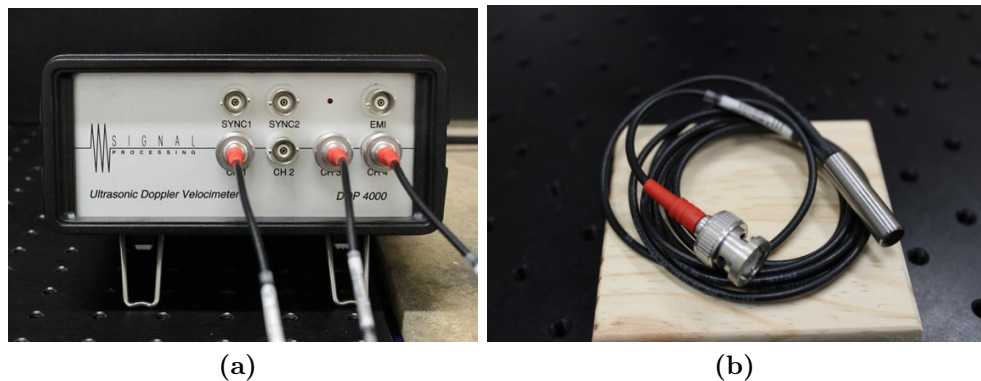


Figura 3.3. a) Equipo DOP 4000, b) transductores TR0805SS de 8 MHz.

El equipo DOP 4000 cuenta con su propio software para la manipulación y obtención de datos, en la **Figura 3.4** se muestra la ventana principal del software UDOP 604.2, a la fecha es la versión de software más actual donde de lado izquierdo se observará la señal de velocidad; mientras que, del lado derecho se muestran los perfiles de velocidad, ambas como función de la profundidad de penetración del haz ultrasónico, el despliegue de la señal de velocidad cambia en el tiempo, siendo posible identificar los regímenes transitorio y estacionario en los distintos flujos.

Para realizar un primer acercamiento con el equipo, se realizó la medición del perfil de velocidad para el caso en que se colocan dos transductores encontrados en la misma posición pero en paredes paralelas del prototipo experimental (en la pared del prototipo, cerca del imán justo a la mitad de la cavidad) ver **Figura 3.5**, esto con el fin de corroborar que cuando el fluido se aleja de los transductores se muestra un perfil de velocidad positivo y caso contrario, cuando se acerca a los transductores el perfil de velocidad es negativo, sabiendo esto, se debe obtener una figura donde se muestren los dos perfiles de velocidad en la misma magnitud de velocidad pero en sentido contrario.

Para la prueba mencionada, se usó una corriente de 3 A, un campo magnético de pares de imanes M2, considerando la ubicación de los imanes y la dirección en que es inyectada la corriente eléctrica podemos predecir la dirección del movimiento, tal como

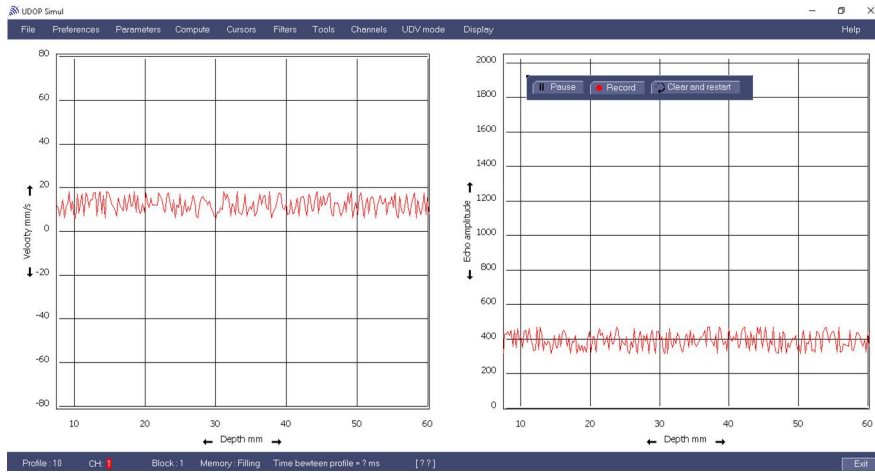


Figura 3.4. Pantalla principal del software UDOP 604.2.

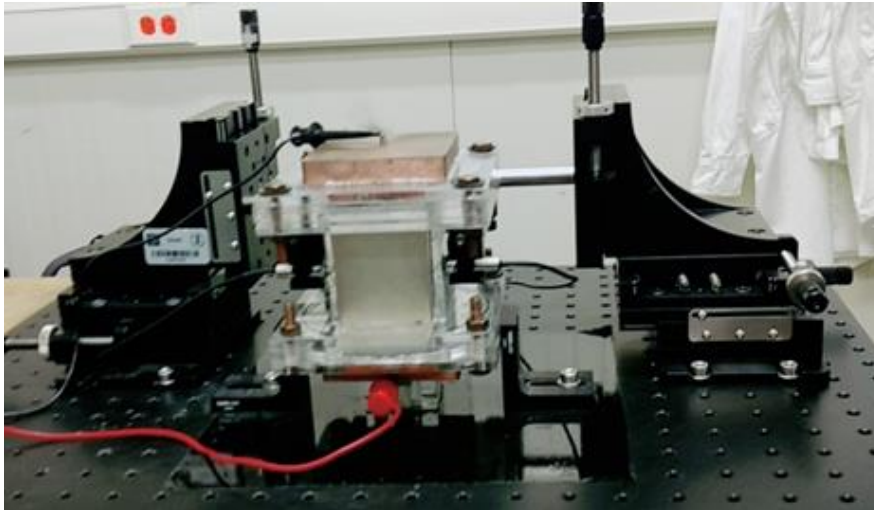


Figura 3.5. Prototipo experimental con dos transductores bajo la influencia del imán M2.

se muestra en la **Figura 3.6**, por tanto se espera que el transductor T1 tenga un perfil positivo y el transductor T2 un perfil negativo ambos de la misma intensidad.

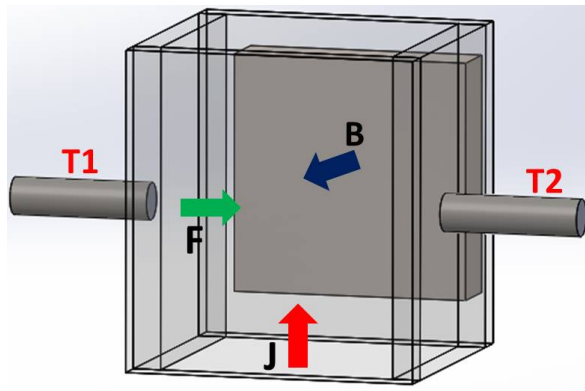


Figura 3.6. Esquema de la dirección de la fuerza producida en el sistema, en base a la dirección de la corriente eléctrica y del campo magnético usados.

Se logró observar que el comportamiento de los perfiles de velocidad fue el esperado, como se puede ver en la **Figura 3.7**.

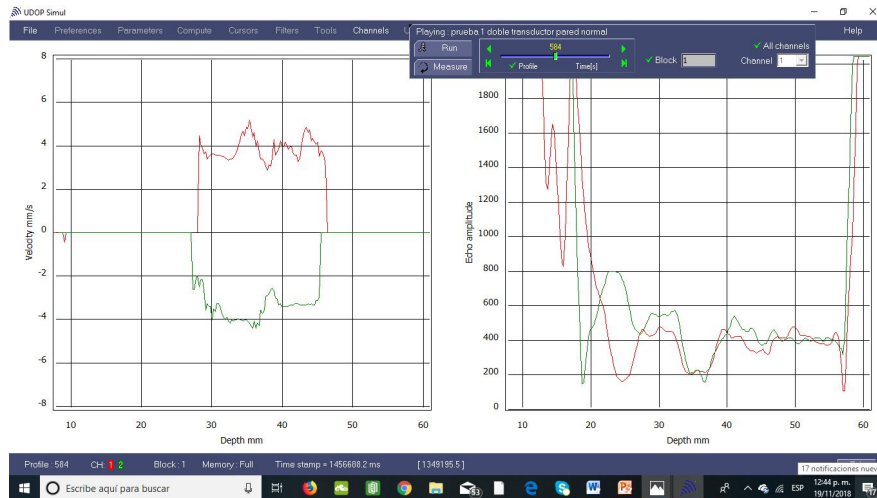


Figura 3.7. Perfil de velocidad y eco usando dos transductores en el prototipo experimental de GaInSn.

En el **Apéndice C** se muestran más detalles del uso del equipo.

Una vez listo el montaje experimental, con los imanes y valor de corriente definido, se procede a colocar los transductores de acuerdo al caso de estudio, debido a que los transductores no se encuentran en contacto directo con el fluido es necesario colocar una capa de gel conductivo en la cara del transductor para evitar posibles señales externas que puedan interferir en la medición, tal como vibraciones. Se asegura que las caras de cada transductor esté completamente paralela y pegada a la pared del prototipo. Posteriormente se procede a realizar las mediciones de los perfiles de velocidad.

Asegurándose de que el equipo de UDV se encuentre encendido se conecta a una PC por medio de los puertos USB. Una vez que el ordenador reconozca el equipo, se abre el software UDOP 604.2 en la ventana que muestra la **Figura 3.8**, seleccionamos “DOP 4000” y la opción “UDV 2D/3D” y presionamos continuar.

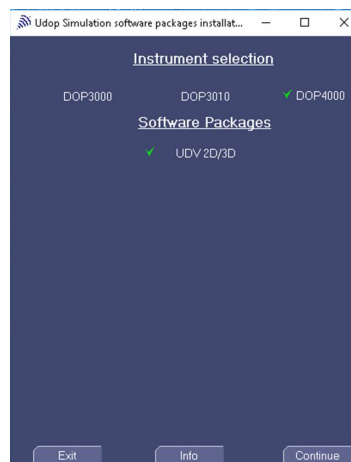


Figura 3.8. Ventana de acceso al software UDOP 604.2.

Ahora podemos observar la ventana de medición principal **Figura 3.4**, abrimos la ventana “Preferences” donde deshabilitamos la opción de “Assisted mode”, posterior-

mente abrimos “Record options” y seleccionamos la carpeta en la que será guardado el archivo, en la casilla de “Data directory”, una vez seleccionada la carpeta definimos la cantidad de perfiles que se guardarán en cada bloque de medición, asegurándose que se cubra el total de perfiles para el tiempo de medición específico, para este caso son 6 minutos, los parámetros no cambian entre configuraciones con imanes M1 y M2.

Para ajustar los parámetros de cada uno de los transductores, abrimos la ventana “parameters” y seleccionamos “Operating parameters” comenzamos con el canal 1, el cual da parámetros al transductor 1, hasta configurar todos los canales de acuerdo al número de transductor a utilizar. Se usan los mismos parámetros para cada transductor con la finalidad de poder hacer comparaciones entre ellos, y poder medir simultáneamente los perfiles de velocidad, estos parámetros son mostrados en la **Figura 3.9** uno de los más importantes es la velocidad del sonido en el metal líquido GaInSn reportado como 2725 m/s (Rivero, 2012), en el Apéndice C son descritos cada uno de estos parámetros.

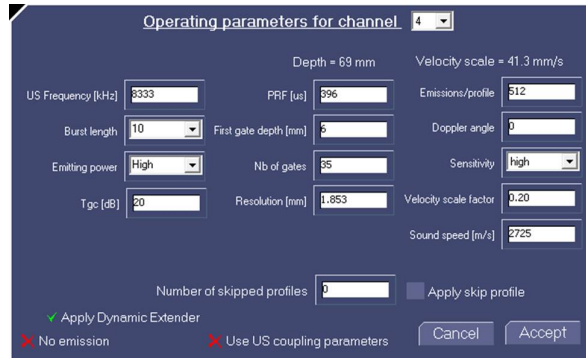


Figura 3.9. Parámetros de operación.

Una vez ajustados los parámetros, se comienza con las mediciones, asegurándose de que el área se encuentre despejada de vibraciones y factores externos que puedan alterar la medición, presionamos el botón de “Record” que se encuentra en la barra mostrada en la **Figura 3.10**, ubicada en la parte superior derecha de la ventana del software.

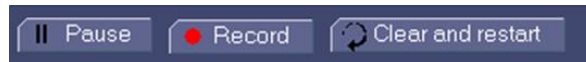


Figura 3.10. Barra de control de grabado.

Esperamos a que transcurra el tiempo y se guarden los perfiles de velocidad en la ruta señalada. El archivo generado guarda el número de puertas o partes en las que está dividida la cavidad, en cada una de estas partes, el equipo toma una medición de velocidad cada cierto tiempo, estas velocidades también se encuentran plasmadas en el archivo, se clasifican por transductor, bloque de medición y tiempo. Tomando en cuenta que se mide durante 6 minutos y que el primer minuto y el último son de arranque y apagado de la corriente eléctrica, se filtran estos datos de modo que solo nos quedamos con 4 minutos para evitar la parte transitoria de estos procesos. Los perfiles son filtrados y procesados por medio del programa Matlab R2019b, obteniendo gráficas que muestran la relación de la velocidad axial en función del espacio y del tiempo. Son ajustados los ejes de acuerdo al sistema de coordenadas que hemos estado manejando en la **Figura 2.6**. De este análisis se obtiene una figura de los perfiles de

velocidad de todas las corrientes por cada transductor y por cada configuración de estudio, resultados que se describen a detalle en el siguiente capítulo.

Resultados y discusión

Una vez realizadas y posprocesadas las mediciones se obtienen los resultados aquí presentados. Primeramente se muestran mediciones de campo magnético para los imanes M1 y M2, en el caso de configuraciones de pares de imanes, las mediciones se hicieron sobre el polo positivo de un imán M1 y M2 y sobre el negativo del segundo imán usado en dichas configuraciones. Posteriormente, se muestran perfiles de velocidad para cada uno de los transductores usados en las cuatro configuraciones discutidas, así como valores para la diferencia de potencial generado por el flujo al interior de la cavidad y medida en terminales de los electrodos. Con objeto de comparar mediciones obtenidas con el equipo DOP 4000, se realizó una prueba experimental en un dispositivo experimental con dimensiones y principio de funcionamiento similar al aquí estudiado, pero ahora usando un electrolito débil como fluido de trabajo y usando la técnica PIV para caracterizar un plano central del flujo. Perfiles obtenidos con dicha técnica son comparados con mediciones de UDV, observándose una correspondencia tanto cuantitativa como cualitativa. Finalmente, también se usó el equipo de UDV para la medición de perfiles de velocidad en una capa de GaInSn sobre la cual se depositó otra de electrolito, para dicho sistema de capas estratificadas, se tiene que cada fluido ocupa la mitad del volumen de la cavidad usada para las mediciones con solo el electrolito.

4.1. Campos magnéticos

Todos los imanes empleados en los experimentos se encuentran magnetizados en la dirección x , por lo que se espera que la componente del campo en dicha dirección, B_x , sea la de mayor magnitud; valores para dicha componente en las coordenadas $x = 0.6, 3.1$ y 5.6 cm (para todos $y = z = 0$), se muestran en la **Tabla 4.1**, es importante mencionar que las mediciones para M1- y M2- corresponden al polo negativo de los segundos imanes usados en las configuraciones donde se tiene pares de ellos, esto dado que en pares de imanes el segundo se coloca con su polo negativo en contacto con la cara de la cavidad opuesta al primero, como es ilustrado en la **Figura 4.1**, de tal forma que ambos imanes se atraen generando una zona de campo más uniforme en comparación con la obtenida con uno solo imán y más intensa ya que se suma el valor de sus campos magnéticos. Las coordenadas mencionadas corresponden a los puntos a lo largo del eje x donde se colocan los transductores de ultrasonido para la medición de perfiles de velocidad mostrados y discutidos en las siguientes secciones.

Las mediciones muestran que, a medida que nos alejamos de la superficie del imán,

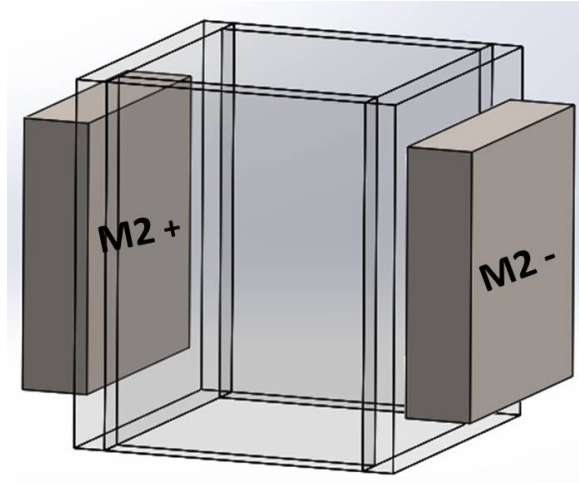


Figura 4.1: Acomodo de par de imanes M2 lado positivo y negativo en la cavidad.

la magnitud del campo disminuye, tal como se observa en la **Figura 4.2**, donde se presentan mediciones para las componentes del campo sobre el eje z , como función del sistema de referencia mostrado en la **Figura 3.2**.

Las **Figuras 4.2(a) y 4.2(b)** muestran perfiles para la magnitud de la densidad de campo magnético para los imanes M1, mientras que las **Figuras 4.2(c) y 4.2(d)** muestran los resultados para los imanes M2. Es claro que las componentes B_y y B_z son de magnitud menor comparadas con B_x y también decrecen conforme nos alejamos de la superficie de los imanes.

Imán	Plano 1	Plano 2	Plano 3
	B_x [T]		
M1 +	0.2087	0.0212	0.0054
M1 -	-0.2013	-0.0210	-0.0054
M2 +	0.1820	0.0506	0.0165
M2 -	-0.1926	-0.0546	-0.0177

Tabla 4.1: Densidad de campo magnético para la componente B_x en las coordenadas $x = 0.6, 3.1$ y 5.6 cm ($y = z = 0$) para imanes M1 y M2.

Las **Figuras 4.3(a), 4.3(b), 4.3(c) y 4.3(d)** corresponden a perfiles para las componentes del campo medidas como función de las coordenadas y y z en $x = 0.6$ cm. Para todos los imanes la componente B_x es simétrica a lo largo de dichos ejes; mientras que B_z es asimétrica en el eje y y con valores muy pequeños en el eje z . B_y muestra un comportamiento contrario, asimétrica a lo largo del eje z y con valores pequeños en y . Mediciones adicionales de las componentes se muestran en el **Apéndice B**.

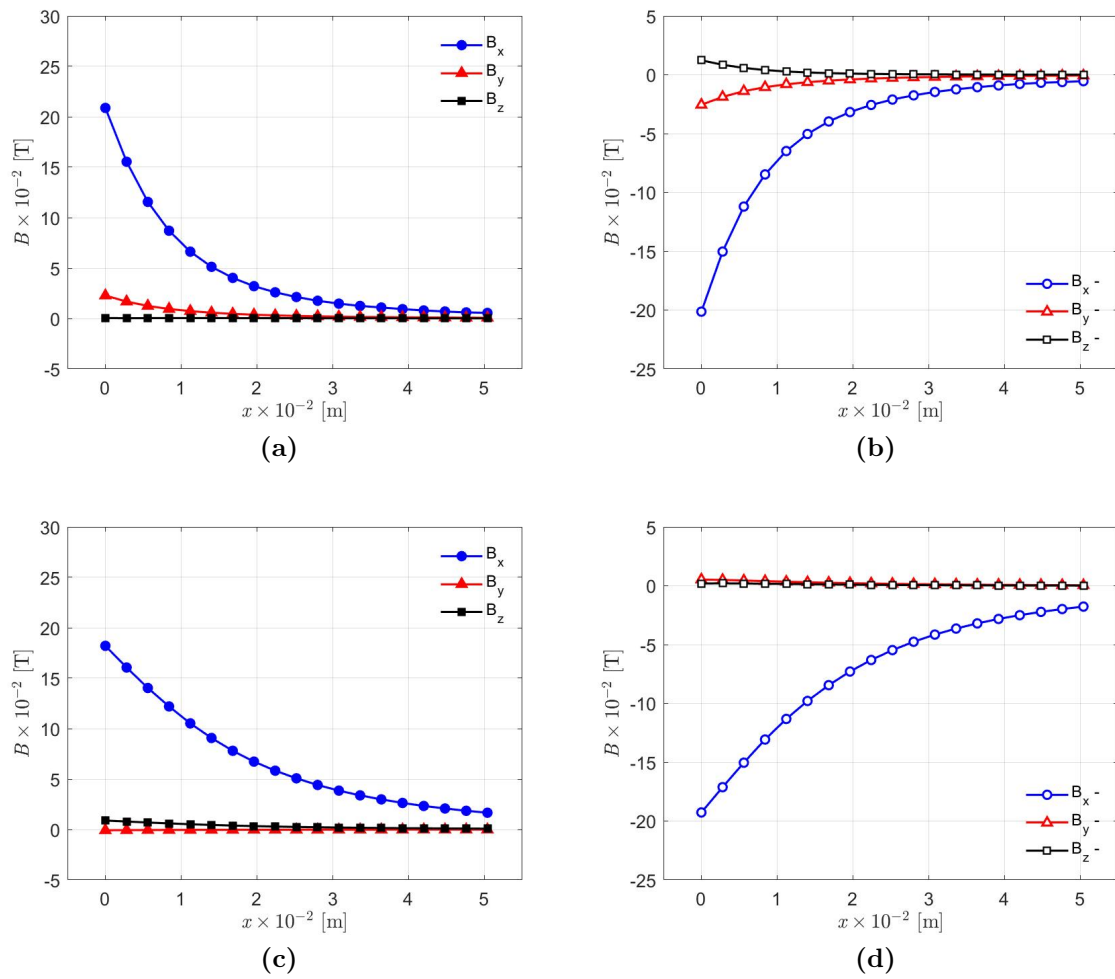


Figura 4.2. Densidad de campo magnético para los imanes: a) M1 positivo, b) M1 negativo, c) M2 positivo, d) M2 negativo.

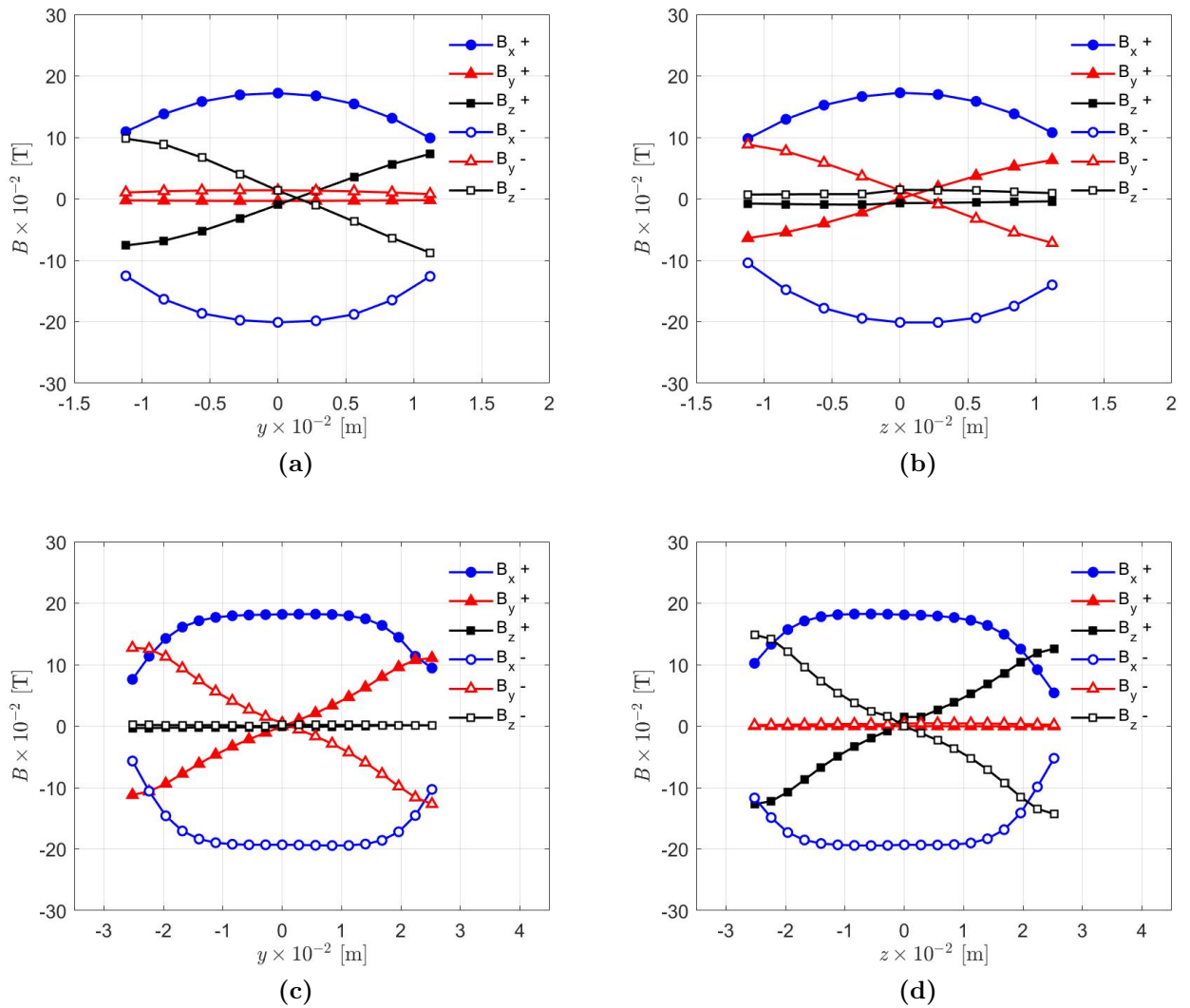


Figura 4.3. Densidad de campo magnético a lo largo de los ejes y y z para $x = 0.6$ cm, y para los imanes: a) M1 eje y , b) M1 eje z , c) M2 eje y , d) M2 eje z .

4.2. Perfiles de velocidad

Para entender el flujo al interior de la cavidad se puede considerar una corriente uniforme en la dirección axial ($-z$) y un campo magnético también uniforme en la dirección $+x$, bajo dichas suposiciones la fuerza de Lorentz apuntaría en la dirección $-y$ y por lo tanto, se espera que el flujo sea dominante en dicha dirección. Como se ha discutido anteriormente mediante la técnica de velocimetría por efecto Doppler, es posible medir perfiles de velocidad; para cada una de las configuraciones se muestran mediciones de perfiles de velocidad usando transductores colocados en posiciones descritas anteriormente.

Se observa que para todos los perfiles obtenidos las barras de error mayores se encuentran en las mediciones cerca de las paredes de la cavidad, esto es referente a que el equipo presenta mejor resolución temporal que espacial, se destaca que entre más lejos del transductor sea la medición la barra de error es mayor. Para todos los perfiles obtenidos con el transductor T2 fue requerido realizar un ajuste tanto en los ejes como en las velocidades obtenidas, debido a que al estar colocado en la cara paralela al transductor T1 como se muestra en las **Figuras 2.7 y 2.8**, para ambas configuraciones de estudio, se obtienen perfiles negativos de acuerdo al movimiento que presenta el fluido en ese punto. En función de esto se observan barras de error mayores en los primeros valores registrados del transductor T2, pues ya que realmente estaríamos viendo las mediciones de velocidad más alejadas al transductor. Es bien sabido que la técnica UDV tiene una buena resolución temporal y presenta problemas para las regiones de interfaces pared sólido-fluido (Signal Processing S.A., s.f.). Conforme aumenta la corriente los perfiles aumentan de forma casi lineal. Todas las figuras de los perfiles de velocidad en función del tiempo fueron tomadas para el punto medio de la cavidad.

4.2.1. Configuración con un imán M1

Para este caso es usado un arreglo de 4 transductores, como se muestra en la **Figura 4.4**.

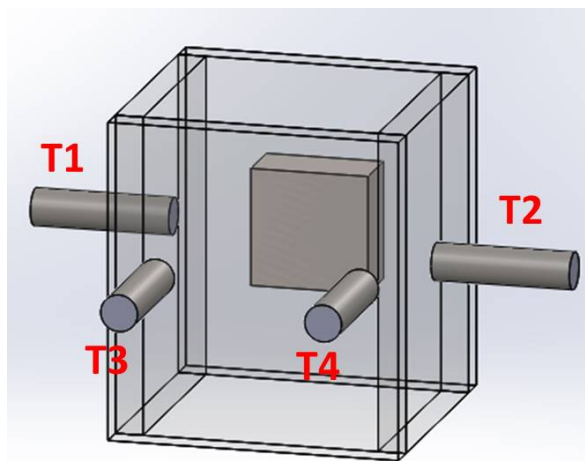


Figura 4.4: Puntos de medición de cada transductor para la configuración con un imán M1.

La **Figura 4.5** muestra perfiles de velocidad para la configuración experimental donde se tiene un solo imán de tipo M1, las **Figuras 4.5(a) y 4.5(b)** muestran la

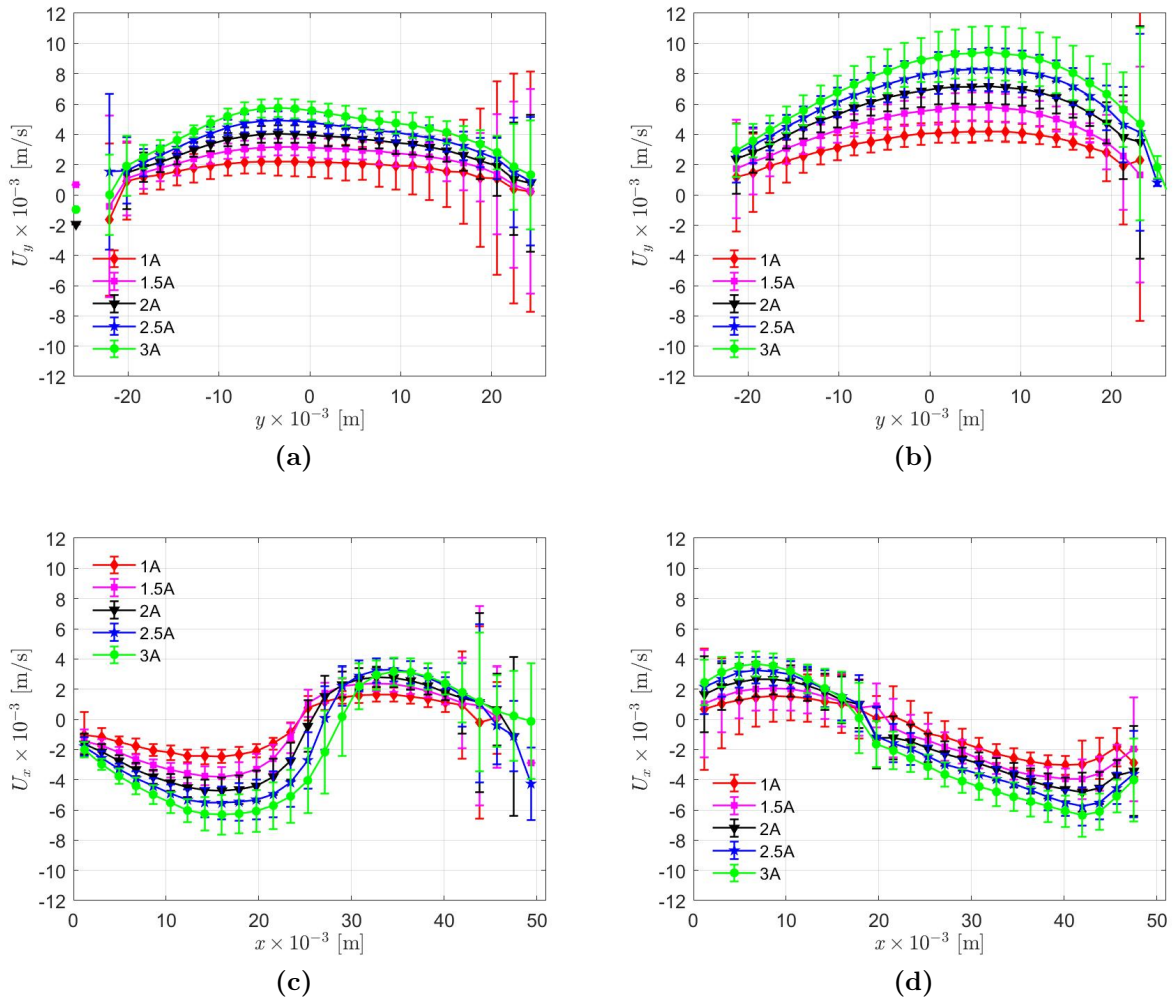


Figura 4.5. Perfiles de velocidad para todas las corrientes, configuración con un imán M1, a) T1, b) T2, c) T3, d) T4.

componente de la velocidad dominante, U_y a lo largo de la dirección y , y corresponden a las mediciones de los transductores T1 y T2, respectivamente; con su polo positivo en contacto con la pared de la cavidad.

Para el transductor T1 mostrado en la **Figura 4.5(a)**, se observan perfiles de tipo parabólico positivos y de mayor magnitud conforme aumenta la intensidad de corriente eléctrica, las velocidades van desde 2×10^{-3} m/s hasta 6×10^{-3} m/s sobre el eje y de acuerdo al sistema de referencia mostrado en la **Figura 2.6**.

En el transductor T2, mostrado en la **Figura 4.5(b)**, son obtenidas las velocidades más intensas, es decir, en el centro de la cavidad se presenta el movimiento más intenso del fluido para esta configuración, siendo éste de aproximadamente 10×10^{-3} m/s para una corriente de 3 A, esto se repite en cada corriente. Los perfiles obtenidos siguen conservando la forma parabólica y aumentan conforme aumenta la corriente eléctrica.

También son mostrados los perfiles obtenidos de los transductores T3 y T4, en las **Figuras 4.5(c) y 4.5(d)**, interesantemente podemos ver que el flujo tiene movimiento sobre el eje x lo que demuestra que hablamos de un flujo tridimensional. A diferencia de los perfiles obtenidos para los transductores T1 y T2, en estos perfiles se observa que se están formando recirculaciones, pues ya que se aprecian perfiles negativos, para el

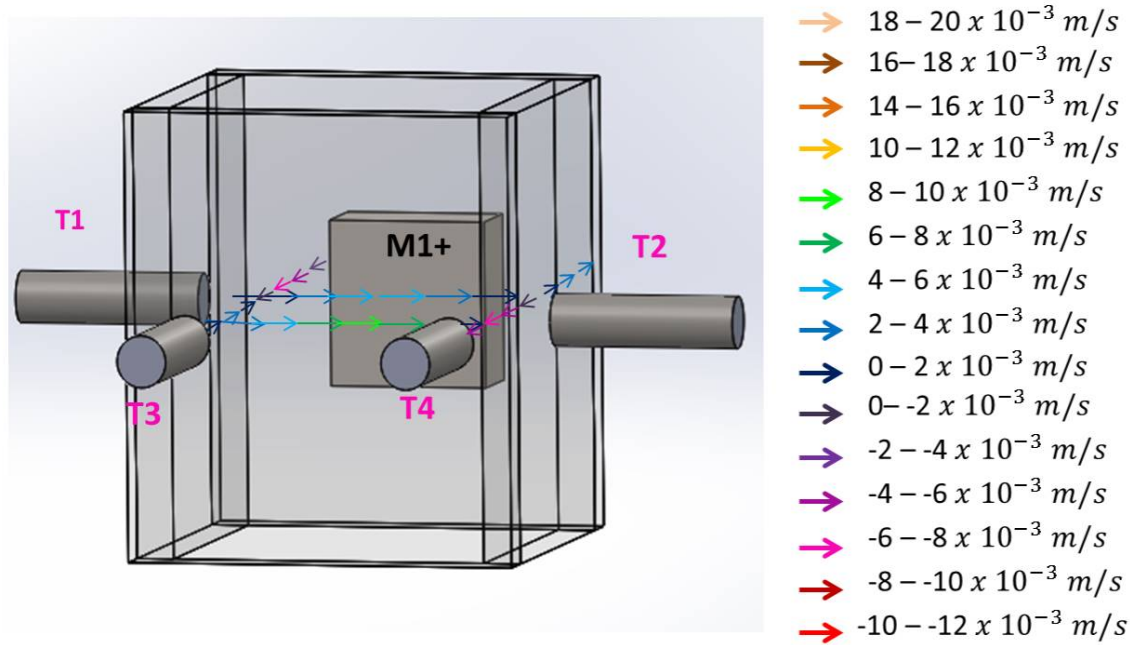


Figura 4.6: Dirección y velocidad de movimiento para cada transductor usando 3 A de corriente eléctrica, configuración con un imán M1.

transductor T3 podemos ver que cerca de él el fluido se aleja y cuando se encuentra cerca del imán la recirculación provoca que el fluido se acerque al transductor, caso contrario para el transductor T4. Las velocidades máximas alcanzadas en éstas posiciones son de $-6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ para el lado negativo y de $4 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ para el lado positivo en ambos transductores.

De acuerdo a los perfiles de velocidad obtenidos para esta configuración podemos observar el movimiento descrito en la **Figura 4.6** para cada transductor, considerando el caso para 3 A de corriente eléctrica, destacando que las flechas que se alejan del transductor indican perfiles positivos y las flechas que se acercan al transductor indican perfiles negativos que representan recirculaciones en esa parte de la cavidad.

En la **Figura 4.7** que muestra U_y en la dirección del eje y y como función del tiempo para los transductores T1 y T2 en las corrientes eléctricas de 1 y 3 A, podemos observar que hay un estado estacionario en cada uno de los transductores ya que no se aprecian variaciones en gran medida; sin embargo, se logran observar pequeñas fluctuaciones. Como se mencionó anteriormente el transductor T2 presenta las velocidades más altas.

Para los transductores T3 y T4 mostrados en la **Figura 4.8** podemos observar menos estabilidad en el movimiento, esto es atribuido a las recirculaciones que se presentan, si bien las velocidades son parecidas entre transductores, se observa que hay mayor velocidad en el transductor T3 para las corrientes mostradas.

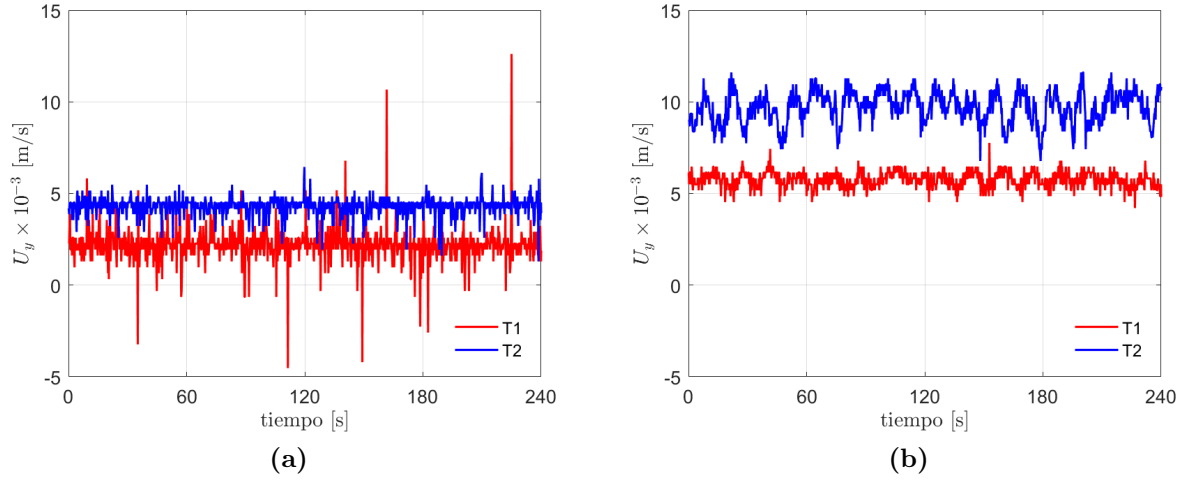


Figura 4.7. U_y vs. tiempo medida a lo largo del eje y con coordenadas en $x = 0.9$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T1 y $x = 3.1$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T2, para la configuración con un imán M1 y para las corrientes eléctricas: a) 1 A, b) 3 A.

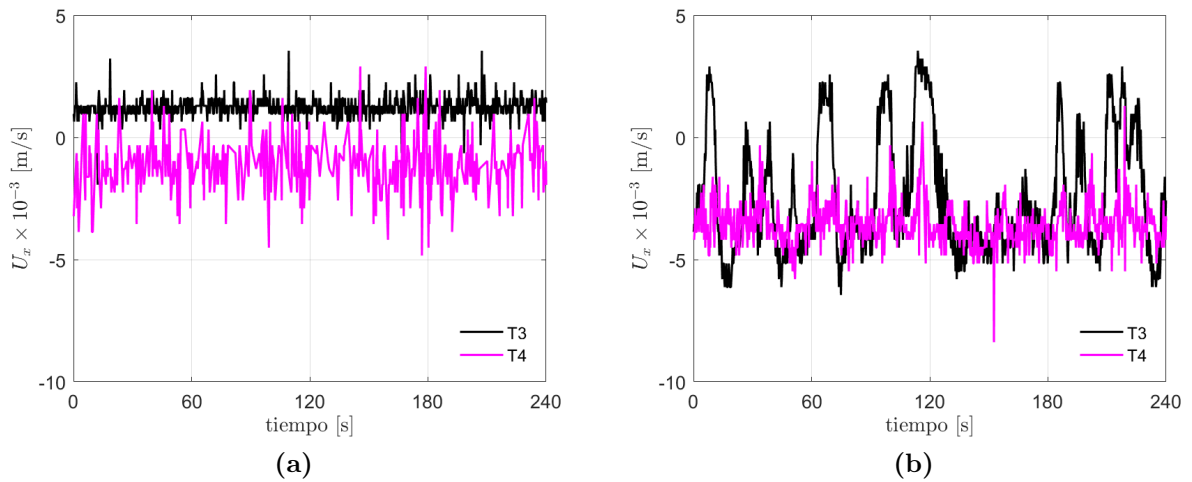


Figura 4.8. U_x vs. tiempo medida a lo largo del eje x con coordenadas en $x = 6.3$ cm, $y = 2.25$ cm y $z = 0$ cm para T3 y $x = 6.3$ cm, $y = -2.25$ cm y $z = 0$ cm para T4, para la configuración con un imán M1 y para las corrientes eléctricas: a) 1 A, b) 3 A.

4.2.2. Configuración con par de imanes M1

Con la presencia de un segundo imán de tipo M1, el campo magnético al interior de la cavidad se intensifica, generándose una fuerza de Lorentz de mayor intensidad y por lo tanto un flujo de mayor velocidad, las mediciones de perfiles de velocidad con los transductores T1, T2 y T3 se realizan en las posiciones mostradas en la **Figura 4.9**. Las velocidades para esta configuración alcanzan valores mayores a los reportados en la configuración con un solo imán de tipo M1. La **Figura 4.10** muestra perfiles de velocidad medidos por los transductores T1, T2 y T3 para la componente U_y a lo largo del eje y para las distintas corrientes. Los transductores T1 y T3 muestran un comportamiento tanto cuantitativo como cualitativo muy similar. Nuevamente el transductor T2 reporta las mayores velocidades en el rango de 8 a 19×10^{-3} m/s, prácticamente el doble que el caso anterior. Interessantemente, el transductor T3 muestra que para todas las corrientes se tiene la presencia de una recirculación después de la posición aproximada a $y = 20 \times 10^{-3}$ m, situación no tan definida en el transductor T1.

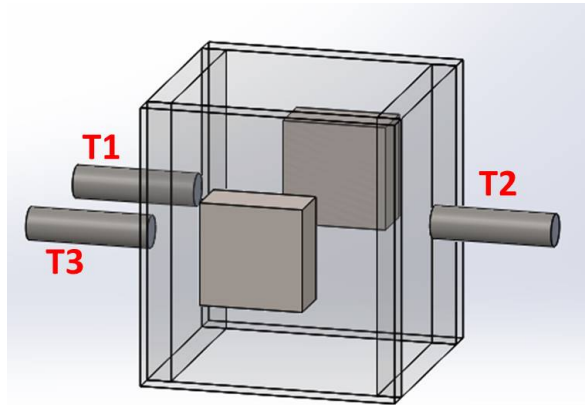


Figura 4.9: Puntos de medición de cada transductor para la configuración con par de imanes M1.

En la **Figura 4.11** se puede observar aún más la simetría en los transductores T1 y T3 y que en el transductor T2 las velocidades son máximas, el fluido se encuentra en estado estacionario.

Se destaca que todos los perfiles de velocidad para cada caso de corriente son perfiles positivos lo que concuerda con la dirección esperada del movimiento en función de la fuerza de Lorentz producida con la interacción del campo magnético y la corriente eléctrica. De acuerdo a los perfiles de velocidad obtenidos para esta configuración podemos observar el movimiento descrito en la **Figura 4.12** para cada transductor, considerando el caso para 3 A de corriente eléctrica.

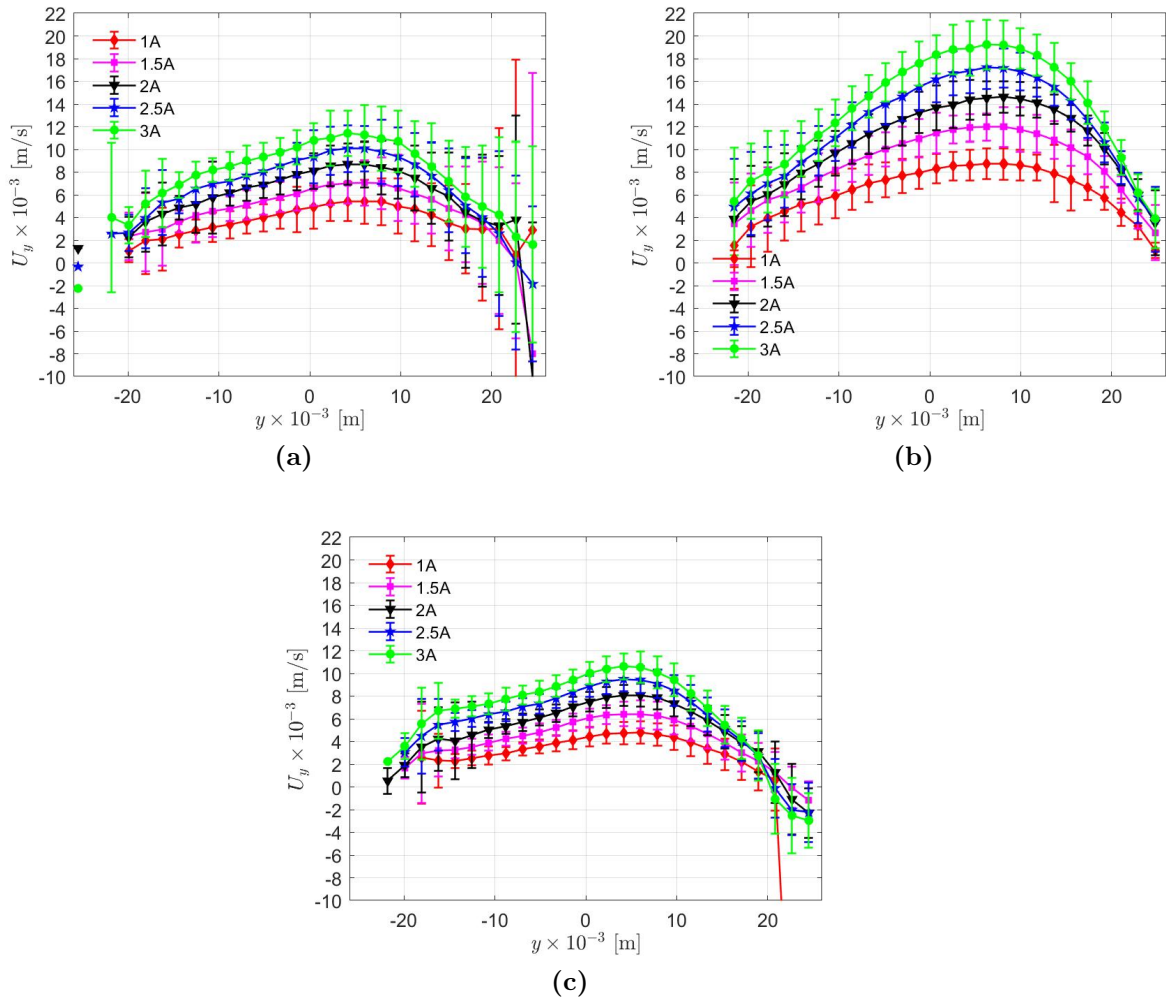


Figura 4.10. Perfiles de velocidad para todas las corrientes, configuración con par de imanes M1, a) T1, b) T2, c) T3.

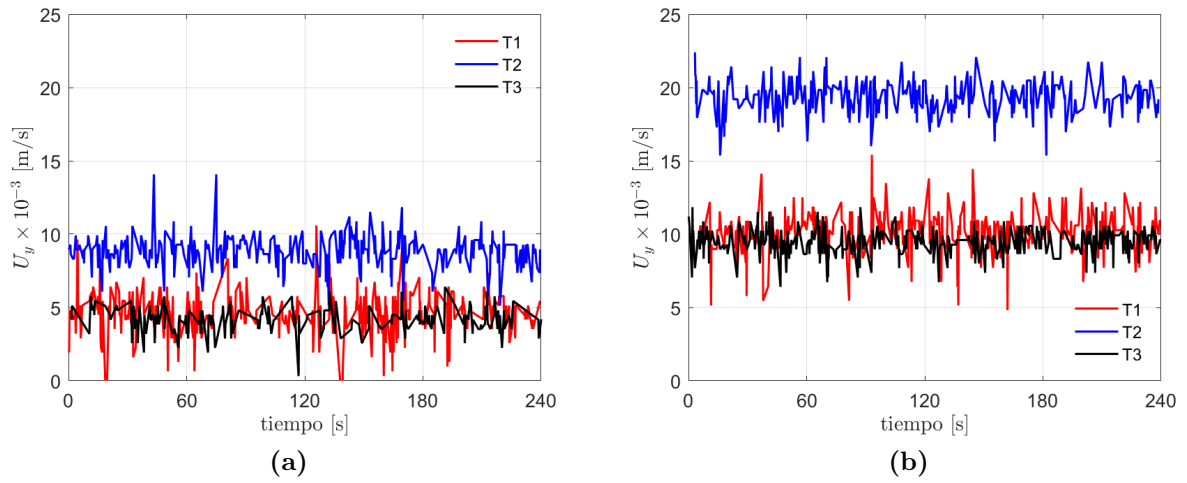


Figura 4.11. U_y vs. tiempo medida a lo largo del eje y con coordenadas en $x = 0.9$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T1, $x = 3.1$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T2 y $x = 5.4$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T3, para la configuración con par de imanes M1 y para las corrientes eléctricas: a) 1 A, b) 3 A.

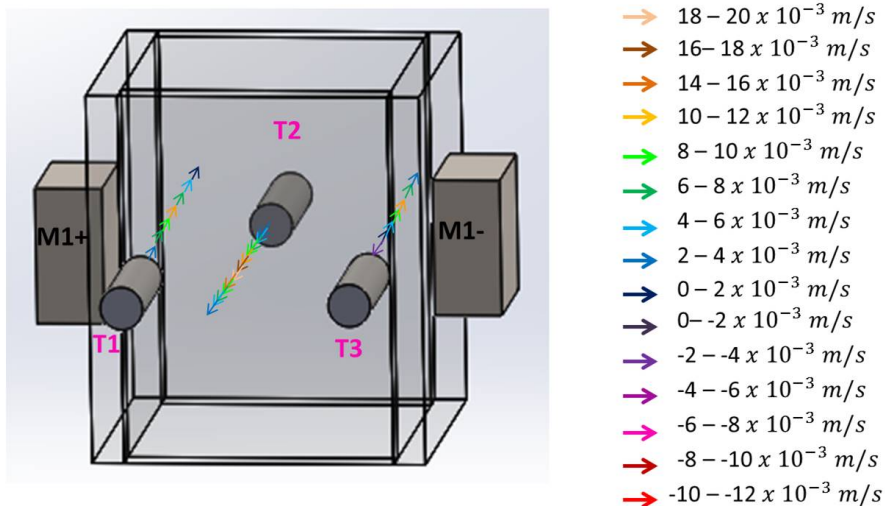


Figura 4.12: Dirección y velocidad de movimiento para cada transductor usando 3 A de corriente eléctrica, configuración con par de imanes M1.

4.2.3. Configuración con un imán M2

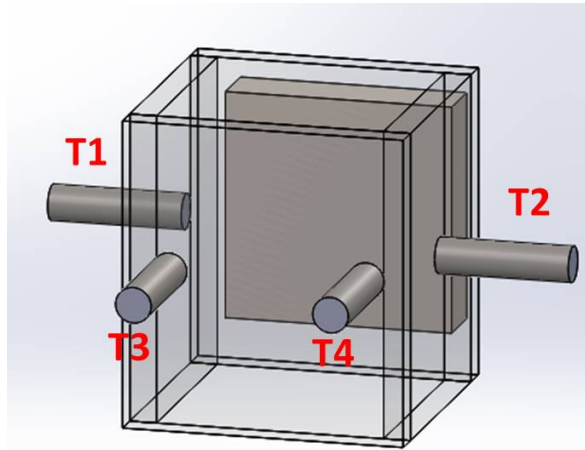


Figura 4.13: Puntos de medición de cada transductor para la configuración con un imán M2.

Para esta configuración son usados cuatro transductores en las posiciones mostradas en la **Figura 4.13**. A diferencia del imán M1, el campo producido por un imán M2 se espera cubra una mayor región del fluido, además de ser de mayor intensidad. El que sea más uniforme en el espacio es posible que genere una fuerza menos localizada y por tanto un flujo de menor velocidad, situación que se confirma con las mediciones obtenidas por los transductores T1, T2, T3 y T4, que muestran en general el mismo rango, para todos, conforme aumenta la corriente también la velocidad, ver **Figura 4.14**. Interesantemente T3 y T4 muestran perfiles menos asimétricos en comparación con los obtenidos para el imán M1.

En la **Figura 4.16**, observamos el comportamiento del movimiento en función del tiempo para las corrientes de 1 y 3 A, para los transductores T1 y T2. En esta figura somos capaces de apreciar que el flujo es estacionario, además de que si bien en el centro la velocidad es máxima, no es muy grande la diferencia de velocidades entre los transductores T1 y T2 como se muestra en el caso con un imán M1, y se comprueba que a medida que se aumenta la corriente la velocidad aumenta.

Para los transductores T3 y T4 mostrados en la **Figura 4.17**, podemos apreciar que el transductor T4 presenta mayor inestabilidad, esto puede ser debido a que la velocidad que alcanza el fluido en ese punto no es tan intensa.

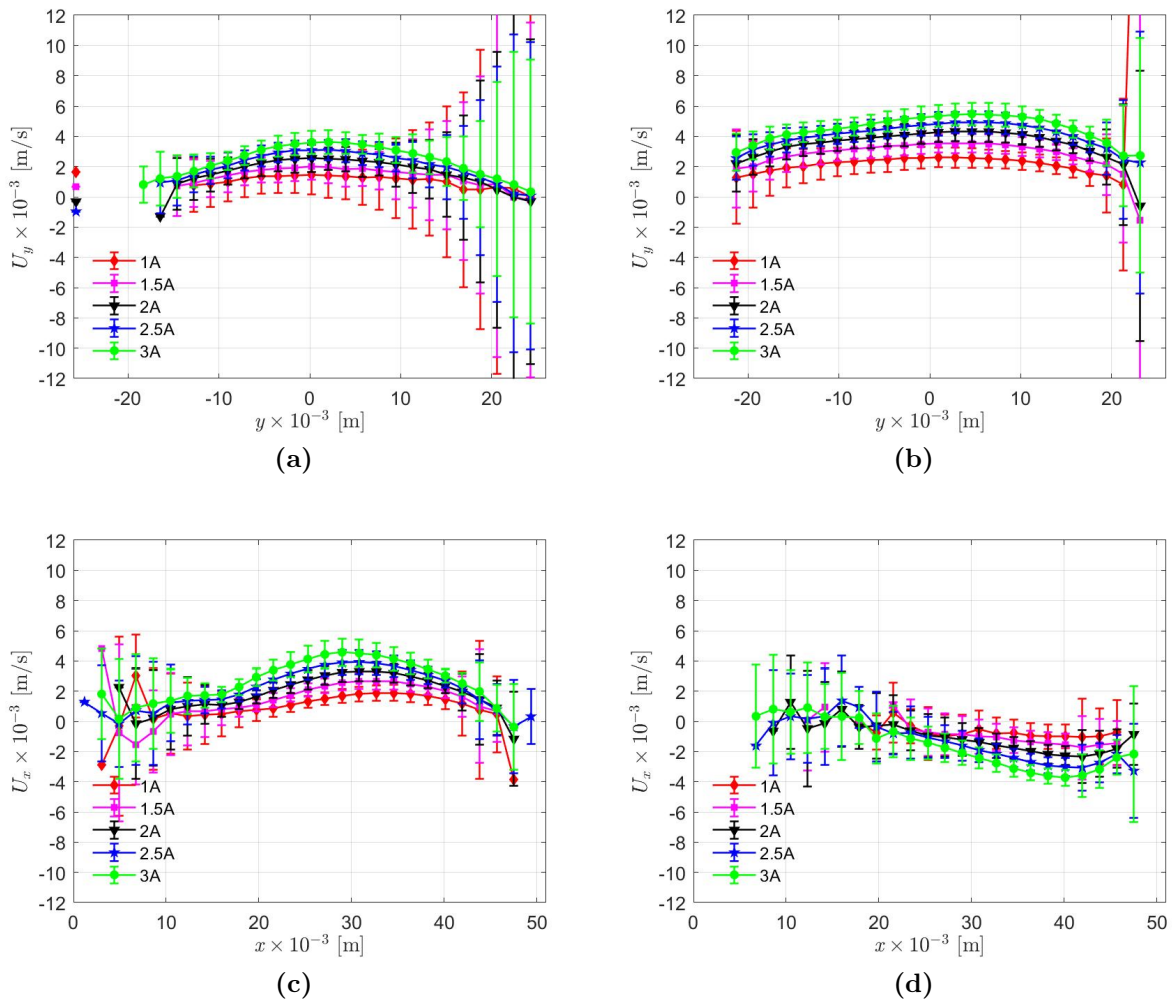


Figura 4.14. Perfiles de velocidad para todas las corrientes, configuración con un imán M2, a) T1, b) T2, c) T3, d) T4.

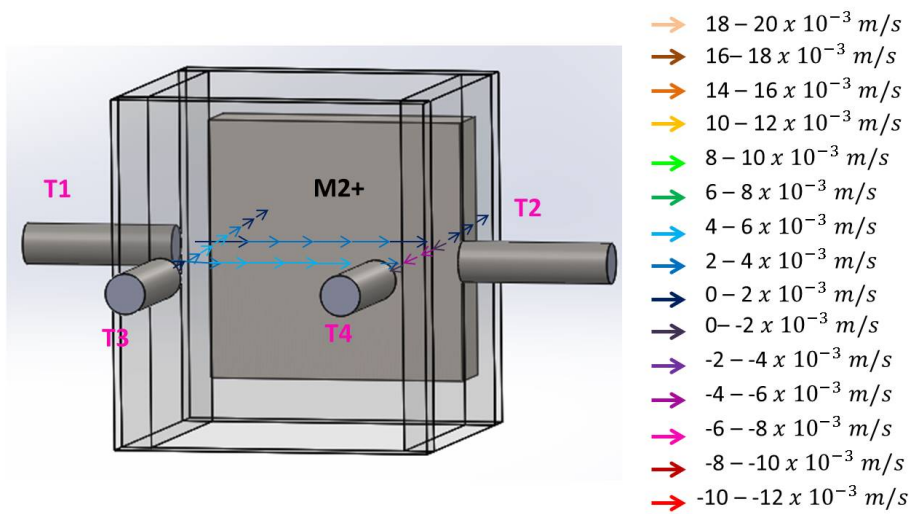


Figura 4.15: Dirección y velocidad de movimiento para cada transductor usando 3 A de corriente eléctrica, configuración con un imán M2.

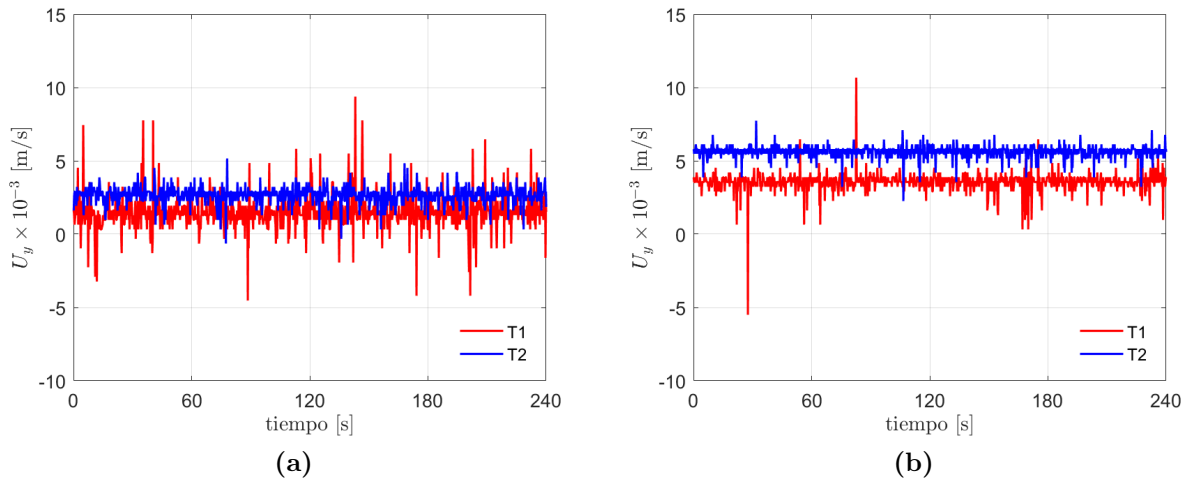


Figura 4.16. U_y vs. tiempo medida a lo largo del eje y con coordenadas en $x = 0.9$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T1 y $x = 3.1$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T2, para la configuración con un imán M2 y para las corrientes eléctricas: a) 1 A, b) 3 A.

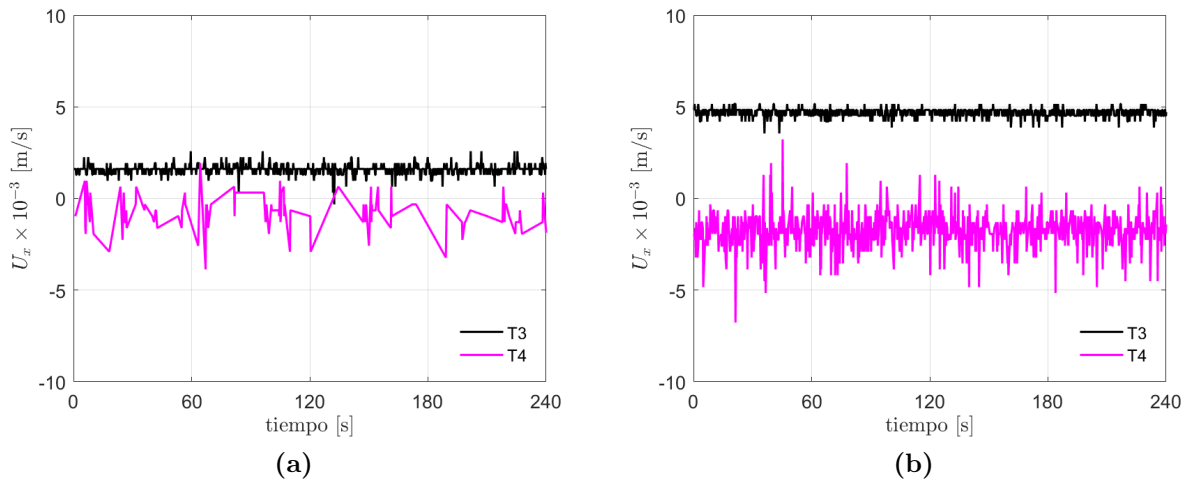


Figura 4.17. U_x vs. tiempo medida a lo largo del eje x con coordenadas en $x = 6.3$ cm, $y = 2.25$ cm y $z = 0$ cm para T3 y $x = 6.3$ cm, $y = -2.25$ cm y $z = 0$ cm para T4, para la configuración con un imán M2 y para las corrientes eléctricas: a) 1 A, b) 3 A.

4.2.4. Configuración con par de imanes M2

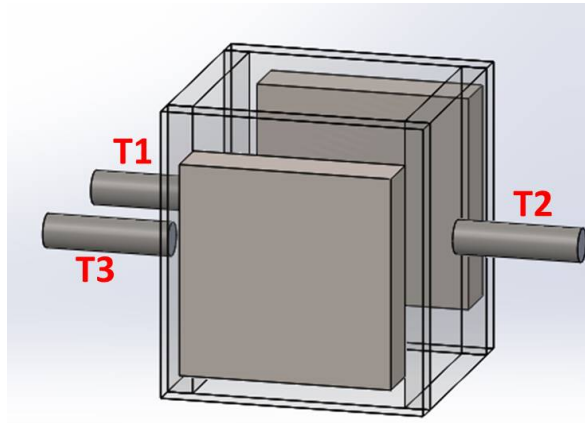


Figura 4.18: Puntos de medición de cada transductor para la configuración con par de imanes M2.

Al usar un segundo imán M2 se logra no sólo un campo más intenso como en el caso de pares de imanes M1, sino también una distribución más uniforme, situación que se refleja en un flujo más intenso y uniforme, en comparación con el caso anterior. Los puntos de medición para este caso son mostrados en la **Figura 4.18**. La **Figura 4.19** muestra perfiles de velocidad medidos con los transductores T1, T2 y T3; interesante, el rango de velocidades es muy similar en todos y prácticamente cuatro veces más intenso que para el caso de un solo imán M2. El transductor T2 muestra valores de velocidad menores a los reportados para el caso de pares de imanes de tipo M1, lo anterior puede deberse a que ahora el flujo es más uniforme. En la presente configuración, se observa que los tres transductores muestran los perfiles de velocidad más simétricos y con una forma parabólica claramente definida.

Con la **Figura 4.21**, notamos que entre más alta sea la corriente la diferencia entre las velocidades que se presentan en los transductores T1 y T3 aumenta. El flujo para todos los casos puede asumirse como estacionario, para todos los casos el transductor T2 reporta las velocidades más altas.

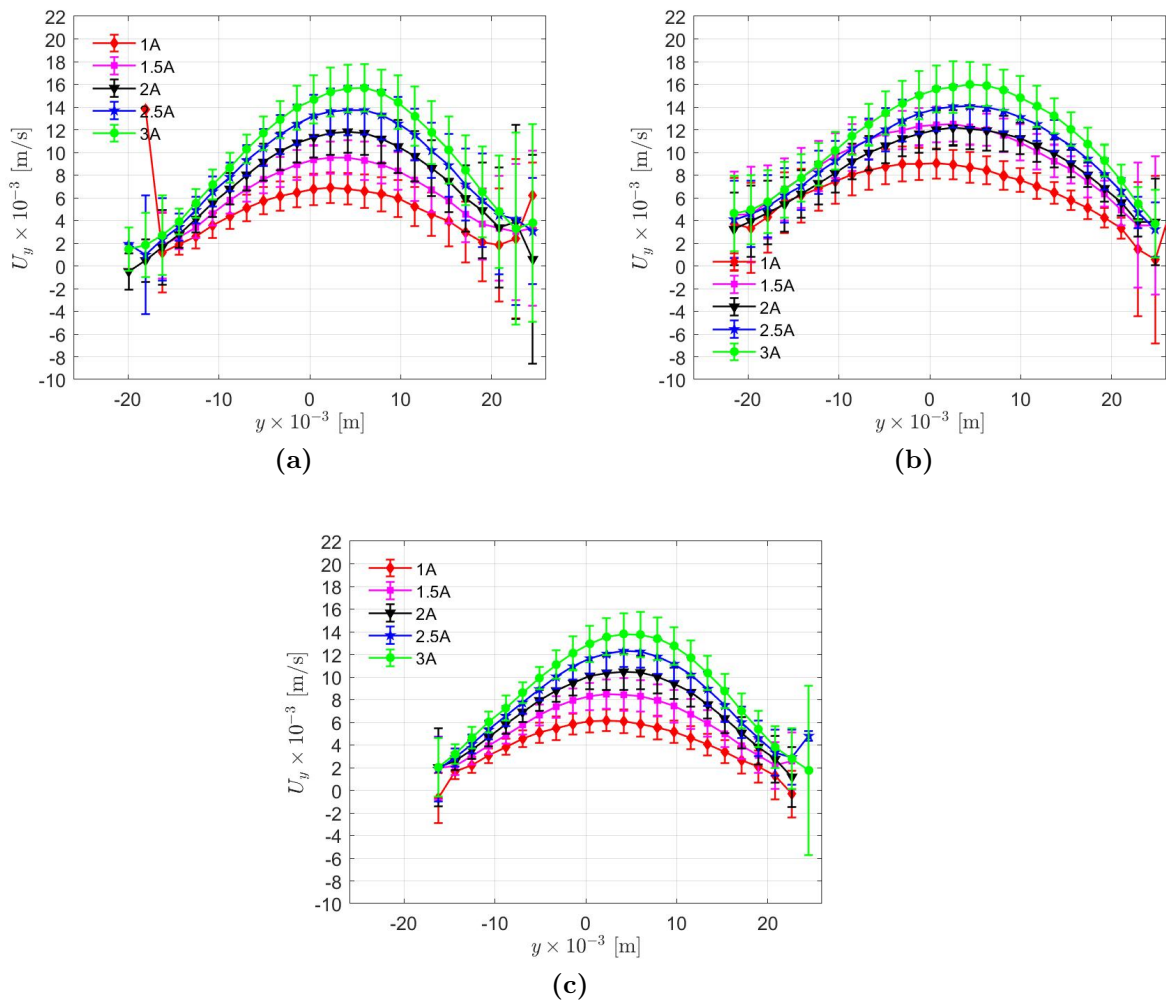


Figura 4.19. Perfiles de velocidad para todas las corrientes, configuración con par de imanes M2, a) T1, b) T2, c) T3.

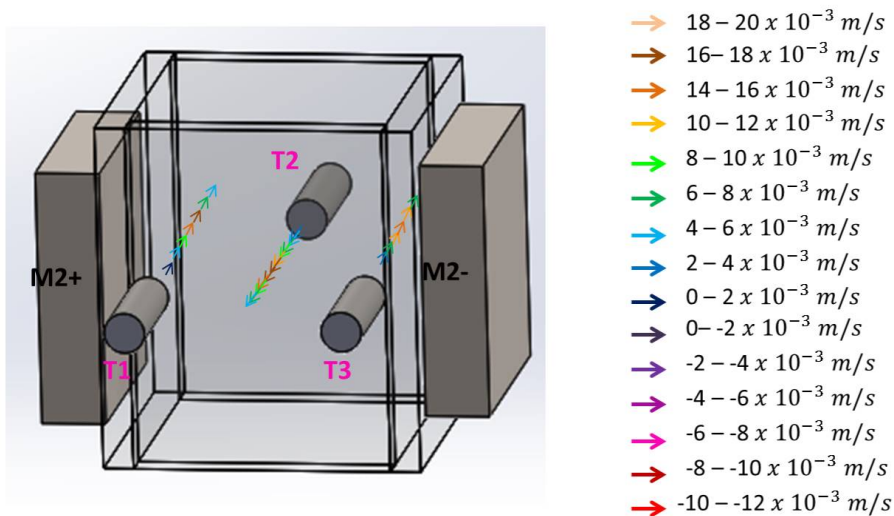


Figura 4.20: Dirección y velocidad de movimiento para cada transductor usando 3 A de corriente eléctrica, configuración con par de imanes M2.

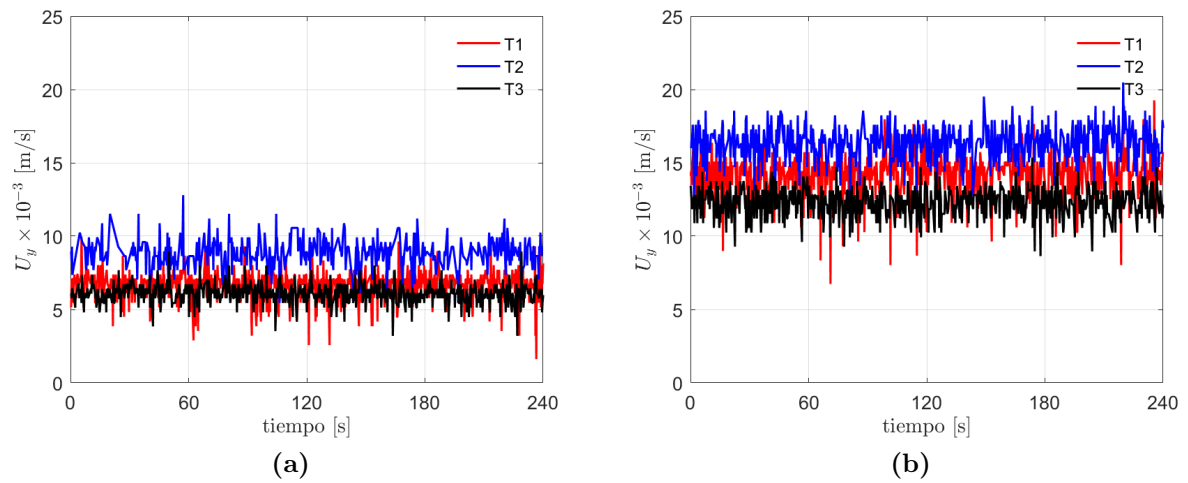


Figura 4.21. U_y vs. tiempo medida a lo largo del eje y con coordenadas en $x = 0.9$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T1, $x = 3.1$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T2 y $x = 5.4$ cm, $y = 3.1$ cm y $z = 0$ cm para T3, para la configuración con par de imanes M2 y para las corrientes eléctricas: a) 1 A, b) 3 A.

4.3. Diferencia de potencial

La ley de Ohm para un fluido conductor en movimiento está dada por la **Ecuación (4.1)**,

$$\mathbf{j} = \sigma(-\nabla\phi + \mathbf{U} \times \mathbf{B}) \quad (4.1)$$

donde \mathbf{j} es la densidad de corriente eléctrica, σ es la conductividad eléctrica del fluido conductor, ϕ es el potencial eléctrico, \mathbf{U} es la velocidad del fluido y \mathbf{B} es la densidad de campo magnético.

De la ley de Ohm es claro que para una densidad de corriente constante, mientras mayor sea la velocidad y/o la densidad de campo magnético menor será la diferencia de potencial.

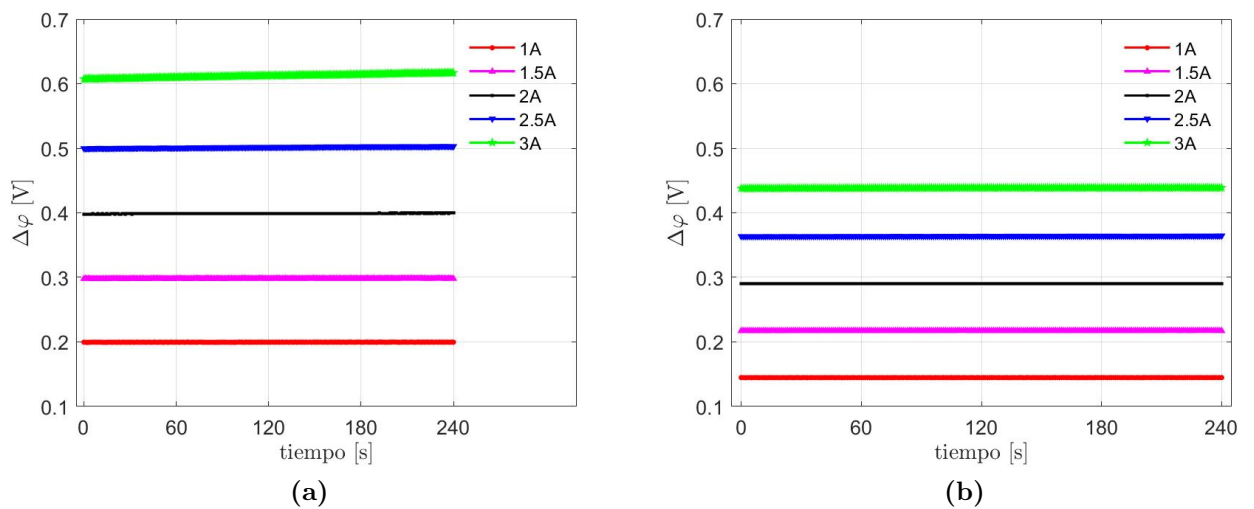


Figura 4.22. Diferencia de potencial como función del tiempo y para distintos valores de corriente: a) imán M1, b) par de imanes M1.

La **Figura 4.22** muestra la diferencia de potencial para las configuraciones con un solo imán y par de imanes M1, medida por la fuente de poder como función del tiempo. Para todos los valores de corriente se observa un comportamiento constante de la diferencia de potencial y un aumento de forma monótona con la corriente; como era de esperarse para el caso de pares de imanes M1 con la densidad de campo magnético y velocidades mayores, se tiene que la diferencia de potencial es aproximadamente 25 % menor en comparación con los experimentos para un solo imán M1.

La diferencia de potencial como función del tiempo para el caso de experimentos que involucran tanto un solo imán como pares de imanes de tipo M2 se muestra en la **Figura 4.23**; nuevamente se tiene un comportamiento constante de la diferencia de potencial como función del tiempo para ambas configuraciones, y un incremento monótono con la corriente. Valores de la diferencia de potencial para un solo imán y par de imanes M2 son muy similares a sus respectivas contrapartes con los imanes M1.

Dado el comportamiento constante de la diferencia de potencial como función del tiempo, se puede confirmar mediante dicha medición, el estado estacionario del flujo al interior de la cavidad para las distintas configuraciones con imanes y valores de corriente eléctrica. Tomando el promedio de la diferencia de potencial en el intervalo de tiempo descrito, para cada valor de corriente y para todas las configuraciones de

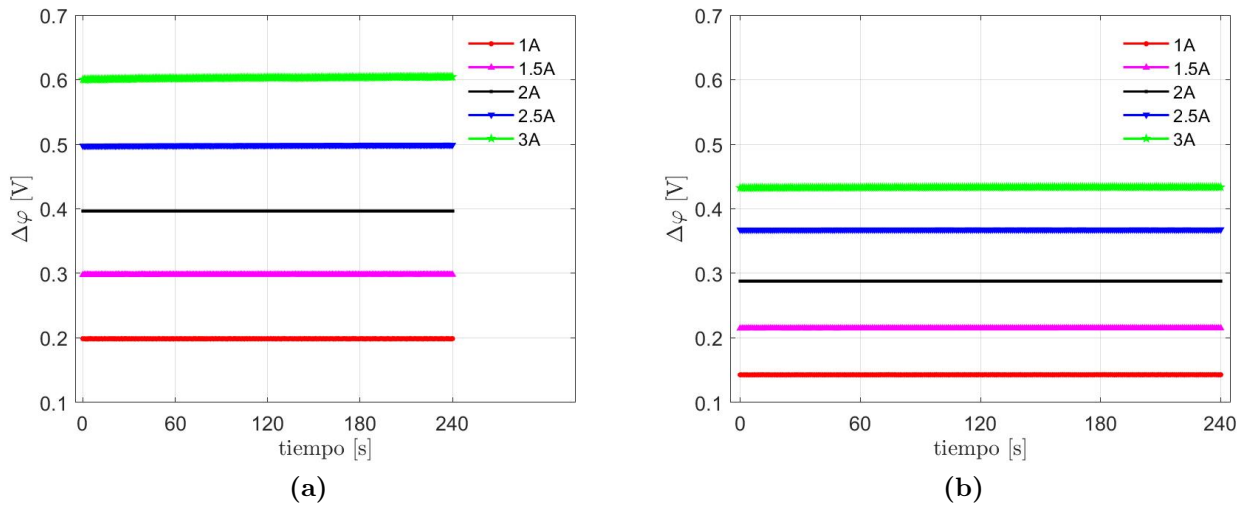


Figura 4.23. Diferencia de potencial como función del tiempo y para distintos valores de corriente: a) imán M2, b) par de imanes M2.

imanes, se obtienen las curvas de la **Figura 4.24**. Como era de esperar y con base en la ley de Ohm, existe un comportamiento lineal de la diferencia de potencial como función de la corriente. Es importante hacer notar que para las configuraciones de pares de imanes en las cuales se presentan las mayores velocidades, los valores de la diferencia de potencial son menores en comparación con las configuraciones con un solo imán. Tanto para el caso de uno como de pares de imanes, la diferencia de potencial es mayor para el imán tipo M1, llama la atención que las pendientes de las curvas para imanes solos son mayores que para el caso de las curvas de pares de imanes (también muy similares entre sí), siendo un posible indicativo de una menor resistencia eléctrica del sistema para velocidades mayores, lo cual puede ofrecer ciertas ventajas en posibles configuraciones experimentales de BML.

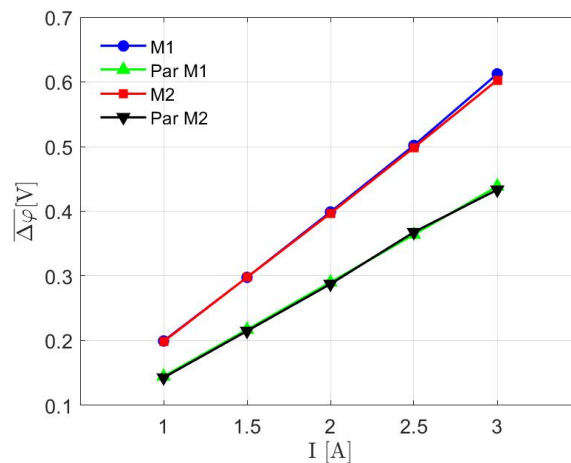


Figura 4.24. Diferencia de potencial promedio como función de la corriente para las distintas configuraciones de imanes.

4.4. Comparación de las técnicas experimentales PIV y UDV

Como se ha mencionado anteriormente la medición de parámetros de flujo como la velocidad, implica el desarrollo de instrumentos e implementación de técnicas especiales. Los equipos más usados (dado su carácter no intrusivo) en tiempos recientes son el UDV ya ampliamente discutido en el presente trabajo y la técnica de velocimetría por imágenes de partículas, la implementación y uso correcto de ambas implica un esfuerzo considerable. En el grupo de investigación de la Unidad Morelia del IIM, se ha implementado también con éxito la medición de campos de velocidad en planos de flujos de electrolitos agitados electromagnéticamente mediante PIV en configuraciones experimentales relacionadas al desarrollo de BML (Aguilasocho-Acosta, G, 2018).

La técnica de PIV en dos dimensiones (2D) consiste básicamente en sembrar partículas con diámetro del orden de micras y con una densidad idealmente igual a la del fluido translúcido cuyo flujo desea caracterizarse. Mediante un haz de luz láser se ilumina un plano del flujo y mediante una cámara se adquieren imágenes de las partículas en dicho plano. Posteriormente y mediante herramientas de software es posible posprocesar las imágenes y obtener campos de velocidad de las partículas arrastradas por el flujo.

Con objeto de validar las mediciones obtenidas con el equipo DOP 4000, se desarrolló un montaje experimental especial para estudiar el flujo de un electrolito débil a base de agua destilada y la sal de KCl, a una concentración de 30% en masa. Usando una configuración similar a la reportada con un imán M1 y se estudió el flujo generado por corrientes de 0.02 y 0.06 A, el montaje experimental se ilustra en la **Figura 4.25**, para mayores detalles ver el trabajo de Aguilar-Campos, S (2020).

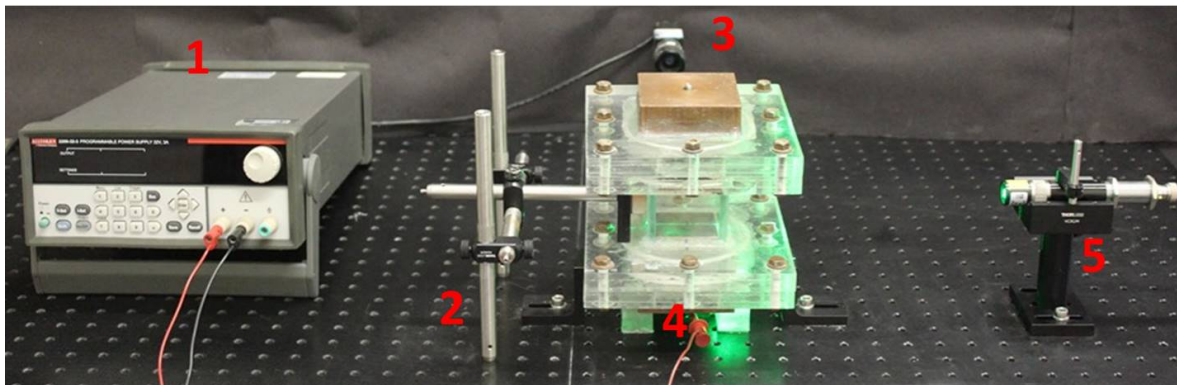


Figura 4.25. Montaje experimental usando la técnica PIV, se muestran los componentes: 1. Fuente de poder KEITHLEY 2200-32-3, 2. Soporte para imán, 3. Cámara, 4. Protitipo experimental contenido con electrolito y 5. Láser.

Para las mediciones con el equipo DOP 4000 se realizó el montaje mostrado en la **Figura 4.26** y los parámetros usados para el transductor en la **Figura 4.28**, es importante destacar que para la velocidad del sonido en el electrolito se usó un valor de 1500 m/s mientras que para el GaInSn fue de 2700 m/s. Mediante PIV fue posible medir el campo de velocidad 2D en el plano central $x-z$ de la cavidad y de dicho plano se extrajeron los perfiles centrales de velocidad a lo largo del eje x . Las mediciones de perfiles de velocidad obtenidos mediante PIV y UDV se muestran en la **Figura 4.27**. Para ambas mediciones se observa que la velocidad aumenta con la corriente

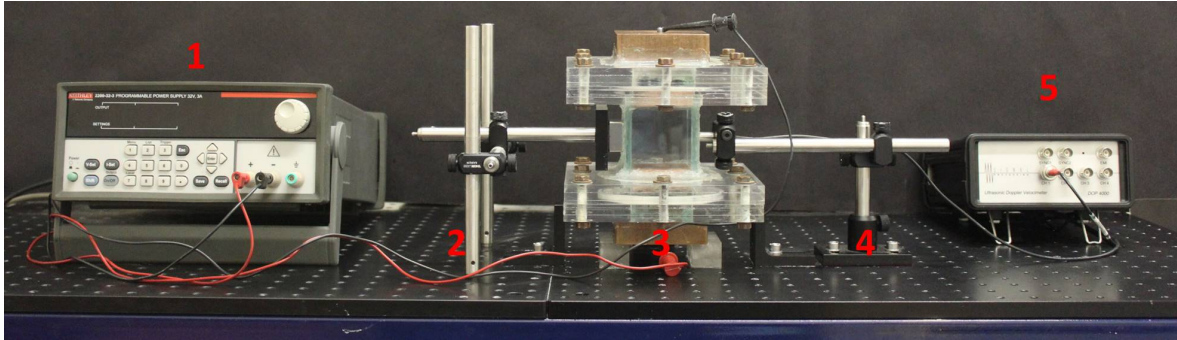


Figura 4.26. Montaje experimental usando la técnica UDV, se muestran los componentes: 1. Fuente de poder KEITHLEY 2200-32-3, 2. Soporte para imán, 3. Prototipo experimental contenido con electrolito, 4. Soporte para transductor y 5. Equipo DOP 4000.

eléctrica, obteniéndose valores 30 % mayores con UDV que con PIV, interesantemente el comportamiento cualitativo es muy similar para ambas mediciones. Los perfiles tienen formas similares a los medidos para el flujo de GaInSn.

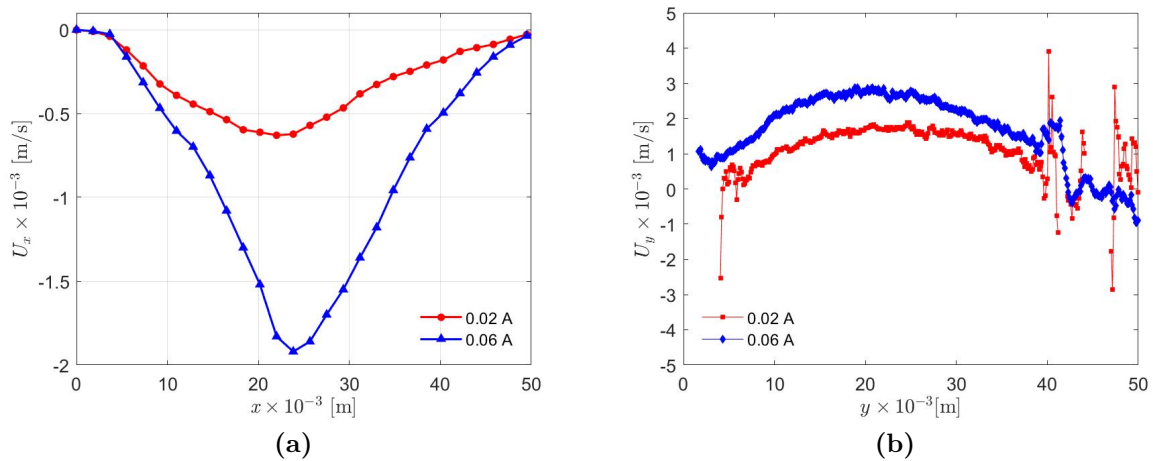


Figura 4.27. Perfiles de velocidad de un electrolito para las corrientes eléctricas de 0.02 y 0.06 A, usando las técnicas: a) PIV, b) UDV.

El comportamiento de la diferencia de potencial obtenido para ambos montajes experimentales es muy similar, como se observa en la **Figura 4.29**, lo que nos indica que existe reproducibilidad experimental.

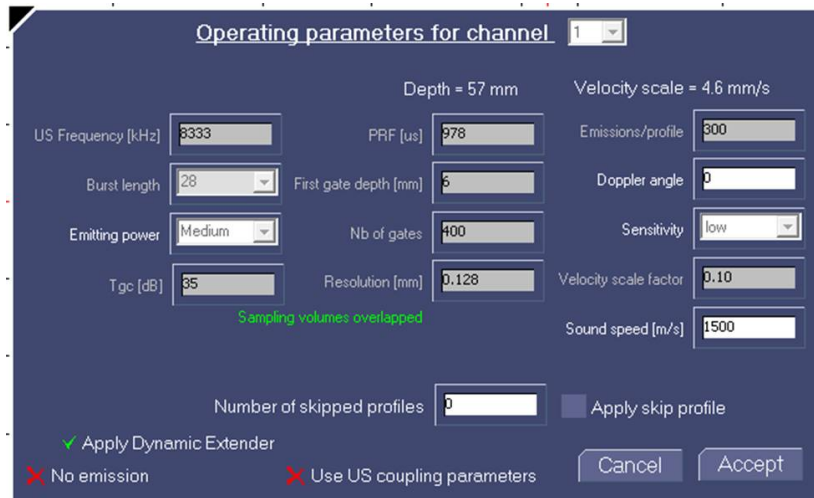


Figura 4.28. Parámetros de medición usados para el flujo de un electrolito.

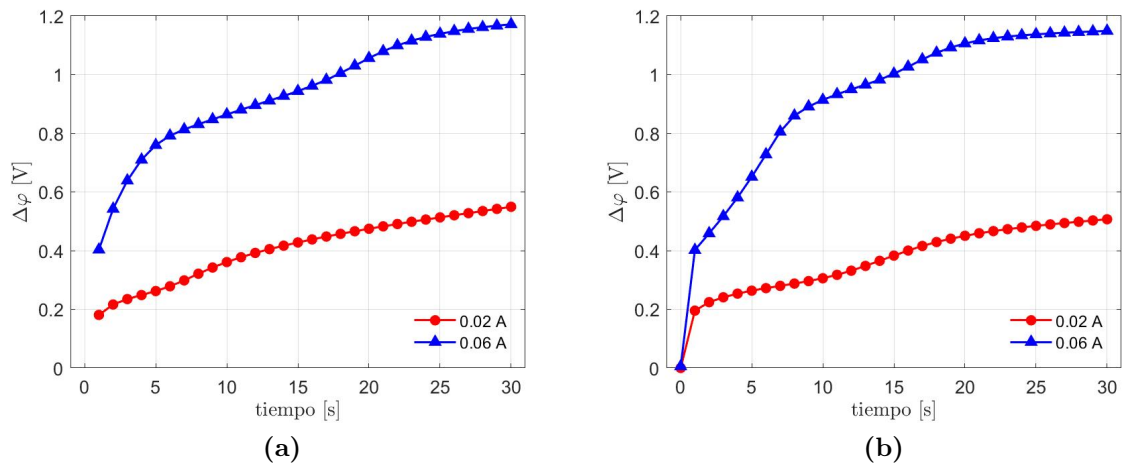


Figura 4.29. Voltajes obtenidos para todas la corrientes usadas en un electrolito, usando las técnicas: a) PIV, b) UDV.

Conclusiones y trabajo futuro

En el trabajo aquí planteado se abordó la caracterización de patrones de flujo del metal líquido GaInSn confinado en una cavidad cúbica y agitado de forma no intrusiva mediante una fuerza de Lorentz, generada por la interacción de una corriente eléctrica en la dirección axial ascendente y distribuciones de campo impuestas externamente mediante el uso de 4 distintos arreglos de imanes permanentes. En particular, se miden perfiles de velocidad a lo largo de distintas direcciones en el flujo mediante transductores conectados a un equipo DOP 4000 de ultrasonido por efecto Doppler. Adicionalmente a la caracterización en función de una variable hidrodinámica como la velocidad, también se presentaron resultados para una variable electromagnética como la diferencia de potencial, medida por la fuente de poder empleada para inyectar la corriente eléctrica a través de electrodos de cobre que funcionan como tapas superiores e inferiores de la cavidad. Mediciones de velocidad y diferencia de potencial indican la presencia de flujos laminares y estacionarios para todos los casos. En base a las hipótesis planteadas, se concluye que no se logra demostrar en su totalidad que la diferencia de potencial en terminales del sistema está relacionada con la distribución del flujo de GaInSn.

Para todas las configuraciones experimentales, la velocidad aumenta monótonamente con la corriente eléctrica; sin embargo, los perfiles muestran distinto comportamiento y magnitudes dependiendo de las distribuciones de campo magnético presentes. Para el caso de un imán M1, el campo magnético puede considerarse como localizado con respecto al volumen de GaInSn, se obtienen perfiles de velocidad prácticamente simétricos a lo largo del eje y , que es la dirección dominante del flujo, mientras que en el eje x se observan perfiles asimétricos. Cuando se usa un imán M2, de magnitud similar a M1, pero con una distribución de campo magnético más homogénea en la cavidad, se obtienen menores valores de velocidad; es decir, campos localizados (M1) generan mayores velocidades que campos más homogéneos (M2).

En el caso de pares de imanes tanto M1 como M2, se obtienen mayores velocidades en comparación con solo un imán. El uso de un par de imanes M2 también genera perfiles de velocidad más simétricos en comparación con el par de imanes M1.

La caracterización en términos de la diferencia de potencial, muestra que se conserva la relación lineal entre dicha variable y la densidad de corriente eléctrica. Las líneas de voltaje para imanes solos son muy similares así como las que describen los pares de imanes; sin embargo, para el caso de imanes solos las líneas tienen una mayor pendiente, situación que se explica por el hecho de que a mayor intensidad de campo (pares de imanes) mayores velocidades y por lo tanto menores diferencias de potencial para el caso de una densidad de corriente constante, situación descrita también por la ley de

Ohm.

El estudio se extendió con objeto de comparar las mediciones de UDV con otras obtenidas mediante la técnica PIV, perfiles de velocidad obtenidos con ambas técnicas, pero ahora para el caso de un flujo de un electrolito débil generado en condiciones similares, mostraron una buena comparación tanto cualitativa como cuantitativa.

5.1. Electrolito KCl, una sola capa

Se logró realizar la comparación entre las técnicas UDV y PIV usando una sola capa de electrolito de KCl, de éste análisis se concluye que ambas técnicas muestran perfiles con comportamientos similares, sin embargo, no podemos decir lo mismo de las velocidades que son detectadas en el fluido con las mismas intensidades de corriente eléctrica, esto se atribuye a que el área de medición que detecta el equipo UDV es mayor al área de medición dado por el equipo utilizado para la técnica PIV, ya que los transductores del equipo UDV cuentan con un diámetro de 0.5 cm por donde es enviado el pulso ultrasónico que reconoce la posición de las partículas, y a medida que este se aleja del transductor, tiende a aumentar su diámetro, debido a esto es que se considera este aumento en la velocidad de los perfiles. En cuanto a la señal de voltaje que se presentan en ambos casos se ve un ligero cambio en la intensidad, adjudicado al tipo de movimiento que este presenta.

5.2. Trabajo futuro

Con vista en un trabajo futuro, el cual nos ayude a entender el comportamiento que se tendría al juntar dos capas de fluidos conductores, con miras a entender el flujo en configuraciones de BML, una capa de metal líquido y una de electrolito, considerando diferentes corrientes eléctricas y diferentes intensidades de campo magnético, se realizó un primer acercamiento, juntando una capa de 75 cm³ de la aleación de GaInSn, con una capa de 75 cm³ de electrolito de KCl con una concentración del 30 % en peso en un prototipo experimental similar al descrito en el capítulo 2, algunas de las diferencias con que cuenta este prototipo es que sus paredes están construidas de vidrio, este dispositivo es mostrado en la **Figura 5.1**, donde se pueden observar las dos capas de fluidos contenidas en él.

Se ajusta un solo transductor en el centro de la capa de GaInSn. Para el caso de la capa del electrolito es necesario usar la técnica PIV.

La **Figura 5.2** representa el montaje experimental, todos los equipos como la cámara, el láser, el transductor y el imán se encuentran sujetos con la ayuda de equipo milimétrico para asegurarse de que siempre se mida en el mismo lugar, así como evitar movimientos de los equipos entre una medición y otra.

Se procede a medir tres minutos, de los cuales se filtran los primeros 30 s, usando corrientes de 0.02 y 0.06 A.

Dentro de los resultados obtenidos podemos ver la **Figura 5.3**, que nos muestra los perfiles de velocidad a lo largo del eje y sobre la capa de metal líquido en los dos casos de estudio, se obtienen velocidades de hasta 0.6×10^{-3} m/s.

Debido a que el fenómeno de electrólisis ocurre de manera casi espontánea en este tipo de configuraciones, solo se analizan los primeros 30 s de cada medición, pues ya que en un tiempo mayor la capa de electrolito se ve afectada por el desprendimiento

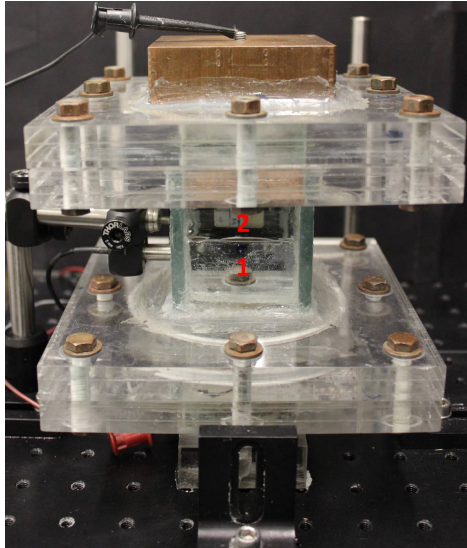


Figura 5.1. Prototipo experimental con capas de: 1. GaInSn y 2. Electrolito.

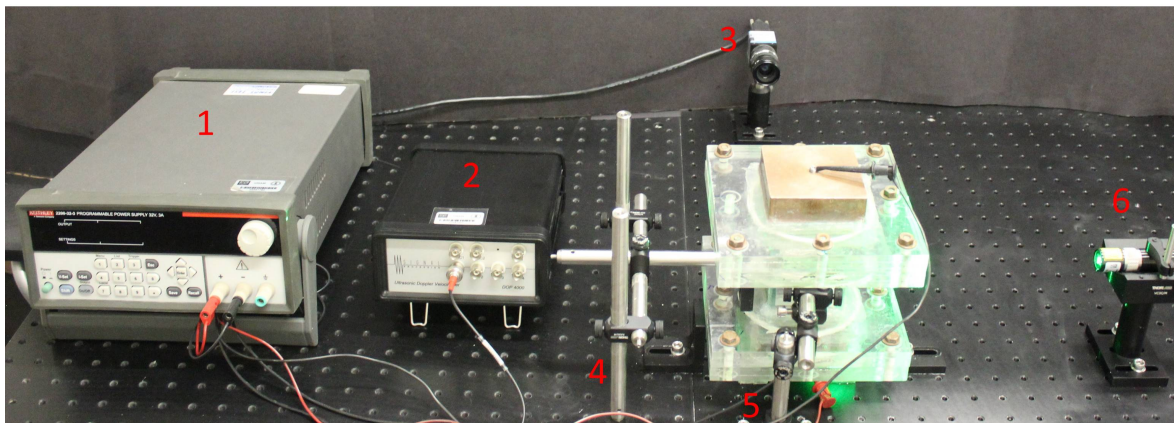


Figura 5.2. Montaje experimental para el estudio con dos capas, dónde se observan: 1. Fuente de poder KETHLEY 2200-32-3, 2. Equipo DOP 4000, 3. Cámara, 4. Soporte para imán, 5. Soporte para transductor, 6. Láser.

de óxido de los electrodos de cobre contaminando el sistema. A causa de esto no es posible obtener perfiles en estado estable de velocidad en la capa de metal líquido ya que se ha observado que la primer capa en presentar movimiento a simple vista es la capa del electrolito, esto basándose en las imágenes obtenidas por el PIV y el primer perfil de velocidad detectado en el equipo.

Un análisis a mayor detalle y comparación entre los resultados obtenidos por UDV y PIV son necesarios y se espera abordarlos en un trabajo futuro por el grupo de investigación.

La señal de voltaje mostrada en la **Figura 5.4**, representa los voltajes a lo largo de los primeros 30 segundos de medición, se aprecia que para las corrientes de 0.02 y 0.06 A, el comportamiento es similar, pero se aprecia un pico de aumento en el voltaje presentado para la corriente mayor, este puede ser explicado debido a un cambio en el movimiento del fluido o aun incremento de su intensidad.

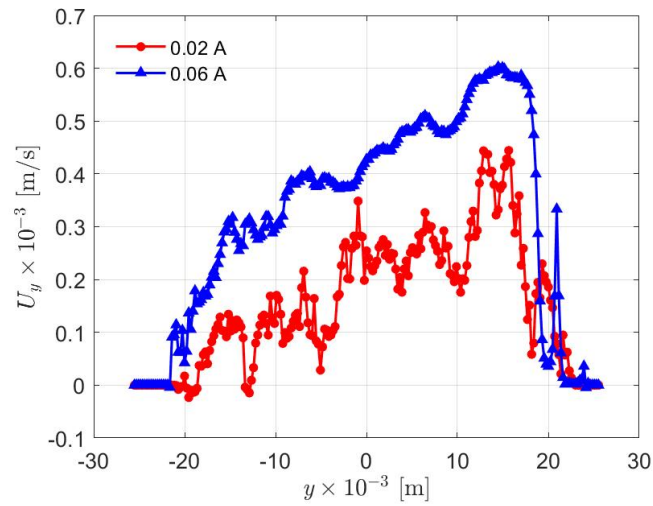


Figura 5.3. Perfil de velocidad al centro de la capa de GaInSn en una configuración de dos capas de fluidos conductores.

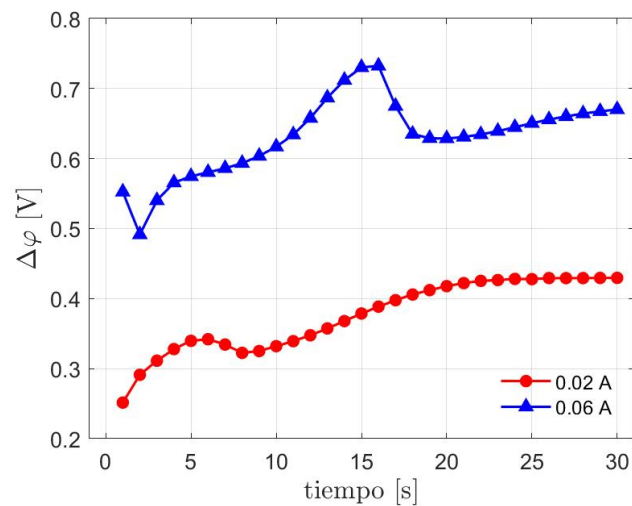


Figura 5.4. Diferencia de potencial en terminales de la cavidad.

Dimensiones de las piezas del prototipo experimental

Son mostradas cada una de las piezas que fueron necesarias para la construcción del prototipo, con medidas de cada uno de sus lados.

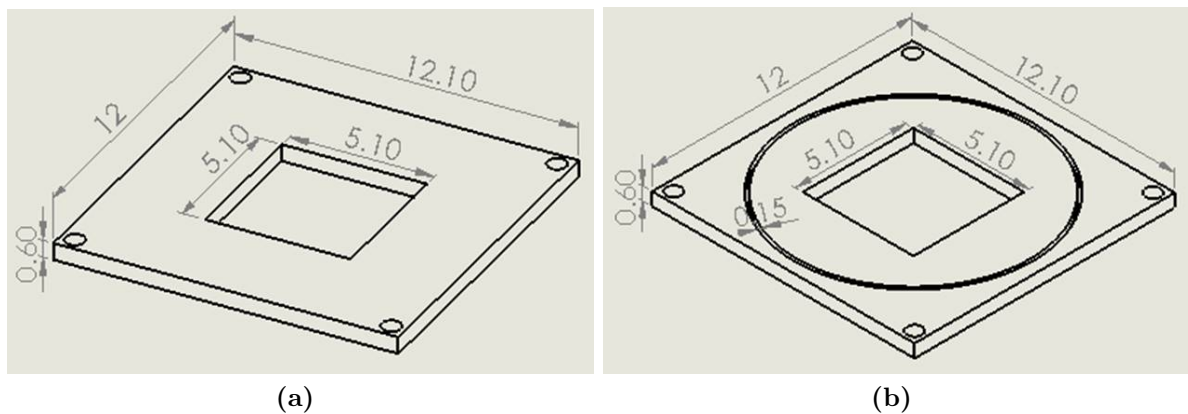


Figura A.1. Tapas del prototipo con medidas expresadas en cm, a) parte superior, b) parte inferior.

Las **Figuras A.1(a) y A.1(b)** muestran las tapas, parte superior e inferior respectivamente, donde son ensambladas las piezas de cobre que funcionan como electrodos en el prototipo, se observa que cuentan con una perforación cuadrada de $5.1 \times 5.1 \text{ cm}^2$ medidas con las que cuenta el electrodo mostrado en la **Figura A.3(a)**, también se aprecia una ranura en forma circular de 0.15 cm de diámetro, espacio necesario para sellar con la ayuda de un empaque que está colocado en los soportes para tapa, mostrados en las **Figuras A.2(a) y A.2(b)**, superior e inferior respectivamente, se observa la misma ranura que en las tapas ya que aquí son colocados los empaques de caucho. Estas piezas son ensambladas en la cavidad cúbica que vemos en la **Figura A.3(b)**. El ensamble más completo se muestra en la **Figura A.4**.

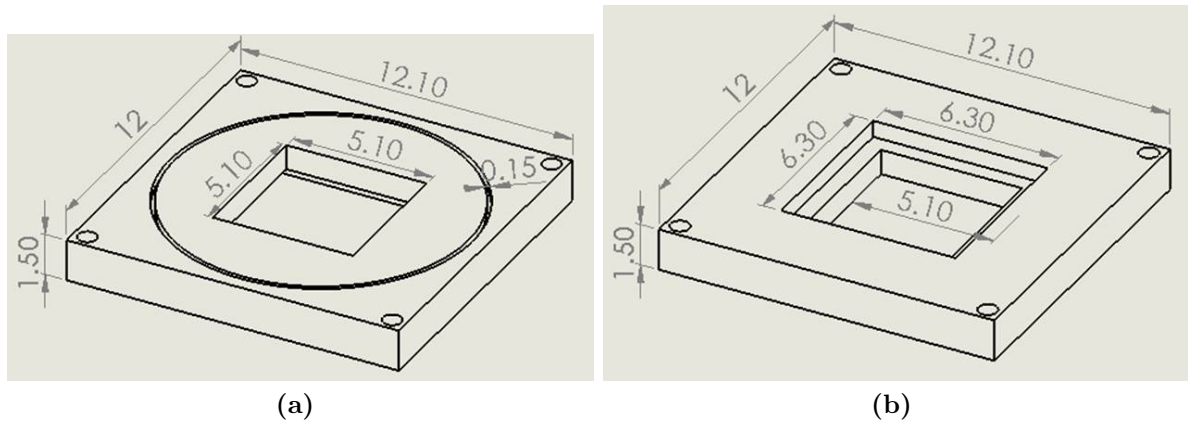


Figura A.2. Soportes para tapas con medidas expresadas en cm: a) superior, b) inferior

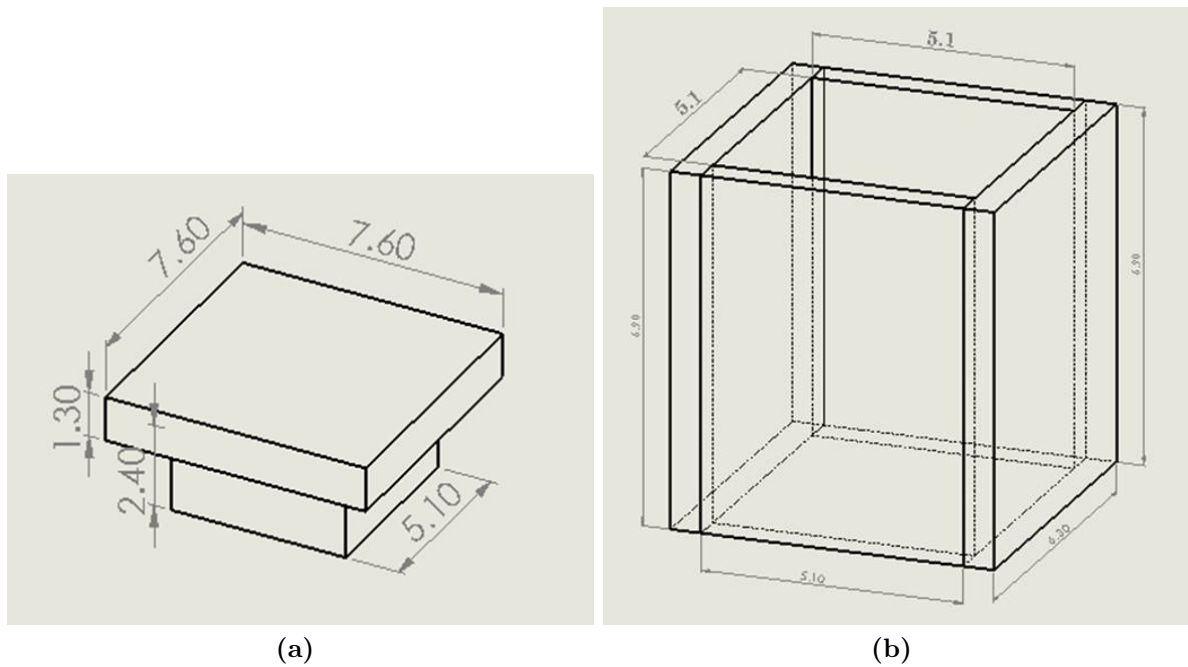


Figura A.3. Piezas del prototipo con medidas expresadas en cm. a) Electrodo, b) cavidad cúbica.

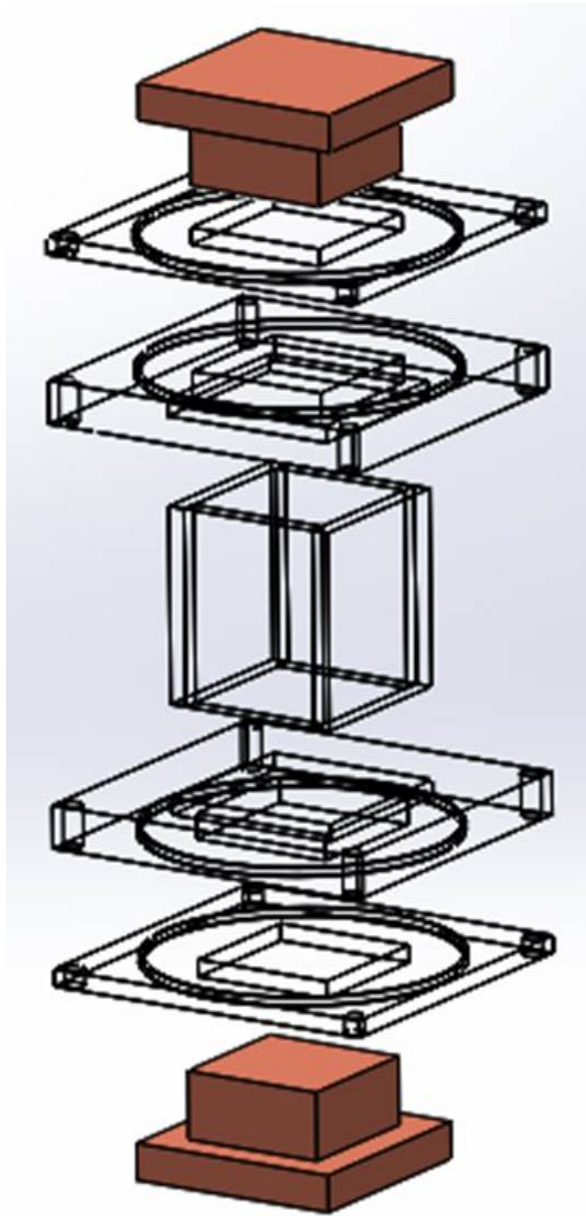


Figura A.4. Ensamble de las piezas del prototipo experimental.

Campos magnéticos

En total se realizaron mediciones en los ejes de simetría de los tres planos mostrados en la **Figura B.1**. El primero en color amarillo es considerado como el plano 1, se encuentra ubicado a 0.6 cm sobre la superficie del imán sobre el eje coordenado x , que es el espesor de pared del prototipo, el plano 2 se encuentra representado en color azul en la parte media de la cavidad a 3.1 cm y por último el plano 3 identificado de color verde ubicado a 5.6 cm de distancia sobre la superficie del imán, sobre el mismo eje.

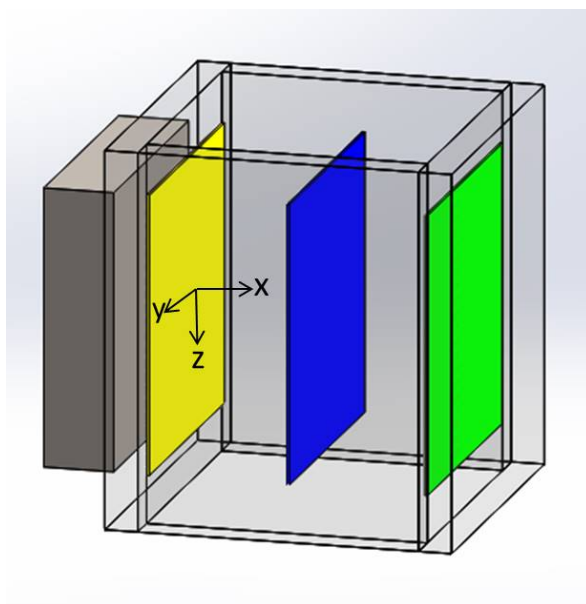


Figura B.1. Planos de medición de campos magnéticos.

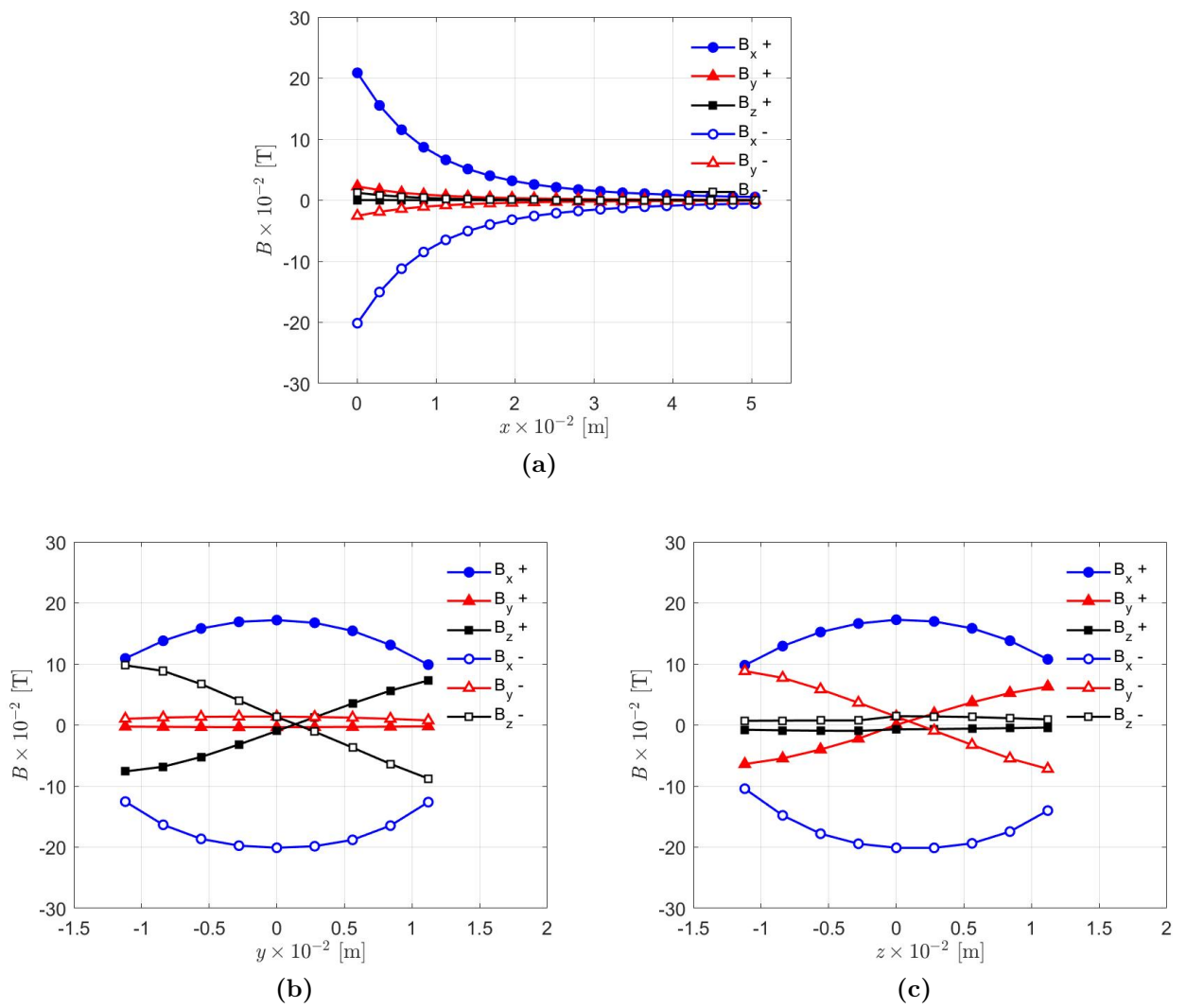


Figura B.2. Densidad de campo magnético del imán M1 sobre los ejes del Plano 1, a) eje x , b) eje y , c) eje z .

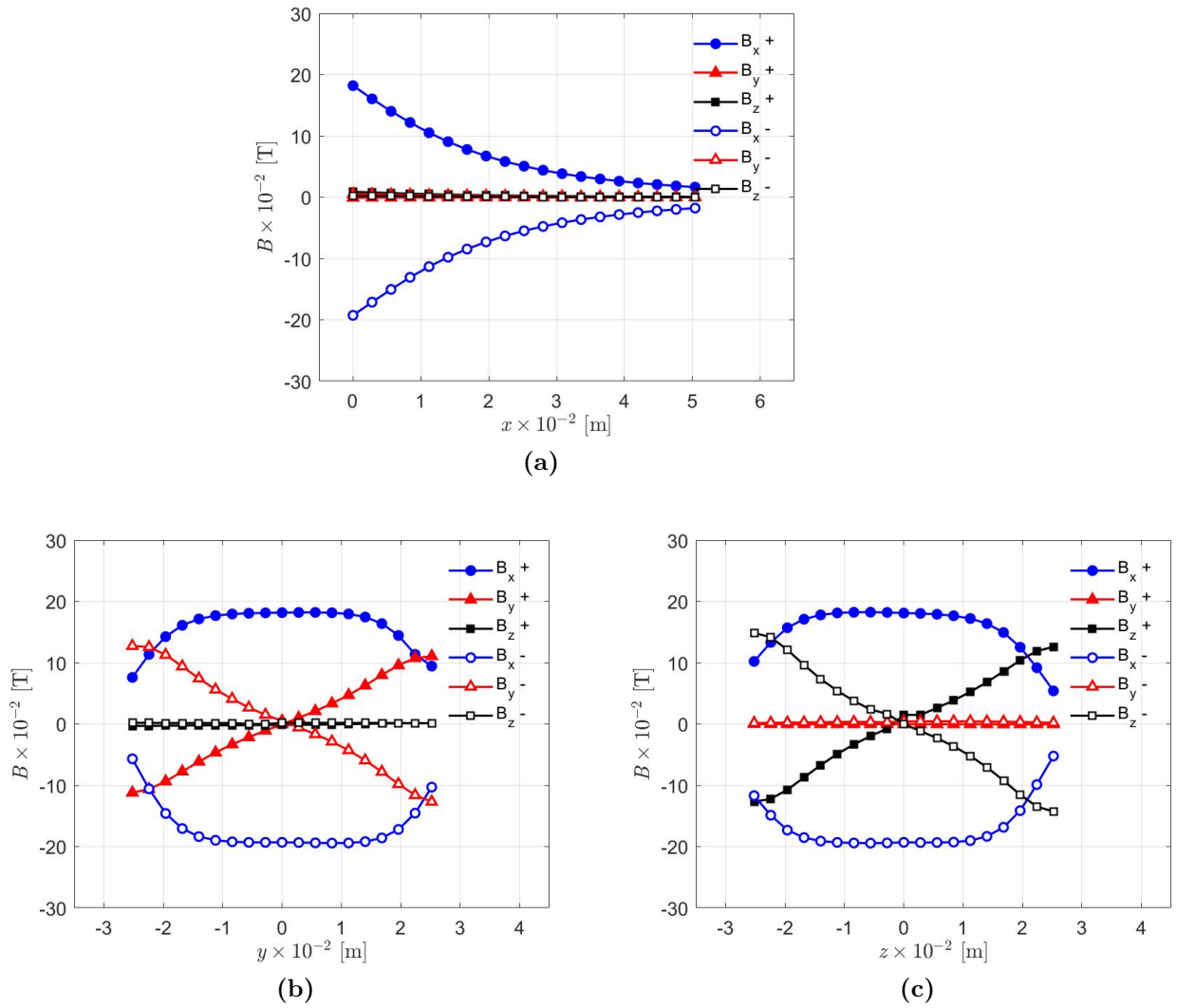


Figura B.3. Densidad de campo magnético del imán M2 sobre los ejes del Plano 1, a) eje x , b) eje y , c) eje z .

Campos magnéticos de los imanes M1 y M2 sobre el Plano 1, considerando 0.6 cm de distancia desde la superficie del imán son mostrados en las **Figuras B.2 y B.3**. Los campos magnéticos de los imanes M1 y M2 sobre el Plano 2, considerando 3.1 cm de distancia desde la superficie del imán, son mostrados en las **Figuras B.4 y B.5**. Así como en las **Figuras B.6 y B.7** se ven los campos magnéticos medidos sobre el Plano 3, ubicado a 5.6 cm de distancia desde la superficie del imán.

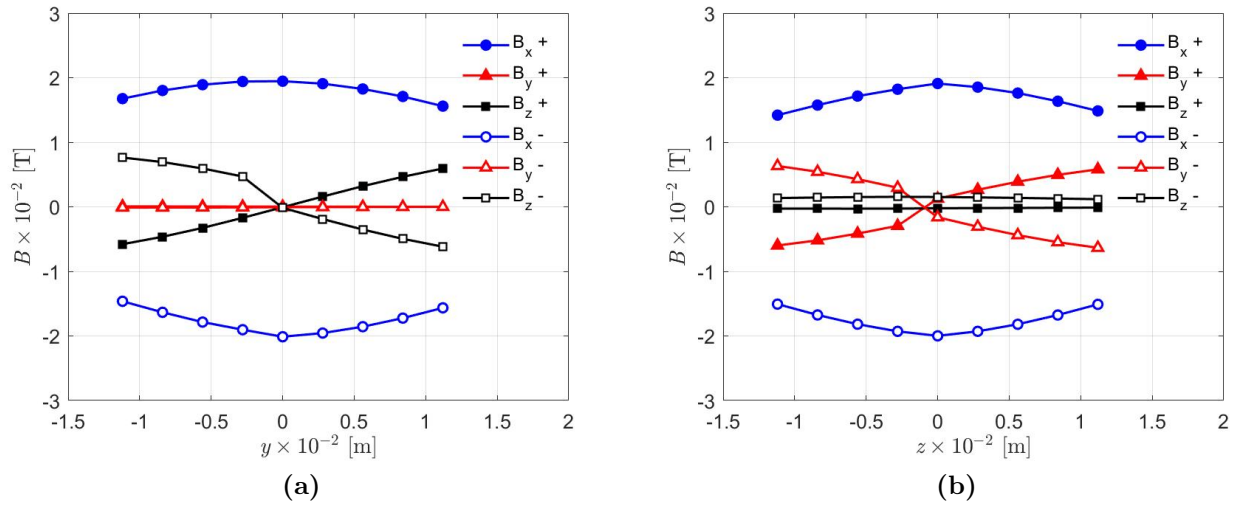


Figura B.4. Densidad de campo magnético del imán M1 sobre los ejes del Plano 2, a) eje y , b) eje z .

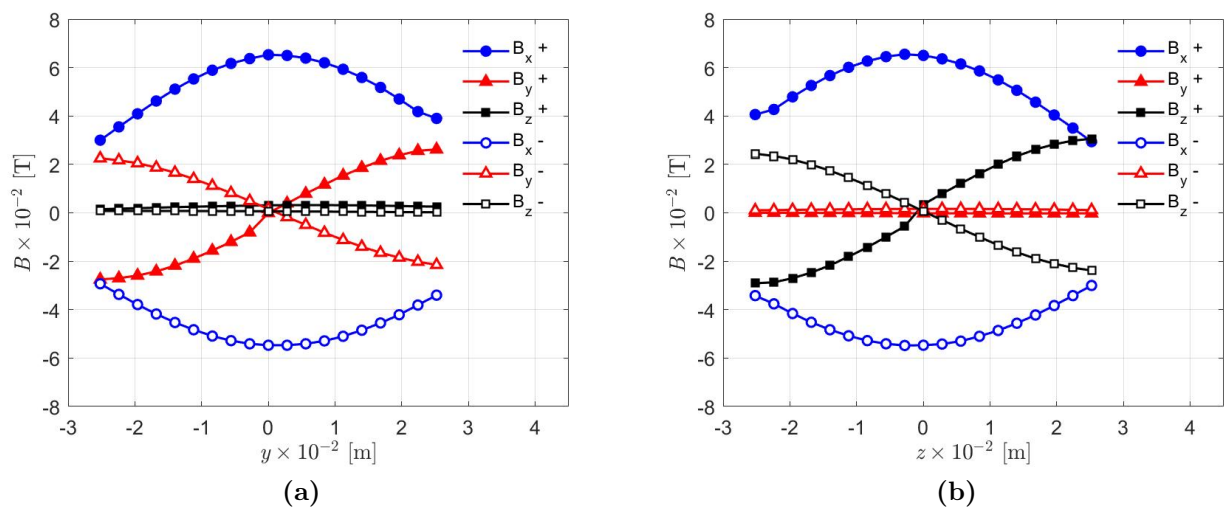


Figura B.5. Densidad de campo magnético del imán M2 sobre los ejes del Plano 2, a) eje y , b) eje z .

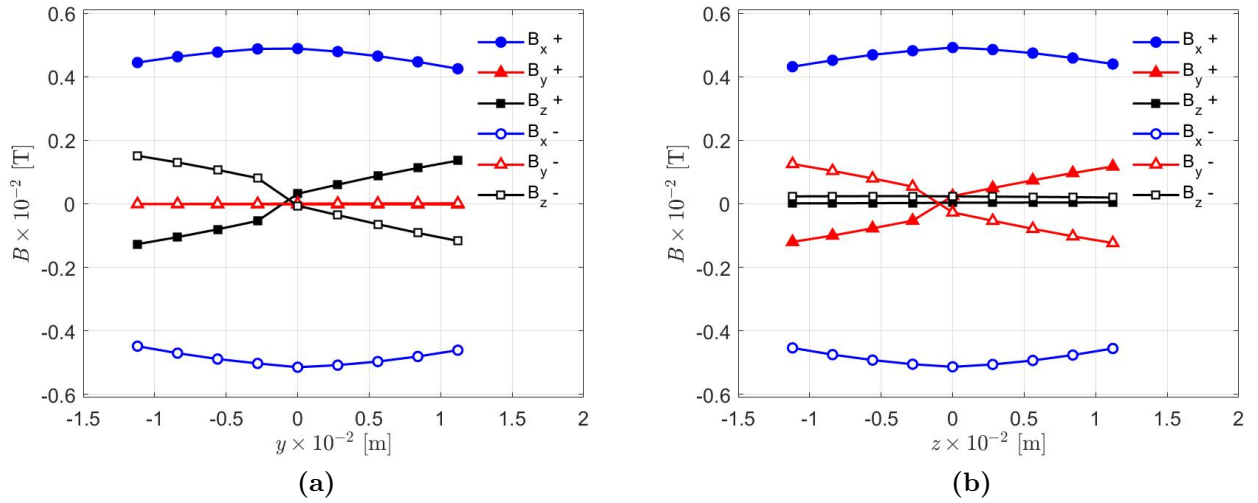


Figura B.6. Densidad de campo magnético del imán M1 sobre los ejes del Plano 3, a) eje y , b) eje z .

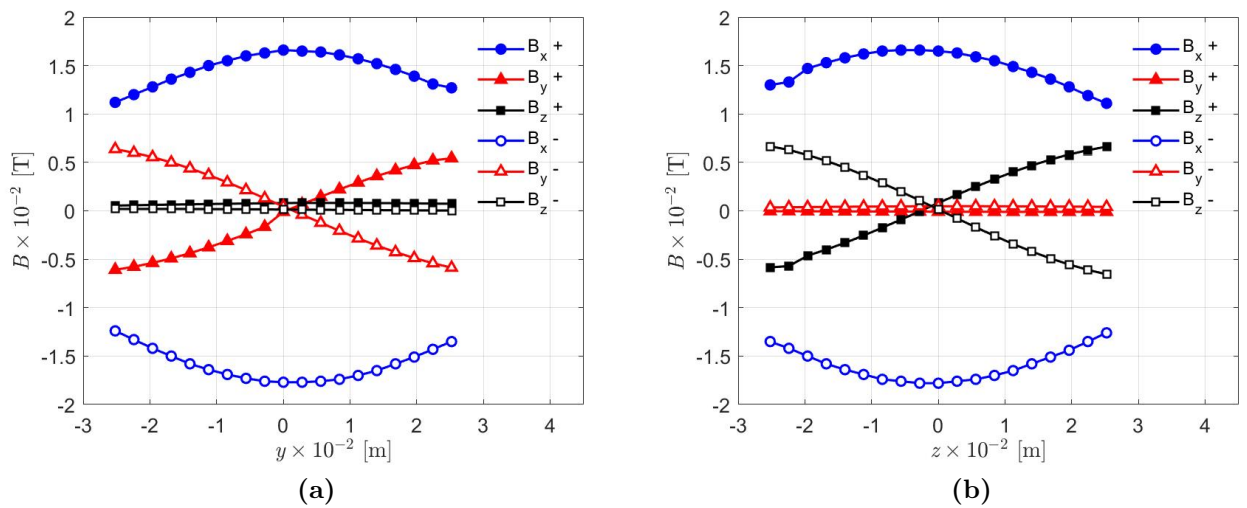


Figura B.7. Densidad de campo magnético del imán M2 sobre los ejes del Plano 3, a) eje y , b) eje z .

Velocímetro ultrasónico Doppler

La técnica de ultrasonido Doppler fue aplicada originalmente en el campo de la medicina, actualmente se ha extendido esta técnica a otros campos y ha abierto el camino a nuevas técnicas de medición en dinámica de fluidos. El término “velocimetría de ultrasonido Doppler” implica que la velocidad se mide al encontrar la frecuencia Doppler en la señal recibida, es decir, se envía un pulso ultrasónico por medio de un transductor que funge como emisor y receptor, entre más pequeño sea el diámetro del transductor la divergencia del haz ultrasónico será mayor. Este pulso choca con las partículas contenidas en el fluido, cabe señalar que las partículas tienen que ser de menor dimensión que la longitud de onda, ya que de no cumplir esto la dirección de propagación y la intensidad de las ondas ultrasónicas son afectadas, a la vez que choca con una partícula se genera un eco, el cual regresa al transductor, por medio de la diferencia de tiempo en que el pulso es enviado y el eco es recibido es posible calcular la velocidad y la posición de la partícula, esta técnica es descrita ampliamente en Takeda (2012).

Supongamos una situación, donde solo una partícula está presente a lo largo de la trayectoria del haz ultrasónico. En el momento t_1 , se emite una ráfaga. Esta ráfaga se propaga dentro del líquido. En el momento t_2 , la ráfaga toca la partícula. Si los tamaños de las partículas son mucho más pequeños que la longitud de onda, solo se genera un eco muy pequeño (efecto de dispersión). Estos ecos vuelven en dirección al transductor, mientras que la energía principal continúa su propagación. En el momento t_3 , el eco llega al transductor. La posición P de la partícula se puede determinar a partir del tiempo de viaje ($t_3 - t_1$):

$$P = \frac{c}{2(t_3 - t_1)} \quad (\text{C.1})$$

donde c es la velocidad del sonido de la onda acústica en el líquido. Una frecuencia de cambio Doppler f_d en el instante nos da información de velocidad en esa ubicación como se muestra en la ecuación Doppler:

$$V = \frac{cf_d}{2f_e} \quad (\text{C.2})$$

Limitaciones y restricciones de velocidad

El ultrasonido Doppler pulsado ofrece instantáneamente un perfil de velocidad completo. Desafortunadamente, como la información está disponible solo periódicamente, esta técnica adolece del teorema de Nyquist (Pollock, Green, y Nguyen, 1999) el cual establece:

$$f_{d,máx} = \frac{f_{prd}}{2} \quad (C.3)$$

donde $f_{d,máx}$ es la frecuencia Doppler máxima y f_{prd} es la frecuencia de repetición de pulso.

Esto significa que existe una velocidad máxima ($V_{máx}$) para cada frecuencia de repetición de pulso:

$$V_{máx} = \frac{cf_{prd}}{4f_e} \quad (C.4)$$

La profundidad máxima ($P_{máx}$) alcanzada está dada por el tiempo en que el pulso viaja de ida y vuelta al transductor como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_{máx} = \frac{c}{2f_{prd}} \quad (C.5)$$

Una restricción de medición para este método se da a partir de las ecuaciones de doble limitación como:

$$P_{máx} V_{máx} = \frac{c^2}{8f_e} \quad (C.6)$$

Usando una frecuencia básica fija, la velocidad máxima a detectar se determina por la profundidad máxima de la trayectoria del haz ultrasónico. Por lo tanto, si la velocidad máxima medida del flujo es grande, se debe establecer una profundidad pequeña. Para que un área amplia sea cubierta, solo se puede detectar la velocidad más pequeña. En algunos casos, es posible compensar mediante post-procesamiento de los resultados, algunas mediciones inadecuadas de velocidad debido a caídas de velocidad ocasionadas por alguna selección errónea en parámetros.

Algunas de las ventajas principales de esta técnica son que se puede usar en fluidos opacos tales como metales líquidos, se puede obtener información espacio-temporal del flujo en cuestión y por último una vez teniendo los parámetros adecuados la medición es fácil de realizar y se pueden obtener mapeos tridimensionales bajo ciertas condiciones.

Parámetros de operación

El velocímetro está controlado por parámetros que pueden ser manipulados manualmente por el operador del equipo. La adecuada elección de estos parámetros ayuda a obtener mediciones correctas de velocidad en el flujo. Los parámetros son definidos a continuación así como la forma en que pueden ser calculados u obtenidos.

- **Frecuencia:** La frecuencia está dada de acuerdo a la frecuencia del transductor a usar, la velocidad máxima estimada a medir, así como el tamaño deseado de volumen de muestreo.

- **Longitud de ráfaga:** Es la longitud total que ocupa una emisión de pulsos ultrasónicos, se podría decir que al sumar la longitud de onda de todos los pulsos enviados en una sola ráfaga obtenemos este parámetro. El tamaño longitudinal de los volúmenes de muestreo, o su grosor, está definido por la longitud de la ráfaga y / o el ancho de banda de la unidad de recepción electrónica. El DOP4000 tiene un ancho de banda fijo de 250 kHz que define una dimensión longitudinal del volumen de muestreo de aproximadamente 0.8 mm en agua. Si la duración de la ráfaga emitida es mayor que el valor asociado al ancho de banda, la dimensión longitudinal del volumen de muestreo está determinada por la longitud de la ráfaga.
- **Potencia emisora:** La potencia ultrasónica emitida debe seleccionarse para recibir suficiente energía retrodispersada de las partículas y evitar la mayor saturación posible en la etapa del receptor.
- **TGC:** Los valores correctos del nivel de amplificación son importantes. Un nivel alto puede inducir saturación en la etapa del receptor del DOP4000, lo que induce valores de medición incorrectos.
- **PRF:** La frecuencia de repetición de pulso o PRF determina la profundidad máxima medible, así como la frecuencia Doppler máxima que se puede medir sin ambigüedades. La profundidad máxima está dada simplemente por la mitad de la distancia cubierta por la ráfaga ultrasónica cuando viaja en el medio durante un tiempo igual al tiempo entre dos emisiones. Como el PRF no es más que la frecuencia de muestreo del eco ultrasónico, el límite de Nyquist define el cambio de frecuencia Doppler máximo que se puede medir de forma inequívoca. Por lo tanto, el PRF define la velocidad máxima para una frecuencia de emisión dada. Como consecuencia, ambos límites, la velocidad máxima y la profundidad máxima, están unidos entre sí.
- **Primer puerta:** La primer puerta o posición de medición depende de la frecuencia de emisión, la longitud de la ráfaga, la potencia de emisión, el nivel de amplificación y el transductor conectado al equipo. El origen de la profundidad medida es la superficie del transductor y su valor mínimo es de alrededor de 3 mm.
- **Número de puertas:** Este es el número de posiciones en que se estará midiendo, el equipo es capaz de medir en más de 1000 puertas a la vez. El número de puertas que se pueden medir depende del PRF seleccionado, la posición de la primera puerta y la resolución seleccionada.
- **Resolución:** UDOP define la resolución como la distancia entre el centro de los volúmenes de muestreo adyacentes y no el grosor del volumen de muestreo. A menudo puede parecer que la resolución seleccionada implica una superposición del volumen de la muestra. Este es el caso cuando la resolución es menor que el grosor del volumen de muestreo. Esto siempre aparece para todas las resoluciones inferiores a 0,8 mm. Cuando la resolución seleccionada corresponde a una distancia mayor que la dimensión longitudinal del volumen de muestreo, los volúmenes de muestreo ya no se tocan entre sí y hay algunos espacios no medidos entre los volúmenes de muestreo. Para evitar este fenómeno, UDOP calcula el valor

promedio de las puertas que se pueden colocar entre dos volúmenes de muestreo, utilizando la resolución más alta.

- **Emisiones/perfil:** El número de emisiones por perfil debe seleccionarse de acuerdo con el tipo de flujo investigado y el ancho del haz ultrasónico. Para velocidades bajas en flujos constantes, un número alto disminuirá la varianza y, por lo tanto, debe seleccionarse. Para altas velocidades en flujos no estacionarios, este número debe adaptarse al grado de variación de las velocidades frente al tiempo. La reducción del número de emisiones por perfil aumenta la tasa de adquisición. Mediante un filtro, como la media móvil, se puede reducir el ruido.
- **Ángulo Doppler:** Este parámetro fija la posición en la que es colocado el transductor, es decir si la superficie del transductor está de forma paralela al punto de medición el ángulo Doppler es igual a cero.
- **Sensibilidad:** El algoritmo utilizado para medir la frecuencia Doppler calcula la frecuencia media del espectro Doppler. Cuando la energía Doppler disminuye, el valor medio se vuelve más y más inestable debido al ruido incluido en el espectro. Para evitar la aparición de valores aleatorios en la pantalla, UDOP calcula también el nivel de energía Doppler recibida y permite al usuario cancelar el cálculo de la frecuencia Doppler si el nivel de energía Doppler está por debajo del valor definido por el usuario. En tal caso, los valores cancelados se reemplazan por valores cero. El parámetro de sensibilidad contiene 5 valores diferentes, que definen el nivel por debajo del cual se cancela el cálculo. Como a veces puede ser útil aceptar el cálculo de la frecuencia Doppler media en presencia de energía Doppler muy baja, se pueden usar dos niveles denominados “Muy alto” y “Alto” en tal situación. Cuando se selecciona “Alto”, puede aparecer algo de ruido en la pantalla. Cuando se selecciona “Muy alto”, es normal que se muestre ruido en la pantalla. La elección de un valor de sensibilidad no introduce ningún sesgo si la energía Doppler es alta. El parámetro de sensibilidad se puede utilizar para obtener información sobre la calidad de los valores medidos. No deberían producirse cambios si se modifica el parámetro de sensibilidad. Cualquier cambio significará que el nivel de energía Doppler es demasiado bajo.
- **Factor de escala de velocidad:** El procesador ultrasónico del velocímetro DOP emite los valores de velocidad en un formato de byte con signo, que permite 256 valores de velocidad diferentes. El usuario puede adaptar el rango de velocidades cubiertas por estos 256 valores para cubrir una parte del desplazamiento de frecuencia Doppler máximo medible que se define por los límites de Nyquist Pollock y cols. (1999) o $PRF/2$. Esta porción del rango de velocidad puede corresponder a todo el rango (valor de 1) o 10 % del rango completo (valor de 0.1).
- **Velocidad del sonido en el líquido:** El conocimiento de la velocidad del sonido en el medio es necesario para transformar los cambios de frecuencia Doppler en mm/s, y el tiempo de vuelo de las ondas ultrasónicas en milímetros. Es necesario un buen conocimiento de la velocidad del sonido en el medio para obtener buenos valores de medición cuantitativa, ya que todos los errores en este parámetro se transfieren directamente a los valores medidos.

Voltaje

Para medir el voltaje se utiliza una interfaz realizada en el programa LabVIEW 2015, esto con la finalidad de poder manipular la fuente de manera automática mediante una PC o laptop, se trabaja con dos ventanas, una en la que podemos ajustar parámetros de medición y otra que se encarga exclusivamente de poner en modo remoto el equipo. En la **Figura D.1** podemos observar la ventana de la interfaz en la que se especifican los parámetros con que la fuente trabaja, como son: tiempo de emisión de corriente, que para cada caso de estudio se miden 6 minutos de los cuales solo se promedian 4 minutos, periodo de tiempo entre el que estará guardando mediciones de voltaje, configurado para medir cada segundo y por último donde será guardado el archivo, debemos asegurarnos de que el equipo esté encendido pues ya que de no ser así la interfaz no será capaz de reconocerlo. Una vez reconocido el equipo, abrimos la ventana mostrada en la **Figura D.2** para poner en modo remoto el equipo y comenzar la medición, cabe señalar que a pesar de estar en modo remoto si se desea interrumpir el paso de corriente eléctrica antes de que termine el tiempo establecido, es necesario presionar los botones shift + 7, para quitar el modo remoto y posteriormente presionar el botón de apagado directamente en el equipo. De igual forma para ajustar la corriente eléctrica y el voltaje inicial deseados es necesario hacerlo de manera manual directamente en el equipo.

Una vez pasado el tiempo de medición la fuente se apagará de manera automática, y guardará el archivo en la ruta dada, este archivo es de extensión txt, y nos arroja una columna con el tiempo de medición y otra con el voltaje, posteriormente se procede a filtrar los datos para dejar fuera los momentos de arranque y apagado de la fuente, quitando dos minutos desde el inicio y dos minutos antes del final, se hace un promedio de estos voltajes, obteniendo un valor para cada corriente y para cada configuración de estudio.

Usando la ley de Ohm es posible calcular la resistencia obtenida para cada caso, por medio de esta ecuación es que obtenemos la resistencia con que trabaja el sistema en cada estudio.

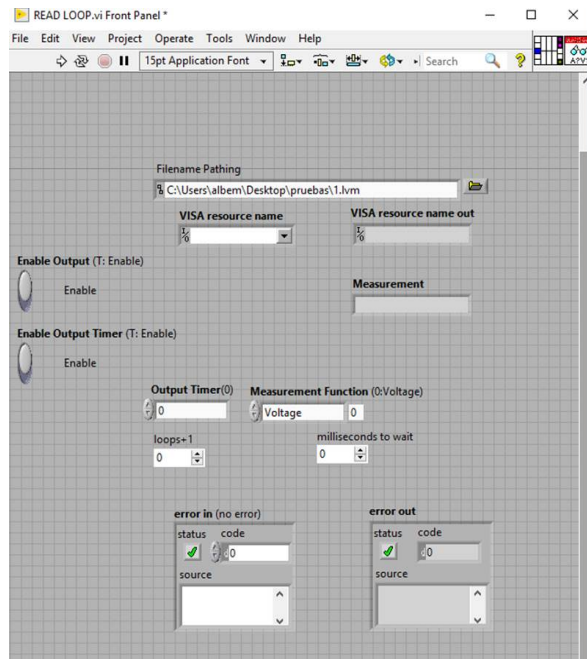


Figura D.1. Pantalla de interfaz de LabVIEW para ajuste de parámetros.

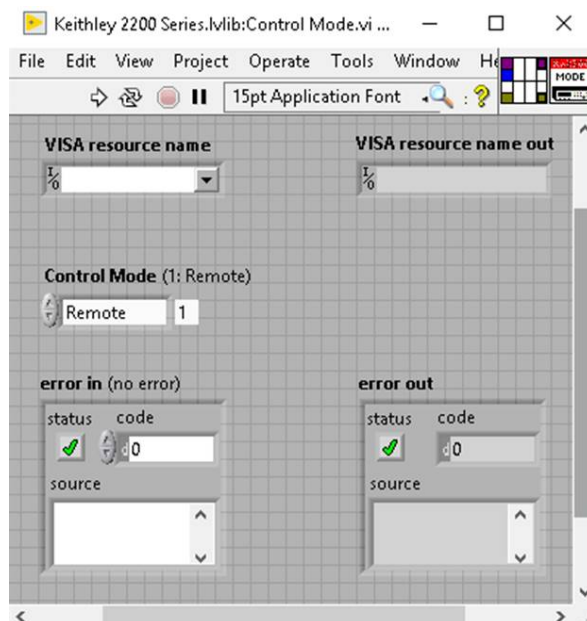


Figura D.2. Pantalla de interfaz de LabVIEW para control del equipo.

Referencias

- Aguilar-Campos, S. (2020). *Caracterización experimental del flujo de un electrolito en una cavidad cúbica*. (Tesis de Master no publicada). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Aguilasocho-Acosta, G. (2018). *Diseño y pruebas de contenedores para el estudio de baterías de metal líquido* (Inf. Téc.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- AMBRI. (2015). *Liquid metal battery cell technology*. Descargado de <http://www.ambri.com/technology/> (Consultado en enero 2020)
- Andreev, O., Kolesnikov, Y., y Thess, A. (2009). Application of the ultrasonic velocity profile method to the mapping of liquid metal flows under the influence of a non-uniform magnetic field. *Experiments in Fluids*, 46(1), 77–83.
- Beltrán, A. (2017). MHD Natural convection flow in a liquid metal electrode. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1203–1212.
- Beltrán, A. (2016). *Nuevos sistemas de almacenamiento de energía: Baterías de metal líquido* (n.º 59). Boletín de la UNAM Campus Morelia.
- Brito, D., Cardin, P., Nataf, H.-C., y Marolleau, G. (1995). Experimental study of a geostrophic vortex of gallium in a transverse magnetic field. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 91(1-3), 77–98.
- 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.
- Changsha Rich Nonferrous Metals CO. (2019). *Proveedor*.
- Changsha Santech Materials CO. (2017). *Proveedor*.
- Domínguez-Lozoya, J., Cuevas, S., Rivero, M., y Ramos, E. (2017). Instabilities in swirling liquid metal flows driven by rotating permanent magnets. *Magneto-hydrodynamics (0024-998X)*, 53(1).
- Eckert, S., Cramer, A., y Gerbeth, G. (2007). Velocity measurement techniques for liquid metal flows. En *Magneto-hydrodynamics* (pp. 275–294). Springer.
- Eckert, S., Franke, S., Gundrum, T., Gerbeth, G., y Willemetz, J. (2015). Applications of ultrasonic doppler velocimetry to flow measurements in hot liquid metals..
- F. W. Bell. (2016, septiembre). 8000 series gauss / tesla meter (UN-01-270 ed.) [Manual de software informático]. (Manual)
- Herreman, W., Nore, C., Ramos, P., Cappanera, L., Guermond, J.-L., y Weber, N. (2019, 11). Numerical simulation of electrovortex flows in cylindrical fluid layers and liquid metal batteries. *Physical Review Fluids*, 4. doi: 10.1103/PhysRevFluids.4.113702

- Holubowitch, N. E., Manek, S. E., Landon, J., Lippert, C. A., Odom, S. A., y Liu, K. (2016). Molten zinc alloys for lower temperature, lower cost liquid metal batteries. *Advanced Materials Technologies*, 1(3), 1600035.
- 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. E. (2017). Fluid mechanics of liquid metal batteries..
- 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.
- 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.
- 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.
- Nauber, R., Büttner, L., Eckert, K., Fröhlich, J., Czarske, J., y Heitkam, S. (2018). Ultrasonic measurements of the bulk flow field in foams. *Physical Review E*, 97(1), 013113.
- 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.
- Pollock, D. S. G., Green, R. C., y Nguyen, T. (1999). *Handbook of time series analysis, signal processing, and dynamics*. Elsevier.
- Ricou, R., y Vives, C. (1982). Local velocity and mass transfer measurements in molten metals using an incorporated magnet probe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 25(10), 1579–1588.
- Rivero, M. (2012). *Estudio experimental de flujos en dispositivos de bombeo y agitación electromagnéticos* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Signal Processing S.A. (s.f.). DOP4000 series user’s manual (6.4 ed.) [Manual de software informático].
- Signal Processing S.A. (2020). *Functioning principles of pulsed doppler ultrasound*. Descargado de <https://www.signal-processing.com/background.php> (Consultado en enero del 2020)
- Stauffer, N. (2015). A battery made of molten metal: New battery may offer low-cost, long-lasting storage for the grid. *Energy Futures*.
- Takeda, Y. (1986). Velocity profile measurement by ultrasound doppler shift method. *International journal of heat and fluid flow*, 7(4), 313–318.
- Takeda, Y. (1987). Measurement of velocity profile of mercury flow by ultrasound doppler shift method. *Nuclear Technology*, 79(1), 120–124.
- Takeda, Y. (2012). *Ultrasonic doppler velocity profiler for fluid flow* (Vol. 101). Springer Science & Business Media.
- Van Noorden, R. (2014). The rechargeable revolution: A better battery. *Nature News*, 507(7490), 26.

-
- 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 taylor instability and electro-vortex flows in liquid metal batteries. *Physics of Fluids*, 27(1), 014103.
- Weber, N., Nimitz, M., Personnettaz, P., Weier, T., y Sadoway, D. (2020, 02). Numerical simulation of mass transfer enhancement in liquid metal batteries by means of electro-vortex flow. *Journal of Power Sources Advances*, 1, 100004. doi: 10.1016/j.powera.2020.100004
- 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.
- Xiang, L., y Zikanov, O. (2019). Numerical simulation of rolling pad instability in cuboid liquid metal batteries. *Physics of Fluids*, 31(12), 124104.