



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES  
UNIDAD MORELIA

## CONVECCIÓN DE LÍQUIDOS CONDUCTORES

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

**PRESENTA:**

LIC. JOSÉ LUIS MORÓN CRUZ

**TUTOR PRINCIPAL:**

DR. ALBERTO BELTRÁN MORALES

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES, UNIDAD  
MORELIA

**COMITÉ TUTOR:**

DR. JOSÉ NÚÑEZ GONZÁLEZ

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD  
MORELIA, UNAM

DR. MICHEL ALEJANDRO RIVERO CORONA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES, UNIDAD  
MORELIA

MORELIA, MICHOACÁN, 13 DE ABRIL 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.



## AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

---

Agradezco a mi tutor el Dr. Alberto Beltrán Morales por ser el guía de este trabajo y contribuir de manera importante a mi formación académica.

Agradezco a los miembros de mi comité tutorial, el Dr. José Núñez González, por su apoyo presentado en este trabajo. Al Dr. Michel Alejandro Rivero Corona por sus críticas y comentarios para la mejora en la calidad del trabajo.

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la beca con número 1148087 como soporte económico para realizar los estudios de maestría.

Se agradece a la Unidad Morelia del Instituto de Investigaciones en Materiales por brindar las instalaciones adecuadas para la realización de mis estudios. En particular a los laboratorios de ahorro y almacenamiento de energía (LAAE) y al de diseño modelado y simulación (LDMS).

Agradezco el financiamiento de esta investigación al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM a través del proyecto IN107722 “Convección de líquidos conductores en presencia de campos electromagnéticos con aplicaciones a las baterías de metal líquido”. También al proyecto PAPIME PE104622 “Manual de prácticas de herramientas de modelado y simulación para la asignatura de mecánica de medios continuos”. Adicionalmente, se agradece al Mtro. Alejandro Pompa García por la configuración del software y equipos de cómputo usados para las simulaciones numéricas y postprocesamiento de datos.

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 la asistencia a congresos.

Se agradece al programa de Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales (PCeIM) por brindarme la posibilidad de desarrollarme profesionalmente.



## AGRADECIMIENTOS PERSONALES

---

Quisiera comenzar expresando mi agradecimiento a las personas que han estado siempre a mi lado, brindándome su cariño: a Lucina y José Luis, mis padres; Andrea, Alberto y Hugo, mis hermanos; y a mis cuñados, primos y amigos que considero mi familia: Juan Carlos, Pam, Edgar, Ever, Santiago y Eduardo. A ellos agradezco el brindarme su apoyo incondicional para cumplir mis objetivos personales. Ellos son los que con su cariño me han impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades. Gracias por seguir siendo parte importante en mi vida.

Agradezco mis compañeros Centli, Bertha, Carlos, David, Eli, Karen y Dulce por el tiempo compartido, apoyarme y darme sus consejos. Especial agradecimiento a Dulce por su amistad y su ayuda en la realización de la malla.

Gracias a Mariana Ortiz, quien estuvo haciéndome compañía durante el proceso, agradezco su tiempo y su cariño.

Agradezco a Kalushoes Sports <sup>TM</sup> por ser la mejor tienda para adquirir mi calzado deportivo al mejor precio.

Le agradezco muy profundamente a mi tutor, el Dr. Alberto Beltrán Morales, por su dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones precisas, no hubiese podido lograr llegar a esta instancia tan anhelada. Gracias por su guía y todos sus consejos.

Me gustaría destacar mis agradecimientos a Viri Herrera, a quien tuve la dicha de conocer durante el proceso de realización de este trabajo. A ella agradezco su presencia, motivarme a ser mejor persona, escucharme, hacerme saber que siempre puedo dar un poco más de mí, recordarme lo valioso que soy y enseñarme que todo llega a mi vida con facilidad, gozo y gloria. Gracias por estar siempre allí.

Ante todo, quisiera dar gracias a Dios por darme fortaleza, la oportunidad de aprender de mis errores y de disfrutar mi vida con las personas que sé que más me quieren y a las que yo más quiero en mi vida, que siempre me han apoyado y siguen creyendo cada día en mí.



Para lograr una transición energética hacia fuentes más limpias, es importante abrir las puertas a nuevas tecnologías que permitan el almacenamiento de energía a gran escala, junto con la implementación de las energías renovables. Dentro de los desarrollos recientes, destacan las baterías de metal líquido (BML), en las cuales tanto los electrodos como el electrolito que las componen se mantienen en estado líquido.

El desarrollo de BML son la motivación para el presente estudio, dado que sus componentes tienen temperaturas de fusión relativamente altas; estudios muestran que las BML en desarrollo tienen temperaturas de operación superiores a los 240 °C, que traen consigo gradientes térmicos en la celda del orden de 10 °C, provocando movimiento de los fluidos por el fenómeno de convección natural y que en conjunto con otros fenómenos de transporte puede mejorar el transporte de masa y carga o llevar al mezclado de los componentes generando un cortocircuito.

En este trabajo se estudia el fenómeno de convección de fluidos confinados en una cavidad cúbica con una configuración relacionada a las BML. Los fluidos son calentados desde abajo y enfriados desde arriba, manteniendo la diferencia de temperatura constante. Se estudiaron desde un punto de vista numérico y experimental los patrones de flujo de agua y GaInSn (metal líquido a temperatura ambiente). Para las mediciones se usaron las técnicas de velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés) y velocimetría de ultrasonido por efecto Doppler (UDV, por sus siglas en inglés); mientras que, para las simulaciones el software comercial ANSYS Fluent. Los resultados muestran una buena comparación entre resultados numéricos y experimentales.

**Palabras clave:** convección natural, agua, GaInSn, PIV, UDV, CFD.





## ABSTRACT

---

To achieve an energy transition towards cleaner sources, it is important to consider new technologies that allow large-scale energy storage, together with the implementation of renewable energies. Among recent developments, liquid metal batteries (LMB) stand out, in which the electrodes and the electrolyte that compose them are kept in a liquid state.

The development of LMB is the motivation for the present study since its components have relatively high melting temperatures. Studies show that the LMB under development have operating temperatures above 240 °C. These high operating temperatures bring with them temperature gradients in the cell of the order of 10 °C, which causes fluid movement due to the phenomenon of natural convection and that together with other transport phenomena can improve the transport of mass and charge or lead to the mixing of the components, generating a short circuit.

In this work, the phenomenon of convection of fluids confined in a cubic cavity with a configuration related to the LMB is studied. The fluids are heated from below and cooled from above, keeping the temperature difference constant. The flow patterns of water and GaInSn (liquid metal at room temperature) were studied from a numerical and experimental point of view. Particle imaging velocimetry (PIV) and Doppler ultrasound velocimetry (UDV) techniques were used for the measurements; while, for the simulations, the commercial software ANSYS Fluent. The results show a good comparison between numerical and experimental results

**Keywords:** natural convection, water, GaInSn, PIV, UDV, CFD.



# ÍNDICE GENERAL

---

<i>Agradecimientos institucionales</i>	·	III
<i>Agradecimientos personales</i>	·	V
<i>Resumen</i>	·	VII
<i>Abstract</i>	·	IX
<i>Figuras y Tablas</i>	·	XIII
1	INTRODUCCIÓN	· 1
1.1	Antecedentes	· 9
2	CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL	· 13
2.1	Modelo experimental	· 13
2.2	Propiedades GaInSn	· 15
2.2.1	Conductividad eléctrica	· 16
2.2.2	Densidad	· 17
2.2.3	Conductividad térmica	· 17
2.2.4	Viscosidad	· 18
3	MODELO MATEMÁTICO	· 21
3.1	Ecuaciones de dinámica de fluidos	· 21
3.1.1	Aproximación de Boussinesq	· 22
3.2	Condiciones iniciales y de frontera	· 24
3.3	Mallado computacional	· 24
4	METODOLOGÍA NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL	· 27
4.1	Velocidad del flujo convectivo	· 27
4.1.1	Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV)	· 28
4.2	Velocimetría de Ultrasonido por efecto Doppler (UDV)	· 29
4.2.1	Principio de funcionamiento UDV	· 31
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	· 35
5.1	Flujo de agua	· 35
5.1.1	Análisis de frecuencias	· 35
5.1.2	Campos promedio de velocidad	· 37
5.1.3	Perfiles de velocidad	· 38

5.2	Flujo de GaInSn	·	42
5.2.1	Análisis de frecuencias	·	42
5.2.2	Perfiles de velocidad	·	43
5.3	Parámetros adimensionales	·	47
5.3.1	Número de $Nu$ para GaInSn	·	49
5.3.2	Número de $Nu$ para agua	·	51
6	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	·	53
6.1	Conclusiones	·	53
A	APÉNDICE A: CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN GaInSn	·	57
B	APÉNDICE B: PARÁMETROS Y LIMITACIONES UDV	·	61
B.1	Limitaciones y restricciones de velocidad	·	61
	BIBLIOGRAFÍA	·	65

### ÍNDICE DE FIGURAS

- 1.1 Mediciones medias mensuales de CO<sub>2</sub> desde 1960 en ppm. Imagen modificada de Climate.gov, 2020. · 2
- 1.2 Esquema de una BML durante los procesos de descarga y carga. Figura modificada de Haomiao y col. (2016). · 4
- 1.3 Temperatura de funcionamiento para diferentes BML. Imagen modificada de Ding y col. (2020). · 5
- 1.4 Configuración experimental para el estudio de convección natural con aplicación a las BML. Imagen modificada de Cheng y col. (2022b) · 12
  
- 2.1 Configuración experimental: 1 cavidad cúbica. 2 circuitos del control de temperatura. · 13
- 2.2 Modelo CAD de la cavidad con sus componentes: 1 electrodos de cobre. 2 disipadores de aluminio. 3 ventiladores. · 14
- 2.3 a) Mediciones del sistema de control de temperatura para  $\Delta T=8$  K. b) Acercamiento a la zona sombreada. · 15
- 2.4 Conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) en función de la temperatura. · 17
- 2.5 Densidad del GaInSn como función de la temperatura (Guthrie y Iida, 1994). · 18
- 2.6 Conductividad térmica en función de la temperatura. · 18
- 2.7 Viscosidad en función de la temperatura. · 19
  
- 3.1 Condiciones de frontera usadas en la simulación. · 23
- 3.2 Geometría del mallado computacional para la zona de fluido y electrodos de cobre. · 25
  
- 4.1 Modelo CAD del montaje experimental para la técnica PIV. · 27
- 4.2 Imagen de partículas iluminadas en el plano  $y - z$ . · 28
- 4.3 Interfaz del software DynamicStudio 5.1, imagen obtenida de Aguilar-Campos, 2020. · 29
- 4.4 Representación gráfica del análisis de la técnica PIV, imagen obtenida de Aguilar-Campos, 2020. · 30
- 4.5 Modelo CAD de la configuración mostrando la posición y nomenclatura de las probetas. · 31

- 4.6 Haz ultrasónico transmitido a una partícula a diferentes tiempos (Signal-Processing, 2019) · 32
- 5.1 Componente  $\omega$  de la velocidad en  $z = 15 \times 10^{-3}$  m vs. tiempo para las  $\Delta T$  impuestas al agua. La zona sombreada corresponde al periodo característico donde se promedian resultados. · 36
- 5.2 Campos de velocidad e isconcontornos de vorticidad ( $W_x$ ) obtenidos de PIV para diferentes valores de  $\Delta T$ . Las líneas rojas representan las mediciones de perfiles promedio de velocidad tomadas por las probetas T1 y T2. · 37
- 5.3 Campos promedio de velocidad e isconcontornos de vorticidad ( $W_x$ ) obtenidos de la simulación para diferentes valores de  $\Delta T$ . · 38
- 5.4 Perfiles de velocidad promedio numéricos ( $\bar{\omega}_N$ ), medidos con T1 y extraídos de PIV para distintos valores de  $\Delta T$ . · 39
- 5.5 Perfiles de velocidad promedio numéricos ( $\bar{\omega}_N$ ), medidos con T2 y extraídos de PIV para distintos valores de  $\Delta T$ . · 40
- 5.6 Perfiles de velocidad promedio numéricos y medidos con T3 y T4 para distintos valores de  $\Delta T$ . · 41
- 5.7 Esquema representativo de la dirección del flujo para T3 y T4 en el plano  $x - y$ . · 42
- 5.8 Frecuencia característica para los flujos de agua y GaInSn como función de  $\Delta T$ . · 43
- 5.9 Componente  $\omega$  de la velocidad en  $z = -15 \times 10^{-3}$  m vs. tiempo para las  $\Delta T$  impuestas al GaInSn. La zona sombreada corresponde al periodo característico donde se promedian resultados. · 44
- 5.10 Perfiles de velocidad promedio numéricos y medidos con T1 para distintos valores de  $\Delta T$  en GaInSn. · 45
- 5.11 Perfiles de velocidad promedio numéricos y medidos con T2 para distintos valores de  $\Delta T$  en GaInSn. · 46
- 5.12 Esquema representativo de la dirección del flujo en el plano  $y - z$  de la cavidad. · 47
- 5.13 Perfiles de velocidad promedio numéricos y medidos con T3 para distintos valores de  $\Delta T$  en GaInSn. · 48
- 5.14 Perfiles de velocidad promedio numéricos y medidos con T4 para distintos valores de  $\Delta T$  en GaInSn. · 49
- 5.15 Para un flujo convectivo de GaInSn: a)  $Nu$  evaluado numéricamente en la tapa inferior de la cavidad vs. tiempo. b)  $Nu$  promedio vs. número de Rayleigh. · 50
- 5.16 Para un flujo convectivo de agua: a)  $Nu$  evaluado numéricamente en la tapa inferior de la cavidad vs. tiempo. b)  $Nu$  promedio vs. número de Rayleigh. · 52
- A.1 Configuración para determinar la velocidad del sonido en GaInSn. · 58
- A.2 Señal del eco para el GaInSn obtenida del software UDOP606. · 59



ÍNDICE DE CUADROS

- 1.1 Valores típicos del número de Prandtl para diversas sustancias a su temperatura de fusión  $T_f$  (cuando no se especifica, se supone que los fluidos están a temperatura de 20 °C. Tabla propia con información de Lappa (2010). · 6
- 2.1 Tabla de valores para los parámetros de los líquidos de trabajo. El electrolito se tomó a una concentración en masa de 10%.(Aguilar-Campos, 2020; Omar y col. 2020; Plevachuk y col. 2014) · 16
- 4.1 Nomenclatura de las probetas, su posición (con respecto a la base de la cavidad) y su plano de medición. · 31
- 4.2 Parámetros de operación usados para UDV. · 33
- 5.1 Frecuencia y periodo característicos para cada  $\Delta T$  del agua.  $\Delta t$  muestra el intervalo del tiempo donde se promedian resultados. · 36
- 5.2 Frecuencia y periodo característicos para cada  $\Delta T$  del GaInSn.  $\Delta t$  muestra el intervalo del tiempo donde se promedian resultados. · 43
- 5.3 Correlaciones para el Nusselt. Elaboración propia con información de Horanyi y col. 1999. · 50
- 5.4 Valores promedio de  $Nu$  para los distintos  $Ra$  y  $\Delta T$  para GaInSn. · 51
- 5.5 Valores promedio de  $Nu$  para los distintos  $Ra$  y  $\Delta T$  para agua. · 51
- A.1 Valores de  $h$  como función de la velocidad del sonido. · 59





# 1

## INTRODUCCIÓN

---

El sector energético en la actualidad está dominado por las fuentes no renovables de energía, las cuales han jugado un papel decisivo para el desarrollo económico de México por su clara influencia sobre todo en el aparato productivo del país. Siendo así que en el año de 2020 el 84.06 % de su plataforma energética estaba relacionada directamente con los hidrocarburos, de los cuales el 56.32 % provenían del petróleo (Secretaría de Energía, 2020). Si bien toda la sociedad requiere producir y consumir la energía para sus procesos productivos, es importante considerar que los patrones de producción y consumo de energía tienen incidencia en las transformaciones del medio ambiente.

En el mundo, las reservas de petróleo son cada vez menores, esto debido a sus altas tasas de extracción. El crecimiento económico y poblacional son dos de los principales factores que inciden en la creciente demanda del hidrocarburo (Hernández Colorado, 2012). En 2012 se obtuvieron datos sobre la relación reserva-producción de petróleo crudo. Se estima que bajo las mismas condiciones de explotación y producción, la demanda energética podría mantenerse por 52.9 años a nivel mundial; mientras que los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), (entre los cuales se encuentra México), contarían con solo 33.4 años de reserva suficiente para la producción de energía (Secretaría de Energía, 2013).

Además de la problemática de escasez y alta demanda de hidrocarburos, nos enfrentamos a la contaminación asociada a cada uno de los procesos de explotación, producción, refinación, distribución, almacenamiento y utilización de los mismos. Nunca antes en la historia de la humanidad se habían registrado índices tan altos de contaminación y tampoco había sido posible observar tantos efectos asociados al calentamiento global, esto va dirigido a las altas tasas de emisión de gases de efecto invernadero (GEI); en especial del CO<sub>2</sub>. Este gas de efecto invernadero se encuentra en concentraciones relativamente bajas en la atmósfera, aproximadamente un 0.0417 % (Gillespie, 2022). A pesar de sus bajos niveles, se trata del mayor impulsor del calentamiento global. Actualmente, existen cerca de 3 trillones de toneladas de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, un 27 % superior al nivel anterior a la Revolución Industrial. A finales del siglo XIX, los niveles eran de 280 partes por millón (ppm); ahora las concentraciones han rebasado niveles de 400 ppm, ver Figura 1.1. Las principales fuentes humanas de CO<sub>2</sub> proceden de la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) y de la

deforestación.

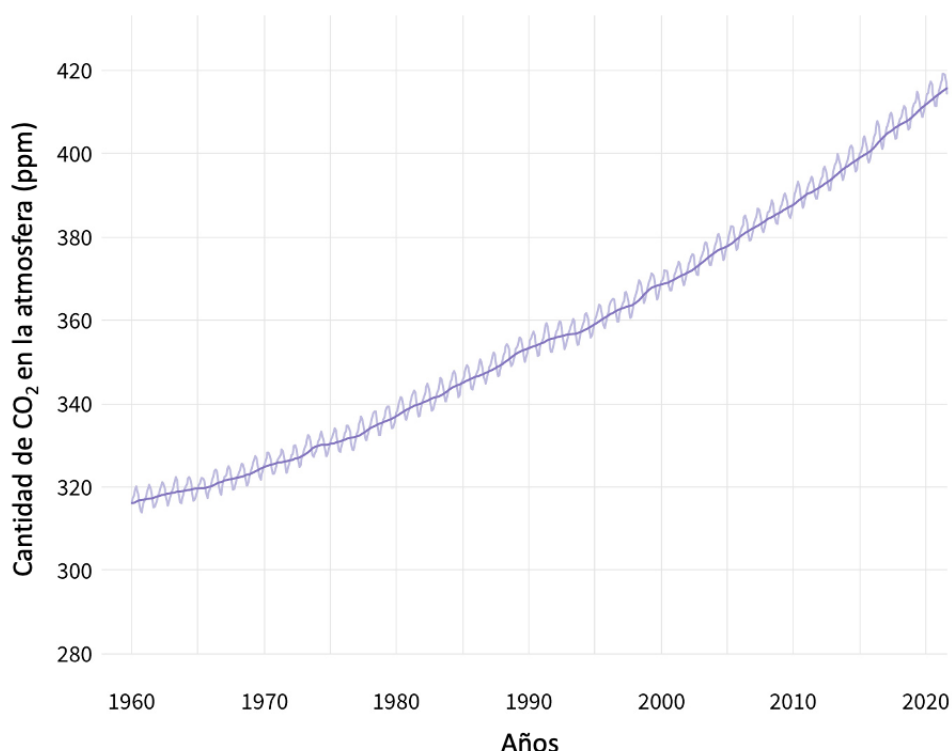


Figura 1.1: Mediciones medias mensuales de CO<sub>2</sub> desde 1960 en ppm. Imagen modificada de Climate.gov, 2020.

Algunos científicos advierten que si la cantidad que hay en la atmósfera supera las 450 ppm, la temperatura de la Tierra podría dispararse de manera descontrolada (OCEANA, 2020).

Una alternativa para la generación de energía eléctrica, es a través de las denominadas fuentes renovables de energía. Sin embargo, el proceso de innovación del modelo energético supone grandes desafíos en la reconversión científica, tecnológica e industrial de los países. Aun con estos desafíos, la demanda actual y desarrollo de las fuentes de energías renovables han sido relativamente rápidos debido a sus bajos costos de operación, largos periodos de vida, y su principal interés sobre la no emisión de GEI durante la generación a gran escala. Actualmente, las energías renovables contribuyen a la solvencia eléctrica mundial, siendo los principales exponentes de esta tecnología la energía geotérmica, hidroenergética, eólica y fotovoltaica (Secretaría de Energía, 2013).

Derivado de que estas fuentes de energías dependen de la radiación solar, el calor interior de la Tierra, la velocidad del viento, entre otras; la capacidad de almacenar grandes cantidades de electricidad y entregarla más tarde cuando se necesite será

---

fundamental. Dicho almacenamiento a gran escala también haría que la red eléctrica actual sea más robusta y eficiente, lo que permitiría a los operadores entregar suministros rápidos durante las interrupciones y satisfacer los picos de demanda temporales sin mantener una capacidad de generación adicional que es costosa y rara vez se usa.

Sin embargo, las tecnologías de almacenamiento de energía en la actualidad resultan insuficientes, ineficientes y con un costo económico bastante alto para su utilización a gran escala. Mientras que el problema de almacenamiento a pequeña escala ya ha sido superado de una manera eficiente, hoy en día es necesario invertir tiempo y recursos económicos en el almacenamiento a gran escala. En este escenario, el costo por unidad de energía almacenada y el alto número de ciclos de carga y descarga (desvanecimiento de baja capacidad) son los principales criterios para una tecnología exitosa.

Una de las tecnologías prometedoras para el almacenamiento de energía son las baterías de metal líquido (BML). Estas baterías son de gran interés en el grupo de trabajo, y son el tema del presente estudio. Las BML son baterías en las que tanto los electrodos como el electrolito se encuentran en estado líquido. Consideran el uso de materiales activos abundantes y baratos en celdas grandes, los costos totales previstos por unidad de energía almacenada son bajos y bastante competitivos (Stauffer, 2016).

Al igual que una batería convencional, una BML tiene electrodos superior e inferior con un electrolito entre ellos, ver Figura 1.2. Durante la carga y descarga, los iones metálicos cargados positivamente viajan de un electrodo al otro a través del electrolito, y los electrones hacen el mismo viaje a través de un circuito externo. El electrodo negativo, la capa superior de la batería, es un metal líquido de baja densidad que fácilmente dona electrones. El electrodo positivo, la capa inferior, es un metal líquido de alta densidad que acepta esos electrones. Y el electrolito, la capa intermedia, es una sal fundida que transfiere partículas cargadas, pero que no se mezcla con los materiales de arriba o de abajo. Debido a las diferencias de densidad y la inmiscibilidad de los tres materiales, estos se estratifican naturalmente en tres capas distintas y permanecen separadas mientras funciona la batería (Weier, 2021b).

Este novedoso enfoque ofrece una serie de ventajas. Dado que los componentes son líquidos, la transferencia de cargas eléctricas y constituyentes químicos dentro de cada componente y de uno a otro es rápida, lo que permite un mejor flujo de elevadas corrientes dentro y fuera de la batería. Durante la descarga, la capa superior de metal fundido se hace más fina y la inferior más gruesa. Cuando se carga, los espesores se invierten. Mientras que los electrodos sólidos son propensos a agrietarse (fallo mecánico) con el tiempo, los electrodos líquidos no se degradan con el uso. Cada vez que se carga una BML, los iones del metal superior que se han depositado en la capa inferior vuelven a la capa superior, purificando el electrolito en el proceso. Los tres componentes se reconstituyen. Además, como los componentes se autosegregan de forma natural, no se necesitan membranas ni separadores, que están sujetos a desgaste. Lo anterior permite una fabricación menos costosa, permitiendo además un número elevado de ciclos de carga/descarga con poco mantenimiento o servicio (Stauffer, 2016).

Resulta deseable para la fabricación que los materiales empleados para los electrodos sean baratos. Pero sobre todo que el material del electrodo superior sean un

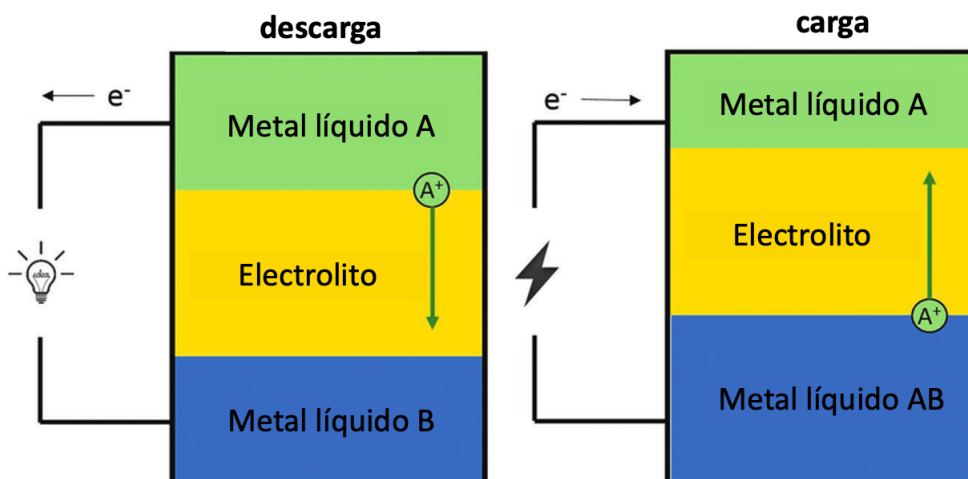


Figura 1.2: Esquema de una BML durante los procesos de descarga y carga. Figura modificada de Haomiao y col. (2016).

buen donante de electrones (litio, sodio, magnesio, potasio, calcio); mientras que, el electrodo inferior sea un buen aceptor (aluminio, galio, mercurio, bismuto). Además, resulta deseable que los materiales tengan un bajo punto de fusión. Actualmente, los desarrollos de BML funcionan a temperaturas superiores a  $240\text{ }^{\circ}\text{C}$  para mantener los electrodos metálicos en estado líquido, ver Figura 1.3. Estas temperaturas de trabajo conllevan a un gradiente de temperatura de alrededor de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo cual provoca el fenómeno de convección natural al interior generando un movimiento de los fluidos (Weier, 2021b). Adicionalmente, durante la carga o descarga, la corriente eléctrica genera disipación de Joule. Es importante mencionar que, la capa de electrolito tiene una la mayor resistencia eléctrica de las tres capas, provocando que el mayor calentamiento ocurra en esta región. De esta forma, el metal localizado al fondo se calienta desde la parte superior; mientras que, el de arriba se calienta por abajo, generándose un flujo convectivo en el electrodo superior.

En este trabajo estudiamos el fenómeno de convección natural tanto en agua como en un metal líquido a temperatura ambiente, como lo es la aleación eutéctica de galio, indio y estaño (GaInSn) con una concentración de Ga 68.5 %, In 21.5 % y Sn 10 % en peso. El fenómeno de convección natural en las BML es responsable de generar distintas inestabilidades de flujo en las BML. Además de otras como: la inestabilidad de Tayler, flujo electrovortex, convección termo-solutal e inestabilidades interfaciales. Las cuales pueden promover una mejor transferencia de masa en la celda, aumentando la eficiencia. Mientras que, por otro lado, un flujo demasiado intenso podría generar mezclado poniendo en duda el funcionamiento seguro de la celda (Weier, 2021a).

Es importante destacar que al tener componentes en estado líquido y gradientes de temperatura, el primer fenómeno a considerar dentro de las BML es la convección natural, resultado de la fuerza de flotación generada por diferencias de densidades de los fluidos. La convección natural también cobra relevancia en otras aplicaciones con

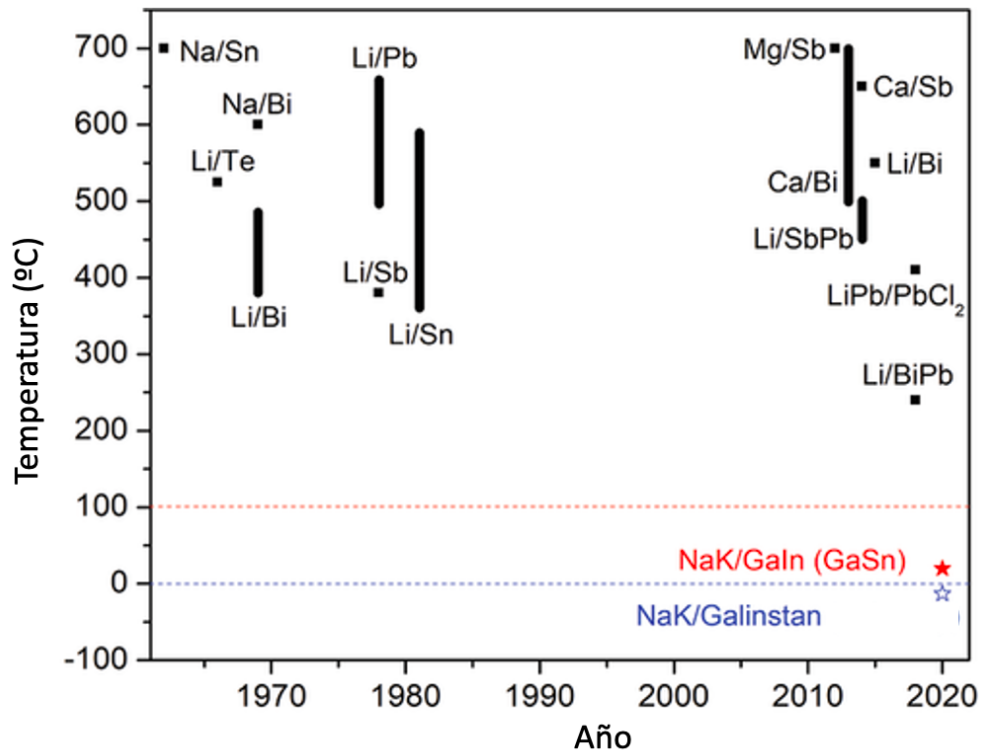


Figura 1.3: Temperatura de funcionamiento para diferentes BML. Imagen modificada de Ding y col. (2020).

fluidos conductores como la fundición y en el crecimiento de cristales (Riahi, 2002). En otras áreas de aplicación, una vez que hay fenómenos de convección, es importante reducir la pérdida de calor dentro del fluido de trabajo. Existen dos métodos principales para reducir estas pérdidas de calor por convección: (i) la optimización de la geometría (Karcher y col. 2002a); (ii) el control de la convección mediante un campo magnético aplicado de forma externa. El uso de campos magnéticos uniformes cobra relevancia, ya que pueden utilizarse para suprimir inestabilidades convectivas (Boyarevich y Gorbunov, 1988; Chandrasekhar, 1961; Fauve y col. 1981), para suprimir la turbulencia (Moffatt, 1967) y para amortiguar vórtices (Davidson, 1995). La supresión del movimiento convectivo y la transferencia de calor en un metal líquido ha sido estudiada por Li y col. (1999), reportando que los campos magnéticos débiles pueden incluso actuar en sentido contrario y aumentar la transferencia de calor por convección.

El estudio de la convección natural se establece en término de ciertos parámetros obtenidos de la adimensionalización de las ecuaciones conservativas (Sección 3.1), estos parámetros nos permiten saber el comportamiento del flujo y se listan a continuación:

1. **Número de Prandtl:** Se define como

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad (1.1)$$

siendo  $\nu$  la viscosidad cinemática, que a su vez se define como  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  ( $\mu$  es la viscosidad dinámica y  $\rho$  es la densidad del fluido) y  $\alpha$  es la difusividad térmica.

Este parámetro adimensional mide la importancia relativa del transporte a nivel molecular del momento (vía  $\nu$ ) y de la energía térmica (vía  $\alpha$ ). A menudo se considera un parámetro que resulta característico para el fluido considerado. Esta es la razón por la que se identifican los fluidos considerados con el  $Pr$  en lugar de proporcionar detalles (nomenclatura, composición, etc.) sobre la estructura química. La Tabla 1.1 presenta algunos valores típicos del número de Prandtl para diferentes sustancias.

Tipo	Fluido	$T_f$ (K)	$Pr$
<i>Metales líquidos</i>	Al	934	0.053
	Ga	303	0.0207
	Hg	300	0.025
	Sn	505	0.009
<i>Componentes semiconductores y aleaciones metálicas</i>	GaAs (Arseniuro de galio)	298.15	0.068
	InP (Fosfuro de indio)	298.15	0.015
	InSb (Antimoniuro de indio)	298.15	0.039
<i>Sales fundidas</i>	KCl	1043	1.16
	NaCl	1073	1.02
	LiCl	883	1.52
<i>Líquidos transparentes orgánicos e inorgánicos</i>	Ciclohexano	–	14.6
	Glicol etileno	–	159
	Vidrio fundido	1873	6750
	Acetona	–	4.3
	Agua	–	6.9
<i>Fluidos de interés geofísico</i>	Magma	–	$10^4$ - $10^8$
	Manto rocoso de la Tierra	–	$10^{23}$

Tabla 1.1: Valores típicos del número de Prandtl para diversas sustancias a su temperatura de fusión  $T_f$  (cuando no se especifica, se supone que los fluidos están a temperatura de 20 °C. Tabla propia con información de Lappa (2010).

2. **Número de Rayleigh:** es un número adimensional que representa la relación entre la flotabilidad y la difusividad térmica. Se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha}, \quad (1.2)$$

---

donde  $g$  es la aceleración debido a la gravedad,  $\beta$  es el coeficiente de expansión térmica,  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura característica y  $L$  es la longitud característica.

El número de Rayleigh es un índice que caracteriza la transferencia de calor en los fenómenos de convección natural. Por debajo del número crítico de Rayleigh, la convección no se produce y el calor se transfiere por conducción térmica. Por encima del número crítico de Rayleigh, el calor se transfiere por convección.

El número de Rayleigh también se puede expresar en la siguiente ecuación utilizando el número de Grashof ( $Gr$ ) y el número de Prandtl ( $Pr$ ).

$$Ra = Gr \cdot Pr. \quad (1.3)$$

3. **Número de Grashof:** se define como la relación entre la fuerza flotante y la viscosa que actúa sobre un fluido en la capa límite de velocidad. Se puede obtener mediante la ecuación

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2}. \quad (1.4)$$

Como se ha mencionado anteriormente, la convección natural es causada por un cambio en la densidad de un fluido debido a un cambio o gradiente de temperatura. Por lo general, la densidad disminuye debido a un aumento de la temperatura y hace que el fluido suba. Este movimiento es causado por la fuerza de flotación. La fuerza principal que resiste el movimiento es la fuerza viscosa. El número de Grashof es una forma de cuantificar estas fuerzas opuestas, es importante resaltar que, solo dos de los números  $Gr$ ,  $Ra$  y  $Pr$  son independientes.

4. **Número de Nusselt:** es el parámetro adimensional que caracteriza la transferencia de calor por convección. Se define como:

$$Nu = \frac{hL}{\lambda}, \quad (1.5)$$

donde  $\lambda$  es la conductividad térmica del fluido. El número de Nusselt es una medida de la relación entre la transferencia de calor por convección ( $h$ ) y la de por conducción ( $\lambda/L$ ).

En la literatura existen correlaciones reportadas para el  $Nu$  y en general están en función de  $Pr$  y  $Ra$  para fenómenos de convección libre.

En los fenómenos de convección, cuando la gravedad es opuesta a  $\Delta T$ ,  $g$  no tiene ningún efecto (no genera movimiento); cuando la gravedad es concurrente con  $\Delta T$  (fluido calentado desde abajo), entonces surgen distorsiones del campo termofluidodinámico (TFD) solo si se superan las condiciones críticas para el inicio de la convección; es decir, si el número de Rayleigh es mayor que un valor crítico  $Ra \geq Ra_{cr}$ , de modo



que se produce la inestabilidad. Por último, cuando la gravedad es ortogonal a  $\Delta T$  (el fluido se calienta lateralmente), surgen distorsiones TFD para cualquier valor de  $T$ . Su intensidad depende del número de Rayleigh. El inicio de la convección inducida por la gravedad para diferentes condiciones de calentamiento (desde el lado o desde abajo) y para varias configuraciones geométricas es un problema básico en muchos sistemas de transferencia de calor en aplicaciones técnicas y ha sido ampliamente investigado en la literatura.

A continuación listaremos algunas referencias con antecedentes importantes relacionados con esta investigación.

## 1.1. ANTECEDENTES

En el grupo de trabajo se tienen estudios relacionados a BML y que anteceden al aquí desarrollado. A continuación se mencionan los más importantes.

Núñez y Beltrán (2018) realizaron un estudio numérico sobre una cavidad cilíndrica sometida a convección natural, siendo calentada desde abajo y parcialmente enfriada desde arriba. Se obtuvieron transiciones de flujo estacionario de axisimétrico a no axisimétrico.

Para la interacción de campos electromagnéticos con fluidos conductores se tiene que, Aguilar-Campos (2020) estudió patrones de flujo de un electrolito confinado en una cavidad cúbica y agitado por una fuerza de Lorentz mediante la inyección de una corriente eléctrica en la dirección axial y su interacción con un campo magnético generado por un imán permanente. El estudio se realizó para un electrolito a base de agua y cloruro de potasio (KCl). Las mediciones de velocidad se realizaron con la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés) y otras con el equipo de velocimetría de ultrasonido por efecto Doppler (UDV, por sus siglas en inglés). Con base en los campos de velocidad fue posible evaluar un parámetro escalar relacionado con la energía cinética del flujo. Para ambas configuraciones de campo, la energía cinética aumentó como función de la corriente y la diferencia de potencial medida en terminales de la cavidad varió de forma no lineal con la corriente eléctrica.

En un estudio similar pero ahora usando GaInSn como fluido de trabajo, Aguilar-García y col. (2021) estudiaron el efecto del flujo magnetohidrodinámico (MHD) sobre la diferencia de potencial eléctrico medida en las tapas superior e inferior de una cavidad cúbica. El flujo también fue generado por la interacción de una corriente y un campo magnético. Se estudiaron flujos generados tanto por distribuciones de campo magnético uniforme como no uniforme. Mediciones de velocidad se realizaron con UDV y el estudio se complementó con simulaciones en el software COMSOL Multiphysics encontrando una buena concordancia entre las mediciones y las simulaciones para los campos magnéticos y de velocidad. En comparación con una configuración sin imanes, la diferencia de potencial eléctrico cuando se utiliza un campo no uniforme alcanza valores superiores. En cambio, para un campo uniforme los valores son menores; es decir, ciertas configuraciones de flujo presentes en las BML pueden ofrecer mayor o menor resistencia al paso de la corriente eléctrica durante los procesos de carga/descarga.

Acosta-Zamora y Beltrán (2022) estudiaron el flujo en un recipiente cilíndrico lleno de un electrolito e impulsado por una fuerza de Lorentz generada por la interacción de una corriente eléctrica directa y un campo magnético de un imán permanente. Se hizo un análisis sobre el campo de velocidad en un plano central orientado axialmente (obtenido mediante PIV) ante la variación de tres valores diferentes de corriente eléctrica; así como para dos distintas configuraciones de campo magnético. Se complementó el estudio con simulaciones numéricas 3D usando el software COMSOL Multiphysics. Las mediciones experimentales mostraron que, para un mismo campo magnético y cuando se aumenta la corriente eléctrica, mayor es la velocidad. El mismo compor-

tamiento se observa al dejar fijo el campo y corriente y se aumenta la conductividad eléctrica del electrolito. Obtuvieron un flujo más uniforme e intenso en el núcleo del flujo cuando se utiliza un imán cuadrado; en cambio, mencionan que algunas zonas de recirculación con velocidades menores corresponden al imán rectangular. Finalmente, mediante un análisis dimensional mostraron que los efectos de la corriente inducida pueden despreciarse y que el comportamiento del flujo está dominado por la difusión.

Fuera del grupo de trabajo, destacan los siguientes trabajos. Braunsfurth y col. (1997) realizaron un estudio numérico y experimental de flujos convectivos estables, usando galio líquido y calentándolo en un extremo y enfriándolo del otro. Aquí, se encontró que al aumentar el  $Gr$  los resultados mostraban un comportamiento divergente comparado con los números de Grashof bajos.

Más tarde, Burr y Müller (2002) estudiaron la influencia de un campo magnético vertical en la transferencia de calor integral en un fenómeno de convección de metal líquido confinado en una caja rectangular, así como también realizaron un análisis sobre la dinámica temporal de dicha transferencia de calor. Sus resultados mostraron que el transporte de calor convectivo significativo está prácticamente asociado al flujo dependiente del tiempo. Además, mencionan que el gradiente de temperatura provoca fluctuaciones en el campo de velocidad y estas fluctuaciones se ven amortiguadas ante la aplicación del campo magnético. En término de los parámetros definidos anteriormente, aquí se menciona que el campo magnético ejerce un efecto de amortiguación hasta números de Rayleigh críticos. También se encuentra que en casos de  $Pr$  muy pequeños (típicos para metales líquidos), la transición de la convección laminar a turbulenta se produce a través de una variedad de estados en una región de  $Ra$  justo por encima de las condiciones críticas.

Posteriormente, Karcher y col. (2002b) investigaron experimental y numéricamente la convección natural en un metal líquido calentado localmente y afectado por un campo magnético. En este caso, realizaron el estudio con una aleación líquida eutéctica de GaInSn. En sus resultados mostraron que, en ausencia de campo magnético, el número de Nusselt depende del número de Rayleigh. Y además mencionan que las pérdidas de calor por convección pueden disminuir en un 20 % aproximadamente cuando hay un campo magnético de intensidad moderada (0.1 T).

En la misma dirección, Kaneda y col. (2006) estudiaron experimental y numéricamente el efecto de una corriente eléctrica en la convección natural de un metal líquido bajo un campo magnético uniforme. La geometría cúbica se calienta y enfría desde las paredes verticales conductoras mientras se aplica un campo magnético horizontal. La corriente se aplicó mediante dos electrodos posicionados en el centro de las paredes laterales electro conductoras. Encontraron que, al aplicar solo el campo magnético, la convección natural se amortigua por la fuerza de Lorentz. Al aplicar tanto el campo magnético como la corriente externa, se muestra que el patrón de convección y la tasa de transferencia de calor de la pared caliente a la pared fría son diferentes en comparación al caso con únicamente el campo magnético. Además, mostraron que el campo magnético suprime la convección, pero su interacción con una corriente eléctrica produce una fuerza de Lorentz que modifica el patrón de flujo y a la tasa de transferencia de calor de la pared caliente a la pared fría, dependiendo de las

direcciones de corriente eléctrica y campo magnético.

Ozoe y Okada estudiaron experimental (Okada y Ozoe, 1992) y numéricamente (Ozoe y Okada, 1989) la convección natural 3D en una cavidad calentada diferencialmente. Los autores demostraron que un campo magnético perpendicular a las paredes calentadas es el más eficaz para suprimir la convección natural. Indicaron que un aumento del campo magnético inducía una intensificación de los flujos secundarios con una reducción del flujo principal. Burr y col. (2003) realizaron un estudio experimental de la convección natural de una mezcla eutéctica de sodio y potasio en una cavidad vertical en presencia de un campo magnético horizontal. Confirmaron que para el caso con campo magnético se presenta una fuerte supresión del flujo convectivo y la transferencia de calor se reduce a un modo puramente conductivo.

Para galio líquido confinado en un recipiente cilíndrico, Ribeiro y col. (2015) mostraron ejemplos de la convección impulsada térmicamente. Estudiando así el flujo aplicando un campo magnético y después en un sistema de rotación en ausencia del campo. Aquí encontraron que la transferencia de calor y las velocidades de flujo están amortiguadas magnéticamente para valores específicos de los parámetros del flujo.

Para estudios puramente numéricos donde se tienen campos magnéticos, destacan los siguientes estudios. Dulikravich y Colaco (2004) mostraron para cambios de fase y minimizar los efectos de convección natural utilizando una distribución de campos magnéticos a lo largo de las fronteras de un contenedor. Sus resultados indican patrones de flujo y campos térmicos diferentes al cambiar de fase. Además, al aplicar potenciales eléctricos variables en el espacio, el flujo se vuelve inestable. En los casos en los que el potencial eléctrico era constante a lo largo de determinadas paredes, no se producía convección. Kolsi y col. (2006) estudiaron la convección natural en una cavidad cúbica calentada diferencialmente y en presencia de un campo magnético externo ortogonal a las paredes isotérmicas con un fluido de trabajo con  $Pr=0.054$ . Además de los efectos de amortiguación y laminarización del campo magnético externo, observaron una organización del movimiento tridimensional central, reportando una representación de los fenómenos de fusión de los dos vórtices centrales. Ben Hadid y Henry (1997) analizaron la convección natural en una cavidad paralelepípedica para un fluido altamente conductor, con una distribución de temperatura dada y en presencia de un campo magnético externo. Este estudio demostró que la dirección y la intensidad del campo magnético tienen una importante influencia en la evolución del flujo. Piazza y Ciofalo (2002) presentaron un estudio sobre la magnetoconvección de una mezcla de plomo y litio con un campo magnético aplicado perpendicularmente al gradiente de temperatura. Demostraron que la presencia del campo magnético externo producía un flujo tridimensional complejo. También mencionaron que el aumento de la conductancia eléctrica de la pared resulta en un aumento de la supresión de la convección. Tagawa y Ozoe (1998) se interesaron por el efecto de la electroconductividad de las paredes en presencia de un campo magnético perpendicular (dirección  $x$ ) o paralelo (dirección  $y$ ) a las paredes calentadas. Los resultados muestran que, cuando el campo magnético está en la dirección  $x$ , la atenuación de la transferencia de calor es más importante, ya que la electroconductividad es fuerte. Si el campo magnético está en la dirección  $y$ , la transferencia de calor disminuye ligeramente para las paredes

aisladas y aumenta con el aumento de la electroconductividad.

Finalmente, los trabajos de Cheng y col. (2022a), Cheng y col. (2022b) motivaron parte del presente estudio. El primero de ellos (Cheng y col. 2022b), muestran un novedoso diseño para el estudio de la dinámica de fluidos en las BML, enfocándose en el estudio de gradientes de temperatura y flujo electrovortex (EVF, por sus siglas en inglés), aquí mantienen las superficies a una temperatura constante gracias a un intercambiador de calor, el cual consiste en tubos de cobre a través del cual hacen pasar un fluido a una temperatura deseada. Con este dispositivo experimental, que se muestra en la Figura 1.4 pudieron realizar un segundo estudio (Cheng y col. 2022a) sobre el efecto del cambio en la relación de aspecto usando números de Rayleigh en el rango similar a los mostrados en esta investigación.

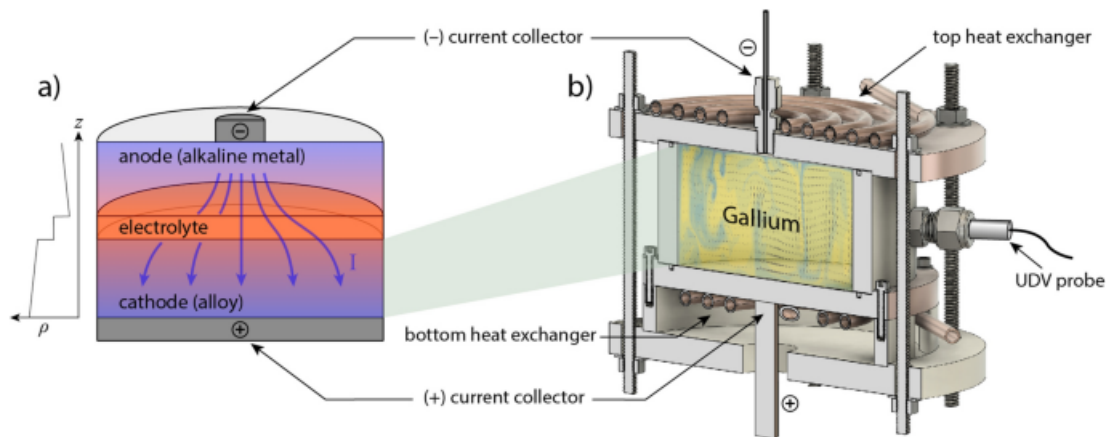


Figura 1.4: Configuración experimental para el estudio de convección natural con aplicación a las BML. Imagen modificada de Cheng y col. (2022b)

En el caso estudiado en esta tesis, el fluido se mantiene confinado en una cavidad cúbica en la que la placa inferior se mantiene a una temperatura más alta con respecto a la superior, mientras que las paredes laterales son consideradas aislantes. El fluido cercano a la placa inferior tendrá una temperatura más alta y, por tanto, una densidad más baja que el resto del fluido. La gravedad hace que el fluido más frío y pesado de la parte superior se hunda, pero a esto se opone la fuerza viscosa del fluido.

Para llevar a cabo el estudio se diseñó y construyó una configuración experimental con dimensiones y estructura similar a las reportadas en prototipos de BML, y que permite el análisis de los fenómenos de convección y flujos MHD de forma aislada y (relativamente) sencilla. En particular, se reportan mediciones experimentales de campos y perfiles de velocidad para el flujo convectivo de agua y se comparan con mediciones de perfiles para el flujo de una aleación de eutéctica de GaInSn. Para las mediciones se hace uso de técnicas como PIV y UDV. Adicionalmente, se reportan simulaciones numéricas 3D con el software comercial ANSYS-Fluent, obteniéndose una buena comparación entre resultados numéricos y experimentales. Tanto el diseño como las metodologías experimental y numérica permitirán en un futuro estudiar flujos convectivos en presencia de campos magnéticos.

## CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

---

En este capítulo se describe el dispositivo diseñado para el estudio del fenómeno de convección, así como su funcionamiento y algunas propiedades importantes de los fluidos de trabajo.

### 2.1. MODELO EXPERIMENTAL

Como se ha mencionado anteriormente, la principal motivación de este trabajo se enfoca en el desarrollo de BML. El desarrollo más reciente por parte de la empresa Ambri Inc. hace uso de una geometría cúbica (Amri, 2015). Adicionalmente, estudios previos del grupo de trabajo han hecho uso de dicha geometría para el estudio de distintos flujos MHD (Aguilar-Campos, 2020; Aguilar-García y col. 2021). La configuración consiste principalmente de una cavidad cúbica con un volumen interno de  $125 \text{ cm}^3$  en la cual las paredes laterales de 6 mm de espesor están fabricadas en acrílico con objetivo de poder observar el fluido inmerso en la cavidad, ver Figura 2.1.

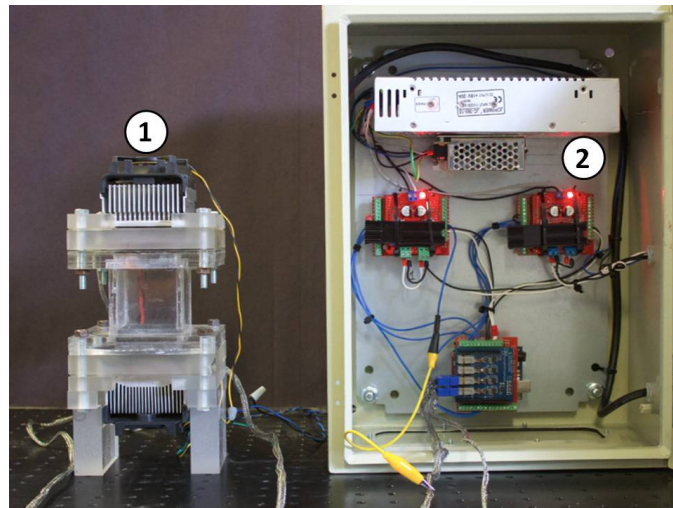


Figura 2.1: Configuración experimental: 1 cavidad cúbica. 2 circuitos del control de temperatura.

Aunque en el modelo CAD se consideró siempre una cavidad cúbica, por detalles en la manufactura al final hubo pequeñas variaciones en la altura de la cavidad. El

sistema de referencia se localiza en el centro la pared del fondo de la cavidad cúbica que confina al fluido, de tal forma que la altura alcanzada por el fluido es de  $H$  en la dirección  $y$ . En las direcciones  $x$  y  $z$  el dominio del fluido se encuentra acotado de  $-L/2$  a  $+L/2$  para ambas direcciones. Se tienen valores de  $H = 4,8$  cm y  $L = 5,1$  cm.

Para facilitar el sellado de la cavidad por arriba y abajo, la configuración cuenta con dos bases y dos tapas de acrílico de 15 mm de espesor; las cuales permiten colocar dos electrodos de cobre como tapas superior e inferior. Cada una de las caras externas de los electrodos se tienen termoeléctricos para lograr elevar la temperatura, también se tienen disipadores de calor de aluminio y sobre ellos ventiladores que permiten enfriar el electrodo una vez alcanzada la temperatura deseada. Toda la configuración anteriormente descrita se muestra en la Figura 2.2.

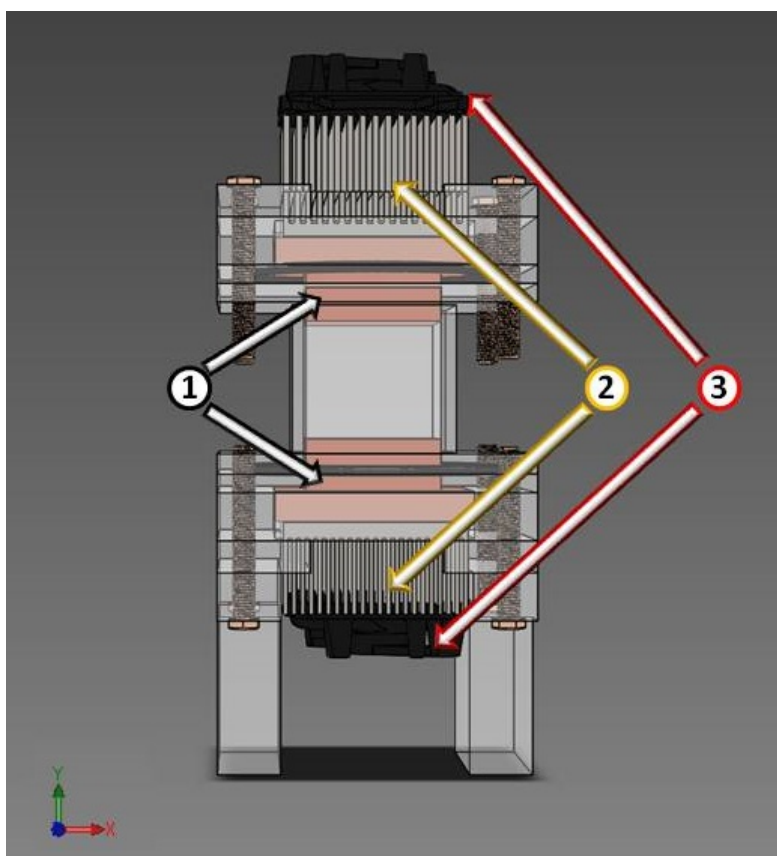


Figura 2.2: Modelo CAD de la cavidad con sus componentes: 1 electrodos de cobre. 2 disipadores de aluminio. 3 ventiladores.

Como ya se mencionó, en la interfase entre los electrodos y los disipadores se encuentra un termoeléctrico, cada uno de ellos se conecta al circuito del sistema de control de temperatura. Este sistema se controla con una PC a través un código escrito en el lenguaje de programación Python, el cual nos permite:

1. Establecer conexión con el circuito.

2. Definir la diferencia de temperatura.
3. Medir en tiempo real la temperatura en las caras superior e inferior, así como la temperatura ambiente.
4. Observar posibles errores en la conexión del circuito.
5. Guardar las mediciones.

En general, la configuración permite mantener las superficies superior e inferior de los electrodos (en contacto con el fluido) a una temperatura constante mediante la siguiente rutina de control. Cuando la temperatura supera un valor deseado, los ventiladores se encienden para disminuir la temperatura (enfriar), en caso de que la temperatura descienda por debajo del valor deseado los termoelectricos se activan incrementando la temperatura. En la Figura 2.3a se muestran los datos obtenidos con el sistema de control para un  $\Delta T=8$  K. TE1 representa al termoelectrico que regula la temperatura en la cara inferior de la cavidad; mientras que TE2 es para el termoelectrico localizado en la tapa superior.  $T_a$  se refiere a la temperatura ambiente. Como se puede observar en la Figura 2.3b, los termoelectricos alcanzan una temperatura establecida después de aproximadamente 30 s, con una desviación estándar de  $\pm 0.5$  K.

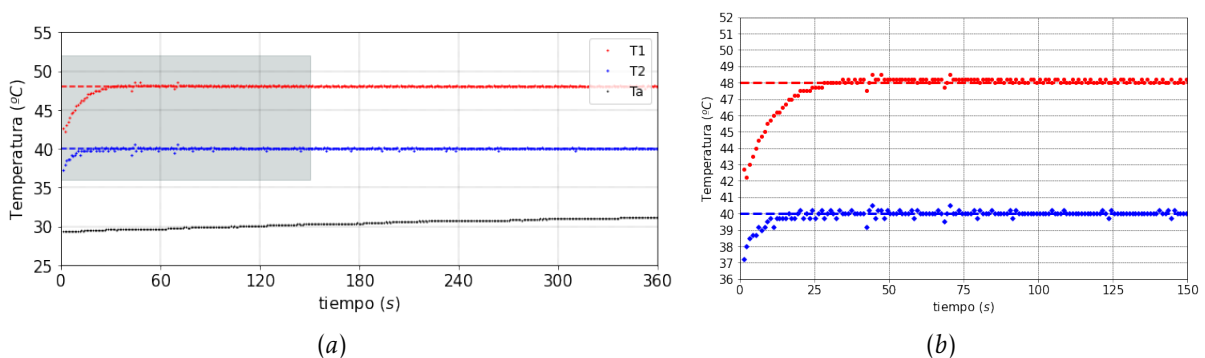


Figura 2.3: a) Mediciones del sistema de control de temperatura para  $\Delta T=8$  K. b) Acercamiento a la zona sombreada.

## 2.2. PROPIEDADES GAlNSn

Los líquidos conductores tienen aplicación en una amplia variedad de campos, tales como sistemas de calefacción y enfriamiento, o en dispositivos como termómetros o barómetros (especialmente los metales líquidos). Para nuestro caso de estudio se sabe que las aleaciones basadas en Galio muestran puntos de fusión bajos, lo cual los hace atractivos para muchas aplicaciones (Prokhorenko y col. 2000).

Debido a su estado líquido a temperatura ambiente y a su baja toxicidad y reactividad, el GaInSn es a menudo usado o considerado un sustituto del Mercurio (ya que este último si es considerado tóxico) (Geraberger, 2000). El GaInSn tiene propiedades que



le han permitido jugar un papel importante como fluido de trabajo en experimentos de modelado de varios procesos que involucran metales líquidos en el campo industrial desde los años 80. Siendo algunos la metalurgia, fundición, crecimiento de cristales, ingeniería de procesamiento de energía o magnetohidrodinámica (Chatterjee y col. 2021).

Propiedad	Agua desionizada	KCl	GaInSn
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	997.1	1.063	6.44
$\mu$ [mPa·s]	0.894	0.988	2.4
$\lambda$ [W/m K]	0.607	0.646	31
$C_p$ [J/kgK]	4181	39.06	370
$\beta$ [1/K]	$2.1 \times 10^{-6}$	$4.5 \times 10^{-6}$	$1.17 \times 10^{-4}$
$\sigma$ [S/cm]	$5.5 \times 10^{-10}$	0.150	$3.46 \times 10^4$
$Pr$	6.157	0.0597	0.0239

Tabla 2.1: Tabla de valores para los parámetros de los líquidos de trabajo. El electrolito se tomó a una concentración en masa de 10%. (Aguilar-Campos, 2020; Omar y col. 2020; Plevachuk y col. 2014)

Para el estudio de fenómenos de convección es muy importante saber las propiedades de los fluidos de trabajo. Aparte de los metales líquidos, otros líquidos conductores (como los electrolitos) tienen aplicación en varios campos. Por ejemplo, en las BML el electrolito que separa al cátodo y ánodo representa el fluido con la mayor resistividad, por lo que es en esta región donde se presenta la mayor disipación de energía debido al calentamiento por efecto Joule (Xiang y Zikanov, 2019). Algunos electrolitos con los que el grupo de trabajo tiene experiencia, son basados en agua y sales de  $KCl$  y  $NaHCO_3$ . En la Tabla 2.1 se muestran algunas de las propiedades de estos electrolitos a temperatura ambiente. Para su comparación, también se incluyen las propiedades de agua desionizada y GaInSn.

El estudio de las propiedades del GaInSn cobra relevancia en nuestro estudio dado que las propiedades cambian con la temperatura. En particular, del trabajo de Plevachuk y col. (2014) se reportan las siguientes propiedades: conductividad eléctrica ( $\sigma$ ), densidad ( $\rho$ ), conductividad térmica ( $\lambda$ ) y viscosidad ( $\mu$ ); los resultados se muestran más adelante.

### 2.2.1. Conductividad eléctrica

Existe un número limitado de investigaciones relacionadas con estudios de esta propiedad para el GaInSn. Sin embargo, Plevachuk y col. (2014) logró realizar un estudio dentro de los valores de la temperatura de fusión  $T_f=283.7$  K y hasta 700 K. Ajustando los datos experimentales con una función parabólica, que expresa la dependencia de la conductividad eléctrica en función de la temperatura:

$$\sigma(T) = \sigma_0 - 49,8(T - T_m) + 0,0476(T - T_m)^2, \quad (2.1)$$

donde  $\sigma_0=33170 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  es la conductividad eléctrica a la temperatura de fusión ( $T_f$ ).

Variaciones de los valores reportados en la literatura, se pueden deber a factores como el método de medición y/o impurezas o contaminantes presentes en la aleación. La Figura 2.4 muestra el comportamiento de la ecuación (2.1).

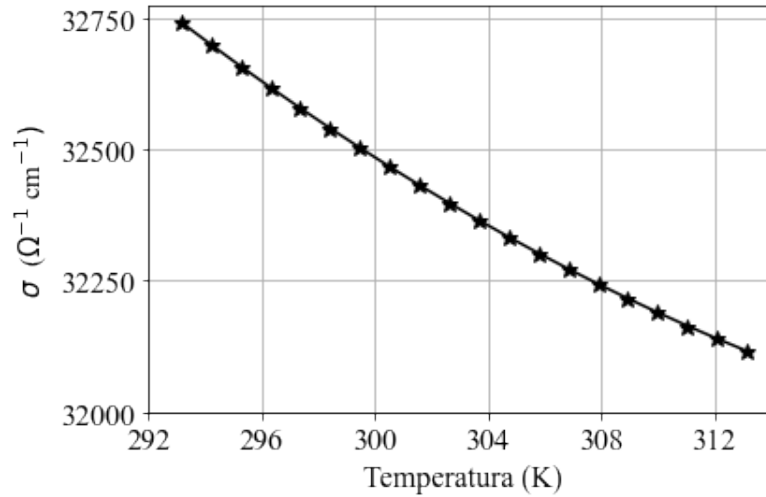


Figura 2.4: Conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) en función de la temperatura.

### 2.2.2. Densidad

Investigaciones sobre la densidad como función de la temperatura para metales líquidos y otras aleaciones muestran un comportamiento lineal (Guthrie y Iida, 1994). Para el GaInSn, se puede describir la siguiente ecuación para la densidad:

$$\rho = \rho_0 + \frac{d\rho}{dT}(T - T_m), \quad (2.2)$$

donde  $\rho_0=6.58 \text{ g cm}^{-3}$  es la densidad a la temperatura de fusión  $T_f$  y  $\frac{d\rho}{dT}=-7.76 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-3} \text{ K}^{-1}$  es el coeficiente de temperatura de la densidad.

El modelo de densidad en función de la temperatura se ajusta a los datos mostrados en la literatura, tal como se muestra en la Figura 2.5. Las variaciones en los valores de densidad se tribuyen a la fuerte capacidad del galio a ser oxidado y sobre el cual existen varios estudios (Crawley, 1974; Guthrie y Iida, 1994).

### 2.2.3. Conductividad térmica

Plevachuk y col. (2014) reporta un polinomio de segundo orden que describe el comportamiento de la conductividad térmica como función de la temperatura ( $\lambda(T)$ ):

$$\lambda(T) = \lambda_0 + 0,0614(T - T_m) + 4,9 \times 10^{-5}(T - T_m)^2, \quad (2.3)$$

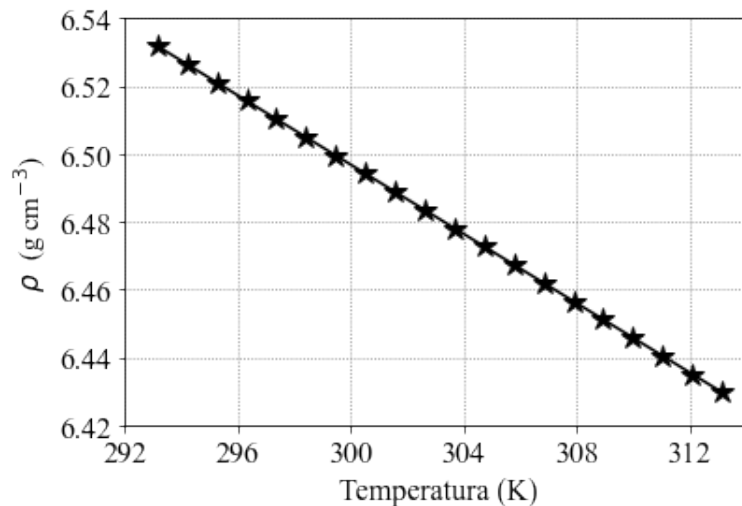


Figura 2.5: Densidad del GaInSn como función de la temperatura (Guthrie y Iida, 1994).

donde  $\lambda_0=23.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  es la conductividad térmica para la temperatura de fusión.

El cambio de la conductividad térmica con un cambio de temperatura muestra un comportamiento lineal desde la temperatura de fusión hasta aproximadamente 315 K (ver Figura 2.6).

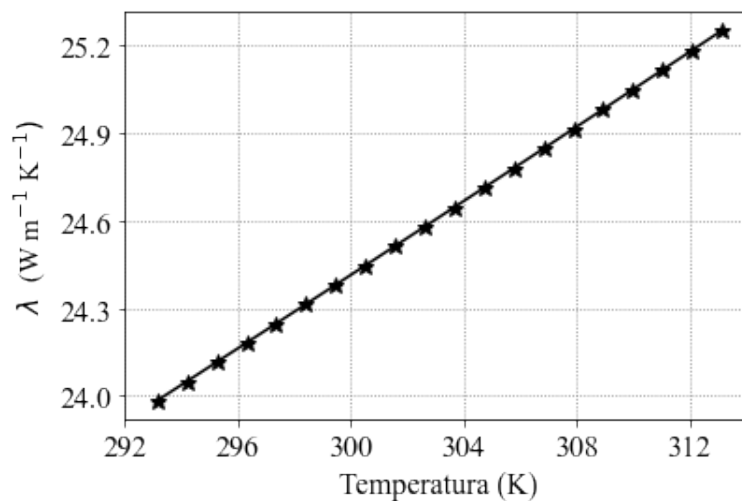


Figura 2.6: Conductividad térmica en función de la temperatura.

#### 2.2.4. Viscosidad

El GaInSn ha mostrado que puede ser tratado como un líquido Newtoniano Elton y col. 2020. Gracias a esto, Plevachuk y col. (2014) realizó pruebas de viscosidad para GaInSn en un rango de temperaturas desde la temperatura de fusión hasta 700 K en pasos de 5 a 10 K. Logrando resultados reproducibles y describiendo la dependencia

de la temperatura como:

$$\nu(T) = \nu_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right), \quad (2.4)$$

donde  $R=8.3144 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$  es la constante de los gases,  $T$  es la temperatura absoluta,  $\nu_0=0.4352 \text{ mPas}$  y  $E=3904 \text{ J mol}^{-1}$  es un parámetro de ajuste.

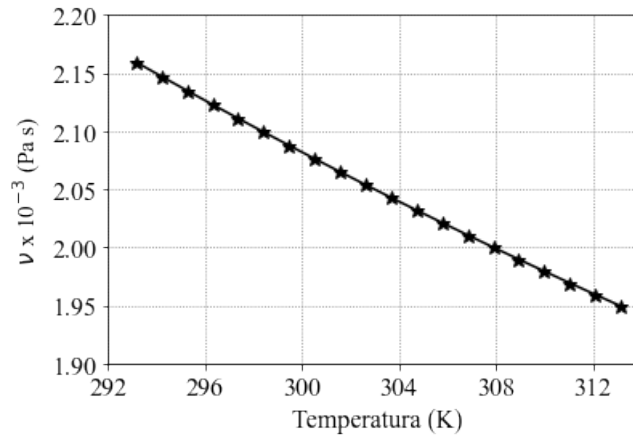


Figura 2.7: Viscosidad en función de la temperatura.

Dado que las ecuaciones de conservación que rigen el comportamiento de la convección natural involucran el conocimiento de propiedades de transporte, el determinar valores o expresiones para ellas como función de la temperatura es fundamental para el estudio numérico presentado en el siguiente capítulo.



# 3

## MODELO MATEMÁTICO

---

El estudio de fenómenos de transporte en BML involucra diversas ramas de la ciencia como la electroquímica, magnetohidrodinámica y la transferencia de calor, entre otras. Sin embargo, en este trabajo enfocado solo en la convección natural, el estudio es posible a través de las ecuaciones de: masa, cantidad de movimiento lineal y energía; además de una ecuación de estado para la densidad. Si bien hay varias notaciones para representar estas ecuaciones, en este trabajo se usará la notación diferencial en tensores cartesianos, con sumatoria convencional y notación vectorial.

Para la solución numérica de las ecuaciones se utilizó el software comercial ANSYS Fluent. Este software proporciona capacidades de modelado y simulación para una amplia gama de problemas de flujo de fluidos incompresibles, compresibles, laminares y turbulentos. Permite realizar análisis en el estadio estacionario o transitorio. Incluye además una amplia gama de modelos matemáticos para fenómenos de transporte, tales como transferencia de calor y reacciones químicas, con la capacidad de modelar geometrías complejas. Dentro del campo de aplicación del software se tienen flujos laminares no newtonianos en equipos, transferencia de calor en maquinaria y componentes de motores, así como fenómenos de combustión y aerodinámica, entre otros. También incluye modelos para propiedades de transporte de distintos fluidos como el agua y tiene la facilidad de permitir implementar modelos para otros fluidos como el GaInSn. En particular, las propiedades reportadas en el capítulo anterior para el GaInSn fueron implementadas en el software mediante funciones definidas por el usuario (UDF, por sus siglas en inglés); mientras que, para el agua, se usaron las propiedades ya incluidas en el software.

A continuación se presentarán las ecuaciones que resuelve el software para la convección natural, así como una aproximación útil en la solución de las ecuaciones, la descripción de las condiciones de frontera establecidas en la configuración y el mallado computacional de la geometría.

### 3.1. ECUACIONES DE DINÁMICA DE FLUIDOS

Para iniciar con la descripción de las ecuaciones, debemos considerar un fluido cuya densidad ( $\rho$ ) es una función de la posición  $\vec{r} = (x_k)$ ,  $k = 1, 2, 3$ , además, los componentes del vector de la velocidad del fluido  $\vec{u} = (u_k)$ ,  $k = 1, 2, 3$  también son

función de la posición. Además, el fluido se encuentra a una presión  $P$  y temperatura  $T$ .

La ecuación de conservación de masa (o continuidad) queda de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) = 0, \quad (3.1)$$

donde  $\rho$  es la densidad,  $t$  es el tiempo y  $x_k$  es el vector de posición.

Para fluidos incompresibles y homogéneos, las variaciones en la densidad se consideran despreciables. Entonces para este tipo de fluidos la ecuación se reduce a la expresión:

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0. \quad (3.2)$$

La ecuación de conservación de movimiento se escribe como:

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right) + \rho f_j, \quad (3.3)$$

donde  $\vec{u}_j$  es la velocidad del flujo en la dirección  $j$  y  $f_j$  es el componente de cualquier fuerza externa que pueda actuar sobre el fluido.

La ecuación que expresa la ley de la conservación de la energía se escribe como:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(C_p T) + \rho u_k \frac{\partial}{\partial x_k}(C_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right), \quad (3.4)$$

donde  $C_p$  es el coeficiente de calor a presión constante y  $\lambda$  es el coeficiente de conductividad térmica.

### 3.1.1. Aproximación de Boussinesq

Consiste en dejar de lado cualquier variación de la temperatura generada por efecto de la variación en las propiedades del fluido (viscosidad cinemática, difusividad térmica, coeficiente de expansión de volumen). Esta aproximación puede ser utilizada cuando la diferencia en la densidad se considera constante, excepto en el término de fuerzas de cuerpo en la ecuación de conservación de movimiento. Con el uso de la aproximación de Boussinesq, resolvemos un flujo compresible como si se tratara de uno incompresible (Núñez, 2012).

En esta aproximación, el último término en la ecuación es de primera importancia, ya que representa la fuerza causante del movimiento del fluido. Cuando la gravedad es la única fuerza significativa, la ecuación de movimiento en forma vectorial se expresa como:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{\nabla P}{\rho_0} + \nu \nabla^2 \vec{u} + \left( 1 + \frac{\partial \rho}{\partial \rho_0} \vec{g} \right), \quad (3.5)$$

tomando  $\vec{g} = -g \hat{e}_y$ , donde  $\hat{e}_y$  es un vector unitario actuando en la dirección  $y$  positiva, asumiendo que la gravedad actúa en la dirección  $y$  negativa.

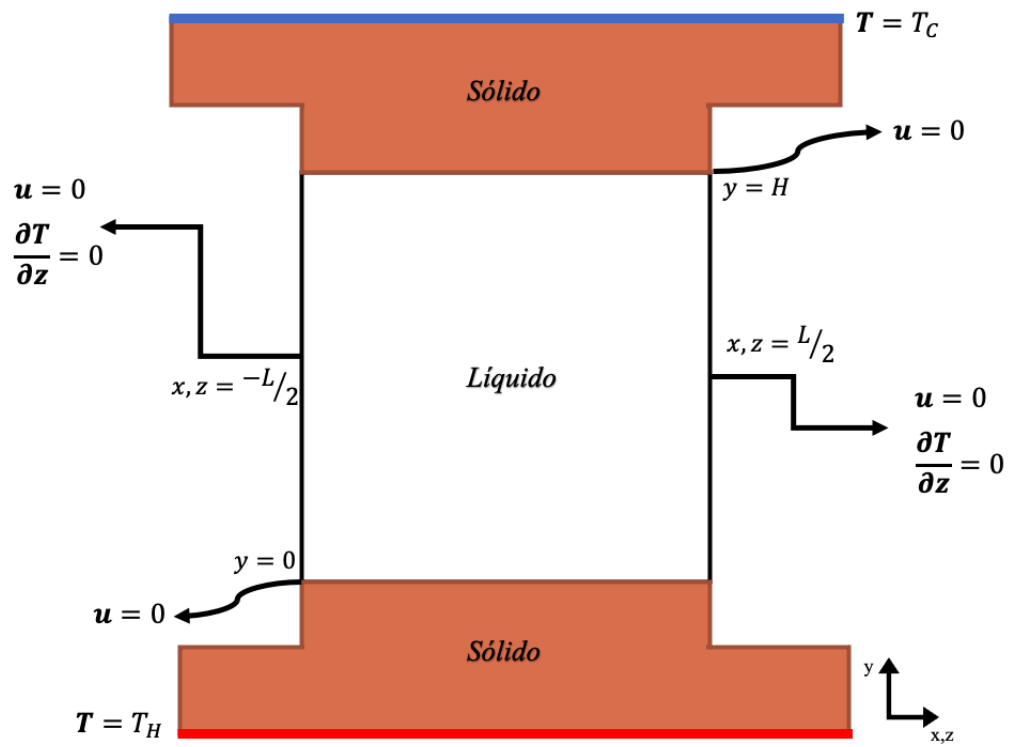


Figura 3.1: Condiciones de frontera usadas en la simulación.



En la convección térmica, la variación de la densidad es causada por variaciones en la temperatura del fluido. La densidad es expresada, en términos de la temperatura, por medio de la ecuación de estado

$$\partial\rho = -\beta(T - T_0), \quad (3.6)$$

donde  $\beta$  es el coeficiente de expansión térmica y  $T_0$  es la temperatura media del fluido cuando se encuentra en equilibrio. Sustituyendo la ecuación 3.6 en la ecuación 3.5, se obtiene:

$$\frac{\partial\vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = -\frac{\nabla P}{\rho_0} + \nu\nabla^2\vec{u} + \beta g(T - T_0)\hat{e}_y, \quad (3.7)$$

donde el último término del lado derecho corresponde a la fuerza de flotación.

### 3.2. CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA

La solución de las ecuaciones de conservación anteriormente descritas, involucra el uso de condiciones iniciales y de frontera. En particular, como condición inicial se consideró el fluido en reposo (velocidad cero) y con una temperatura igual a la ambiente.

Las condiciones de frontera usadas son de no deslizamiento para la velocidad:

$$\vec{u} = (0, 0, 0). \quad (3.8)$$

Mientras que, se supone una temperatura constante,  $T_C$ , para la pared superior (temperatura fría) y  $T_H$  para la inferior (temperatura caliente). El resto de las paredes se consideran adiabáticas (flujo de calor cero). Dichas condiciones se muestran en la Figura 3.1.

Una vez definidas las condiciones iniciales y de frontera es necesario construir una malla computacional para los dominios de fluido y sólidos (electrodos de cobre).

### 3.3. MALLADO COMPUTACIONAL

El mallado es uno de los pasos más importantes para realizar una simulación precisa. Una malla se compone de elementos que contienen nodos (ubicaciones de coordenadas en el espacio que pueden variar según el tipo de elemento) que representan la forma de la geometría. Decidir el método de malla que se usa generalmente depende de qué tipo de análisis o física que se está resolviendo y el nivel de precisión que se desea lograr. Es importante prestar especial atención a la malla, ya que si es de buena calidad dará resultados más precisos. Una mala calidad tiene como consecuencia problemas de convergencia en la solución, lo que puede conducir a resultados incorrectos y conclusiones falsas.

La geometría a simular incluye tanto los electrodos de cobre como la zona de fluido, por lo que es necesario mallar ambas regiones, poniendo especial énfasis en hacer refinamientos de la malla cerca de las paredes sólido-fluido para una correcta solución de capas límites (hidrodinámicas y térmicas). La malla completa se muestra en la

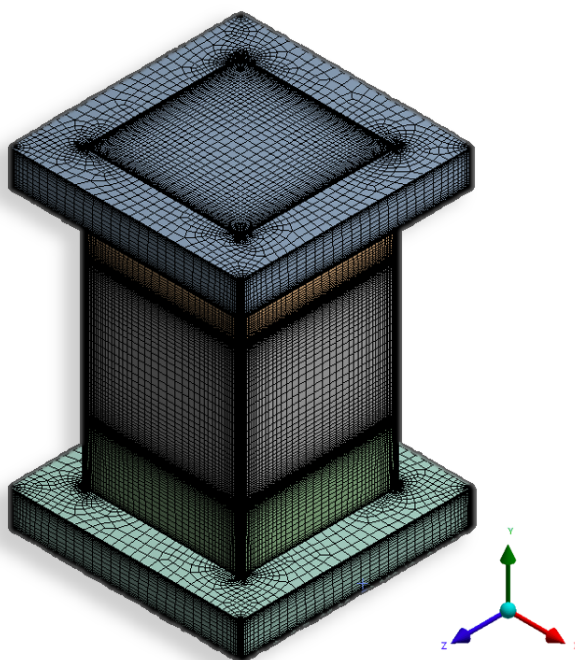


Figura 3.2: Geometría del mallado computacional para la zona de fluido y electrodos de cobre.

Figura 3.2 y corresponde a una no uniforme de tipo hexaédrica dominante, con un total de 575588 elementos de tamaño (máximo) de  $3.077 \times 10^{-3}$  m.

Como primer caso a simular se consideró el agua como fluido de trabajo. Se usaron propiedades ya definidas en el software con un tiempo de simulación de 6 minutos y paso en tiempo de  $dt = 0.32$  s, para todas las simulaciones. Se corrieron simulaciones para diferencias de temperatura de  $\Delta T = 2, 4, 6$  y 8 K.

Es importante mencionar que para  $\Delta T = 2$  K, y al igual que para las mediciones experimentales, se despreciaron los primeros 6 min de las simulaciones, considerando solamente el flujo dependiente con una duración de otros 6 min. Tiempo considerado para todas las simulaciones. Los resultados para esta primer diferencia de temperatura fueron usados como condición inicial para la simulación de  $\Delta T = 4$  K, la misma metodología fue usada para los siguientes valores de  $\Delta T$ .

Para las simulaciones con GaInSn como fluido de trabajo, se hizo uso de las expresiones reportadas previamente para las propiedades de transporte como función de la temperatura. Se usó la misma malla y demás parámetros numéricos, ajustando únicamente  $\Delta T$ . Una de las ventajas de las simulaciones es la capacidad de determinar valores de los distintos campos en cualquier región de la geometría. Es importante mencionar que de las simulaciones es posible obtener información de la temperatura, presión y velocidad; sin embargo en este primer trabajo y con objeto de validar las simulaciones con resultados experimentales, se extrajeron campos y perfiles de

velocidad para comparar con los obtenidos de PIV y UDV. Adicionalmente, para cada  $\Delta T$  fue posible evaluar en número de  $Nu$  en la pared inferior como función del tiempo. Comparaciones de resultados numéricos y experimentales se muestran en los siguientes capítulos.

## METODOLOGÍA NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL

---

En este capítulo se describe a detalle la metodología seguida para llevar a cabo las mediciones experimentales que permiten determinar el comportamiento del flujo en la cavidad. Así como la descripción de las técnicas de medición.

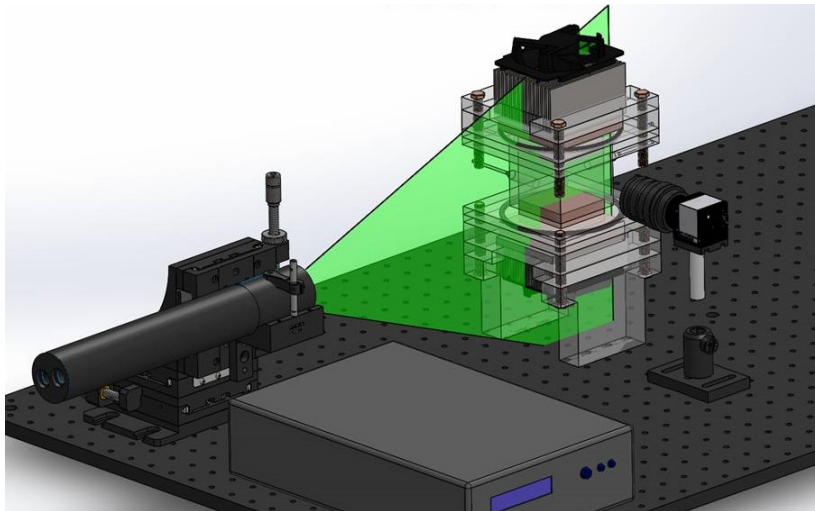


Figura 4.1: Modelo CAD del montaje experimental para la técnica PIV.

### 4.1. VELOCIDAD DEL FLUJO CONVECTIVO

Con objeto de verificar la ausencia de fugas en la cavidad, esta fue llenada primeramente con agua. También para verificar el correcto funcionamiento del sistema de control electrónico se procedió a realizar pruebas para fijar diferencias de temperatura de 2, 4, 6 y 8 K. Una vez corroborada la ausencia de fugas y la aparición de un flujo para todos los casos, se procedió a comparar dos técnicas de medición experimentales con las que se cuenta en el laboratorio de ahorro y almacenamiento de energía. Para cada diferencia de temperatura y de forma simultánea se realizaron mediciones PIV en dos dimensiones (2D) y perfiles de velocidad (1D) con un equipo UDV.

#### 4.1.1. Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV)

Para el caso de la técnica óptica PIV se tomó ventaja del carácter translúcido del agua. La Figura 4.1 muestra la implementación de la técnica PIV en 2D.

El plano central axial  $y-z$  es iluminado por un láser continuo marca Z-laser, modelo ZM18GF029 de 0.75 mm de espesor y longitud de onda de 532 nm, correspondiente al color verde, el cual fue localizado al costado izquierdo de la cavidad a una distancia de 20 cm y una altura de 10 cm de la mesa óptica a la que estaba fijado en un soporte. Para la adquisición de imágenes, se colocó una cámara monocromática digital de marca The Imaging Source, modelo DMK 23U618, de alta resolución espacial VGA ( $640 \times 480$  píxeles) con sensor integrado CCD Sony (H:  $5.6 \mu\text{m}$ , V:  $5.6 \mu\text{m}$ ) que obtiene en promedio 120 fps. A fin de obtener un mejor enfoque se adapta un lente óptico Pentax, modelo C31630KP con una distancia focal de 16 mm. Se usaron 0.02 g de partículas de poliamida con un diámetro promedio de  $30 \mu\text{m}$  como partículas trazadoras. Una vez encendido el control de la temperatura, se dejaron transcurrir 6 minutos antes de empezar con las mediciones.

Con la cámara controlada por el software IC Capture 2.4 se adquirieron imágenes para un tiempo de 12 minutos a una tasa de 30 fps, un ejemplo de imagen se muestra en la Figura 4.2.

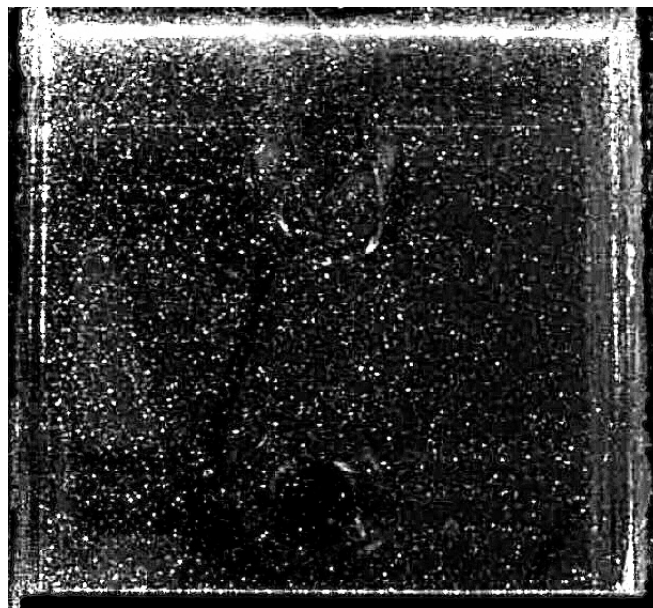


Figura 4.2: Imagen de partículas iluminadas en el plano  $y-z$ .

Posteriormente, las imágenes son posprocesadas con el software DynamicStudio 5.1 para la obtención de campos de velocidad a partir de una correlación cruzada de pares de imágenes. En la técnica PIV, cada par de imágenes capturadas se divide en un conjunto de celdas pequeñas que se conocen como áreas de interrogación. La velocidad se calcula comparando las posiciones de las partículas en dos imágenes consecutivas en un tiempo determinado. Con base en estudios previos del grupo de investigación

realizados en configuraciones experimentales relacionadas, se seleccionaron áreas de interrogación de  $32 \times 32$  píxeles con superposición de áreas de 50 % y de opciones de filtrado de vectores espurios. La Figura 4.3 muestra una de las pantallas del software DynamicStudio 5.1 donde se configuran ciertos parámetros.

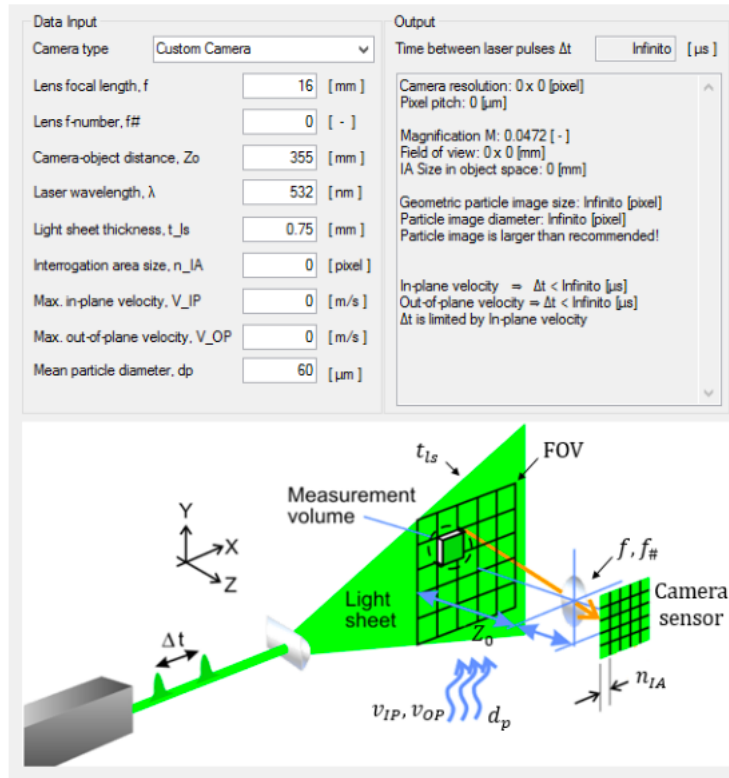


Figura 4.3: Interfaz del software DynamicStudio 5.1, imagen obtenida de Aguilar-Campos, 2020.

En la pestaña Field of View ubicada en la parte de *New Calibration* se colocan las medidas de ancho y alto de la cara a observar, 73.33 y 55 mm, respectivamente, obteniendo un factor de escala del campo de visión de  $20.46^\circ$ . En general, la Figura 4.4 muestra una representación de los pasos a seguir con la técnica PIV.

Finalmente, como resultado de los análisis se obtienen campos de velocidad en 2D para todo el tiempo de la prueba. A partir de ellos es posible obtener perfiles de velocidad a lo largo de distintos puntos.

#### 4.2. VELOCIMETRÍA DE ULTRASONIDO POR EFECTO DOPPLER (UDV)

Otra técnica de medición usada para el estudio experimental tanto en flujos de fluidos translúcidos como opacos es la UDV. Esta técnica de medición se usa hace más de 30 años, teniendo su mayor campo de aplicación en el campo de la medicina; sin embargo, en años más recientes ha sido de utilidad en la mecánica de fluidos, debido a que presenta ciertas ventajas sobre otras técnicas de medición de velocidad.

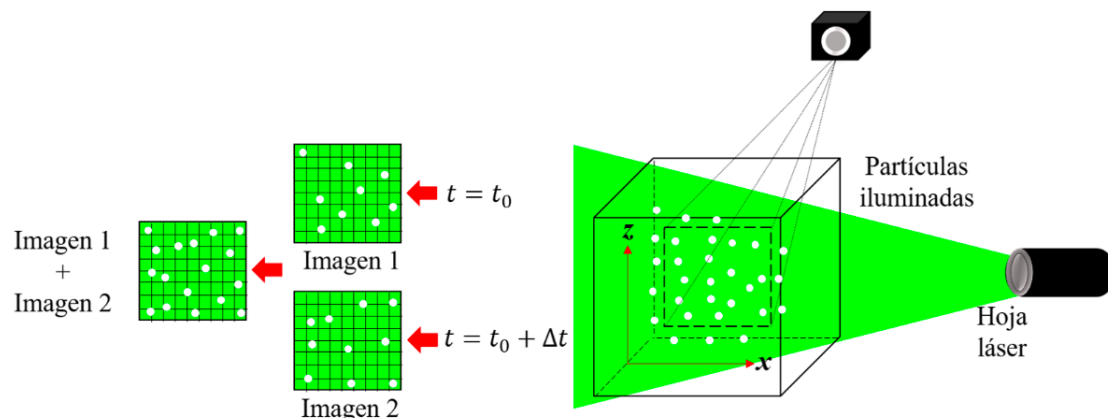


Figura 4.4: Representación gráfica del análisis de la técnica PIV, imagen obtenida de Aguilar-Campos, 2020.

La más importante de ellas es que, su principio de funcionamiento se basa en el efecto Doppler de un haz ultrasónico; a diferencia de otras técnicas ópticas en las que se usan haces de luz láser, esto permite a la técnica UDV estudiar el comportamiento de flujos en líquidos opacos, como metales líquidos, lo cual no es posible con técnicas ópticas. Es importante mencionar que, en comparación con la técnica PIV (con mejor resolución espacial) la UDV tiene una mejor resolución temporal (Signal-Processing, 2019, Aguilar-García y col. 2021), siendo un factor importante para flujos dependientes del tiempo como los contemplados en este trabajo. El equipo usado hace uso de hasta cuatro probetas ultrasónicas de forma cilíndrica puestas en contacto con paredes de los contenedores donde se desarrollan los flujos.

La aplicación de esta técnica consistió en medir perfiles de velocidad en zonas estratégicas del flujo. Con base en las mediciones PIV para el agua y para comparar perfiles de velocidad, dos probetas (T1 y T2) se localizaron en el plano iluminado por el láser (plano  $y - z$ ), esto para comparar con los perfiles extraídos de los campos de velocidad del PIV. Adicionalmente, se colocaron dos más (T3 y T4) a lo largo de la dirección  $x$ . Para todas las mediciones, se usaron probetas TR08005SS de ultrasonido con frecuencia de 8 MHz y diámetro de 5 mm. Se aplicó gel conductivo transparente entre transductores y paredes del contenedor para garantizar un buen contacto ultrasónico.

Cada una de las probetas está conectada a un equipo DOP 4000 de la marca Signal Processing que se controla a través del software UDOP606 en el que se definen parámetros necesarios para las mediciones. El posicionamiento de las cuatro probetas en la cavidad se muestra en la Figura 4.5 y más detalles sobre su posición se muestran en la Tabla 4.1.

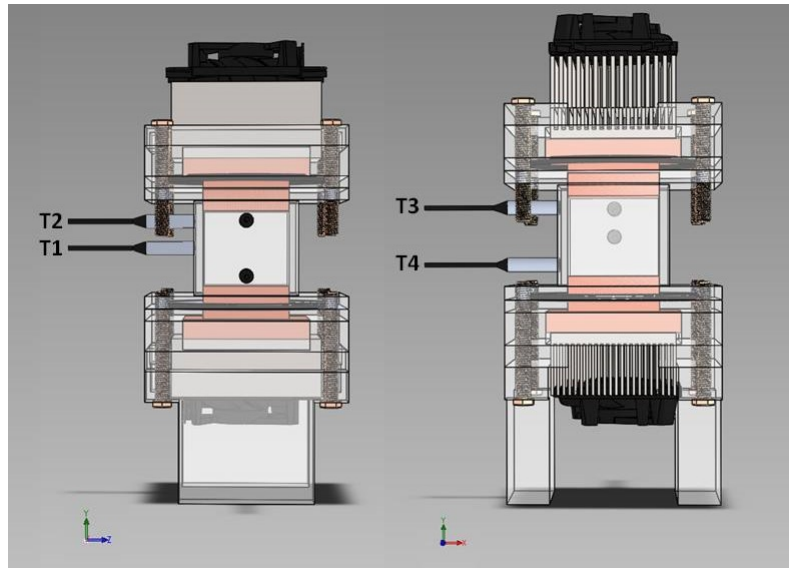


Figura 4.5: Modelo CAD de la configuración mostrando la posición y nomenclatura de las probetas.

Probeta	Dirección $y$ (mm)	Plano
T1	24	$y - z$
T2	36	$y - z$
T3	12	$x - y$
T4	36	$x - y$

Tabla 4.1: Nomenclatura de las probetas, su posición (con respecto a la base de la cavidad) y su plano de medición.

#### 4.2.1. Principio de funcionamiento UDV

El efecto Doppler se define como el cambio en la frecuencia de una onda acústica o electromagnética resultante del movimiento, ya sea de un emisor o de un receptor (Communications-System, 2019). En el UDV, en lugar de emitir ondas ultrasónicas continuas, un emisor envía periódicamente una breve ráfaga ultrasónica y un receptor recopila continuamente ecos de las partículas que pueden estar presentes en la trayectoria del haz ultrasónico. Al muestrear los ecos entrantes al mismo tiempo en relación con la emisión de las ráfagas, se puede calcular la velocidad de las partículas (Signal-Processing, 2019).

Supongamos el caso ilustrado en la Figura 4.6, donde solo hay una partícula en el haz ultrasónico. A partir del conocimiento del retardo de tiempo  $T_d$  entre una ráfaga emitida y el eco reflejado por la partícula, la profundidad  $P$  de esta partícula se puede calcular mediante:

$$P = \frac{T_d c}{2}, \quad (4.1)$$



donde  $c$  es la velocidad de la onda ultrasónica en el líquido.

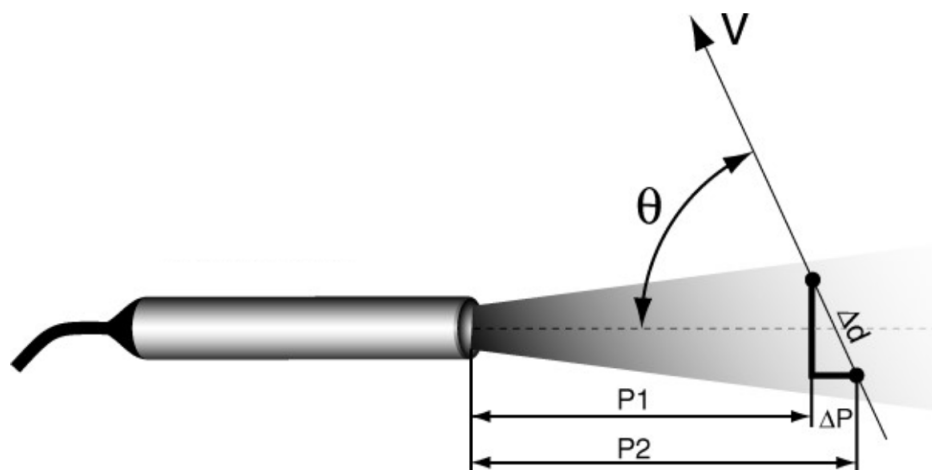


Figura 4.6: Haz ultrasónico transmitido a una partícula a diferentes tiempos (Signal-Processing, 2019)

Si la partícula se mueve en un ángulo  $\theta$  en relación con el eje del haz ultrasónico, su velocidad se puede medir calculando la variación de su profundidad entre dos emisiones separadas en el tiempo:

$$(P_2 - P_1) = \frac{c}{2} (T_2 - T_1), \quad (4.2)$$

La diferencia entre tiempo ( $T_2 - T_1$ ) es siempre muy corta, la mayoría de las veces menos de un microsegundo. Por lo que es conveniente sustituir esta medición de tiempo por una medición del desplazamiento de fase del eco recibido.

$$\partial = 2\pi f_e (T_2 - T_1), \quad (4.3)$$

donde  $f_e$  es la frecuencia de emisión. Con esta información, la velocidad del objetivo se expresa mediante:

$$v = \frac{c f_d}{2 f_e \cos\theta}, \quad (4.4)$$

siendo  $f_d$  el cambio de frecuencia.

Suponiendo que las partículas se distribuyen aleatoriamente dentro del haz ultrasónico. Los ecos devueltos por cada partícula se combinan de forma aleatoria, dando una señal de eco aleatoria. Es de esperar que exista un alto grado de correlación entre las diferentes emisiones. Este alto grado de correlación se destaca en todas las técnicas

de procesamiento digital utilizadas en el UDV para extraer información, como la velocidad.

Es importante mencionar que estudios previos en el grupo de trabajo fueron de ayuda para determinar algunos parámetros importantes; sin embargo, hay otros parámetros como la velocidad del sonido que se tuvieron que hacer pruebas para determinar su valor, siendo necesario el desarrollo de un montaje experimental adicional y discutido en el Apéndice A.

Otro factor importante a considerar es la sensibilidad de las probetas, para las mediciones se requiere de un entorno lo más libre de ruido y vibraciones. Además, la técnica UDV requiere que las partículas sean más pequeñas que la longitud de onda del haz emitido, de lo contrario la dirección de propagación y la intensidad de las ondas ultrasónicas se ven afectadas. Como ya se ha mencionado, la técnica UDV usualmente se emplea para fluidos opacos. El GaInSn al contacto con el aire forma rápidamente una fina capa de óxido insoluble que tiene como consecuencia un tamaño de partícula mayor a la longitud de onda. Motivo por el cual, previo a las mediciones del flujo de GaInSn, fue necesario un proceso de limpieza de dicho fluido para evitar óxidos en la experimentación.

Las mediciones obtenidas en esta técnica dependen en gran medida de los valores de los parámetros, los cuales se fijan de acuerdo al fluido. Los parámetros operativos se muestran en la Tabla 4.2. La descripción de los parámetros y algunas limitaciones de la técnica se pueden ver en el Apéndice B.

Frecuencia	8333 Hz	Resolución	0.574 mm
Longitud de ráfaga	12	Emisiones/perfil	64
Potencia emisora	Alta	Ángulo Doppler	0
Tgc	40 dB	Sensibilidad	Media
PRF	4000 $\mu$ s	Factor de escala de velocidad	1.00
Profundidad de la primera puerta	6 mm	Velocidad del sonido en el líquido	2450 m/s
Número de puertas	85		

Tabla 4.2: *Parámetros de operación usados para UDV.*

Al igual que para el agua, se realizaron mediciones para cuatro diferentes diferencias de temperatura:  $\Delta T = 2, 4, 6$  y  $8$  K.

Tanto para el flujo de agua como de GaInSn, no se analizaron los datos para los primeros 6 minutos de medición. Considerándose únicamente mediciones de 6 minutos adicionales para cada probeta y misma cantidad de tiempo para PIV. Para el agua, se midió a la par el plano con PIV y las probetas en el orden T1, T2, T3 y T4. Posteriormente, se realizó un estudio de frecuencias con una Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés).

Una comparación entre perfiles de velocidad extraídos de los campos de velocidad de PIV, los medidos por UDV y los obtenidos de la simulación se presenta en el

siguiente capítulo.

# 5

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

En este capítulo se muestran los resultados de las mediciones realizadas para caracterizar los flujos convectivos y su comparación con resultados numéricos. Primeramente, se muestran los resultados para el agua en donde fue posible medir de forma simultánea con PIV y UDV, presentándose campos de velocidad obtenidos con PIV y una comparación de perfiles de velocidad extraídos de dichos campos y los medidos con UDV. Posteriormente, se presentan los perfiles de velocidad para el flujo de GaInSn. Es importante mencionar que al tenerse un flujo dependiente del tiempo para todos los casos, se decidió presentar mediciones promediadas en intervalos de tiempo característicos para cada diferencia de temperatura y fluido de trabajo. Dichos intervalos fueron determinados con base en un análisis de las frecuencias características de los flujos.

### 5.1. FLUJO DE AGUA

#### 5.1.1. *Análisis de frecuencias*

Como se ha mencionado, la técnica UDV tiene una mejor resolución espacial que la PIV, por lo anterior estas mediciones fueron las empleadas para el análisis de las frecuencias de cada flujo. Para todas las probetas se tienen seis minutos de medición, de la probeta T1 (localizada al centro a lo largo de la dirección  $z$ ) se extrajo el valor de la velocidad en la posición  $z = 15 \times 10^{-3}$  m para todos los perfiles adquiridos. De las simulaciones numéricas fue posible extraer el valor de la componente  $\omega$  en la misma posición y para cada instante de tiempo ( $\omega_p$ ). Resultados de estas señales temporales para cada  $\Delta T$  se muestran en la Figura 5.1, donde la línea continua muestra la señal experimental para UDV y la línea discontinua muestra la señal en la misma posición para la solución numérica.

En general, las señales toman valores positivos y negativos durante las mediciones. Llevando a cabo un análisis de transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) de los datos experimentales fue posible identificar la frecuencia característica para los flujos y tomando el inverso de esta, determinar el periodo de tiempo. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 5.1. Para los resultados obtenidos de la solución numérica, se tiene una variación del 5 al 10 % con respecto a los datos experimentales. Una vez identificado el valor en tiempo del periodo, se seleccionó dicho

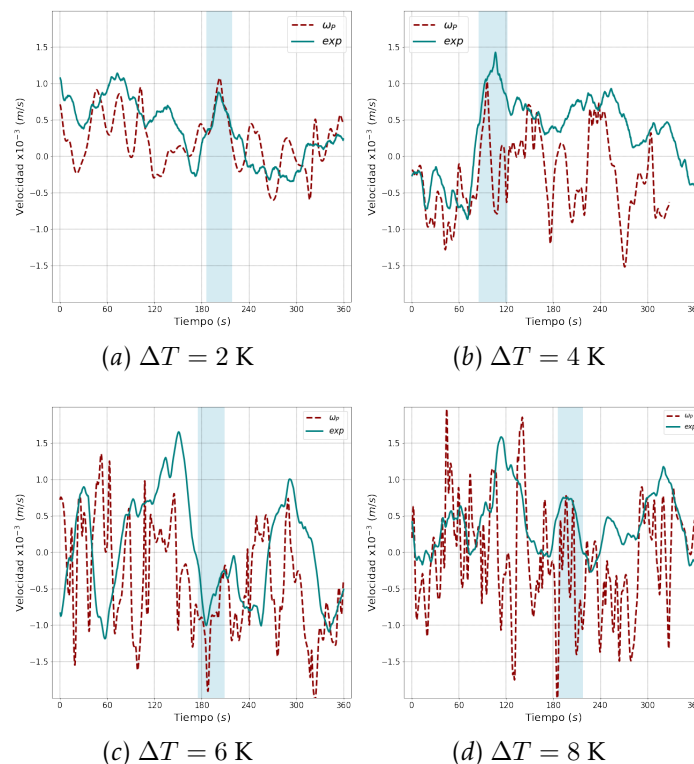


Figura 5.1: Componente  $\omega$  de la velocidad en  $z = 15 \times 10^{-3}$  m vs. tiempo para las  $\Delta T$  impuestas al agua. La zona sombreada corresponde al periodo característico donde se promedian resultados.

intervalo ( $\Delta t$ ) en las señales temporales, procurando que tanto la señal experimental como numérica tuvieran la mejor coincidencia, ver Figura 5.1.

$\Delta T$ (K)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	$\Delta t$ (s)
2	36.7	0.027	186-218.7
4	36.5	0.027	85-121.5
6	34	0.029	175-209
8	32.2	0.031	186-218.2

Tabla 5.1: Frecuencia y periodo característicos para cada  $\Delta T$  del agua.  $\Delta t$  muestra el intervalo del tiempo donde se promedian resultados.

Del estudio de FFT se observa que conforme aumenta  $\Delta T$  se tiene una ligera tendencia a disminuir el periodo característico para las señales de velocidad. Es posible afirmar que,  $\Delta T$  es relativamente pequeño para poder observar cambios significativos en el periodo.

Una vez definidos los intervalos de tiempo donde existen una buena correspondencia entre señales, se procede a promediar campos y perfiles de velocidad obtenidos tanto

de PIV como de UDV.

### 5.1.2. Campos promedio de velocidad

Como se mencionó anteriormente, mediante la técnica PIV, es posible determinar el campo de velocidades en el plano  $y - z$  ( $x = 0$ ) del flujo. La Figura 5.2 muestra campos vectoriales promedio de la velocidad e isocontornos de vorticidad ( $W_x$ ) para los diferentes valores de  $\Delta T$ . En las Figuras 5.2a y 5.2b, que corresponden a  $\Delta T = 2$  y 4 K, respectivamente, se pueden observar múltiples zonas de recirculación. Las magnitudes de velocidad mayores se localizan en zonas centrales del plano, alcanzando valores de hasta  $2.1 \times 10^{-3}$  m/s; mientras que, para los valores de  $\Delta T$  más altos, Figuras 5.2c y 5.2d, se puede observar una gran recirculación en todo el plano, mostrando las mayores magnitudes de la velocidad cerca de las paredes con valores de hasta  $4 \times 10^{-3}$  m/s. Las líneas rojas representan las mediciones de perfiles promedio de velocidad tomadas por las probetas T1 ( $y = 24 \times 10^{-3}$  m) y T2 ( $y = 36 \times 10^{-3}$  m) mostradas en la Sección 5.1.3 y con cuyos perfiles se comparan los extraídos de los campos de velocidad.

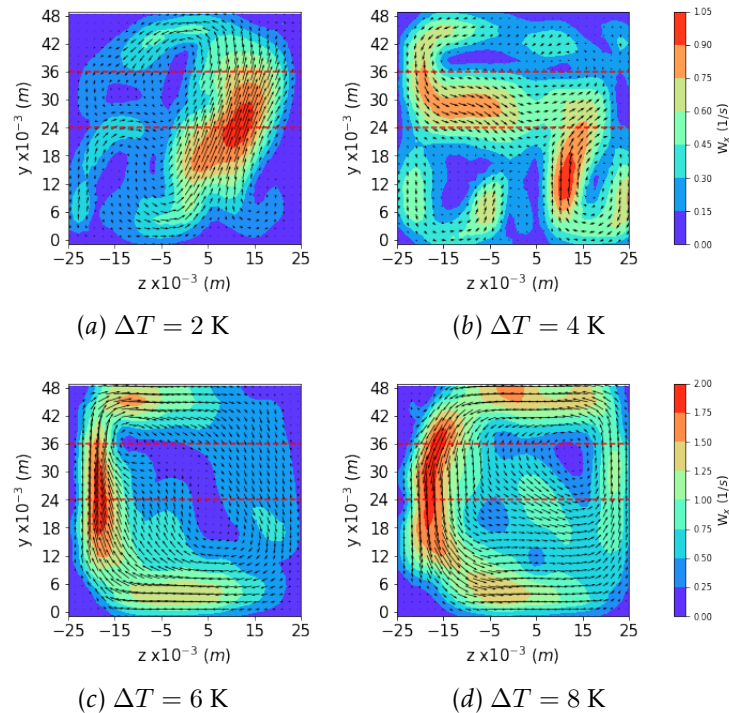


Figura 5.2: Campos de velocidad e isconcontornos de vorticidad ( $W_x$ ) obtenidos de PIV para diferentes valores de  $\Delta T$ . Las líneas rojas representan las mediciones de perfiles promedio de velocidad tomadas por las probetas T1 y T2.

De las simulaciones numéricas y para los periodos de tiempo encontrados, es posible también calcular los campos promedio de velocidad, la Figura 5.3 los muestra para cada  $\Delta T$ .

Comparando los campos numéricos con los campos experimentales, podemos observar dos similitudes: el mismo orden para la magnitud de la velocidad y patrones de flujo con recirculaciones en el centro del plano para 2 y 4 K; mientras que, para 6 y 8 K una gran recirculación con magnitudes de velocidad mayores en zonas cercanas a las paredes.

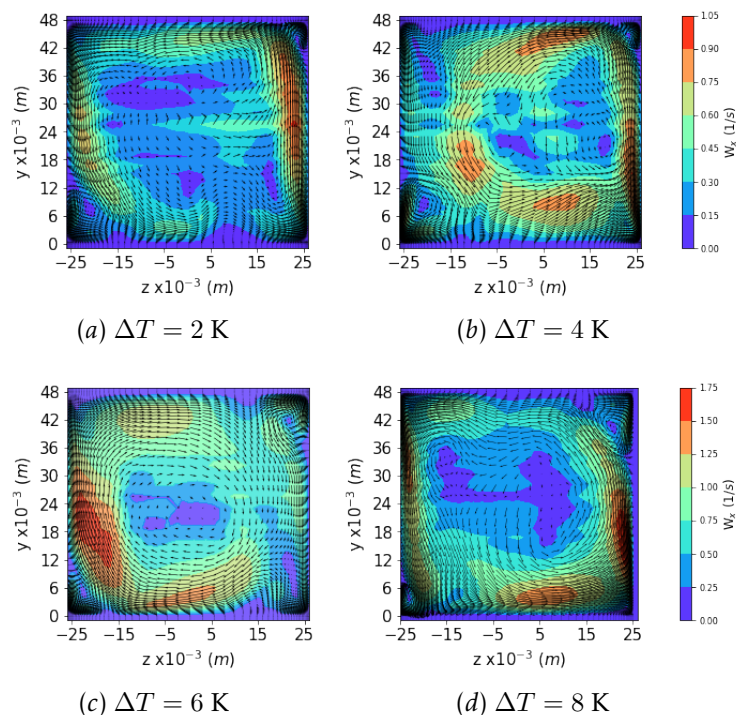


Figura 5.3: Campos promedio de velocidad e isconcontornos de vorticidad ( $W_x$ ) obtenidos de la simulación para diferentes valores de  $\Delta T$ .

### 5.1.3. Perfiles de velocidad

Con objeto de evaluar cuantitativamente el efecto de  $\Delta T$  en los patrones de flujo, así como para realizar una comparación entre las dos técnicas de medición y los resultados numéricos, se obtuvieron perfiles de velocidad de los campos promedio previamente mostrados.

En la Figura 5.4 se muestra la comparación de perfiles de velocidad promedio para la probeta T1. Aquí se puede observar una buena comparación entre resultados numéricos y las mediciones PIV y UDV. Interesantemente, la comparación entre la simulación y PIV es mejor que con UDV. En general, la forma asimétrica de los perfiles a lo largo de la dirección  $z$  (con valores pequeños cerca del centro de la cavidad) predice flujos ascendentes y/o descendentes en las paredes verticales de la cavidad. Destaca también que las desviaciones estándar tanto para las mediciones experimentales como para las simulaciones son del mismo orden de magnitud.

En el caso de los perfiles de velocidad para la probeta T2 mostradas en la Figura

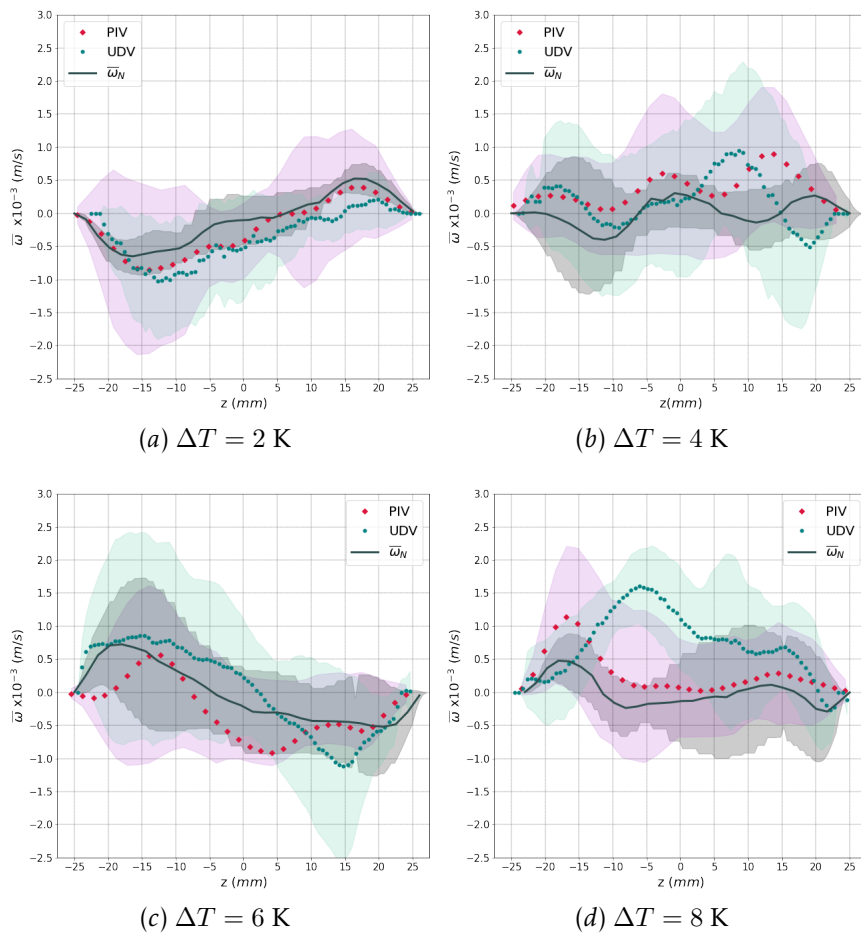


Figura 5.4: Perfiles de velocidad promedio numéricos ( $\bar{w}_N$ ), medidos con T1 y extraídos de PIV para distintos valores de  $\Delta T$ .



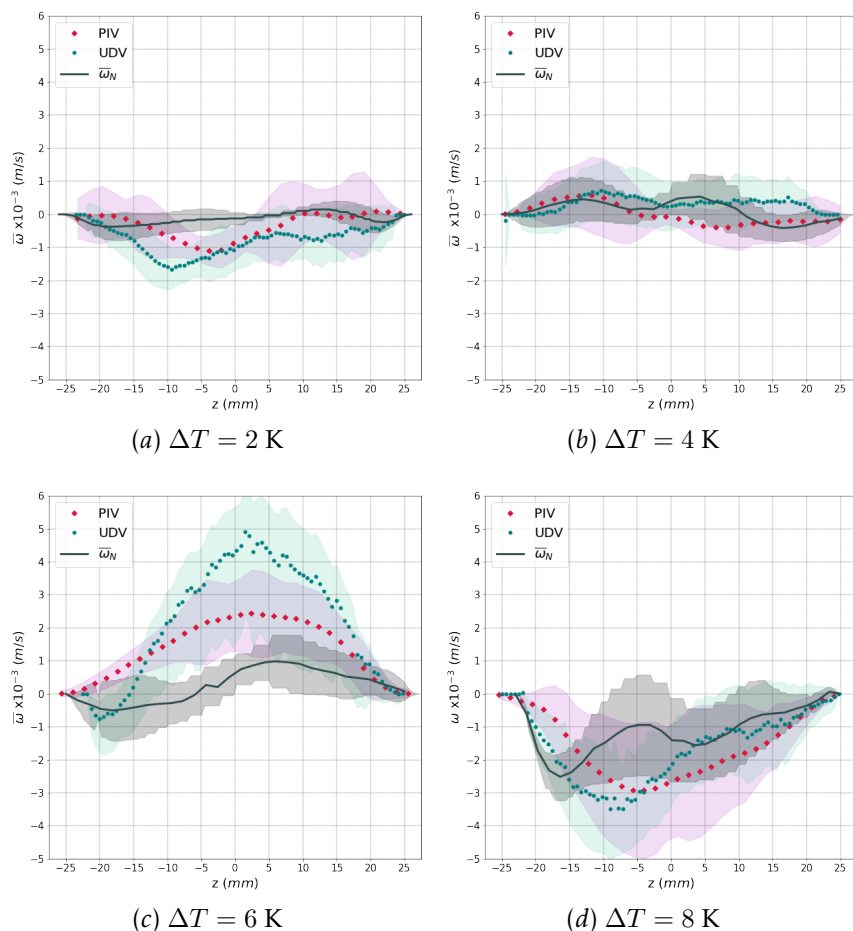


Figura 5.5: Perfiles de velocidad promedio numéricos ( $\bar{\omega}_N$ ), medidos con T2 y extraídos de PIV para distintos valores de  $\Delta T$ .

5.5 se puede observar un comportamiento diferente al mostrado en los perfiles para T1. Es importante recordar que esta probeta se encuentra cerca de la pared fría. Las velocidades son menores para 2 y 4 K; mientras que para 6 y 8 K aumentan en magnitud. Se alcanzan valores de velocidad de hasta  $5 \times 10^{-3}$  m/s. Este comportamiento en los perfiles era esperado dado que, como observamos en T1, para los valores de  $\Delta T$  mayores, el flujo se concentra en las paredes de la cavidad, teniendo, por ende, velocidades relativamente altas, comparándolas con los casos donde  $\Delta T$  es más baja y el flujo se concentraba en la zona central de la cavidad.

Finalmente, los perfiles promedio correspondientes a T3 y T4 para diferentes  $\Delta T$  se muestran en la Figura 5.6. Aquí solo se muestran resultados para UDV y la solución numérica, dado que el estudio mediante la técnica PIV solamente se realizó en el plano  $y - z$  de la cavidad. Observando los perfiles, a diferencia de T1, se puede observar una analogía entre todos los perfiles, ya que todos muestran un comportamiento relativamente parabólico, presentando velocidades máximas desde  $3 \times 10^{-3}$  m/s (para valores de  $\Delta T$  más bajos) hasta velocidades de  $5 \times 10^{-3}$  m/s (para valores de  $\Delta T$  más

altos).

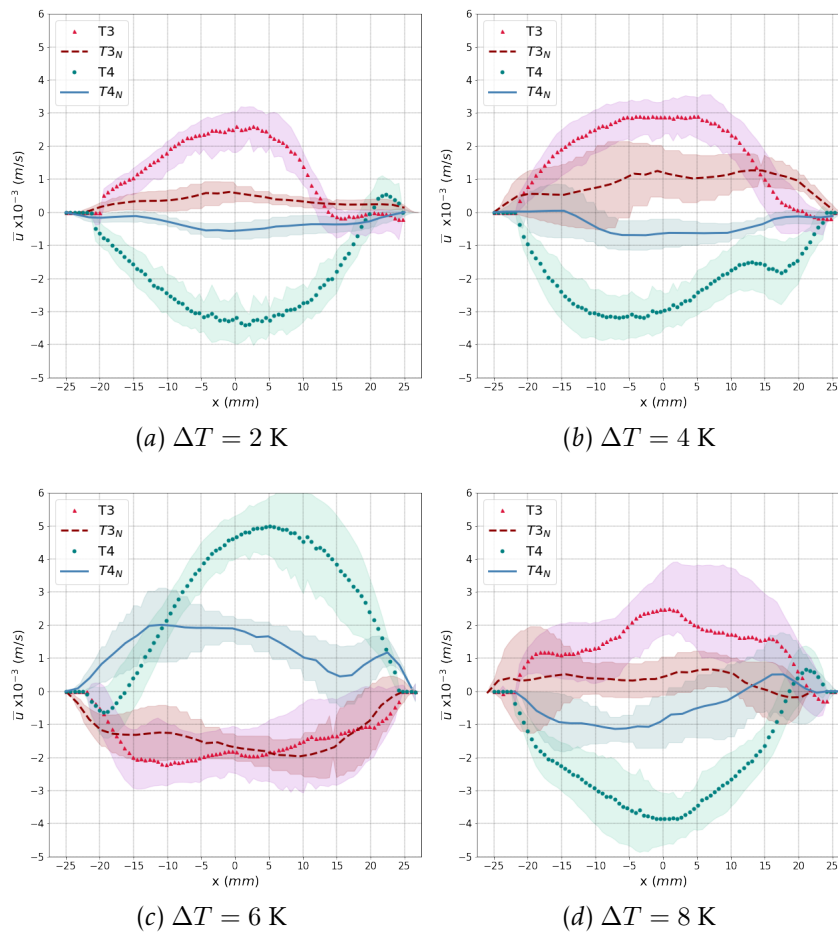


Figura 5.6: Perfiles de velocidad promedio numéricos y medidos con T3 y T4 para distintos valores de  $\Delta T$ .

Tomando en cuenta que la ubicación de T3 y T4 es cercana a la pared fría y caliente, respectivamente, y recordando que la técnica UDV toma valores positivos cuando el flujo se aleja del transductor y negativo cuando se acerca, es posible inferir que el flujo tiene un comportamiento similar al mostrado en la Figura 5.7 (a excepción de los perfiles para  $\Delta T=6 \text{ K}$ , donde es el mismo comportamiento, pero en dirección contraria). En esta figura se puede mostrar la dirección del flujo captado por el haz ultrasónico. Basándonos en este flujo y en la magnitud de la velocidad mostrada en los campos promedio en el plano  $z - y$ , se puede creer que el flujo en el plano  $x - y$  tiene el comportamiento de una gran celda concentrada en las paredes de la cavidad; sin embargo, al no tener mediciones en otras alturas del plano no se puede asegurar dicho comportamiento.

Los perfiles promedio obtenidos de la solución numérica ( $T3_N$  y  $T4_N$ ) comparan cualitativamente bien con los medidos con UDV. En general, aumenta la velocidad con  $\Delta T$ ; sin embargo, para  $\Delta T=8 \text{ K}$  se tienen valores ligeramente menores que para  $6 \text{ K}$ .

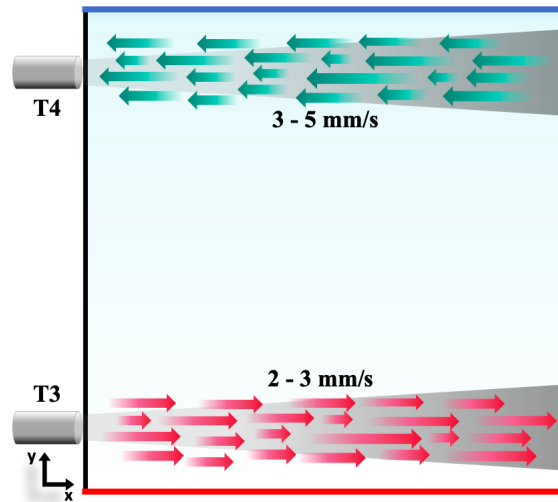


Figura 5.7: Esquema representativo de la dirección del flujo para T3 y T4 en el plano  $x - y$ .

Las desviaciones estándar también son menores, lo que indica menores variaciones del flujo en el periodo de tiempo.

## 5.2. FLUJO DE GAlNSn

### 5.2.1. Análisis de frecuencias

Para el estudio de la convección natural en GaInSn realizamos mediciones similares a las hechas en agua, tomando un rango de valores de 6 min tanto para las probetas como en la solución numérica, esto después de 6 min de haber fijado la diferencia de temperatura. Después de dicho intervalo de tiempo, las mediciones muestran un comportamiento dependiente del tiempo. Al igual que en el caso con agua, tomamos un punto en la cavidad para graficar el cambio de la velocidad en el tiempo. Para este fluido midió la velocidad en el punto  $z = -15 \times 10^{-3}$  m, el cambio en el punto de medición con respecto al agua se debe a que después del centro de la cavidad ( $z = 0$ ), el haz ultrasónico de la probeta T1 pierde potencia, por lo que arrojaba datos más inestables que para el caso del agua, por tal motivo el estudio de frecuencias se hizo en un punto de la primera zona media de la cavidad.

Las señales de velocidad como función del tiempo tanto de las simulaciones ( $\omega_P$ ) como de las mediciones UDV se muestran en la Figura 5.9. Las mediciones experimentales muestran que, mientras el valor de  $\Delta T$  aumenta, la velocidad también aumenta tomando valores positivos. Destaca que para las simulaciones las señales oscilan alrededor de cero, variando entre valores negativos y positivos. También se observa que al aumentar  $\Delta T$  parece aumentar la frecuencia de oscilación de la señal numérica.

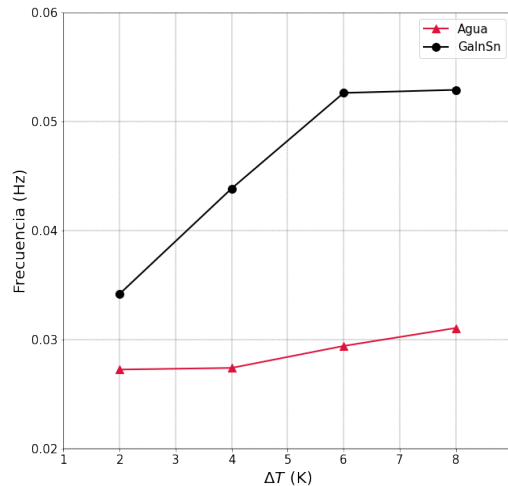


Figura 5.8: Frecuencia característica para los flujos de agua y GaInSn como función de  $\Delta T$

$\Delta T$ (K)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	$\Delta t$ (s)
2	29.25	0.034	270-299.25
4	22.8	0.043	615-637.8
6	19	0.052	431-450
8	18.9	0.053	445-463.9

Tabla 5.2: Frecuencia y periodo característicos para cada  $\Delta T$  del GaInSn.  $\Delta t$  muestra el intervalo del tiempo donde se promedian resultados.

La diferencia en comportamientos de las señales experimental y numérica se atribuye a que, en el caso del agua, se tienen bien definidas en el software ANSYS Fluent las propiedades como función de la temperatura; mientras que, para el GaInSn, se usaron las funciones definidas en el Capítulo 2 y que como se mencionó varían con la composición de la aleación eutéctica.

Similar a lo realizado para los flujos convectivos de agua, se tomaron las señales temporales de GaInSn para un análisis con FFT, encontrando las frecuencias y periodos característicos de cada señal, los resultados se muestran en la Tabla 5.2 y confirman el comportamiento mostrado en la Figura 5.9, un aumento de la frecuencia con  $\Delta T$ .

Comparando los resultados obtenidos para GaInSn y con agua, encontramos una analogía en el comportamiento de las frecuencias características, ya que en ambos casos se muestra un aumento con  $\Delta T$ , ver Figura 5.8. Sin embargo, el agua muestra una variación menor que el GaInSn.

### 5.2.2. Perfiles de velocidad

Siguiendo el mismo método de obtención de resultados que para el agua, se obtuvieron perfiles de velocidad promedio para las probetas T1, T2, T3 y T4 y de las simulaciones numéricas.

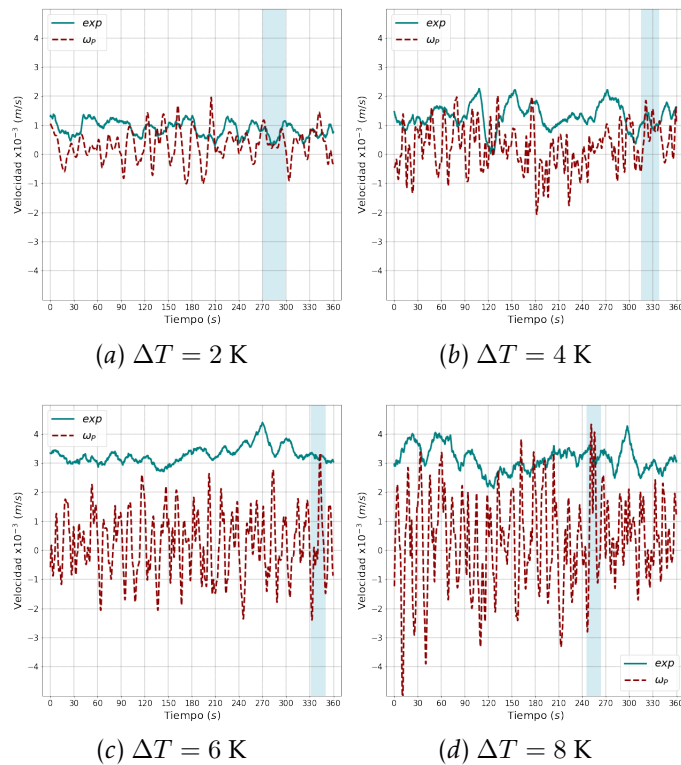


Figura 5.9: Componente  $\omega$  de la velocidad en  $z = -15 \times 10^{-3} \text{ m}$  vs. tiempo para las  $\Delta T$  impuestas al GaInSn. La zona sombreada corresponde al periodo característico donde se promedian resultados.

Una vez obtenido el periodo característico para cada  $\Delta T$ , se tomó un intervalo de la señal en función del tiempo en la cual la solución numérica y la experimental tuvieran valores similares en la gráfica, el intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ) tomado para cada  $\Delta T$  se muestra en la Tabla 5.2 y en la región sombreada en las gráficas mostradas en la Figura 5.8.

Los perfiles promedio obtenidos para T1 se muestran en la Figura 5.10, aquí se observa un comportamiento similar en ambas soluciones, teniendo un flujo completamente positivo que se anula en las paredes de la cavidad, lo que nos indica que el flujo va en una sola dirección. Para ambos casos se muestra un incremento en la magnitud máxima de la velocidad de los perfiles, alcanzando así desde  $2 \times 10^{-3}$  hasta  $7 \times 10^{-3}$  m/s, para el caso experimental; y magnitudes desde  $6 \times 10^{-3}$  hasta  $2 \times 10^{-3}$  m/s para las simulaciones. Teniéndose también una buena comparación cualitativa de los perfiles.

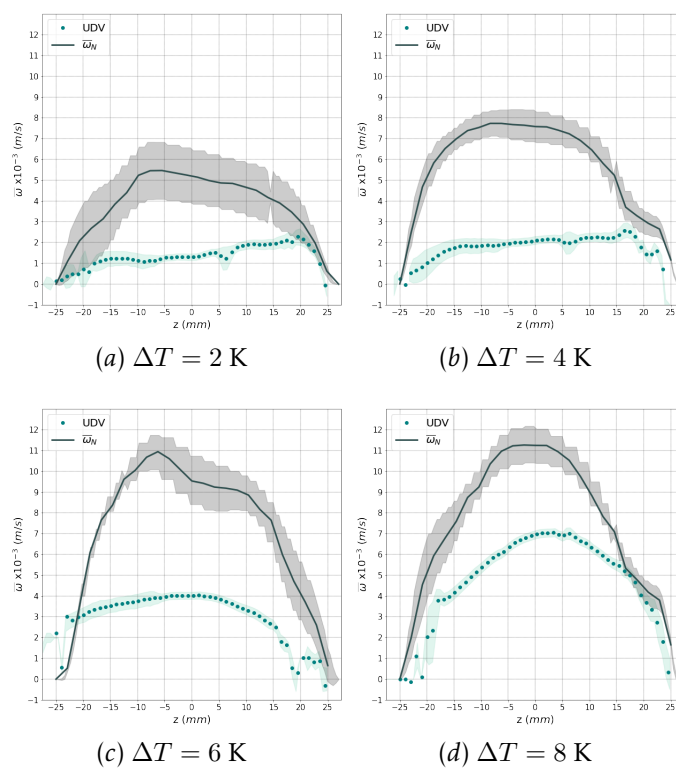


Figura 5.10: Perfiles de velocidad promedio numéricos y medidos con T1 para distintos valores de  $\Delta T$  en GaInSn.

En la Figura 5.11 se muestran los perfiles promedio para T2. Comparados con los perfiles de T1, se muestra una mejor comparación entre mediciones y simulaciones. Al igual que en T1, se tiene un aumento en la velocidad conforme aumenta  $\Delta T$ . Teniendo velocidades de  $-4 \times 10^{-3}$  a  $-8 \times 10^{-3}$  m/s para la solución experimental, mientras las simulaciones están en el rango de  $-6 \times 10^{-3}$  a  $-10 \times 10^{-3}$  m/s.

Observando los perfiles para T1 y T2, se puede deducir que el flujo en el plano

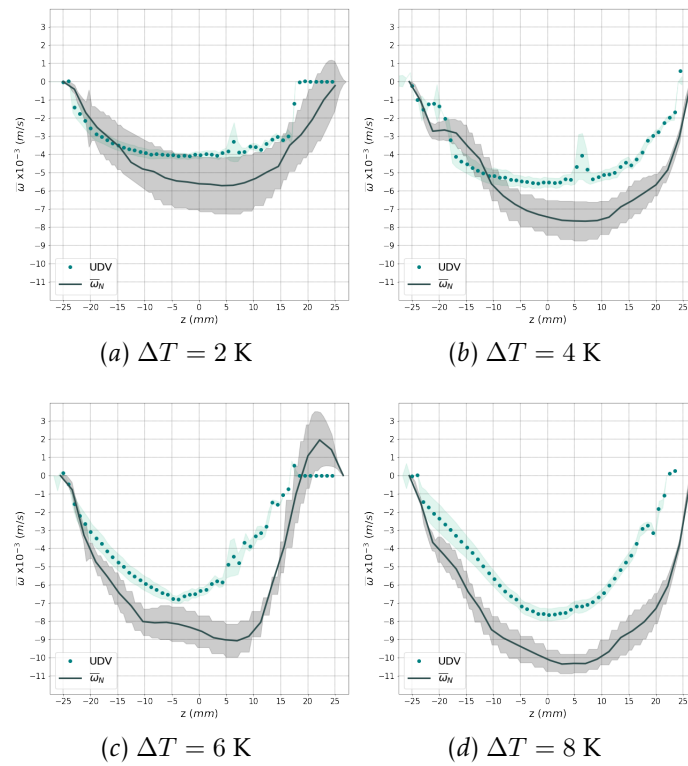


Figura 5.11: Perfiles de velocidad promedio numéricos y medidos con T2 para distintos valores de  $\Delta T$  en GaInSn.

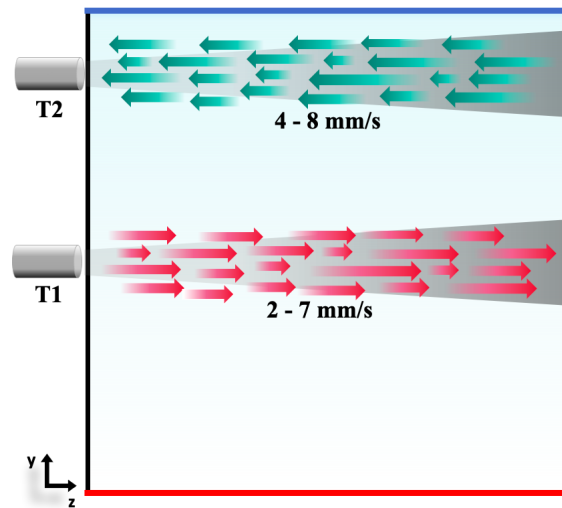


Figura 5.12: Esquema representativo de la dirección del flujo en el plano  $y - z$  de la cavidad.

$y - z$  corresponde a una gran recirculación, dado que las componentes se dirigen en diferentes direcciones; sin embargo, y nuevamente al no conocer el comportamiento en la parte baja de la cavidad debido a la limitante cantidad de transductores, no se puede asegurar la naturaleza del flujo en esta dirección.

En cuanto a las probetas T3 y T4, podemos observar sus perfiles promedio de velocidad en las Figuras 5.13 y 5.14, respectivamente. Los resultados muestran valores de velocidad relativamente bajos comparadas con las obtenidas en el plano  $y - z$ . Para ambas probetas, los perfiles de velocidad experimentales muestran un comportamiento asimétrico con velocidades muy pequeñas cerca de la zona centro de la cavidad. Los valores varían entre  $-1.5 \times 10^{-3}$  y  $1.5 \times 10^{-3}$  m/s. En general, existe una buena correspondencia entre mediciones y simulaciones. De forma aventurada se puede concluir que el flujo en el plano  $x - y$  presenta múltiples zonas de recirculación en zonas cercanas a las paredes fría y caliente, además de las verticales.

Es importante recordar que la técnica UDV recolecta datos de los ecos de un haz ultrasónico que considera un volumen (cónico) y es ahí donde promedia los datos para obtener valores de velocidad; por otro lado, de las simulaciones se extraen datos en líneas (1D) a lo largo de las direcciones  $x$  y  $z$ , dicha diferencia en la obtención de los perfiles anteriormente reportados puede justificar las diferencias que se tienen entre mediciones y simulaciones.

### 5.3. PARÁMETROS ADIMENSIONALES

Como fue mencionado en el Capítulo 1, los parámetros adimensionales pueden ser de ayuda para describir la naturaleza del flujo. En la misma sección definimos el número de Nusselt, el cual mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre comparada con la transferencia de calor si esta ocurriera solamente por conducción, de forma que el Número de Nusselt podría verse



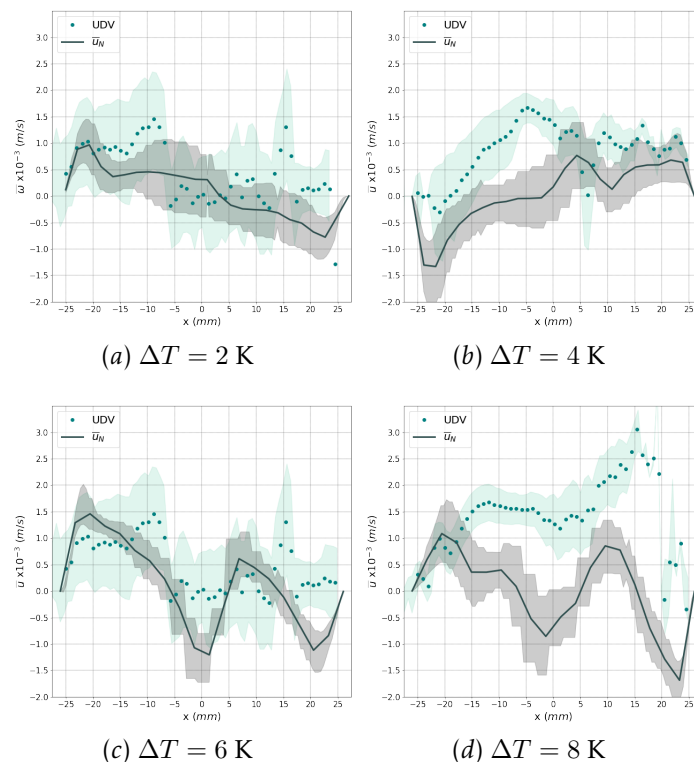


Figura 5.13: Perfiles de velocidad promedio numéricos y medidos con T3 para distintos valores de  $\Delta T$  en GaInSn.

de la forma:

$$Nu = \frac{\text{Transferencia de calor por convección}}{\text{Transferencia de calor por conducción}} = \frac{1}{Pt} \int_0^{Pt} Nu dt. \quad (5.1)$$

donde  $Pt$  es el tiempo de las mediciones consideradas.

Existen muchas correlaciones empíricas para número de Nusselt como función del número de Rayleigh y Prandtl en geometrías de: placas planas, cilindros, dentro de tuberías, etc., las cuales evalúan generalmente el número de Nusselt medio en una superficie. Estas correlaciones tienen forma de  $Nu = Nu(Ra, Pr)$ , algunos ejemplos pueden observarse en la Tabla 5.3. En una solución numérica, el número de Nusselt medio puede obtenerse integrando el número de Nusselt local en toda la superficie.

Para nuestro caso de estudio, la correlación más cercana es la segunda, debido a que el rango de Rayleigh está entre  $7 \times 10^4$  y  $3.6 \times 10^5$ , y el Prandtl del Mercurio ( $Pr = 0.025$ ) es cercano al del GaInSn ( $Pr = 0.024$ ). Otra de las correlaciones que describe el rango de nuestra investigación, es la segunda de la tabla, ya que en nuestro caso el valor de  $(RaPr)^{\frac{1}{2}} > 41.9$ .

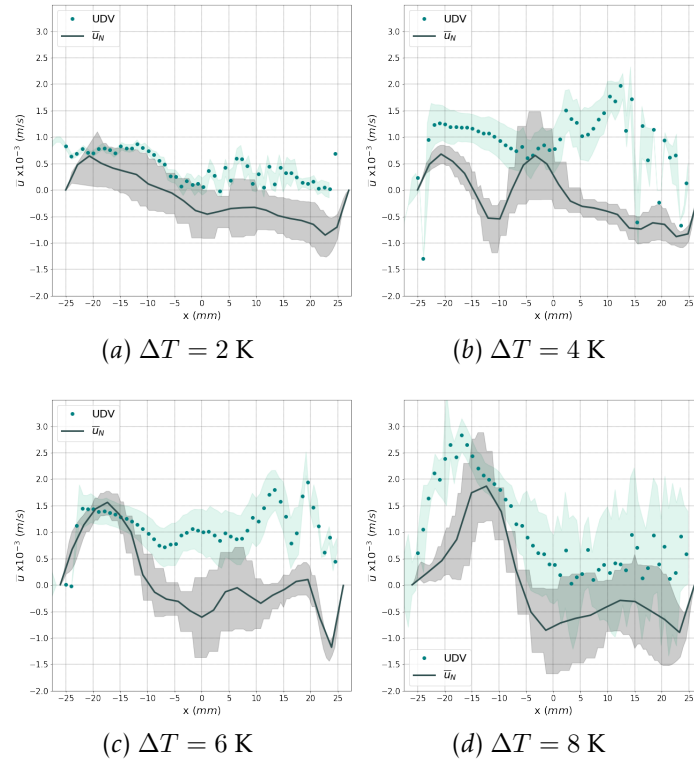


Figura 5.14: Perfiles de velocidad promedio numéricos y medidos con T4 para distintos valores de  $\Delta T$  en GaInSn.

### 5.3.1. Número de $Nu$ para GaInSn

Se analiza la transferencia de calor en la tapa inferior de la cavidad que está en contacto con el GaInSn durante el tiempo de simulación para todas las diferencias de temperatura. Este análisis se realizó obteniendo el número de Nusselt promedio en dicha superficie para todos los instantes de tiempo de las simulaciones, ver Figura 5.15a). Se observa que las señales para el  $Nu$  varían ligeramente con el tiempo, incluso para valores altos de  $\Delta T$ . Los resultados promedio de las señales se muestran en la Tabla 5.4.

Valores promedio de  $Nu$  comparados con la función reportada para nuestro rango de validez se muestran en la Figura 5.15b. La línea roja muestra la correlación reportada, mientras que la negra corresponde a los resultados de simulación. Se puede observar una gran diferencia entre las dos curvas, que puede atribuirse a que la correlación, como ya se mencionó, es para mercurio.

La línea verde corresponde a un ajuste realizado para aproximar los resultados de la simulación de la forma  $Nu = Nu(Pr, Ra)$ , dando como resultado la siguiente expresión:

$$Nu = 6.15 \times 10^{-3} Ra^{0.877}.$$

Correlación	Rango de validez
$Nu = 0.069Ra^{0.33}Pr^{0.074}$	$1.5 \times 10^5 < Ra < 4 \times 10^7$ (para cualquier fluido)
$Nu = 0.147Ra^{0.257}$	$1 \times 10^3 < Ra < 5 \times 10^5$ (para mercurio)
$Nu = 0.078Ra^{0.32}$	$4.8 \times 10^6 < Ra < 4 \times 10^7$ (para sodio)
$Nu = 0.140Ra^{0.26}$	$7 \times 10^6 < Ra < 4.5 \times 10^8$ (para mercurio)
$Nu = 0.44Ra^{0.2}$	$4.5 \times 10^8 < Ra < 2.1 \times 10^9$ (para mercurio)
$Nu = 0.155Ra^{0.27}$	$2 \times 10^6 < Ra < 8 \times 10^7$ (para mercurio)
Correlaciones $Pr$ bajos	Rango de validez
$Nu = 0.17(RaPr)^{\frac{1}{3}}$	$Ra \sim 1700, Pr < 1$
$Nu = 0.175(Ra)^{\frac{1}{4}}$	$(RaPr)^{\frac{1}{2}} \sim 1$
$Nu = 0.27Ra^{\frac{2}{7}}Pr^{\frac{-1}{7}}$	$(10^7 - 10^8)Pr^{\frac{3}{5}} < Ra < (10^{13} - 10^{15})Pr^4$
$Nu = 0.25(RaPr)^{\frac{2}{7}}$	$10^6 < Ra < 10^9, Pr \sim 1$

Tabla 5.3: Correlaciones para el Nusselt. Elaboración propia con información de Horanyi y col. 1999.

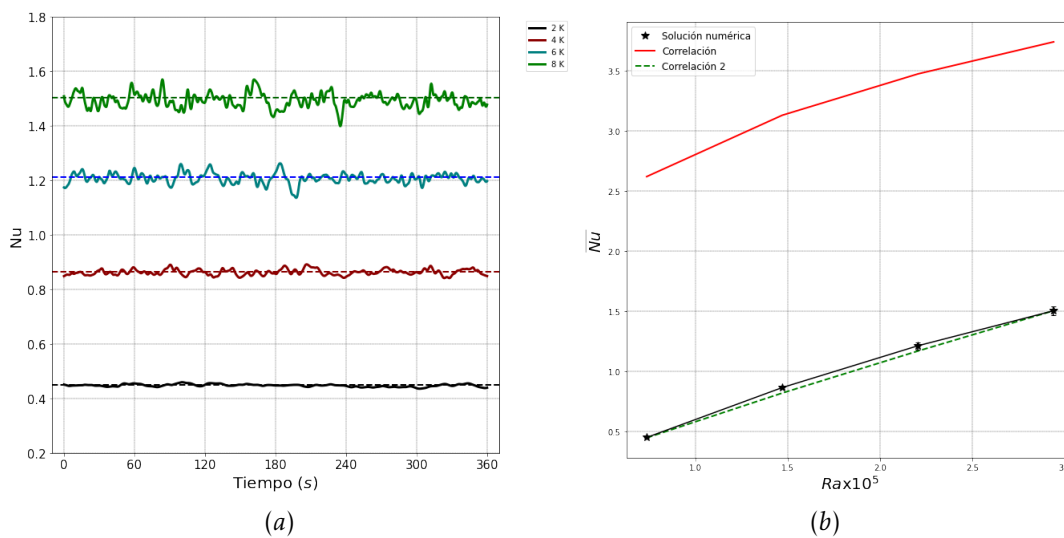


Figura 5.15: Para un flujo convectivo de GaInSn: a)  $Nu$  evaluado numéricamente en la tapa inferior de la cavidad vs. tiempo. b)  $Nu$  promedio vs. número de Rayleigh.

$\Delta T$ (K)	$Ra$	$Nu$
2	$7.345 \times 10^4$	0.448
4	$1.469 \times 10^5$	0.863
6	$2.203 \times 10^5$	1.211
8	$2.938 \times 10^5$	1.502

Tabla 5.4: Valores promedio de  $Nu$  para los distintos  $Ra$  y  $\Delta T$  para GaInSn.

De los resultados se puede observar que, conforme el  $Ra$  aumenta su valor, el  $Nu$  lo hace de forma análoga, teniendo así que para los primeros dos valores, la transferencia de calor es por conducción, mientras que para  $Ra$  más altos, es por convección.

### 5.3.2. Número de $Nu$ para agua

Al igual que para el caso de agua, se realizó una medición del parámetro  $Nu$  para las simulaciones con agua.

La Figura 5.16 muestra el valor de  $Nu$  en el tiempo para diferentes valores de  $\Delta T$ , así como la curva del valor promedio comparada con la correlación que corresponde al rango de validez, la cual es la primera función listada en la Tabla 5.3, debido al rango de Rayleigh y al ser válida para cualquier fluido, en la Tabla 5.5 se observan los valores obtenidos para el Nusselt promedio.

$\Delta T$ (K)	$Ra$	$Nu$
2	$4.125 \times 10^6$	1.582
4	$8.251 \times 10^6$	3.587
6	$1.237 \times 10^7$	5.181
8	$1.650 \times 10^7$	6.747

Tabla 5.5: Valores promedio de  $Nu$  para los distintos  $Ra$  y  $\Delta T$  para agua.

Los valores muestran un comportamiento similar al mostrado en el caso anterior, ya que conforme aumenta la diferencia de temperatura (y por consiguiente, el  $Ra$ ), se tiene un aumento en el Nusselt. Destaca que para todo el rango de  $Ra$  la transferencia de calor es puramente por convección.

Al igual que en el caso anterior, se hizo un ajuste a los resultados de las simulaciones, obteniéndose la siguiente expresión:

$$Nu = 1 \times 10^{-7} Ra^{1,082},$$

Comparando resultados para ambos fluidos, se puede observar que el agua toma valores desde 1.5 hasta 6.7, mientras que el GaInSn solo aumenta de 0.4 a 1.5. De lo cual podemos concluir que conforme aumenta el valor de  $\Delta T$ , en el agua aumenta la transferencia de calor por convección en mayor medida que con el GaInSn.

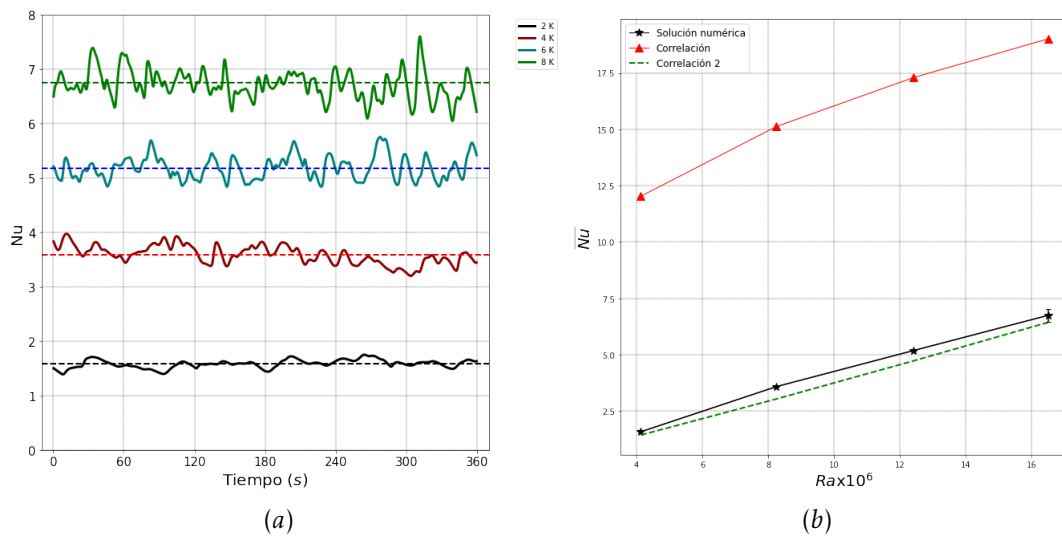


Figura 5.16: Para un flujo convectivo de agua: a)  $Nu$  evaluado numéricamente en la tapa inferior de la cavidad vs. tiempo. b)  $Nu$  promedio vs. número de Rayleigh.

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

---

### 6.1. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un estudio de la convección natural usando agua (fluido no conductor de la electricidad) y GaInSn (fluido conductor de la electricidad) confinados en una cavidad cúbica y sometidos a una diferencia de temperatura constante en el rango de 2 a 8 K, en intervalos de 2 K y con una variación de  $\pm 0.5$  K para cada diferencia. La temperatura más alta se fijó en la tapa del fondo, mientras que la más baja en la tapa superior, mientras que las paredes laterales pueden considerarse adiabáticas. En términos del número de Rayleigh se tienen rangos de  $10^6 < Ra < 10^8$  y  $10^4 < Ra < 10^6$  para el agua y GaInSn, respectivamente. Los flujos de ambos fluidos presentaron un comportamiento dependiente del tiempo para todas las diferencias de temperatura.

El montaje experimental fue especialmente diseñado para permitir la medición simultánea y de forma no intrusiva con dos técnicas distintas: una óptica como PIV y otra ultrasónica como UDV. Para el caso de agua fue posible implementar ambas; mientras que, para el GaInSn solo UDV. Perfiles de velocidad obtenidos para ambos fluidos fueron comparados con resultados de simulaciones numéricas realizadas en el software comercial ANSYS Fluent.

Para ambos fluidos de trabajo, se monitoreó la velocidad en un punto del perfil de velocidad medido con la probeta central. Para la señal periódica en el tiempo realizó un estudio de frecuencias, evaluando la transformada rápida de Fourier. En ambos casos se encontró un aumento en la frecuencia conforme aumentó la diferencia de temperatura, teniendo un aumento mayor para los flujos de GaInSn. Las frecuencias tienen un orden de magnitud de  $10^{-2}$  Hz. Con base en las frecuencias, se determinaron los intervalos de tiempo en donde se promediaron los campos y perfiles de velocidad.

Para el agua, los campos de velocidad PIV promediados en el plano  $y - z$  mostraron que, para una diferencia de temperatura de 2 K se tienen recirculaciones localizadas en la zona central de la cavidad y que conforme aumenta la diferencia de temperatura, el flujo gana velocidad en zonas cercanas a las paredes. Para la diferencia de temperatura más alta, el flujo se caracteriza por una gran celda con las mayores velocidades localizadas en zonas cercanas a las paredes y recirculaciones menores confinadas en las esquinas. De las simulaciones se encontraron patrones de flujo muy similares, para todos ellos los mayores gradientes de velocidad se localizaron en zonas cercanas a las

paredes y pequeñas recirculaciones en las esquinas. El comportamiento de los perfiles de velocidad UDV y los extraídos de los campos vectoriales PIV es acorde con los patrones de flujo observados y comparan tanto cualitativamente como cuantitativamente bien. Los obtenidos numéricamente también muestran una misma tendencia y órdenes de magnitud similares. Interesantemente, perfiles de velocidad para la componente  $u$  de la velocidad (perpendicular al plano  $y - z$ ), predicen un flujo en una sola dirección (sin recirculaciones). Tanto de los resultados experimentales como numéricos, es claro que conforme aumenta la diferencia de temperatura lo hace también la velocidad, reportándose valores de velocidad de hasta  $6 \times 10^{-3}$  m/s.

En el caso del GaInSn, donde solo se midieron perfiles de velocidad, tanto los resultados experimentales como numéricos para la componente  $w$  de la velocidad a lo largo de la dirección  $z$  prácticamente predicen un flujo uniforme. Sin embargo, mientras que la probeta cercana a la pared fría mide valores positivos de velocidad, para la cercana al centro son negativos. Lo anterior, indicaría la presencia de una recirculación en el plano  $y - z$ . Interesantemente, las componentes  $u$  de la velocidad a lo largo de la dirección  $x$  si predicen recirculaciones en las zonas cercanas tanto a la pared caliente como a la fría, lo que implicaría patrones de flujo más complejos en el plano  $x - y$ . Nuevamente, los resultados numéricos reproducen de forma tanto cuantitativa como cualitativa las mediciones experimentales. La velocidad también aumenta con la diferencia de temperatura y alcanza valores de hasta  $12 \times 10^{-3}$  m/s, el doble de los reportados para el agua.

Dada la buena comparación entre mediciones experimentales y resultados numéricos para la velocidad. Se evaluó como parámetro adimensional el número de Nusselt promedio en la superficie inferior de la cavidad como función del número de Rayleigh. Para el caso del GaInSn, los resultados mostraron que para valores de  $Ra$  más pequeños se tiene un mecanismo de transferencia de calor por conducción ( $Nu < 1$ ), conforme aumenta  $Ra$ , el mecanismo es convectivo ( $Nu > 1$ ). En contraste para el agua, el mecanismo de transferencia de calor es convectivo para todo el rango de  $Ra$ . Las curvas de  $Nu$  vs.  $Ra$  muestran un comportamiento similar al reportado por distintas correlaciones.

Los rangos para la diferencia de temperatura estudiados en el presente trabajo corresponden a los reportados en BML ( $\Delta T \leq 10K$ ); adicionalmente, los números de  $Pr$  al menos de los electrodos líquidos son del orden de magnitud del GaInSn. Por lo anterior se espera que, al menos para el electrodo superior se tengan rangos de velocidad similares a los reportados en el presente trabajo. Los ordenes de magnitud para flujos electrovortex (sin convección) en GaInSn estudiados en el grupo de trabajo (relacionados al tema de BML) se tienen velocidades del mismo orden de magnitud por lo que se espera que la convección afecte no solo los patrones de flujo generados por la interacción de campos electromagnéticos en metales líquidos, sino también la distribución de temperatura, pudiendo modificar el desempeño de sistemas como las BML.

Dado el buen acuerdo entre las mediciones experimentales y la simulación numérica, los resultados sugieren la necesidad de mejorar las técnicas de visualización de campos de velocidad para lograr un entendimiento más claro de los patrones de

flujo. Adicionalmente, es posible que para mayores diferencias de temperatura se tengan patrones de flujo turbulentos, situación que implicaría utilizar algún modelo de turbulencia en las simulaciones numéricas. Una extensión directa del estudio será el considerar la inyección de un corriente eléctrica (a través de imponer una diferencia de potencial en los electrodos de cobre) y su efecto en los patrones de flujo de GaInSn. Adicionalmente, es posible considerar el efecto de campos magnéticos de forma individual o en combinación con la corriente eléctrica, lo que daría lugar una fuerza de Lorentz en combinación con la fuerza de flotación. Finalmente, el diseño experimental permite el estudio de al menos dos capas estratificadas de fluidos (de distintas densidades); con base en los resultados aquí reportados, se espera estudiar un sistema metal líquido - electrolito sujeto tanto a una diferencia de temperatura como a campos electromagnéticos, con objeto de contribuir al entendimiento de la dinámica de flujo al interior de sistemas relacionados a las BML.





# A

## APÉNDICE A: CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN GaInSn

---

Un parámetro importante para la adquisición de los perfiles de velocidad mediante la técnica UDV es la velocidad del sonido. Como se mencionó en el Capítulo 4, Sección 4.2, la técnica UDV basa su principio de funcionamiento en la emisión de un haz ultrasónico mediante una probeta y la recolección del eco.

Conocer la velocidad del sonido en el medio sobre el cual se realizan las mediciones cobra especial relevancia para transformar los cambios de frecuencia Doppler en velocidad. Un buen conocimiento de la velocidad del sonido en el medio nos ayudará a obtener buenos valores de medición cuantitativos, mientras que, un error en el parámetro se transfiere directamente a los valores medidos en los perfiles. La metodología para su medición se describe a continuación.

Para la medición de la velocidad del sonido en el GaInSn se vertieron 80 ml del fluido en un vaso de precipitados, para evitar la formación de óxidos se agregó una capa de 5 mm solución de ácido clorhídrico y agua a una concentración de 8 % en volumen. En la parte superior y en contacto con el GaInSn se colocó una probeta con frecuencia de 8 MHz y diámetro de 5 mm, ver Figura A.1.



Figura A.1: Configuración para determinar la velocidad del sonido en GaInSn.

Una vez establecida la configuración, el transductor se conecta al equipo DOP4000 y a través del software UDOP606 se grafica el eco de la señal como se puede observar en la Figura A.2. Antes del llenado del vaso de precipitado, se determinó la altura a la cual llegaría el líquido al verter los 80 ml y que correspondió a  $h = 40$  mm. De graficar la señal del eco es posible obtener un pico máximo justo en el valor de  $h$  para cierto valor de la velocidad del sonido.

Previo a la medición, se realizó una búsqueda en la literatura de los valores que han

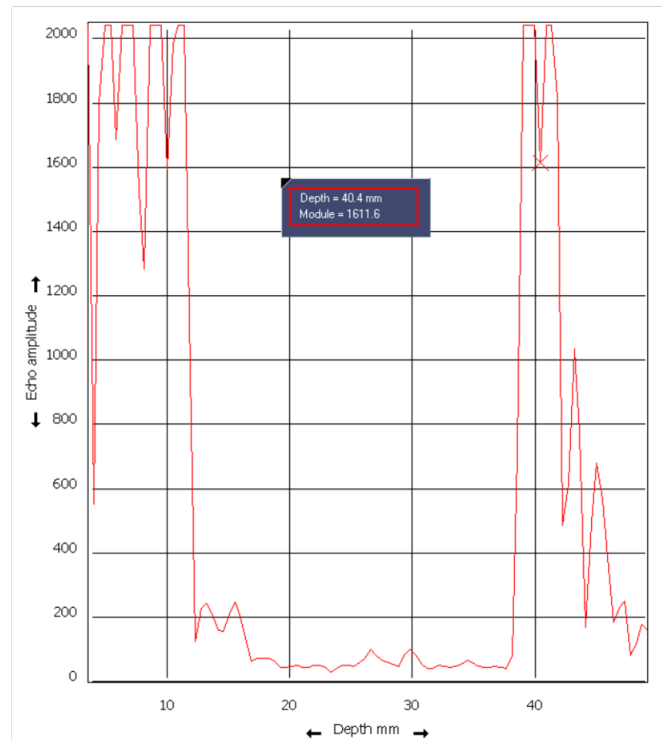


Figura A.2: Señal del eco para el GaInSn obtenida del software UDOP606.

sido utilizados para GaInSn. Morley y col. 2008 reportan un valor para la velocidad del sonido para una aleación de 67%Ga, 20,5% In y 12,5% Sn igual a 2730 m/s. Mientras que Rivero, 2012 reportó para la misma concentración una velocidad de 2725 m/s. Con estos antecedentes se estableció 2730 (m/s) como parámetro inicial y se modificó hasta acercarse al valor real que diera el pico de la señal eco a la altura  $h$ .

En la Tabla A.1 se muestran los resultados para los diferentes valores de velocidad del sonido y la distancia  $h$  a la cual se encuentra el pico máximo en la señal del eco. Dado el margen de error y las condiciones experimentales, se decidió tomar la velocidad del sonido para el GaInSn igual a 2450 m/s.

Velocidad del sonido (m/s)	$h$ (mm)
2730	44.1
2725	44
2500	41
2450	40.2
2400	39.4

Tabla A.1: Valores de  $h$  como función de la velocidad del sonido.



# B

## APÉNDICE B: PARÁMETROS Y LIMITACIONES UDV

---

### B.1. LIMITACIONES Y RESTRICCIONES DE VELOCIDAD

La técnica de velocimetría de ultrasonido por efecto Doppler ofrece instantáneamente un perfil de velocidad completo. Desafortunadamente, como la información está disponible solo periódicamente, esta técnica adolece del teorema de Nyquist (Perez y Kelley, 2015) el cual establece:

$$f_{d,max} = \frac{f_{prf}}{2} \quad (\text{B.1})$$

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

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

$$V_{max} = \frac{c f_{prf}}{4 f_e} \quad (\text{B.2})$$

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

$$P_{max} = \frac{c}{2 f_{prf}} \quad (\text{B.3})$$

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

$$P_{max} V_{max} = \frac{c^2}{8 f_e} \quad (\text{B.4})$$

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 grande 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 3D bajo ciertas condiciones.

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 determina la profundidad máxima medible, así como la frecuencia Doppler máxima que se puede medir sin ambigüedades. La profundidad 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.

- **Primera puerta:** La primera 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 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 dichos volúmenes. 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 UDOP 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 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.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Acosta-Zamora, K., & Beltrán, A. Study of electromagnetically driven flows of electrolytes in a cylindrical vessel: Effect of electrical conductivity, magnetic field, and electric current. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 191, 122854. ISSN: 0017-9310 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122854>.
- Aguilar-Campos, S. Caracterización experimental del flujo de un electrolito en una cavidad cúbica (2020).
- Aguilar-García, T., Rivero, M., Nunez, J., López, I., & Beltran, A. Effect of electromagnetically driven liquid metal flows on the electric potential difference in a cuboid vessel. *Journal of Power Sources*, 483, 229162 (2021). DOI: [10.1016/j.jpowsour.2020.229162](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229162).
- Amri. (2015). *Liquid metal battery cell technology*. <http://www.http://ambri.com/technology/>
- Ben Hadid, H., & Henry, D. Numerical study of convection in the horizontal Bridgman configuration under the action of a constant magnetic field. Part 2. Three-dimensional flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 333, 57-83 (1997). DOI: [10.1017/S002211209600420X](https://doi.org/10.1017/S002211209600420X).
- Boyarevich, A., & Gorbunov, L. Effect of magnetic fields of different orientation on thermogravitational convection in an electrically conducting fluid with a horizontal heat flow. 24, 148-154 (1988).
- Braunsfurth, M. G., Skeldon, A. C., Juel, A., Mullin, T., & Riley, D. S. Free convection in liquid gallium. *Journal of Fluid Mechanics*, 342. ISSN: 00221120 (1997). DOI: [10.1017/S0022112097005569](https://doi.org/10.1017/S0022112097005569).
- Burr, U., & Müller, U. Rayleigh-Benard convection in liquid metal layers under the influence of a vertical magnetic field. *Journal of Fluid Mechanics*, 453, 345-369 (2002). DOI: [10.1017/S002211200100698X](https://doi.org/10.1017/S002211200100698X).
- Burr, U., Barleon, L., Jochmann, P., & Tsinober, A. Magneto hydrodynamic convection in a vertical slot with horizontal magnetic field. *Journal of Fluid Mechanics*, 475, 21-40 (2003). DOI: [10.1017/S0022112002002811](https://doi.org/10.1017/S0022112002002811).
- Chandrasekhar, S. (1961). *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*.
- Chatterjee, D., Manna, N., Mandal, D., & Biswas, N. Effect of partial magnetic field on thermo gravitational convection in an inclined cavity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1080, 012030 (2021). DOI: [10.1088/1757-899X/1080/1/012030](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1080/1/012030).

- Cheng, J., Mohammad, I., Wang, B., Keogh, D., Forer, J., & Kelley, D. Oscillations of the large-scale circulation in experimental liquid metal convection at aspect ratios 1.4-3. *Journal of Fluid Mechanics*, 949, A42 (2022). DOI: [10.1017/jfm.2022.778](https://doi.org/10.1017/jfm.2022.778).
- Cheng, J., Mohammad, I., Wang, B., Forer, J. M., & Kelley, D. H. Laboratory model of electrovortex flow with thermal gradients for liquid metal batteries. *Experiments in Fluids*, 63(11) (2022). DOI: [10.1007/s00348-022-03525-3](https://doi.org/10.1007/s00348-022-03525-3).
- Climate.gov. (2020). *Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide* [Climate.gov image, based on data from NOAA Global Monitoring Lab.]. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- Communications-System. (2019). *What is the Doppler effect?* <https://www.qrg.northwestern.edu/projects/vss/docs/communications/3-what-is-the-doppler-effect.html>
- Crawley, A. F. Densities of Liquid Metals and Alloys. *International Materials Reviews*, 19, 32-48 (1974).
- Davidson, P. A. Magnetic damping of jets and vortices. *Journal of Fluid Mechanics*, 299, 153-186 (1995). DOI: [10.1017/S0022112095003466](https://doi.org/10.1017/S0022112095003466).
- Ding, Y., Guo, X., Qian, Y., Xue, L., Dolocan, A., & Yu, G. Room-Temperature All-Liquid-Metal Batteries Based on Fusible Alloys with Regulated Interfacial Chemistry and Wetting. *Advanced Materials*, 32. ISSN: 15214095 (2020). DOI: [10.1002/adma.202002577](https://doi.org/10.1002/adma.202002577).
- Dulikravich, G., & Colaco, M. Convective Heat Transfer Control Using Magnetic and Electric Fields, 133-144 (2004). DOI: [10.1615/ICHMT.2004.IntThermSciSemin.120](https://doi.org/10.1615/ICHMT.2004.IntThermSciSemin.120).
- Elton, E., Reeve, T., Thornley, L., Joshipura, I., Paul, P., Pascall, A., & Jeffries, J. Dramatic effect of oxide on measured liquid metal rheology. *Journal of Rheology*, 64, 119-128 (2020). DOI: [10.1122/1.5117144](https://doi.org/10.1122/1.5117144).
- Fauve, S., Laroche, C., & Libchaber, A. Effect of a horizontal magnetic field on convective instabilities in mercury. <http://dx.doi.org/10.1051/jphyslet:019810042021045500>, 42 (1981). DOI: [10.1051/jphyslet:019810042021045500](https://doi.org/10.1051/jphyslet:019810042021045500).
- Geraberger, T. German patent DE 4227434C2. August 1994, U.S. patent 6019509, 954-968 (2000).
- Gillespie, A. Global atmospheric carbon dioxide levels continue to rise. English. *National oceanic and atmospheric administration* (2022). <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2914/No-sign-of-significant-decrease-in-global-CO2-emissions>
- Guthrie, R., & Iida, T. Thermodynamic properties of liquid metals [NATO-Advanced Research Workshop on Undercooled Metallic Melts: Properties, Solidification and Metastable Phases]. *Materials Science and Engineering: A*, 178(1). NATO-Advanced Research Workshop on Undercooled Metallic Melts: Properties, Solidification and Metastable Phases, 35-41. ISSN: 0921-5093 (1994). DOI: [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)90515-0](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)90515-0).

- 
- Haomiao, L., Huayi, Y., Kangli, W., Shijie, C., Kai, J., & Donald, S. Liquid Metal Electrodes for Energy Storage Batteries. *Advanced Energy Materials*, 6 (2016). doi: [10.1002/aenm.201600483](https://doi.org/10.1002/aenm.201600483).
- Hernández Colorado, J. Isabelle Rousseau (coord.), América Latina y petróleo. Los desafíos políticos y económicos de cara al siglo XXI, México, El Colegio de México, 2010, 416 pp. Español. *Foro Internacional*. ISSN: 0185-013X (2012). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=59929087009>
- Horanyi, S., Krebs, L., & Müller, U. Turbulent Rayleigh-Bénard convection in low Prandtl-number fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 3983-4003 (1999).
- Kaneda, M., Tagawa, T., & Ozoe, H. Natural convection of liquid metal under a uniform magnetic field with an electric current supplied from outside. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30(3), 243-252. ISSN: 0894-1777 (2006). doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2005.07.001>.
- Karcher, C., Kolesnikov, Y., Andreev, O., & Thess, A. Natural convection in a liquid metal heated from above and influenced by a magnetic field. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 21(1), 75-90. ISSN: 0997-7546 (2002). doi: [https://doi.org/10.1016/S0997-7546\(01\)01164-5](https://doi.org/10.1016/S0997-7546(01)01164-5).
- Karcher, C., Kolesnikov, Y., Lüdtke, U., & Thess, A. Electromagnetic control of convective heat transfer in liquid metal flow during electron beam evaporation. *Energy Conversion and Management*, 43, 433-440 (2002). doi: [10.1016/S0196-8904\(01\)00114-5](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00114-5).
- Kolsi, L., Abidi, A., Mohamed, B., Daous, N., & ssia, H. Effect of an External Magnetic Field on the 3-D Unsteady Natural Convection in a Cubical Enclosure. *Numerical Heat Transfer Applications*, 51 (2006). doi: [10.1080/10407790601184462](https://doi.org/10.1080/10407790601184462).
- Lappa, M. (2010). *Thermal Convection: Patterns, Evolution and Stability*.
- Li, B., Lu, X., & De Groh, H. Finite element modeling of magnetically damped convection in conducting melts. *Fluid Flow Phenomena in Metals Processing*, TMS Publication, 458-470 (1999).
- Moffatt, K. On the suppression of turbulence by a uniform magnetic field. *Journal of Fluid Mechanics*, 28, 571-592 (1967). doi: [10.1017/S0022112067002307](https://doi.org/10.1017/S0022112067002307).
- Morley, N., Burris, J., Cadwallader, L., & Nornberg, M. GaInSn usage in the research laboratory. *Review of Scientific Instruments*, 79, 056107-056107 (2008). doi: [10.1063/1.2930813](https://doi.org/10.1063/1.2930813).
- Núñez, J. Simulación numérica de la convección bajo la influencia de fuerzas electromagnéticas y fuerzas de rotación. *Centro de Investigaciones en Energía, Programa de maestría y doctorado en ingeniería. Cuernavaca: Universidad Nacional Autónoma de México*. (2012).
- Núñez, J., & Beltrán, A. On the onset of natural convection in a partially cooled cylinder. *Heat Transfer Research*, 49 (2018). doi: [10.1615/HeatTransRes.2018019154](https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2018019154).
- OCEANA. (2020). *Cambio Climático*. <https://europe.oceana.org/es/cambio-climatico>
- Okada, K., & Ozoe, H. Experimental Heat Transfer Rates of Natural Convection of Molten Gallium Suppressed Under an External Magnetic Field in Either the

- X, Y, or Z Direction. *Journal of Heat Transfer-transactions of The Asme - J HEAT TRANSFER*, 114, 107-114 (1992). DOI: [10.1115/1.2911234](https://doi.org/10.1115/1.2911234).
- Omar, L., Wu, R., & Zhao, C. Experimental study on the effect of the liquid/surface thermal properties on droplet impact. *Thermal Science*, 25, 142-142 (2020). DOI: [10.2298/TSCI190905142L](https://doi.org/10.2298/TSCI190905142L).
- Ozoe, H., & Okada, K. The effect of the direction of the external magnetic field on the three-dimensional natural convection in a cubical enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer - INT J HEAT MASS TRANSFER*, 32, 1939-1954 (1989). DOI: [10.1016/0017-9310\(89\)90163-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(89)90163-4).
- Perez, A., & Kelley, D. Ultrasound Velocity Measurement in a Liquid Metal Electrode. *Journal of visualized experiments : JoVE*, 2015 (2015). DOI: [10.3791/52622](https://doi.org/10.3791/52622).
- Piazza, I., & Ciofalo, M. MHD free convection in a liquid-metal filled cubic enclosure. I. Differential heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 1477-1492 (2002). DOI: [10.1016/S0017-9310\(01\)00252-6](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00252-6).
- Plevachuk, Y., Sklyarchuk, V., Eckert, S., Gerbeth, G., & Novakovic, R. Thermophysical Properties of the Liquid Ga-In-Sn Eutectic Alloy. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 59, 757-763 (2014). DOI: [10.1021/je400882q](https://doi.org/10.1021/je400882q).
- Prokhorenko, V., Roshchupkin, V., Pokrasin, M., Prokhorenko, S. (, & Kotov, V. Liquid Gallium: Potential Uses as a Heat-Transfer Agent. *High Temperature*, 38, 954-968 (2000). DOI: [10.1023/A:1004157827093](https://doi.org/10.1023/A:1004157827093).
- Riahi, D. (2002). 12 - Effects of Rotation on Convection in a Porous Layer During Alloy Solidification. En D. B. Ingham & I. Pop (Eds.), *Transport Phenomena in Porous Media II* (pp. 316-340). Pergamon. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-008043965-5/50013-1>
- Ribeiro, A., Fabre, G., Guermond, J.-L., & Aurnou, J. Canonical Models of Geophysical and Astrophysical Flows: Turbulent Convection Experiments in Liquid Metals. *Metals*, 5, 289-335 (2015). DOI: [10.3390/met5010289](https://doi.org/10.3390/met5010289).
- Rivero, M. (2012). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DE FLUJOS EN DISPOSITIVOS DE BOMBEO Y AGITACIÓN ELECTROMAGNÉTICOS*.
- Secretaría de Energía, M. (2013). *Prospectiva de Energías Renovables 2013-2027.. Recuperado el 12 de Mayo de 2022*, [México: Secretaría de Energía]. [http://www.energia.gob.mx/webSener/res/PE\\_y\\_DT/pub/2013/Balance\\_2013.pdf](http://www.energia.gob.mx/webSener/res/PE_y_DT/pub/2013/Balance_2013.pdf)
- Secretaría de Energía, M. (2020). *Balance Nacional de Energía 2013. Dirección General de Planeación e Información Energéticas* [México: Secretaría de Energía]. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE\\_NACIONAL\\_ENERGIA\\_0403.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf)
- Signal-Processing. (2019). *Functioning principles of pulsed Doppler ultrasound* [Signal Processing]. <https://www.signal-processing.com/background.php>
- Stauffer, N. W. (2016). *A battery made of molten metals New battery may offer low-cost, long-lasting storage for the grid*. <https://news.mit.edu/2016/battery-molten-metals-0112>
- Tagawa, T., & Ozoe, H. The natural convection of liquid metal in a cubical enclosure with various electro-conductivities of the wall under the magnetic field. *Inter-*

- 
- national Journal of Heat and Mass Transfer - INT J HEAT MASS TRANSFER*, 41, 1917-1928 (1998). DOI: [10.1016/S0017-9310\(97\)00313-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00313-X).
- Weier, T. (2021a). *Fluid dynamic instabilities in liquid metal batteries*. <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=55224&pNid=226>
- Weier, T. (2021b). *Liquid Metal Batteries*. <https://europe.oceana.org/es/cambio-climatico>
- Xiang, L., & Zikanov, O. Numerical simulation of rolling pad instability in liquid metal batteries (2019).