



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA-PROCESOS Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN CIRCUITO
DE METAL LÍQUIDO IMPULSADO POR UNA BOMBA DE INDUCCIÓN MHD**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
DAVID ROBERTO DOMÍNGUEZ LOZOYA

DIRECTOR DE TESIS:
DR. SERGIO CUEVAS GARCÍA
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

TEMIXCO, MORELOS JULIO 2013



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Ramos Mora Eduardo

Secretario: Dr. Cuevas García Sergio

Vocal: Dr. Figueroa Lara Aldo

1er. Suplente: Dr. Rojas Menéndez Jorge Antonio

2do. Suplente: Dr. Ávalos Zúñiga Raúl Alejandro

Lugar donde se realizó la tesis:
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

TUTOR DE TESIS:
Dr. Cuevas García Sergio

FIRMA

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial al Instituto de Energías Renovables donde me brindaron todas las facilidades para realizar este trabajo.

A CONACyT, ya que este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo económico otorgado, así como al proyecto de CONACYT No. 131399 “Flujos magnetohidrodinámicos en campos magnéticos inhomogéneos”.

Resumen

En este trabajo se llevó a cabo el diseño, la construcción y la caracterización inicial de un circuito experimental de metal líquido (GaInSn) propulsado por una bomba magneto-hidrodinámica (MHD) de inducción de imanes permanentes con diseño de discos. Dicho circuito se utilizó para el análisis preliminar de flujos de metal líquido, dentro de un ducto de sección transversal rectangular constante. El interés principal por desarrollar una bomba MHD de inducción y estudiar flujos de fluidos eléctricamente conductores en ductos, radica en que estos flujos son de gran importancia en áreas como la metalurgia, el procesamiento de materiales y el diseño de reactores de fusión. En el Capítulo 1 se presenta una introducción de las características de los sistemas de bombeo, con un particular énfasis en las bombas electromagnéticas (bombas MHD), así como su desarrollo. Con el fin de proporcionar un marco teórico para el estudio de los flujos de líquidos conductores en campos magnéticos, en el Capítulo 2 se presentan las ecuaciones que gobiernan los fenómenos magnetohidrodinámicos. En el Capítulo 3 se describe el diseño que se llevó a cabo para la construcción de la bomba MHD de inducción de imanes permanentes con diseño de discos, así como también del circuito de pruebas para flujos de metal líquido, que en conjunto conforman la instalación experimental para el estudio de flujos MHD. En el Capítulo 4 se presentan las diferentes condiciones en las que se puede operar el equipo experimental, la metodología con la que se desarrollaron los experimentos, así como el tipo de mediciones que se realizaron. Los primeros resultados obtenidos con el equipo experimental se presentan en el Capítulo 5, los cuales sirvieron para la caracterización de la bomba, de los flujos hidrodinámicos establecidos por ésta, así como de los flujos en presencia de un campo magnético localizado. Finalmente se plantean las conclusiones y las ventajas que presenta el equipo experimental construido. Los resultados de este trabajo pueden ser de utilidad en el diseño de dispositivos de bombeo electromagnético y diversos equipos que utilicen metales líquidos.

Índice general

1. Introducción	1
2. Ecuaciones fundamentales de la MHD	9
2.1. Ecuaciones de la dinámica de fluidos	9
2.1.1. Conservación de masa	10
2.1.2. Conservación de la cantidad de movimiento	10
2.1.3. Conservación de la energía	10
2.2. Ecuaciones del campo electromagnético	11
2.2.1. Ecuaciones de Maxwell	11
2.2.2. Conservación de la carga	13
2.2.3. Ley de Ohm	13
2.2.4. Fuerza de cuerpo electromagnética	13
2.3. Aproximación MHD	14
3. Descripción del diseño del equipo experimental	17
3.1. Diseño de la bomba MHD de inducción de imanes permanentes	17
3.1.1. Sistema magnético activo	19
3.1.2. Sistema motriz	22
3.1.3. Sistema de transmisión motriz	22
3.1.4. Partes complementarias	23
3.2. Diseño del circuito para la caracterización de flujos de metal líquido	24
3.2.1. Zonas de bombeo y de pruebas	25
3.2.2. Mirillas de nivel	26
3.2.3. Zona de llenado y vaciado	26
3.3. Diseño de la estructura para el montaje de la bomba y el circuito	27
4. Metodología experimental	31
4.1. Configuraciones magnéticas de la bomba de inducción MHD	31
4.2. Metal líquido y medición de perfiles hidrodinámicos y MHD	32

5. Resultados Experimentales	37
5.1. Caracterización hidrodinámica	37
5.1.1. Características de los flujos y obtención de los perfiles de velocidad	37
5.1.2. Cálculo del gasto	40
5.1.3. Cálculo del número de Reynolds	42
5.2. Caracterización de flujos MHD	43
5.2.1. Características del flujo MHD y obtención de los perfiles de velocidad	45
5.2.2. Cálculo del gasto y del número de Reynolds	49
6. Conclusiones y trabajo a futuro	53
A. Velocimetría Ultrasónica por efecto Doppler	55
Bibliografía	59

Capítulo 1

Introducción

A través de la historia, la humanidad ha necesitado transportar diferentes tipos de fluidos para satisfacer ciertas necesidades, tales como suministrar agua desde lo profundo de un pozo hasta el asentamiento de una comunidad, trasladar el petróleo extraído a kilómetros de profundidad en mar abierto hacia plataformas sobre el nivel del mar, o transportar metales fundidos a altas temperaturas para su transformación en herramientas y equipos. Esta gran variedad de fluidos, así como las diferentes condiciones en las que se encuentran, ha dado lugar a una amplia gama de sistemas de bombeo, los cuales con el desarrollo de la tecnología otorgan la posibilidad de mantener las condiciones y propiedades de dichos fluidos dentro de los requerimientos específicos que el proceso demande (propiedades: químicas, mecánicas, térmicas, etc.). La mayoría de los sistemas de bombeo utilizan métodos mecánicos para proporcionar el impulso al fluido de trabajo, tales como los sistemas de desplazamiento positivo, entre los que destacamos las bombas reciprocantes (de diafragma, émbolo, pistón) y las bombas rotatorias (de pistón, engranes, lóbulos) o los sistemas rotodinámicos (centrífuga, de turbina, de ariete). La característica que distingue a estos sistemas de bombeo, es que cada uno cuenta con una parte mecánica que interactúa directamente con el fluido de trabajo o suministra otro fluido a alta velocidad que realice la función de proporcionar el impulso al fluido de trabajo. Estos tipos de bombas pueden ayudar a resolver muchos de los problemas que se presentan en la industria, en laboratorios o en el hogar. Sin embargo, existen otras aplicaciones que hacen que este tipo de bombas convencionales sean inadecuadas, como cuando es necesario transportar fluidos a altas temperaturas o altamente corrosivos, ya que las partes mecánicas que se mantienen en continuo contacto con el fluido pueden ser afectadas y perjudicar la vida útil de la bomba. Otro inconveniente se presenta cuando se trata de manipular materiales a los que no es deseado modificar sus propiedades, tales como los metales líquidos o sustancias químicas de alta pureza, los cuales pueden ser afectados por las partes mecánicas de las bombas convencionales. Ejemplos muy claros de estas situaciones se encuentran en la industria metalúrgica o en la industria nuclear, donde es necesario transportar metales líquidos, así como también en la industria petroquímica donde se presenta la necesidad de bombear sales fundidas. Para estas aplicaciones se le ha encontrado mucha utilidad a la bomba electromagnética.

La bomba electromagnética fue desarrollada por J. Hartmann en 1918 [1, 2], la cual tiene como principio utilizar una fuerza electromagnética para impulsar el fluido de trabajo, éste siendo necesariamente un fluido eléctricamente conductor. Convencionalmente estas bombas son mejor conocidas como bombas magnetohidrodinámicas (MHD), las cuales pueden ser clasificadas en dos importantes grupos: las bombas MHD de conducción y las bombas MHD de inducción.

El principio básico de las bombas MHD conductoras se establece mediante la aplicación de una fuerza electromagnética denominada “*fuerza de Lorentz*”, originada por la interacción de un campo magnético (establecido por imanes permanentes o por electroimanes) y de una corriente eléctrica aplicada a través de electrodos especialmente dispuestos, de manera que se genera una fuerza impulsora perpendicular tanto al campo como a la corriente aplicada. El esquema de una bomba MHD de conducción se observa en la Fig. 1.1.

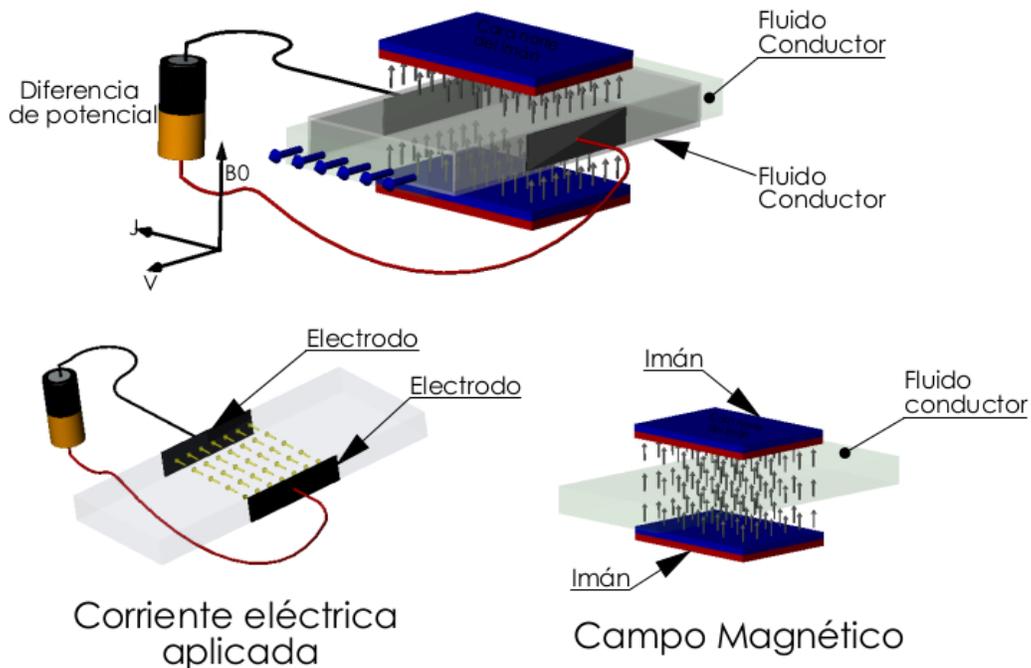
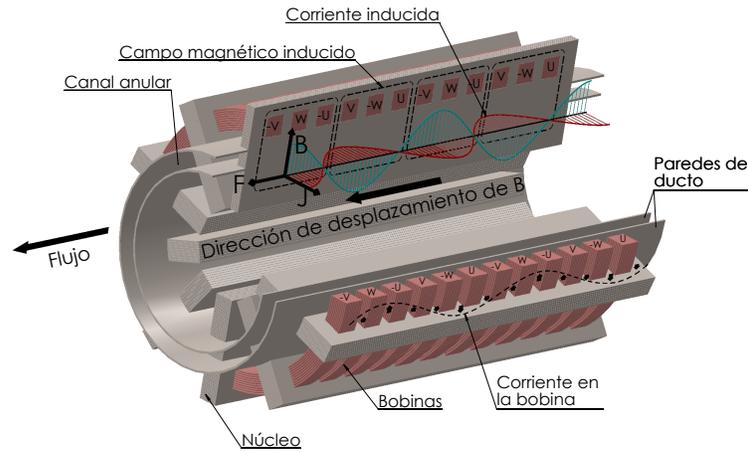


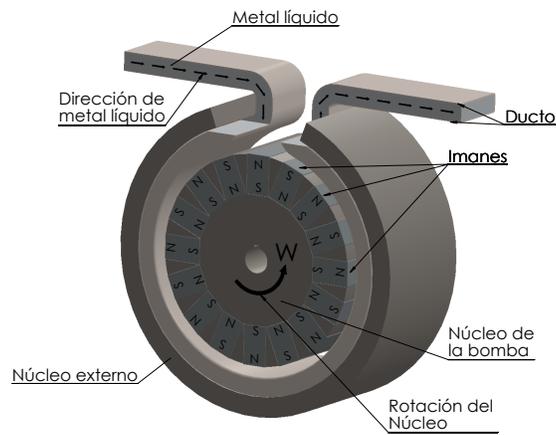
Fig. 1.1: Esquema de una bomba electromagnética de conducción.

Análogamente, las bombas MHD inductivas producen una *fuerza de Lorentz*, solo que esta fuerza se origina cuando las corrientes eléctricas inducidas por la variación espacial o temporal del campo, interactúan con el mismo campo aplicado obteniendo así una fuerza sobre el fluido conductor que da lugar al movimiento del mismo. Enfocándonos en su forma de construcción podemos identificar dos diseños de bombas de inducción, las que generan el campo magnético por medio de devanados (electroimanes) como se muestra en la Fig. 4.3a

y las que están constituidas con imanes permanentes como se ejemplifica en la Fig. 4.3b. Este diseño de “Bomba MHD de inducción de imanes permanentes” es en el que centraremos nuestra atención en este trabajo de investigación.



(a)



(b)

Fig. 1.2: Tipos de bombas electromagnéticas de inducción. a) Bomba basada en electroimanes. b) Bomba basada en imanes permanentes.

El diseño de bomba MHD de inducción en el que nosotros trabajamos consta de un ducto de sección transversal rectangular con paredes aislantes, donde dos de estas paredes para-

lelas del ducto se encuentran bajo la presencia de un campo magnético perpendicular, externo y variable, producido por imanes permanentes con polaridad alterna, colocados en dos discos de acero paralelos rotatorios, entre los cuales se encuentra el ducto completamente lleno del fluido conductor (metal líquido). Más adelante se especificará con detalle el diseño de la bomba construida en el Instituto de Energías Renovables (IER). (ver Fig. 1.3).

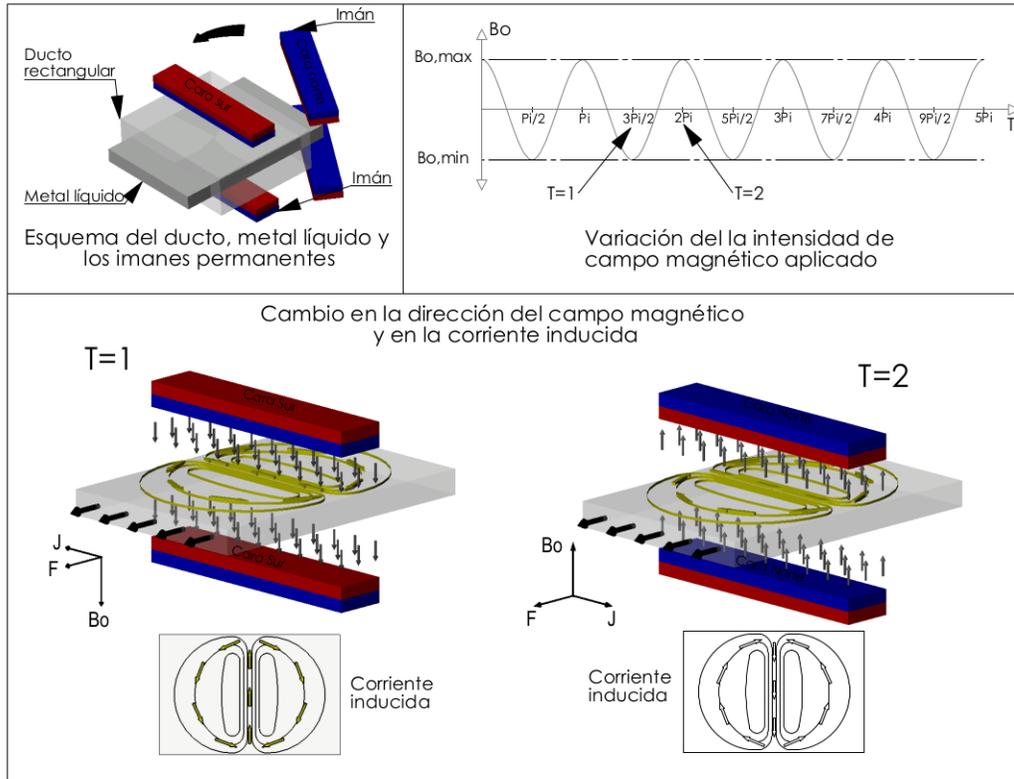


Fig. 1.3: Esquema de funcionamiento de una bomba electromagnética de inducción de imanes permanentes.

Este tipo de dispositivos surgen gracias al descubrimiento que realizó el inglés Michael Faraday, quien hizo público en 1831 que una variación en el flujo magnético que atraviesa un circuito da lugar a una corriente eléctrica lo que más tarde sería conocido como la Ley de Inducción Faraday [3].

Fue hasta inicios del siglo XX que la MHD empezó a tener auge, ya que aparecieron los primeros inventos y patentes de diferentes dispositivos, como la primera Bomba MHD de conducción diseñada y patentada por Northrup en 1907 [4] y el primer generador MHD patentado por Christian Petersen en 1923 [5], el cual funciona de manera inversa a la de una bomba, ya que extrae la corriente eléctrica generada al momento en que un fluido eléctricamente conductor pasa a través de un campo magnético y corta sus líneas de flujo. Otro dispositivo que cabe señalar es un refrigerador que utilizó la primera bomba MHD de in-

ducción (ver Fig. 1.4), lo que fue una de las invenciones más exitosas y revolucionarias de Albert Einstein y Leo Szilar en 1931 [6].

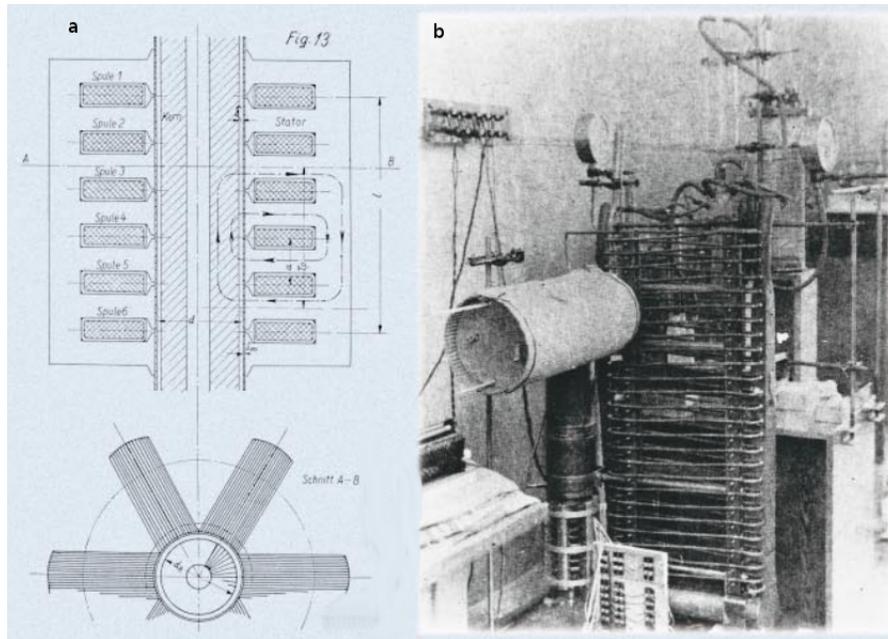


Fig. 1.4: En la región azul (a) se muestra un corte longitudinal de la Bomba Electromagnética de Inducción inventada por Einstein y Szilar [6]. Se pueden apreciar el arreglo de los devanados (bobinas), así como la ejemplificación del flujo magnético. También se muestra un corte transversal donde se distingue el ducto por donde fluye el metal líquido de manera concéntrica al estátor. Del lado derecho (b) se muestra un montaje de un refrigerador casi completo, donde se puede observar la bomba de inducción posicionada de manera vertical. Esta imagen fue tomada en el año de 1932 y descubierta por Gene Dannen en 1997 [6].

En este siglo también se iniciaron los primeros estudios teóricos y experimentales de fluidos eléctricamente conductores (flujos MHD) dentro de ductos, ya que Williams [7] publicó en 1930 los primeros resultados experimentales de electrolitos que fluían en tubos aislados. Fue en 1936 y 1937 que Hartmann y Lazarus [2, 8] realizaron experimentos con mercurio cuya alta conductividad eléctrica permitió observar de una mejor manera los efectos MHD que presentaba el fluido en presencia de campos magnéticos.

El término Magnetohidrodinámica fue utilizado por primera vez por Alfvén [9] en 1942, mientras que el término “estado de turbulencia MHD” fue utilizado en 1950 por G. K. Batchelor [9] en un artículo publicado en la revista de la Royal Society. En las siguientes décadas la investigación en MHD se incrementó sustancialmente. Shercliff [9] demostró experimentalmente en 1965 que la componente de vorticidad perpendicular al campo magnético aplicado tiende a ser suprimida.

En la segunda mitad del siglo XX la metalurgia se vio beneficiada por el desarrollo de la magnetohidrodinámica. En particular, en la conferencia de la Unión Internacional de

Mecánica Teórica y Aplicada (IUTAM, por sus siglas en inglés) celebrada en Cambridge, Inglaterra en 1982, se realizó una presentación titulada "The application of magnetohydrodynamics to metallurgy", lo que dio un mayor impulso a esta disciplina. Entre otros aspectos, se reconoció que la aplicación de campos magnéticos en flujos de metal líquido puede modificar la distribución del campo de velocidad, controlar la transferencia de calor y mejorar el mezclado. Estas y otras aplicaciones hacen uso de la fuerza de Lorentz, que permite interactuar con el fluido de una manera no intrusiva.

Los reactores de fusión son otra área de aplicación de la MHD que despegó en los años 50s, dado a que el plasma donde se lleva a cabo la reacción se encuentra a temperaturas de miles de grados, por lo que contenerlo se vuelve todo un desafío. Al ser el plasma conductor de electricidad, es posible contenerlo y manipularlo mediante campos magnéticos intensos que permiten confinarlo lejos de las paredes solidas [1, 9, 10]. Otra aplicación de la MHD en los reactores de fusión, es la extracción del calor generado por la reacción nuclear, lo que se logra al hacer fluir metal líquido através de lo que se conoce como "manto"(que se encuentra después de la primera pared sólida de contención). El metal líquido (comunemente Litio, una aleación eutéctica de Pb-17Li o $LiF - 34BeF_2$ [9]) alcanza temperaturas que van desde los 450 y 500 °C y es difícil de manipular con bombas convencionales, por lo que ha sido de gran utilidad las bombas MHD.

Poder conocer como se comporta un fluido eléctricamente conductor dentro de un campo magnético es de vital importancia para muchos procesos industriales, ya que se pueden tomar decisiones para un mejor desempeño de los procesos. Uno de los objetivos de este trabajo es desarrollar un equipo en el que podamos realizar experimentos de flujos magnetohidrodinámicos de metal líquido de manera controlada con el fin de estudiar las características físicas de estos flujos. Para tal fin, se diseñó y construyó una bomba MHD de inducción de imanes permanentes, así como un circuito por donde fluye el metal líquido y es posible realizar mediciones de velocidad mediante el método de Velocimetría Ultrasónica por efecto Doppler (UDV por sus siglas en inglés).

Para poder comprender los flujos magnetohidrodinámicos de interés en el presente estudio, es necesario conocer las ecuaciones que rigen tanto la mecánica de fluidos como los fenómenos electromagnéticos. Al acoplar los dos grupos de ecuaciones antes mencionados y aplicar ciertas aproximaciones, se llega a las ecuaciones fundamentales de la MHD, las cuales se describen brevemente en el Capítulo 2.

En el Capítulo 3 se presenta el diseño de la bomba MHD de inducción de imanes permanentes, así como también el diseño del circuito y la estructura en el que se soportan ambos dispositivos.

En el Capítulo 4 se muestra la metodología con la que se llevaron a cabo los experimentos, las condiciones en las que se operó la bomba, las variantes que se exploraron y el equipo

que se utilizó para la caracterización de los flujos analizados.

El análisis de resultados experimentales se describe en el Capítulo 5, donde se presentan las variantes del comportamiento de las diferentes condiciones de operación de la bomba y los flujos obtenidos.

Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y el trabajo a futuro que puede ser llevado a cabo en el equipo experimental.

Capítulo 2

Ecuaciones fundamentales de la MHD

La Magnetohidrodinámica es el estudio de la dinámica de fluidos conductores de electricidad (líquidos o gases no magnetizables) en presencia de campos eléctricos y magnéticos. Cuando un fluido eléctricamente conductor, se encuentra en movimiento relativo a un campo magnético, se presentan dos fenómenos básicos de acoplamiento. Primero, el campo magnético provoca que se induzcan corrientes eléctricas en el medio, las cuales a su vez inducen un campo magnético (campo magnético inducido) que modifica el campo existente. Segundo, la interacción del campo magnético y la corriente eléctrica inducida produce una fuerza de cuerpo sobre el fluido conocida como la fuerza de Lorentz, la cual modifica el estado inicial de reposo o movimiento del fluido.

El conjunto de ecuaciones que describen los fenómenos MHD comprenden las ecuaciones de la dinámica de fluidos y las ecuaciones del electromagnetismo. La deducción de estas ecuaciones se encuentran en un gran número de libros (ver por ejemplo [1, 11, 12, 13]). El objetivo de este capítulo es presentar de una manera breve el marco teórico de la MHD enfocado a los problemas físicos que se abordan en este trabajo de investigación.

2.1. Ecuaciones de la dinámica de fluidos

Existen dos tipos de fuerzas que pueden afectar el estado de movimiento de un fluido, es decir, las fuerzas de superficie (como las fuerzas de presión o las viscosas) y las fuerzas de cuerpo o volumen como por ejemplo, las gravitacionales y las electromagnéticas. Para poder caracterizar un fluido es necesario conocer como función de la posición y del tiempo ciertas variables físicas, tales como velocidad, presión, densidad, temperatura, etc. Se considera que estas variables están definidas en cada punto del espacio en el que se encuentra el fluido y que varían de una manera suave, aplicando de esta forma la hipótesis del continuo y despreciando la naturaleza atómica de la materia. Otra aproximación importante que se realiza en un gran número de aplicaciones prácticas que involucran flujos de gases o líquidos, es considerar que los fluidos mantienen su densidad constante, por lo que se les puede tomar como incompresibles. Las ecuaciones que determinan la variación temporal

y espacial de las variables que describen al fluido se obtienen de los principios de conservación de masa, cantidad de movimiento (momentum) y energía, así como de ecuaciones constitutivas y ecuaciones de estado.

2.1.1. Conservación de masa

El principio de conservación de masa indica que la masa M contenida en un volumen V se mantiene constante. En un fluido incompresible donde la densidad se mantiene constante, dicho principio se expresa en forma diferencial como

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (2.1)$$

donde \vec{u} es el campo vectorial de velocidad.

2.1.2. Conservación de la cantidad de movimiento

El principio de conservación de la cantidad de movimiento consiste en aplicar la *Segunda Ley de Newton* a un elemento de volumen del fluido. Los fluidos que son de interés en este trabajo son los metales líquidos, los que podemos considerar como fluidos Newtonianos. Por lo tanto si aplicamos la *Segunda ley de Newton* a esta clase de fluidos, se obtiene como resultado la ecuación de Navier-Stokes que en forma diferencial se expresa como:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{\rho} \vec{f}, \quad (2.2)$$

donde ρ , ν , p y \vec{f} son la densidad del fluido, la viscosidad cinemática, la presión y las fuerzas de cuerpo externas, respectivamente. Es necesario expresar \vec{f} de manera explícita, la cual dependerá directamente de las condiciones físicas a las que esté sujeto el flujo en cuestión. Para los fines de esta investigación, donde tendremos fluidos eléctricamente conductores en presencia de campos magnéticos, la fuerza de cuerpo de mayor relevancia será la fuerza de Lorentz que se presentará posteriormente.

2.1.3. Conservación de la energía

El principio de conservación de la energía es una aplicación de la primera ley de la termodinámica a un elemento de volumen de fluido en movimiento, utilizando la hipótesis de equilibrio local. Este principio da lugar a la ecuación de balance de energía o ecuación de transferencia de calor y para un fluido incompresible está desacoplada de las dos anteriores. Para el problema que se pretende abordar en este trabajo de investigación esta

ecuación no es de relevancia ya que no se tratarán problemas de transferencia de calor y solo se presentará aquí para completar el sistema de ecuaciones. En forma diferencial se expresa como

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{T} \cdot \nabla)T \right] = \nabla \cdot (k \nabla T) + \frac{\vec{j}^2}{\sigma} + \Phi_v, \quad (2.3)$$

donde c_p es el calor específico a presión constante, T es el campo de temperatura, k es la conductividad térmica, \vec{j} es el vector densidad de corriente eléctrica, σ es la conductividad eléctrica del medio y Φ_v denota la disipación viscosa la cual involucra términos cuadráticos de los gradientes de velocidad. El penúltimo término del lado derecho de la ecuación (2.3) corresponde a la disipación óhmica generada por la circulación de corrientes eléctricas en el fluido.

2.2. Ecuaciones del campo electromagnético

Las ecuaciones que se han presentado hasta ahora son insuficientes para describir los fenómenos físicos que se tratan en este trabajo de investigación, ya que se debe considerar la interacción del fluido eléctricamente conductor con campos electromagnéticos. Por lo que es necesario complementarlas con las ecuaciones del electromagnetismo [13].

2.2.1. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell son un conjunto de cuatro ecuaciones que sintetizan el comportamiento experimental de los fenómenos electromagnéticos. Estas ecuaciones relacionan los vectores de intensidad de campo eléctrico (\vec{E}), y de inducción magnética (\vec{B}), con sus fuentes, que son las cargas y las corrientes eléctricas. A continuación se describen brevemente las ecuaciones macroscópicas de Maxwell en un medio homogéneo, isotrópico y lineal [13].

Ley de Gauss para el campo eléctrico

Para el caso del campo eléctrico la ley de Gauss establece que el flujo neto a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga neta encerrada por la superficie. En forma diferencial se expresa como

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_e}{\epsilon}, \quad (2.4)$$

donde ρ_e es la densidad de carga eléctrica y ϵ la permitividad eléctrica del medio.

Ley de Gauss para el campo magnético

Cuando tratamos con campos magnéticos la ley de Gauss expresa la inexistencia de cargas magnéticas aisladas, ya que la fuente de estos campos siempre posee un polo norte y un polo sur (dipolos magnéticos). De esta manera su flujo a través de cualquier superficie cerrada es nulo. La forma diferencial de la ley de Gauss para campos magnéticos está expresada de la siguiente manera

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0. \quad (2.5)$$

Ley de Faraday

La ley de Faraday nos habla sobre la inducción electromagnética. Ésta establece que la fuerza electromotriz inducida (f.e.m.) en un circuito es directamente proporcional a la rapidez con la que cambia en el tiempo el flujo magnético que lo atraviesa. Para cada punto del espacio la ley de Faraday se puede expresar de la forma

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (2.6)$$

En otras palabras, la ley de Faraday establece la posibilidad de producir un campo eléctrico a partir de la variación de un campo magnético.

Ley de Ampère-Maxwell

La ley de Ampère establece que un campo magnético puede ser producido por una corriente eléctrica que no varía en el tiempo (corriente eléctrica estacionaria). Maxwell generalizó esta ley para poder considerar también que un campo eléctrico que varía con el tiempo produce un campo magnético y además ser consistente con el principio de conservación de la carga. La expresión diferencial de la ley de Ampère-Maxwell toma la forma

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{j} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (2.7)$$

donde μ es la permeabilidad magnética del medio. La permeabilidad magnética de los metales líquidos y de los electrolitos es aproximadamente igual a la del vacío μ_0 . El segundo término del lado derecho se denomina la corriente de desplazamiento de Maxwell y es indispensable para la descripción de los fenómenos donde la frecuencia del campo electromagnético es muy alta.

2.2.2. Conservación de la carga

Este principio afirma que la carga eléctrica no se crea ni se destruye, de manera que si en una superficie cerrada la carga eléctrica contenida en su interior disminuye, debe existir un flujo de corriente neto hacia el exterior del sistema, mientras que si la carga eléctrica contenida aumenta, debe ser por la existencia de un flujo neto de corriente hacia el interior del sistema. Esta ecuación se obtiene al aplicar el operador divergencia a la ley de Ampère-Maxwell (2.7) y al utilizar la ecuación de la ley de Gauss (2.4), dando como resultado la siguiente ecuación

$$\nabla \cdot \vec{j} + \frac{\partial \rho_e}{\partial t} = 0. \quad (2.8)$$

2.2.3. Ley de Ohm

Es necesario complementar las ecuaciones de Maxwell con una ecuación constitutiva que relacione la densidad de corriente eléctrica en el medio con los campos \vec{E} y \vec{B} . Para fines de este trabajo de investigación, la ecuación más común que satisfacen la mayoría de los materiales conductores, en particular los metales líquidos, es la ley de Ohm. Esta ley establece una relación lineal entre la densidad de corriente eléctrica y el campo eléctrico en el medio. Desde el sistema de laboratorio respecto al cual el fluido se desplaza con una velocidad \vec{u} , la expresión para la ley de Ohm está dada en la forma

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) + \rho_e \vec{u}, \quad (2.9)$$

donde el término $\rho_e \vec{u}$ se conoce como la corriente convectiva.

2.2.4. Fuerza de cuerpo electromagnética

Por último, debemos considerar la fuerza electromagnética ejercida sobre el medio debido a la interacción de los campos eléctrico (\vec{E}) y magnético (\vec{B}). En un medio continuo con una distribución de densidad de carga eléctrica ρ_e y una densidad de corriente \vec{j} , la fuerza

electromagnética que experimenta el medio continuo al moverse a través de un campo magnético está dada por

$$\vec{f} = \rho_e \vec{E} + \vec{j} \times \vec{B}. \quad (2.10)$$

2.3. Aproximación MHD

Como ya se ha comentado la Magnetohidrodinámica es el estudio de la dinámica de fluidos conductores de electricidad en presencia de campos eléctricos y magnéticos, por lo que para realizar este estudio es necesario llevar a cabo el acoplamiento de las ecuaciones de la dinámica de fluidos y las ecuaciones del campo electromagnético. Las ecuaciones de la dinámica de fluidos son ecuaciones no relativistas por lo que son invariantes ante transformaciones galileanas. Por otro lado, las ecuaciones del campo electromagnético son ecuaciones relativistas y por lo tanto los cambios entre sistemas de coordenadas se realizan mediante transformaciones de Lorentz. Para lograr un acoplamiento adecuado de las ecuaciones y poder describir el tipo de fenómenos observados en laboratorio, es necesario realizar algunas aproximaciones para simplificar las ecuaciones del campo electromagnético. Las aproximaciones son las siguientes:

- No se consideran fenómenos relativistas. La velocidad del fluido en problemas de laboratorio es mucho menor que la velocidad de la luz (c), es decir $c^2 \gg u^2$. De esta manera las ecuaciones de Maxwell pierden la forma relativista y así pueden ser acopladas a las ecuaciones de balance de la dinámica de fluidos.
- No se consideran fenómenos que involucren altas frecuencias. Los flujos tienen lugar en campos magnéticos cuasi-estacionarios o a bajas frecuencias, implicando de esta forma que el término de la corriente de desplazamiento ($\mu\epsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$) de la ley Ampère-Maxwell (Ecu.2.7) es despreciable.
- Se considera que los campos eléctricos inducidos son de orden $\vec{u} \times \vec{B}$.

Este conjunto de simplificaciones se denominan la aproximación MHD y un análisis detallado de la misma puede encontrarse en diferentes libros, por ejemplo en el de Hughes y Young [14]. Bajo la aproximación MHD, las ecuaciones fundamentales de la MHD quedan

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{\rho} \vec{j} \times \vec{B}, \quad (2.12)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2.13)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2.14)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{j}, \quad (2.15)$$

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}). \quad (2.16)$$

Nótese que la ecuación de conservación de energía (2.3) no se encuentra explícita, dado a que en este trabajo de investigación no es importante determinar los campos de temperatura. Por otro lado se ha ignorado la ecuación de Gauss para el campo eléctrico, esto debido a que dicho campo queda completamente definido por la ley de Faraday (2.14), la ley de Ampère (2.15) y la ley de Ohm (2.16).

Cuando se tratan problemas en el laboratorio con metal líquido, es muy importante tener en consideración las corrientes inducidas, las cuales a su vez inducen un campo magnético, como se mencionó previamente. Para la mayoría de los flujos MHD a nivel industrial y de laboratorio, el campo magnético inducido es muy pequeño en comparación con el campo magnético aplicado. Este hecho se puede expresar a través de un número adimensional conocido como el número magnético de Reynolds, definido como $R_m = \mu_0 \sigma v_c D$ donde v_c y D son la velocidad y la longitud característica del flujo. Entonces para los flujos de interés en este trabajo se tiene $R_m \ll 1$. Es posible obtener una ecuación de transporte para el campo magnético inducido a partir de las ecuaciones [(2.13)-(2.16)]. Dicha ecuación se conoce como la ecuación de inducción y tiene la forma

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nu_m \nabla^2 \vec{B} + \nabla \times (\vec{u} \times \vec{B}), \quad (2.17)$$

donde $\nu_m = \frac{1}{\mu_0 \sigma}$ se conoce como la difusividad magnética. En esta ecuación el transporte de campo magnético inducido por difusión está representado por $\nu_m \nabla^2 \vec{B}$, mientras que el transporte por convección viene dado por el término $\nabla \times (\vec{u} \times \vec{B})$. La simulación numérica del tipo de flujos de interés en este trabajo puede realizarse a partir de las ecuaciones (2.11), (2.12) y (2.17), eliminando la densidad de corriente eléctrica en la ecuación (2.12) mediante la ecuación de Ampère (2.15). De esta forma se obtiene un sistema completo de siete ecuaciones y siete incógnitas (\vec{u} , p y \vec{B}). En un futuro se espera utilizar las ecuaciones aquí presentadas para desarrollar un modelo numérico que simule los flujos que tienen lugar en el dispositivo experimental.

Capítulo 3

Descripción del diseño del equipo experimental

Para llevar a cabo experimentos de flujos de metal líquido (aleación eutéctica $GaInSn$) en presencia de campos magnéticos, fue necesario realizar el diseño de una bomba, de un circuito de prueba que permitiera la caracterización de los flujos MHD de metal líquido y de una estructura donde se pudiera montar tanto a la bomba como al circuito de prueba. En este capítulo describen las características de diseño y operación de cada uno de los componentes que integran el sistema experimental.

3.1. Diseño de la bomba MHD de inducción de imanes permanentes

Como ya se ha comentado anteriormente, el funcionamiento de una bomba MHD de inducción de imanes permanentes se basa en la inducción de una corriente eléctrica en el fluido a partir de campos magnéticos permanentes rotatorios. Dicha corriente interactúa con el mismo campo aplicado para producir la fuerza de Lorentz que impulsa al metal líquido. Ese tipo de bombas ofrecen las siguientes ventajas:

- Una mayor simplicidad en la construcción. Al no tener devanados, este tipo de bombas no requieren un aislamiento eléctrico. Esta característica ocasiona también que algunos diseños de bombas MHD de inducción de imanes permanentes sean de un menor peso y tamaño.
- No se requiere un consumo de potencia eléctrica para la creación del campo magnético aplicado.
- No es necesario un sistema de enfriamiento para la generación del campo magnético.
- Mayor eficiencia al no tener que invertir energía a la generación del campo magnético.

Existen básicamente dos conceptos de diseño de bombas MHD de inducción de imanes permanentes [15]. El primer concepto es conocido como “*Diseño Cilíndrico*”, en el cual

el sistema magnético activo está compuesto por un cilindro sólido fabricado con un material ferromagnético, en donde los imanes permanentes se encuentran fijos. A esta sección también se le conoce como rotor magnético (ver Fig. 3.1). Alrededor del rotor magnético se sitúa el ducto de la bomba, diseñado con una sección transversal rectangular constante. Entre el ducto y el rotor debe haber un pequeño espacio que permita la rotación libre del rotor. La forma del ducto alrededor del rotor magnético, lo que se conoce como la parte magnética activa, varía con respecto a la longitud total del ducto. Se entiende como parte magnética activa a la zona donde interactúa el campo magnético con el metal líquido dentro del ducto. Comúnmente se utilizan dos tipos de forma para esta parte del ducto: Forma-C, en la que el canal solo cubre la mitad de la parte magnética activa o la forma- Ω o en heradura, que intenta cubrir en su mayoría a la parte magnética activa al envolver el rotor magnético (ver Fig. 3.1). Alrededor del canal se coloca un yugo (anillo externo) de material ferromagnético, el cual se instala para aumentar la intensidad del campo magnético en el metal líquido. Este yugo ferroso es opcional, pero cuando no está presente la eficiencia de la bomba es considerablemente más baja, debido a la menor intensidad del campo magnético.

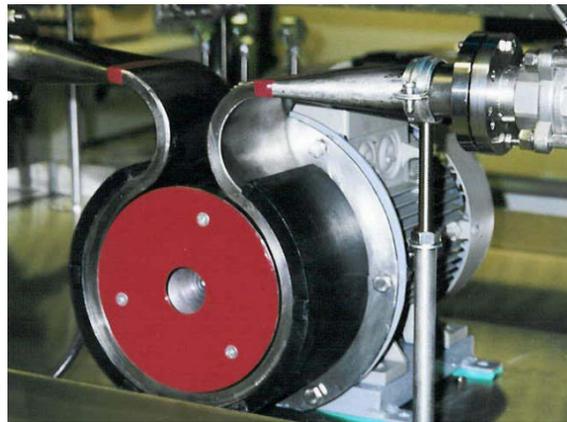


Fig. 3.1: Ejemplo de bomba MHD de inducción de imanes permanentes con diseño cilíndrico y forma- Ω [15].

Otro concepto de diseño de una bomba MHD de inducción de imanes permanentes se conoce como “*Diseño de Discos*” (Fig. 3.2), en el que el sistema magnético activo consiste en dos discos sólidos de un material ferromagnético con imanes permanentes fijados en ellos en dirección radial y entre los cuales se encuentra el ducto por el que circula el metal líquido, el cual también cuenta con una sección transversal rectangular. Los discos con los imanes permanentes empotrados se ponen en rotación a través de un motor eléctrico para lograr el impulso del fluido. De la misma manera que en la bomba de diseño cilíndrico la forma del ducto que se sitúa entre los discos puede tener forma-C o forma- Ω . Dicha forma determina asimismo la longitud del ducto que constituye la parte magnética activa. La ventaja de la bomba de diseño de discos en comparación con la bomba de diseño cilíndrico es que no hay necesidad de colocar un yugo de material ferromagnético en el exterior, ya que ambos discos cuentan con imanes permanentes que intensifican el campo aplicado.

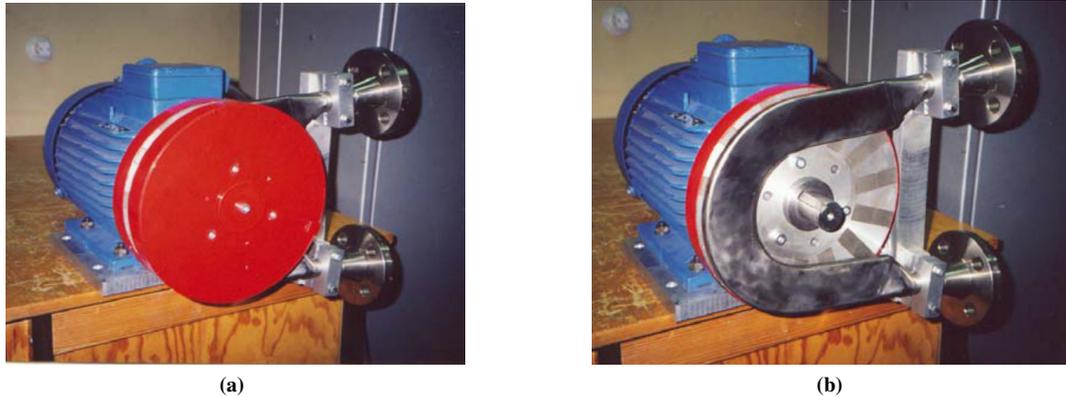


Fig. 3.2: Ejemplo de bomba MHD de inducción de imanes permanentes con diseño tipo discos. a) Bomba con ambos discos, b) Bomba con un solo disco, mostrando la sección del canal [15].

Por simplicidad en su construcción, para este trabajo se decidió llevar a cabo el diseño de discos. La bomba que se diseñó es muy sencilla y está constituida básicamente por tres componentes principales: el sistema magnético activo, el sistema motriz (motor) y el sistema de transmisión motriz (eje).

Tomando en consideración las necesidades que presentan cada uno de los tres componentes básicos de una bomba MHD de inducción de imanes permanentes, considerando las características dimensionales de los equipos y piezas que se adquirieron de fabrica (motor e imanes), se desarrolló el diseño de cada una de las demás piezas que constituyen la bomba, tales como los discos, el eje, el cople, las tuercas y contratueras de sujeción de los discos. En gran medida las dimensiones de los componentes de la bomba estuvieron dictadas, a su vez, por las dimensiones del ducto por donde circula el metal líquido, que se describe más adelante. Dado que el metal líquido es muy costoso, se trató de minimizar la cantidad necesaria en todo el circuito, lo que impuso restricciones sobre el tamaño del ducto. Finalmente se obtuvo un diseño completo de la bomba, el cual se puede observar en la Fig. 3.3. Las especificaciones de cada uno de los componentes se presentan a continuación.

3.1.1. Sistema magnético activo

Como se comentó previamente, una parte importante del sistema magnético activo en este tipo de bombas está constituido por dos discos de un material ferromagnético. En la Fig. 3.4 se muestran las características de estos discos, los cuales están fabricados en acero AISI 1045, lo que indica que es un acero sin ningún tipo de aleación y que cuenta con un 0.45 % de carbono (C). Esta calidad de acero presenta una permeabilidad magnética relativa (μ_r) aproximada de 1000 [16], lo que implica que los discos muestren un aumento en la intensidad del campo magnético cuando el campo aplicado interactúa con estos. Un conjunto de imanes permanentes de alta intensidad son los elementos que establecen el campo magnético activo, los cuales se montan sobre 24 ranuras diseñadas en los discos.

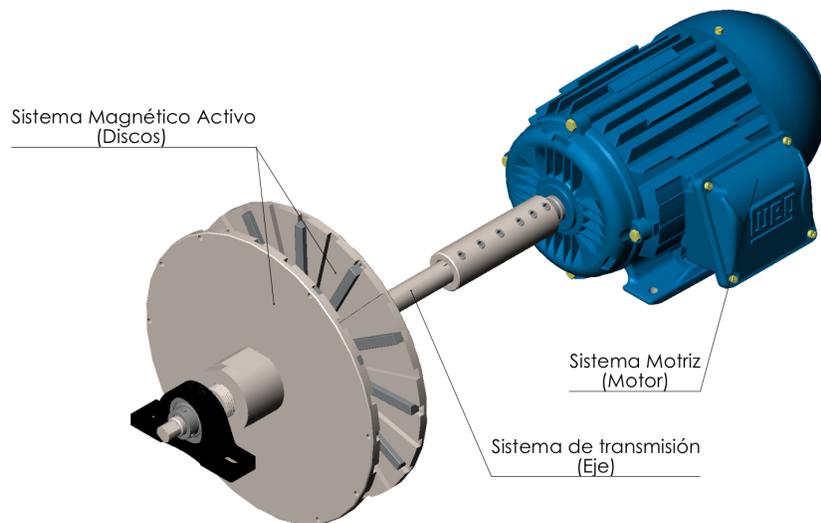


Fig. 3.3: Esquema de la bomba MHD de inducción de imanes permanentes con diseño de discos.

Esta calidad de imanes intensos se fabrica con tierras raras y para este equipo se utilizaron unos imanes que están constituidos por una aleación basada en neodimio con una fórmula $Nd_2Fe_{14}B$. Para desarrollar este trabajo se adquirieron tres tamaños diferentes de imanes en forma de paralelepípedos, de los cuales 16 piezas tienen una dimensión de $100\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ (donde las distancias corresponden a largo, alto y ancho respectivamente), 10 piezas de $85\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ y 25 piezas de $80\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$. El decaimiento de la intensidad del campo magnético como función de la distancia y las características de cada uno de los imanes, se muestran en las Figs. 3.5, 3.6 y 3.7.

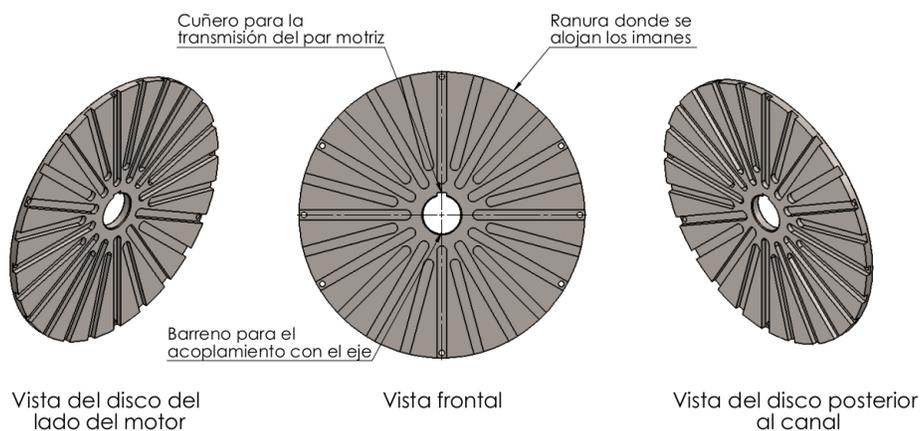
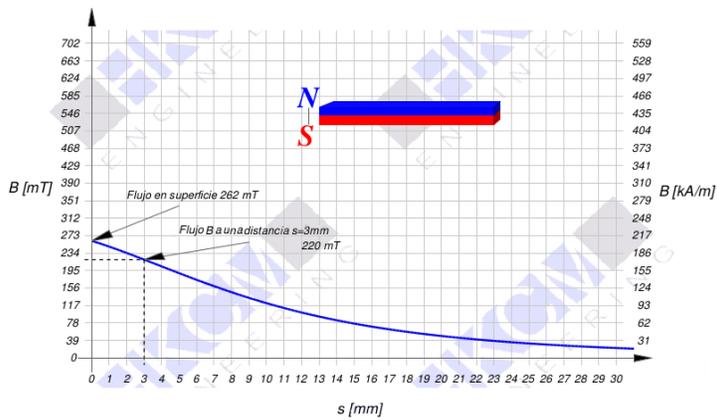
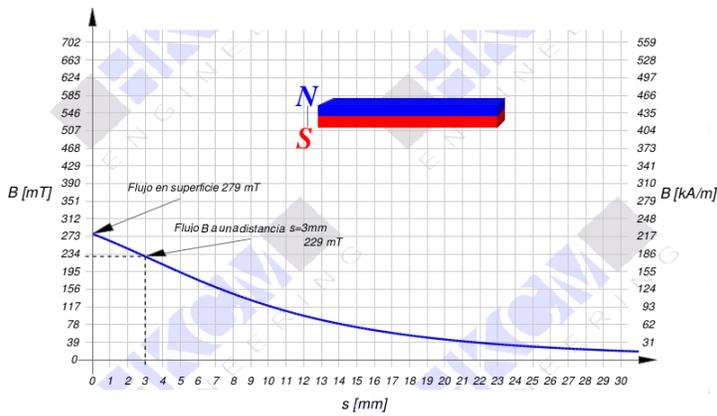


Fig. 3.4: Discos de acero AISI 1045 sobre los cuales se colocan los imanes permanentes.



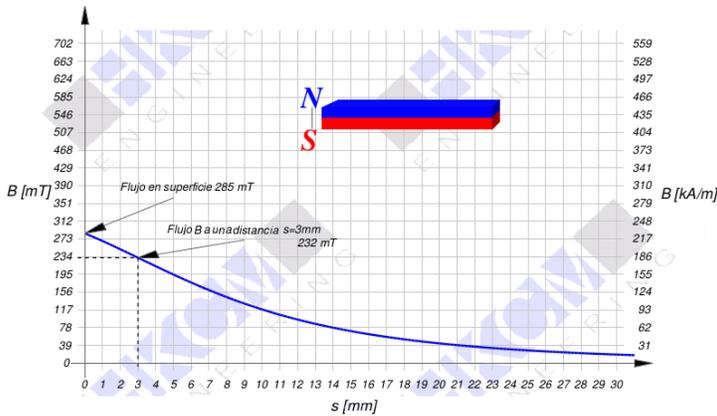
Material	Nd ₂ Fe ₁₄ B
Grado	N35
Superficie	Niquelada
Inducción residual	1.17 T
Max. Temp. de trabajo	80°C
Peso	0.074 kg

Fig. 3.5: En la figura. se puede observar la intensidad del campo magnético (B) como función de la distancia (s) para el imán de dimensiones 100 mm × 10 mm × 10 mm . En el recuadro lateral se muestran las características del imán.



Material	Nd ₂ Fe ₁₄ B
Grado	N35
Superficie	Niquelada
Inducción residual	1.17 T
Max. Temp. de trabajo	80°C
Peso	0.063 kg

Fig. 3.6: En la figura. se puede observar la intensidad del campo magnético (B) como función de la distancia (s) para el imán de dimensiones 85 mm × 10 mm × 10 mm . En el recuadro lateral se muestran las características del imán.



Material	Nd ₂ Fe ₁₄ B
Grado	N35
Superficie	Niquelada
Inducción residual	1.17 T
Max. Temp. de trabajo	80°C
Peso	0.059 kg

Fig. 3.7: En la figura. se puede observar la intensidad del campo magnético (B) como función de la distancia (s) para el imán de dimensiones 80 mm × 10 mm × 10 mm . En el recuadro lateral se muestran las características del imán.

3.1.2. Sistema motriz

El sistema motriz está constituido por un motor eléctrico marca WEG. La imagen y las características importantes de este motor se encuentra en la Fig. 3.8.



Potencia	746 W (1 HP)
Frecuencia	60 Hz
Polos	4
Rotación nominal	1755 rpm
Voltaje nominal	220/440 V
Corriente nominal	2.92/2.46 A
Par nominal	4.08 Nm
Clase de aislamiento	F
Factor de servicio	1.25

Fig. 3.8: En la figura se observa una representación del motor. En el recuadro lateral se muestran algunas características del mismo.

3.1.3. Sistema de transmisión motriz

Este sistema consta esencialmente de un eje con el que se transmite el par del motor hacia el sistema magnético activo. Este eje está diseñado con acero inoxidable austenítico del tipo AISI 304, material que nos brinda una gran confianza al momento de trabajar con imanes permanentes de alta intensidad, ya que su permeabilidad magnética relativa (μ_r) es menor a 200, por lo que no presenta una atracción significativa con los imanes. Otro beneficio que nos brinda este material, es que tiene una muy buena resistencia a la corrosión y ya que es necesario cuidar el metal líquido dado a que tiene un alto costo, el acero inoxidable nos brinda seguridad al momento de ocurrir un derrame. En la Fig. 3.9 se muestran las características de este eje de transmisión.

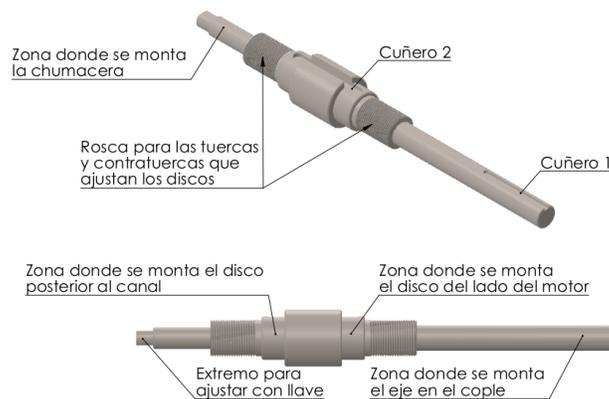


Fig. 3.9: Eje de transmisión del par motriz. El Cuñero 1 se acopla con el motor y el Cuñero 2 se acopla con los discos del sistema magnético activo.

3.1.4. Partes complementarias

Para que la bomba pueda realizar su trabajo es necesario complementar los tres principales componentes con algunos aditamentos que sirvan de eslabón entre estos. Una de las necesidades básicas es poder transmitir el par del motor al eje y de éste hacia los discos del sistema magnético activo. Para esto primeramente se realizó el diseño de un cople, el cual ayuda a transmitir el torque del motor al eje. Para transmitir el torque a los discos se diseñaron juegos de tuercas y contratuercas, lo cuales mantienen fijos y en una posición segura a los discos sobre el eje. En la Fig. 3.10a y Fig. 3.10b se observan las características del cople y de los juegos de tuercas y contratuercas. Es necesario mencionar que estas piezas están fabricadas de acero inoxidable, debido a los motivos ya antes mencionados.

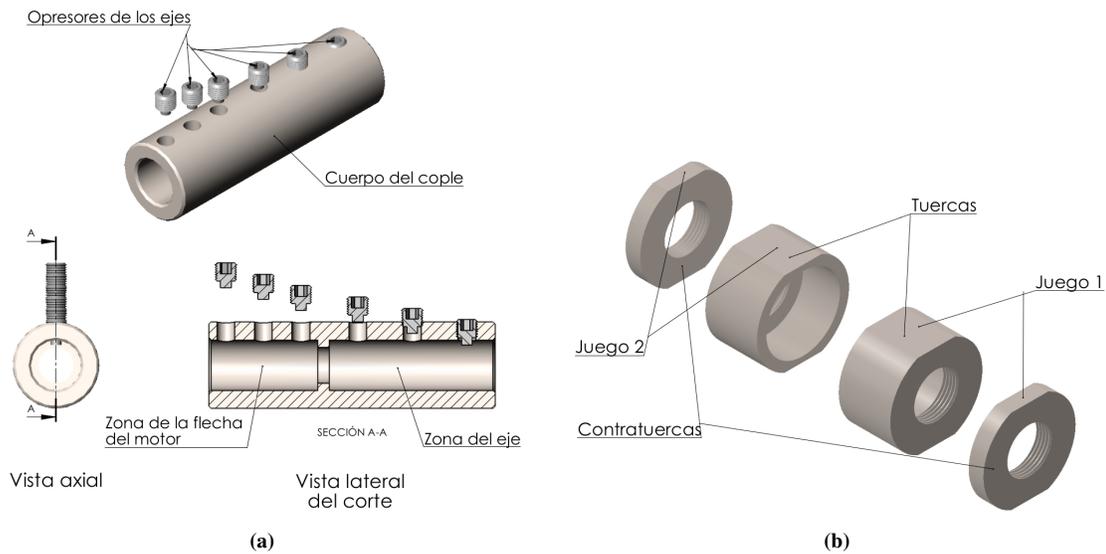


Fig. 3.10: Aditamentos del sistema motriz. a) Cople que transmite el par motriz entre el motor y el eje. b) Juegos de tuercas y contratuercas que se utilizan para la sujeción de los discos, donde el Juego1 es de rosca derecha y el Juego2 es de rosca izquierda.

Tener un buen control en la estabilidad y el balance de la bomba es de gran importancia ya que se desea trabajar con un equipo que tenga la menor vibración posible. Por tal motivo, fue necesario soportar al eje desde dos puntos, uno en el lado del motor y otro al extremo contrario. Para el punto de apoyo del lado del motor se utilizó el cople ya antes mencionado, mientras que para soportar el otro extremo del eje se utilizó un rodamiento (chumacera de piso), que permitió tener otro punto de apoyo con la menor resistencia a la rotación y de esta manera tener un mejor balance.

3.2. Diseño del circuito para la caracterización de flujos de metal líquido

Cuando se establecen flujos de líquidos conductores de electricidad en presencia de campos magnéticos se producen diferentes efectos a causa de la geometría del ducto y de las propiedades eléctricas del material del que están constituidas las paredes del mismo. Una de las situaciones donde se observan estos efectos es cuando se trabaja con flujos turbulentos. Se ha demostrado experimentalmente que cuando se aplica un campo magnético a un flujo de líquido conductor de electricidad, la turbulencia tiende a ser bidimensionalizada, formando vórtices alargados en la dirección del campo magnético aplicado. Cuando las paredes del ducto son eléctricamente conductoras, la turbulencia es rápidamente amortiguada debido a la intensificación de las corrientes eléctricas que circulan a través del fluido y el ducto lo que acarrea una mayor disipación óhmica. A su vez, cuando las paredes son aislantes las estructuras cuasi-bidimensionales persisten durante un tiempo mucho mayor [17]. Lo anterior muestra la importancia de considerar cuidadosamente los materiales y la geometría del circuito de pruebas.

Con la finalidad de minimizar la cantidad de metal líquido requerido pero al mismo tiempo contar con un dispositivo de un tamaño adecuado para poder realizar mediciones experimentales, se decidió contruir un circuito con una capacidad cercana a los $2L$, basado en ductos de geometría rectangular con paredes eléctricamente aislantes. La sección transversal se diseñó con dimensiones de $80\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, de alto y ancho, respectivamente, con un espesor de 8 mm en las paredes laterales y 15 mm en las paredes superior e inferior (ver Fig. 3.11). El material seleccionado para construir el circuito es *Polimetilmetacrilato*, el cual presenta propiedades de aislamiento eléctrico y presenta características magnéticas inocuas al tener una permeabilidad magnética relativa (μ_r) de 1. Otra de las ventajas del polimetilmetacrilato es que es fácilmente maquinable y no es necesaria alguna técnica especial para unir diferentes piezas del mismo material.

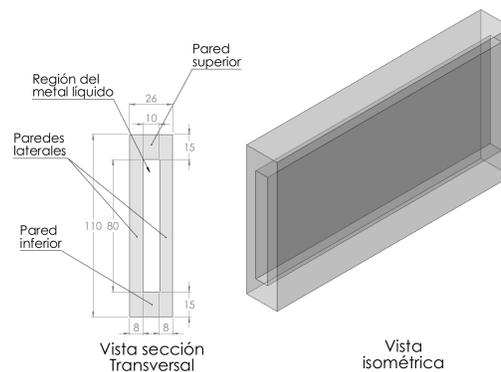


Fig. 3.11: Dimensiones de la sección transversal del ducto.

En el diseño del circuito de pruebas se buscó que fuera lo más sencillo posible y brindara la posibilidad de realizar un fácil ensamblaje, un llenado rápido con el metal líquido (de forma que evitara tenerlo expuesto al ambiente durante mucho tiempo) y una reparación rápida en caso de que el ducto se dañara. Para cumplir con este propósito se diseñó un circuito rectangular con dos secciones de 858 mm de longitud y las otras dos de 400 mm. El circuito consta de cuatro principales zonas: zona de bombeo, zona de pruebas, mirillas de nivel y zona de llenado y vaciado, las cuales se acoplan mediante bridas. El diseño completo del circuito de pruebas se puede observar en la Fig. 3.12, donde se ha omitido la bomba MHD para visualizarlo de manera íntegra. Las especificaciones de cada uno de las zonas del circuito se presentan a continuación.

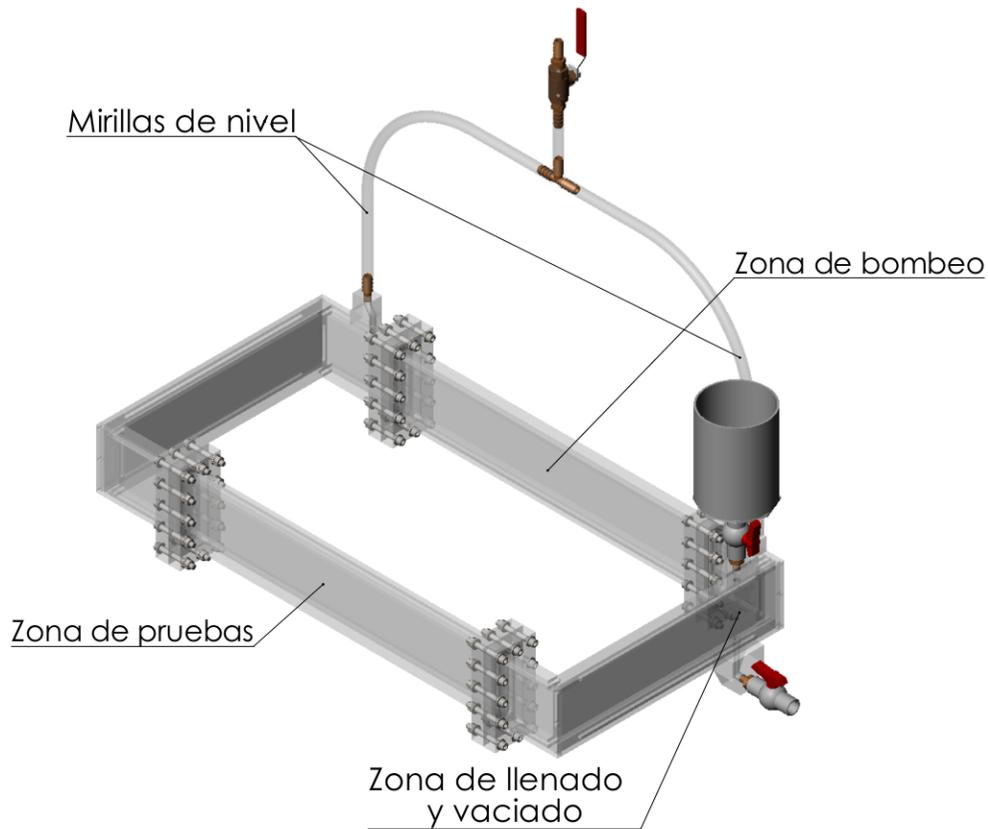


Fig. 3.12: Circuito de pruebas.

3.2.1. Zonas de bombeo y de pruebas

Como se observa en la Fig. 3.12 existen dos zonas idénticas del circuito en sus lados largos, una de las cuales fue diseñada para colocar la bomba de modo que el ducto queda entre los dos discos del sistema magnético activo, y otra donde se establecen las diferentes condiciones electromagnéticas que se requieran en los experimentos, es decir, donde se colocan

los campos magnéticos externos necesarios para el estudio de flujos MHD específicos. Estas dos secciones del circuito tienen un longitud de 594 mm y cuentan con bridas en sus extremos, las cuales nos permiten realizar un fácil montaje y desmontaje. Aunque en esta etapa del proyecto se considera realizar experimentos con el ducto de paredes de polimetilmetacrilato (paredes aislantes), no se descarta en un futuro sustituir con otra que tenga paredes eléctricamente conductoras y de esta manera estudiar el efecto sobre las condiciones de frontera producido por la conductividad eléctrica del material o bien abordar otro tipo de problemas como el análisis de un generador eléctrico MHD [1]. En la Fig. 3.14 se pueden observar las características de estas secciones del circuito.

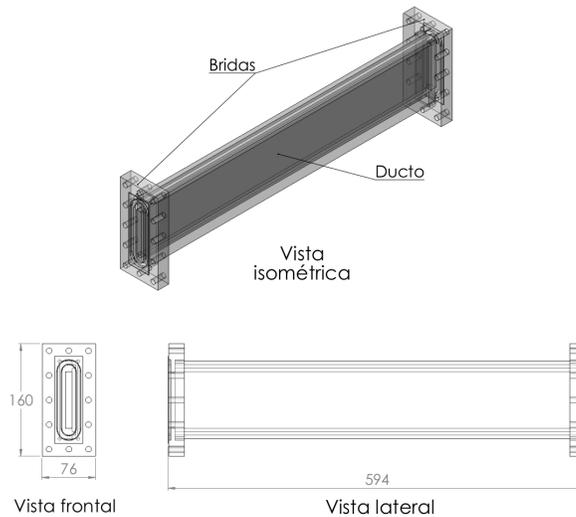


Fig. 3.13: Sección del canal para la zonas de bombeo y de pruebas.

3.2.2. Mirillas de nivel

Estas mirillas se encuentran del lado de la sección del circuito donde se ubica la zona de bombeo y están localizadas en los extremos pasando las uniones de las bridas. La intención de colocarlas en estos sitios es monitorear el aumento y la caída de presión que la bomba establece cuando ésta se encuentra funcionando. De forma tal que si la bomba se encuentra funcionando a muy bajas revoluciones y el flujo que establece es un tanto pulsante, podremos notar sus oscilaciones en el momento que el nivel del fluido suba y baje. Hay que tener en cuenta que las mirillas se encuentran interconectadas entre si mediante una manguera, buscando que ambas se encuentren bajo las mismas condiciones.

3.2.3. Zona de llenado y vaciado

Después de diseñar el circuito, es necesario ahora tener la posibilidad realizar un llenado y vaciado rápido del metal líquido, para evitar lo más posible la exposición de éste al

ambiente, lo que provoca que se oxide. De forma tal que se desarrollaron implementos que ayudan a este propósito. En la Fig. 3.14 se observa de manera detallada esta zona del circuito.

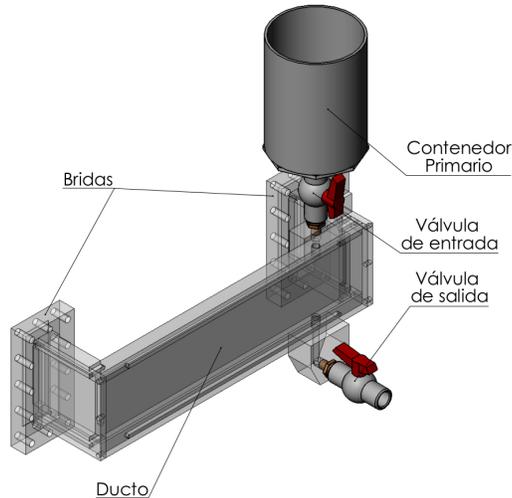


Fig. 3.14: Sección del canal para la zonas de llenado y vaciado.

El llenado de metal líquido se realizó colocando un poco más del volumen necesario para llenar el circuito de pruebas en el contenedor primario. Hay que mencionar que el metal líquido, que como se mencionó es una aleación eutéctica de GaInSn líquida a temperatura ambiente, se mantuvo bajo una capa de ácido clorhídrico diluido al 5 % (vol) mientras éste se encontraba en el contenedor. Previamente se hizo fluir un gas inerte (argón) a través del ducto, ingresándolo por la válvula de salida del metal líquido y forzando su salida por el extremo de las mirillas. Finalmente se abrió la válvula del entrada y se llenó el ducto.

Hay que mencionar que en la construcción de este circuito fue necesario utilizar algunos aditamentos especiales. Por ejemplo, en la conexión de las bridas fueron necesarios algunos tornillos de acero inoxidable con sus respectivas tuercas, arandela plana y de presión, los cuales no afectan los experimentos debido a que cuentan con una permeabilidad magnética muy baja. También se utilizaron juntas tóricas (mejor conocidos como *O-ring*) entre las bridas para tener un mejor sello en su unión. Otros aditamentos utilizados fueron: reducciones, conectores rosca-espiga, “T” tipo espiga, entre otros. Todas estas piezas fueron seleccionadas con el cuidado de que no alterar los efectos magnetohidrodinámicos.

3.3. Diseño de la estructura para el montaje de la bomba y el circuito

Con el fin de llevar a cabo los experimentos de una manera conveniente y segura, fue necesario realizar el diseño de una estructura de montaje del equipo experimental que evitara la interferencia de las vibraciones de la bomba sobre el flujo y los equipos de

medición. Por tal motivo, se desarrollaron estructuras separadas para la bomba y el circuito.

La estructura que soporta el circuito de pruebas cumple dos funciones. La primera es mantener seguro el dispositivo en una posición donde se pueda caracterizar el flujo del fluido. La segunda función es brindar la seguridad de que en caso de que ocurra algún accidente, como un derrame de metal líquido, éste pueda ser recuperado con facilidad y en las mejores condiciones posibles. Con este propósito se diseñó una estructura a la cual se le adaptó una superficie en forma de tarja, ambas en acero inoxidable. Para su dimensionamiento se consideró la posición óptima del circuito para llevar a cabo las mediciones de caracterización del flujo en el circuito experimental. Esto requiere separar el circuito de la superficie de la mesa o tarja, ya que se requieren hacer mediciones a lo largo del ducto y si éste se encuentra en contacto con la mesa, se complica la colocación del instrumento de medición. Por tanto fue necesario diseñar soportes que mantuvieran a una cierta distancia entre el circuito y la superficie de la tarja.

Para la bomba fue necesario diseñar una estructura que soportara al motor pero que también brindara soporte a la chumacera que carga el otro extremo del eje. Recordando que la zona de bombeo del circuito de prueba queda entre los discos, se notará que la estructura que brinda apoyo a la chumacera y la mesa interfieren. Considerando la necesidad de que la bomba y el circuito de pruebas permanezcan desacoplados, se realizó una modificación a la mesa. En la Fig. 3.15 se observa el arreglo de ambas estructuras.

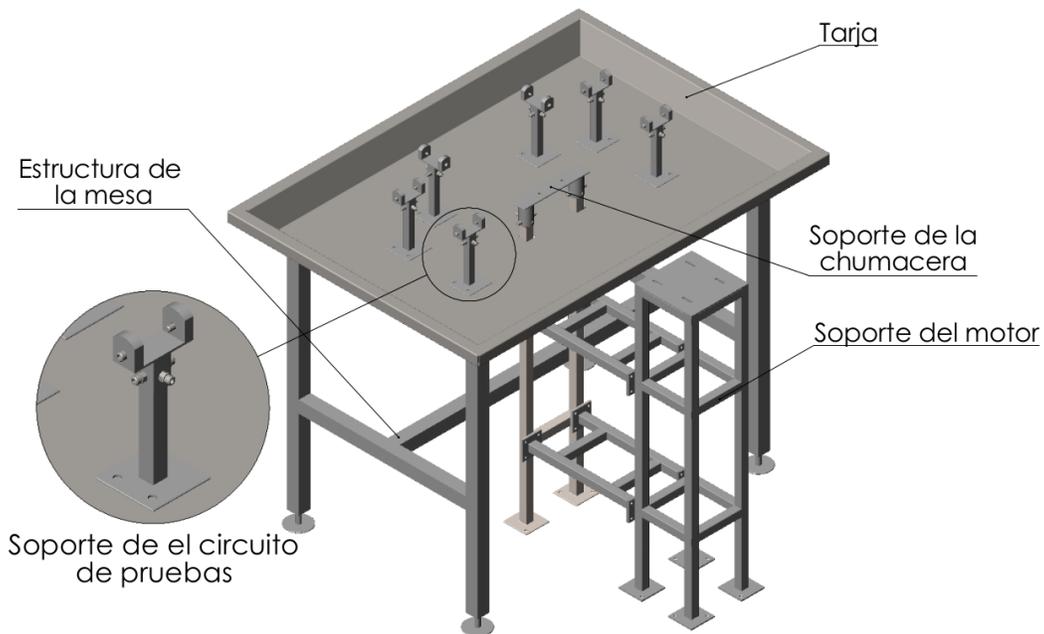


Fig. 3.15: Estructuras que soportan a la bomba y al circuito de pruebas.

Concluyendo los diseños de cada uno de los elementos del equipo experimental se obtuvo finalmente un diseño integral, el cual se muestra en la Fig. 3.16. A partir de este diseño se construyó el dispositivo experimental que fue armado en el Laboratorio de Magneto-hidrodinámica del Departamento de Termociencias del IER. En la Fig. 3.17 se muestra una fotografía de dicho dispositivo.

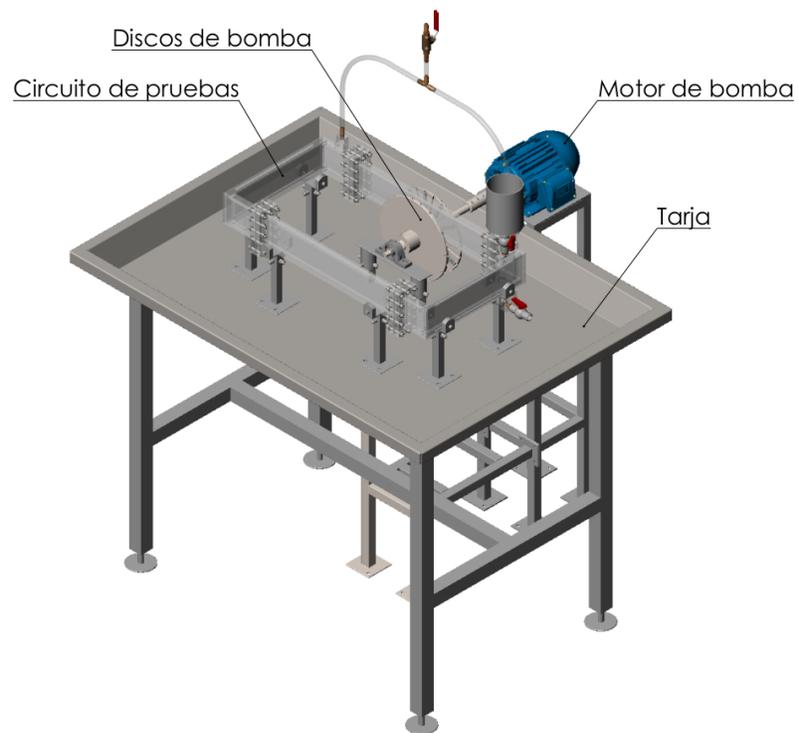


Fig. 3.16: Diseño del equipo experimental.



Fig. 3.17: Dispositivo experimental construido.

Capítulo 4

Metodología experimental

Como ya se ha comentado anteriormente, la finalidad del equipo experimental es caracterizar tanto la bomba MHD de inducción de imanes permanentes con diseño de discos, como los flujos que tienen lugar en el circuito de metal líquido. Dichos flujos pueden ser puramente hidrodinámicos o bien magnetohidrodinámicos. En este capítulo se realizará una descripción de la metodología experimental que se desarrolló para las caracterizaciones mencionadas.

4.1. Configuraciones magnéticas de la bomba de inducción MHD

Las diferentes distribuciones de campo magnético entre los discos de la bomba, influyen directamente en el comportamiento y eficiencia de la misma, por lo que el diseño realizado se basó en tener la versatilidad de manejar diferentes arreglos o configuraciones de imanes, así como también variar la dirección preferencial del campo magnético. Utilizar un arreglo de imanes adecuado puede representar un incremento de hasta 1.4 veces la intensidad del campo en algunas regiones específicas. Una configuración magnética típica utilizada para estas bombas es el “*arreglo de Halbach*” [18]. Como ya se explicó anteriormente, los discos de la bomba cuentan con 24 ranuras cada uno y éstos están dispuestos a manera de espejo el uno con el otro, lo que representa que cada imán tiene su equivalente del otro lado del ducto. De esta forma, si se coloca un imán con el flujo magnético con orientación norte de manera normal a la superficie de las paredes laterales del ducto, en la posición correspondiente del otro disco podrá existir una polaridad magnética sur que incremente la intensidad del campo en el centro del ducto o bien una polaridad norte que haga caer a cero la intensidad del campo en este punto. En la Fig. 4.1 se muestran diferentes arreglos de imanes y diferentes configuraciones de campo magnético. Dichos arreglos pueden ser muy variados y aquí solo se mencionan algunos de ellos. Por ejemplo, uno de los más sencillos es utilizar únicamente cuatro imanes en cada disco, disponiendo en un disco todos los imanes con la misma polaridad y en el otro disco los cuatro imanes con polaridad opuesta (ver Fig. 4.1a). Una variante de este arreglo es colocar en un disco dos

imanes con polaridad norte y dos con polaridad sur y en el disco opuesto su contraparte con las polaridades invertidas (ver Fig. 4.1b). La Fig. 4.1c) muestra otra configuración en donde se utilizan 24 imanes en cada disco con polaridades alternadas. Por último, en la Fig. 4.1d) se muestra la configuración o arreglo de Holbach [18], en donde también se utilizan 24 imanes en cada disco pero entre un imán con polaridad norte y otro con sur, se intercala un imán cuyas polaridades norte y sur no apuntan normalmente a la cara del disco sino lateralmente. Este arreglo parece dar buenos resultados ya que intensifica el campo magnético aplicado [18]. La caracterización de la operación de la bomba de acuerdo a las diferentes configuraciones magnéticas es una tarea a largo plazo y los resultados que se reportan en este trabajo solo se obtuvieron a partir de una única configuración, la mostrada en la Fig. 4.1a). Otra modificación importante que se puede realizar en las condiciones de operación de la bomba, es la variación de la velocidad de rotación de los discos, la cual tiene un rango de 0-29.5 rps, que se controla a través del variador de frecuencia.

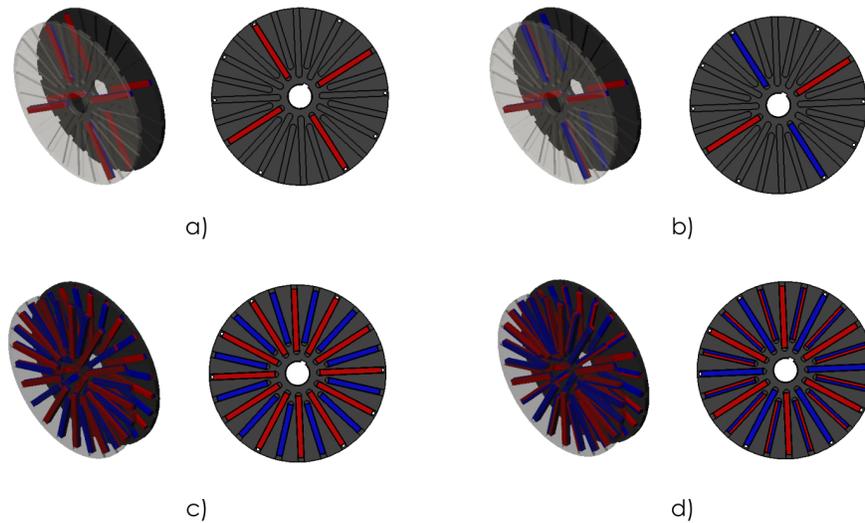


Fig. 4.1: Distintos Arreglos de imanes. a) Arreglo de 4 pares de imanes dispuestos todos con la misma polaridad, b) Arreglo de 4 pares de imanes dispuestos de manera alternada, c) Arreglo de 24 pares de imanes dispuestos de manera alternada, d) Arreglo Halbach.

4.2. Metal líquido y medición de perfiles hidrodinámicos y MHD

Los experimentos se realizaron con metal líquido como fluido de trabajo, el cual es una aleación eutéctica de $Ga^{68\%}In^{20\%}Sn^{12\%}$. Las propiedades físicas del $GaInSn$ se presentan en la Tabla 4.1. La zona que se utilizó para la caracterización de los flujos fue la sección de pruebas del circuito que se muestra en la Fig. 4.2. Las mediciones se llevaron a cabo utilizando el método de Velocimetría Ultrasónica por efecto Doppler (UDV, por sus siglas en inglés) [19]. Una explicación general de la técnica UDV se presenta en el Apéndice A. Esta

técnica de velocimetría se basa en los cambios de la posición que presentan las partículas del fluido en un de tiempo conocido entre pulsos acústicos emitidos por un transductor, que en el caso de mediciones en una dimensión (como las realizadas en este trabajo) actúa como fuente y receptor de los pulsos acústicos. Al trabajar con metales líquidos, comúnmente las partículas de fluido detectadas por los pulsos acústicos son producidas por la oxidación del metal. En el tipo de flujos considerados en este trabajo, el efecto Doppler juega un papel de menor importancia debido a que la velocidad media del fluido en estos experimentos es mucho menor que la velocidad del sonido en el medio [20].

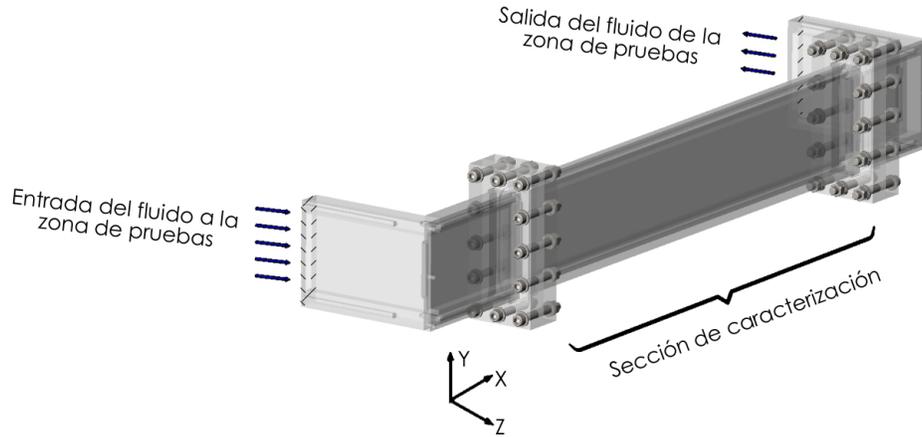


Fig. 4.2: Descripción de la sección donde se lleva a cabo la caracterización de los flujos.

Densidad	$6360 [kg m^{-3}]$
Viscosidad dinámica	$2.2 \times 10^{-3} [kg m^{-1} s^{-1}]$
Viscosidad cinemática	$3.3 \times 10^{-7} [m^2 s^{-1}]$
Tensión superficial	$0.533 [N m^{-1}]$
Conductividad Eléctrica	$3.46 \times 10^6 [\Omega^{-1} m^{-1}]$
Velocidad del sonido	$2725 [m s^{-1}]$
Conductividad térmica	$39 [W K^{-1} m^{-1}]$
Calor específico	$39 [J kg^{-1} K^{-1}]$
Permeabilidad magnética	$4 \pi \times 10^{-7} [N A^{-2}]$
Temperatura de fusión	$10.5 [^{\circ}C]$

Tabla 4.1: Propiedades físicas del fluido de trabajo $Ga^{68\%}In^{20\%}Sn^{12\%}$ a $20^{\circ}C$.

Por una parte, la caracterización del equipo se basó en obtener los perfiles de velocidad del flujo establecido por la bomba y con éstos obtener el gasto de la misma para ciertas condiciones de operación. En la sección de prueba se analizaron tanto flujos puramente hidrodinámicos, es decir, flujos en ausencia de campos magnéticos, así como flujos MHD producidos por la presencia de dos imanes pequeños colocados sobre las paredes laterales

a cada lado del ducto. Para obtener los perfiles de velocidad se analizó el plano medio XY del ducto. El transductor del equipo UDV se colocó sobre la pared localizada en el extremo aguas abajo de la sección de prueba, como se observa en la Fig. 4.3. De esta manera, se obtuvo la medición de la componente de la velocidad en dirección axial a lo largo de la línea definida por la alineación del transductor (paralela al eje X). Para obtener el perfil de velocidad en la sección transversal del ducto, fue necesario colocar el transductor en 15 diferentes posiciones sobre el eje Y , barriendo casi completamente la altura del ducto. En la Fig. 4.3 se muestra la forma de como se dispuso el transductor para para realizar las mediciones tanto de los flujos hidrodinámicos como de los flujos MHD. Es importante señalar que para cada posición en Y se desarrolló un experimento diferente, pero para cada uno de estos experimentos se consideraron las mismas condiciones, de tal manera que al final el perfil sea representativo a dichas condiciones. Una de las ventajas que brinda la técnica UDV es que obtiene información de la velocidad axial de manera continua como función del tiempo a lo largo de la línea recta por donde viajan los pulsos, por lo que podemos obtener el valor de la velocidad axial en diferentes posiciones del eje X de manera simultánea.

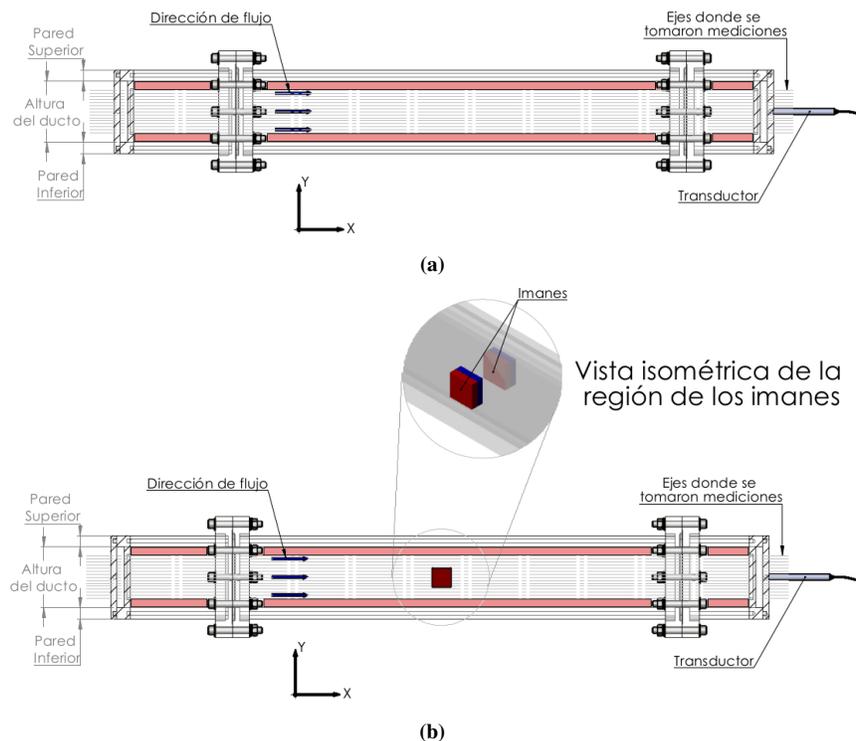


Fig. 4.3: Plano medio donde el transductor XY del ducto donde se realizaron las mediciones. a) Flujo puramente hidrodinámico, b) Flujo MHD obtenido mediante un campo magnético localizado producido por dos imanes pequeños.

Es necesario enfatizar que en las regiones marcadas de color rosa del plano medio de XY que se muestran en la Fig. 4.3, no se realizaron mediciones debido a que los efectos de las paredes superior e inferior afectan la medición del transductor.

Los resultados de los experimentos preliminares que se muestran en el siguiente capítulo se obtuvieron solo con el arreglo de 4 pares de imanes dispuestos con la misma polaridad en los discos de la bomba (ver Fig. 4.1a.). Con este arreglo se hicieron 8 corridas en total, 4 para analizar el flujo puramente hidrodinámico y 4 para analizar el flujo MHD obtenido a partir de un campo magnético localizado, lo que comúnmente se conoce como un obstáculo magnético. Estos grupos de 4 experimentos fueron realizados con diferentes velocidades de rotación de la bomba (1, 2, 3 y 4 rps cada uno). En el siguiente capítulo se exponen los resultados de estos experimentos.

Capítulo 5

Resultados Experimentales

En este capítulo se presentan los resultados experimentales preliminares obtenidos en el circuito de metal líquido descrito en los capítulos anteriores. La primera sección incluye los resultados obtenidos de los experimentos realizados en un flujo puramente hidrodinámico. Estos resultados consisten principalmente de la medición del perfil de velocidad del fluido establecido por la bomba en la sección de pruebas del circuito en ausencia de campos magnéticos externos. La segunda sección incorpora los resultados de los experimentos realizados con el arreglo de imanes en la sección de pruebas para generar un flujo MHD. Cabe mencionar que los resultados que se mostrarán a continuación fueron obtenidos mediante la técnica de Velocimetría Ultrasónica por efecto Doppler, pero procesados de manera independiente al software con que cuenta el dispositivo de medición. Esto debido a que el equipo no arroja campos de velocidad como tales, sino que proporciona una matriz de datos compuesta principalmente por valores de la posición y la componente de la velocidad correspondiente a la localización del transductor. De tal manera que para realizar las graficas, los datos obtenidos por el UDV se procesaron en códigos con lenguaje de programación *Fortran*.

5.1. Caracterización hidrodinámica

Para la caracterización hidrodinámica, se realizaron 4 experimentos, todos estos en el plano medio del ducto (XY). Con estos experimentos se reprodujo aproximadamente el perfil de la componente de velocidad en la dirección del eje X . A continuación se presentan los resultados de estos experimentos.

5.1.1. Características de los flujos y obtención de los perfiles de velocidad

Como ya se explicó anteriormente, los 4 experimentos se realizaron con frecuencias de trabajo de la bomba (ω) de 1, 2, 3 y 4 Hz y con el arreglo de 4 pares de imanes en los discos, los cuales tienen la misma orientación de campo magnético en cada uno de los discos.

Para poder reproducir aproximadamente los perfiles de velocidad, se obtuvieron primeramente los valores de la velocidad en dirección X (componente v) para diferentes alturas del ducto. En total se realizaron 15 mediciones sobre el eje Y a cada 4 mm de distancia, comenzando a los 12 mm de la pared inferior y terminando a la altura de 68 mm de la misma.

Es importante recordar que el equipo de medición brinda información de la velocidad a lo largo del eje de propagación de la onda ultrasónica, por lo que es posible obtener la componente de la velocidad a diferentes distancias a lo largo del eje X . En la Fig. 5.1 se muestra el comportamiento de la componente de la velocidad v con respecto al tiempo en la posición $X = 0$ y para varias alturas del ducto ($Y = 20$ mm, $Y = 40$ mm y $Y = 60$ mm), teniendo en cuenta que este valor de X está situado exactamente en el centro de la sección de pruebas, entre las dos bridas.

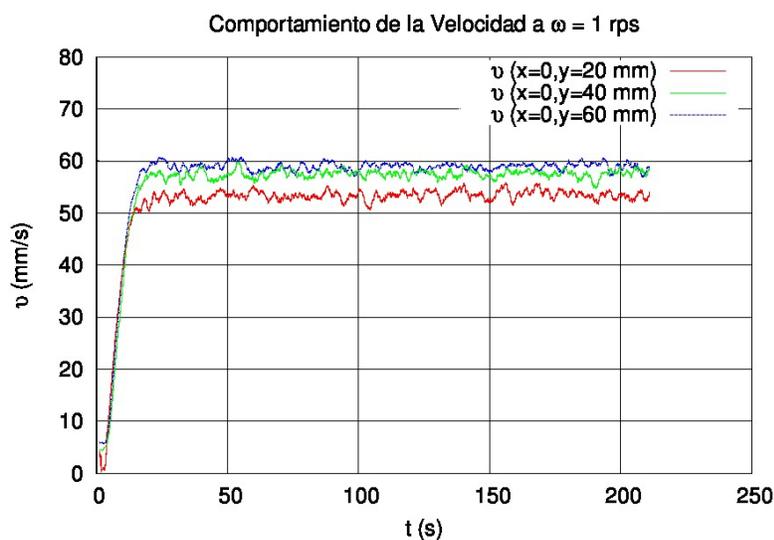


Fig. 5.1: Comportamiento de la componente X de la velocidad a diferentes alturas del ducto como función del tiempo.

La medición se realizó iniciando muy cerca del estado de reposo del fluido, por lo que se puede observar que la velocidad es casi nula ($v = 0$) en un inicio ($t = 0$ s) y después de un periodo de transición ($t > 25$ s) llega a un estado aproximadamente estable con una velocidad máxima (v_{max}). Es de interés conocer si el comportamiento de la velocidad observado en la Fig. 5.1 es el mismo para cada una de las frecuencias de trabajo ω de la bomba, de tal manera que se realizó una comparación entre estas. En la Fig. 5.2 se muestran los comportamientos de la velocidad v para cada una de las frecuencias de rotación de la bomba ω . En la Fig. 5.2 es notable el incremento que existe entre las velocidades máximas v_{max} que alcanza el flujo para las diferentes frecuencias de trabajo, pero también es importante observar que este incremento va disminuyendo conforme se

aumenta la frecuencia de trabajo.

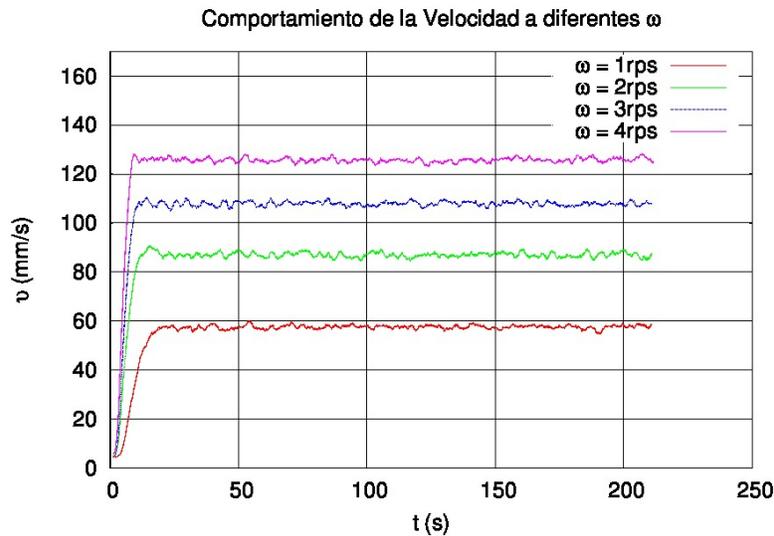


Fig. 5.2: Comportamiento temporal de la componente X de la velocidad en X=0 mm y Y= 40 mm para diferentes velocidades de rotación ω .

Para obtener los perfiles de velocidad de los flujos establecidos por la bomba, fue necesario realizar un promediado de las mediciones de la velocidad del fluido en las diferentes alturas del ducto, con el objeto de obtener una velocidad característica para ese punto del canal. Este promediado se realizó a partir de que el flujo alcanzó un estado estable. Una vez que se obtuvieron cada una de las velocidades características para los diferentes puntos del ducto fue posible realizar una representación del perfil de velocidad del fluido. En la Fig. 5.3 se muestra el perfil de velocidad en X=0 para una de las frecuencias de trabajo de la bomba. Es importante recordar que en las regiones rojas de la Fig. 5.3 se realizó un ajuste para los valores de la velocidad, esto debido a que se dificulta tomar mediciones para estas zonas del ducto. El ajuste fue llevar a 0 el valor de las velocidades características en las paredes superior e inferior, esto debido a que se está considerando la condición física de no deslizamiento sobre estas paredes.

Por las características que ofrece el equipo de medición UDV es posible obtener estos perfiles para diferentes posiciones en X (ver Fig. 5.4), por lo que se realizó un análisis en cada una de las condiciones de trabajo de la bomba, obteniendo de esta manera perfiles de velocidad a lo largo de X. Al observar la evolución que tienen los perfiles, es posible concluir que las variaciones son mínimas, por lo que se puede inferir que el flujo establecido por la bomba ha alcanzado un estado estable y es aproximadamente desarrollado.

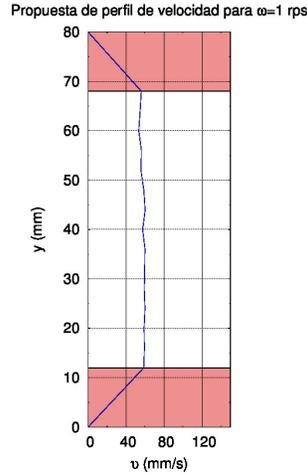


Fig. 5.3: Representación del perfil de velocidad del fluido para $\omega = 1$ Hz, en la posición $X = 0$ mm.

5.1.2. Cálculo del gasto

Con el objetivo de conocer el flujo volumétrico (Q) que se obtiene con la bomba y el comportamiento que tiene éste en función de las frecuencias de trabajo, fue necesario utilizar los perfiles de velocidad anteriormente obtenidos con el método UDV, incluyendo las regiones cercanas a las paredes superior e inferior del ducto (regiones donde se complican las mediciones). Al asumir condiciones de no deslizamiento en la pared, se utilizó un ajuste polinómico de los resultados experimentales para reproducir el perfil completo. De manera tal que se supone que la velocidad en X (v) para toda la región transversal del ducto se puede expresar como un producto de dos funciones independientes, es decir,

$$v(y, z) = \gamma(y)f(z). \quad (5.1)$$

Si además se supone que el flujo tiene una perfil parabólico en la dirección z (ancho del ducto), es posible escribir la ecuación Ec.5.1 de la siguiente manera

$$v(y, z) = \gamma(y)(az - z^2) \quad (5.2)$$

donde a es el ancho del canal ($a = 10$ mm). Es importante identificar que la Ec.5.2 satisface la condición física de no deslizamiento en las fronteras $z = 0$ y $z = a$ que corresponden a las caras laterales del ducto. Para determinar el valor de la función γ tenemos que $v(y, a/2) = \gamma(y)$ por lo que

$$\gamma(y) = \frac{4v(y)}{a^2}. \quad (5.3)$$

Considerando lo anterior el flujo volumétrico se puede obtener mediante la integración, de la velocidad en función de Y ($v(y)$) de la siguiente manera

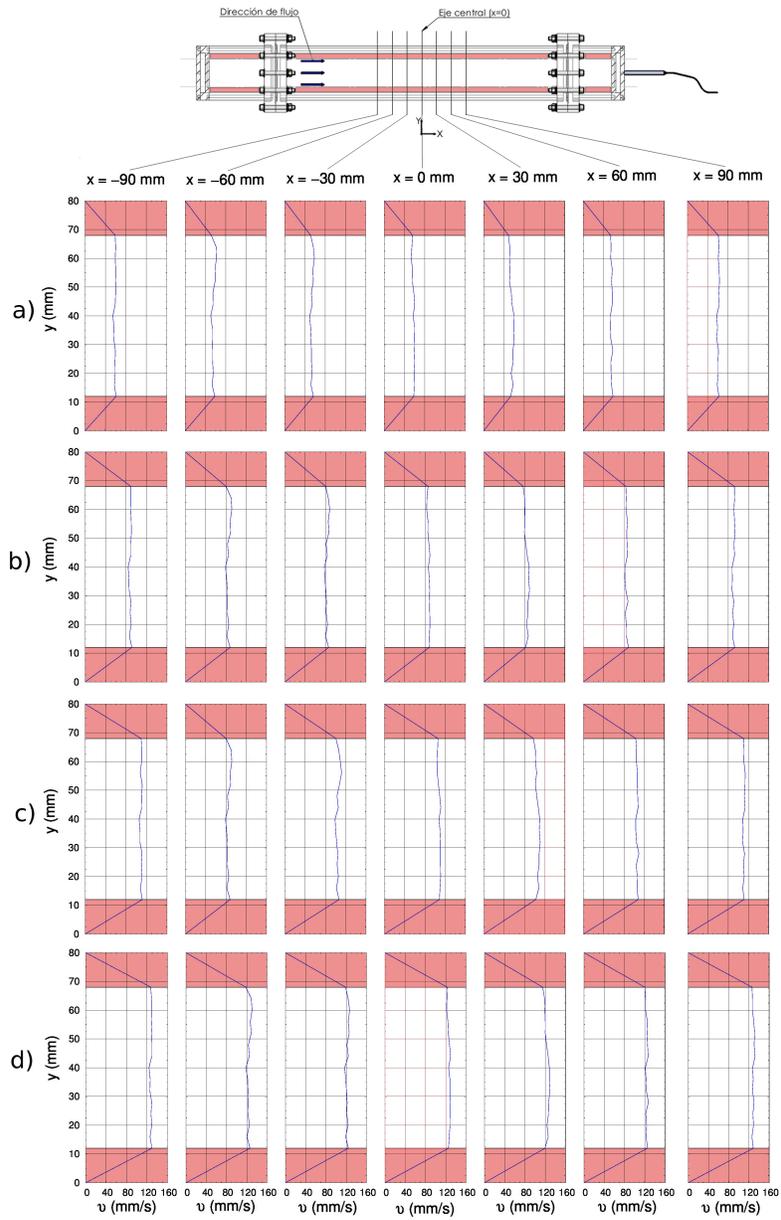


Fig. 5.4: Evolución del perfil de velocidad sobre el eje x . a) Comportamiento a $\omega = 1\text{ Hz}$, b) Comportamiento a $\omega = 2\text{ Hz}$, c) Comportamiento a $\omega = 3\text{ Hz}$ y d) Comportamiento a $\omega = 4\text{ Hz}$.

$$Q = \int_0^b \int_0^a \frac{4}{a^2} v(y)(az - z^2) dy dz, \quad (5.4)$$

donde b es la altura total del canal. Finalmente después de realizar la integración la ecuación para el flujo volumétrico queda

$$Q = \frac{2}{3}a \int_0^b v(y)dy, \quad (5.5)$$

donde el perfil $v(y)$ es el medido experimentalmente. El flujo volumétrico se representa gráficamente en la Fig. 5.5 como función de la frecuencia de trabajo de la bomba, donde podemos observar que tiene un caudal máximo aproximado de 5650 mm³/s (0.0056 L/s) a 4 Hz. Cada uno de los valores del gasto volumétrico de la Fig. 5.5 fueron calculados con base en el promediado de 21 perfiles que se obtubieron a lo largo del eje X. El comportamiento del gasto con respecto a cada uno de los perfiles se muestra en la Fig. 5.6, donde se asume que las variaciones que se observan para cada uno de las frecuencias de rotación se deben a la falta de conocimiento sobre los valores de la velocidad en las regiones donde no se tomaron mediciones. Sin embargo es notorio que el gasto para todas las frecuencias se mantiene oscilando constantemente sobre un valor específico.

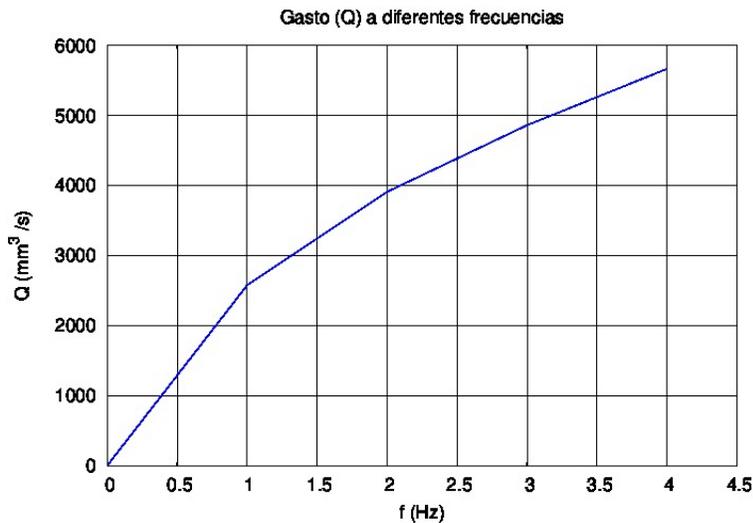


Fig. 5.5: Flujo volumétrico como función de la frecuencia de rotación de la bomba.

5.1.3. Cálculo del número de Reynolds

Un punto importante para la caracterización de los flujos, es conocer su comportamiento con relación a las fuerzas que actúan sobre ellos. Para el caso del flujo puramente hidrodinámico la relación que existe entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas, la podemos caracterizar a través del *número de Reynolds* ($Re = v_c D / \nu$), donde v_c , D y ν son la velocidad característica del flujo, una distancia que caracterice el medio por donde se desplaza el fluido y la viscosidad cinemática del fluido, respectivamente. Para obtener una estimación de este número adimensional se consideró al diámetro hidráulico del ducto (D_h) como distancia característica, el cual está dado como

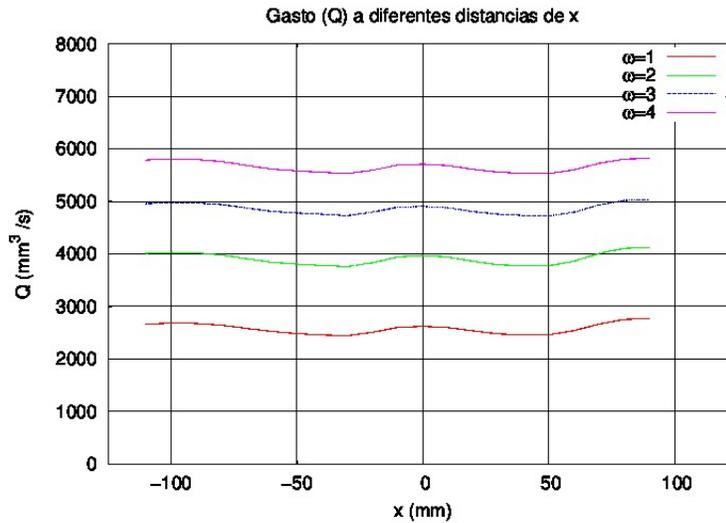


Fig. 5.6: Variación del gasto (Q) en función del eje x .

$$D_h = \frac{4A}{P}, \quad (5.6)$$

donde A y P , son el área de la sección transversal y el perímetro mojado del ducto. Por otro lado la velocidad característica del flujo se obtuvo con la ecuación

$$v_c = \frac{Q}{A}, \quad (5.7)$$

donde Q es el gasto, obtenido en base a los perfiles de velocidad. El valor del número de Reynolds se representa gráficamente en la Fig. 5.7 como función de la frecuencia de rotación de la bomba.

5.2. Caracterización de flujos MHD

El estudio de los flujos sobre obstáculos sólidos ha sido fundamental en la dinámica de fluidos, ya que han permitido realizar investigación en temas como la estabilidad y la transición de flujos. Incluso, uno de los problemas más estudiados es el de un flujo al cual se le interpone un cilindro sólido, en particular el comportamiento de mayor interés en este problema es el de la estela que se produce detrás del cilindro. De manera análoga a este problema puramente hidrodinámico, en la magnetohidrodinámica existe un problema similar que ha sido objeto de muchos estudios en años recientes. El problema consiste en el flujo de un fluido conductor a través de un campo magnético localizado, lo que comúnmente se denomina un obstáculo magnético. El flujo a través del campo localizado induce corrientes eléctricas que interactúan con el mismo campo y producen una fuerza de

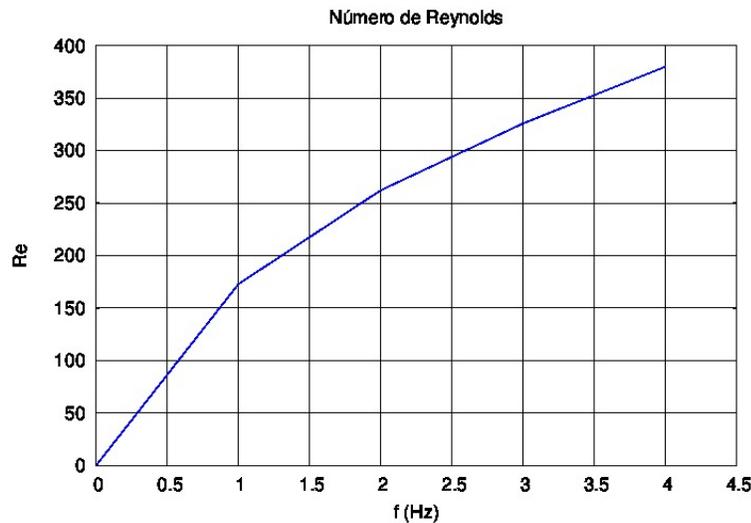


Fig. 5.7: Número de Reynolds como función de la frecuencia de rotación de la bomba.

Lorentz que se opone al flujo, es decir, actúa como un obstáculo para el mismo. Detrás de dicho obstáculo se forma una cauda que en ciertos aspectos se asemeja a las observadas en flujos sobre obstáculos sólidos [21, 22, 23].

Los primeros estudios teóricos acerca de flujos de fluidos eléctricamente conductores bajo la influencia de campos magnéticos localizados fueron realizados por Geftgat [24], sin embargo en su momento los resultados experimentales no dieron resultados claros. Fue hasta muchos años después cuando se encontró, a partir de simulaciones numéricas realizadas con un modelo cuasi-bidimensional, la aparición de patrones de vórtices dependientes del tiempo en la cauda detrás de un obstáculo magnético, similares a los observados en flujos sobre obstáculos sólidos [21]. Se encontró que dado un número de Reynolds, existía un número de Hartmann para el cual se presentaban vórtices estacionarios en la región del campo localizado. Al aumentar el número de Hartmann y llegar a un valor crítico, estos vórtices se desprendían periódicamente y producían una cauda similar a la calle de vórtices de von Kármán [21]. Este fenómeno ha sido comprobado experimentalmente [19]. La variación de los parámetros que gobiernan el flujo en un obstáculo magnético, es decir, el número de Reynolds y el número de Hartmann, da como resultado un comportamiento dinámico muy variado. En la Fig. 5.8 se puede observar la manera en que se dispuso el campo magnético localizado en la sección de pruebas para el estudio experimental del flujo en un obstáculo magnético.

Para producir los flujos MHD se optó por utilizar imanes con características similares a las que se utilizaron en la bomba. Se utilizaron dos imanes cuadrados de neodimio $Nd_2Fe_{14}B$ con dimensiones de $25.4 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$, cuyas características se presentan en

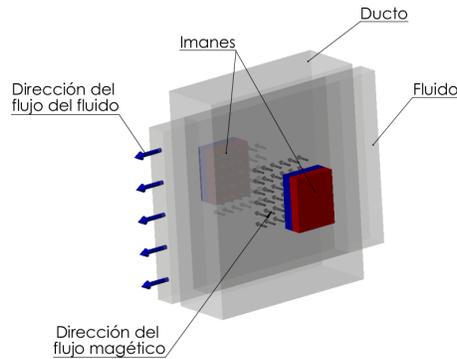


Fig. 5.8: Ilustración de la disposición del campo magnético localizado para el estudio experimental del flujo en un obstáculo magnético.

la Fig. 5.9.

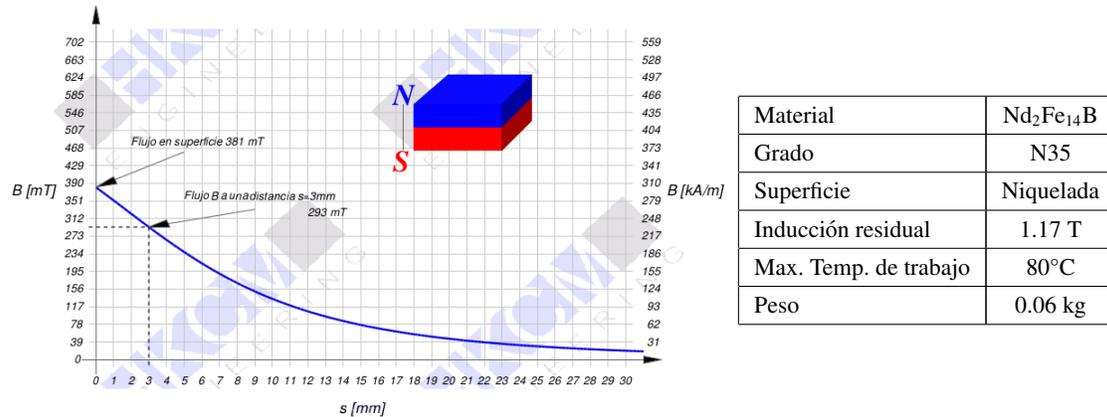


Fig. 5.9: En la gráfica se observa la intensidad del campo magnético de los imanes utilizados para el estudio del flujo MHD como función de la distancia. En la tabla se muestran características del imán.

5.2.1. Características del flujo MHD y obtención de los perfiles de velocidad

Para obtener los perfiles de velocidad en el flujo MHD se utilizó el mismo método que se utilizó en el flujo hidrodinámico. En este caso, debido a la interacción del campo magnético con el flujo del fluido se observaron algunas diferencias significativas respecto al caso anterior. Primeramente al analizar las mediciones de la velocidad en dirección X , se observó la aparición de oscilaciones en la región aguas abajo del ducto con respecto al imán, las cuales parecen ser debidas a las caudas producidas por el efecto del obstáculo magnético. Estas oscilaciones se observan en la Fig. 5.10. Como ya se ha comentado anteriormente el equipo de medición UDV tiene la capacidad de tomar la lectura de la velocidad a lo largo de la línea de propagación de las ondas ultrasónicas y a partir de esta información es posible realizar mapas de velocidad-tiempo. En estos mapas de velocidad

en el eje de las ordenadas se muestra la posición a lo largo de la línea de medición, que en este caso corresponde al eje X y el eje de las abscisas corresponde al tiempo en que se realizó la medición. La escala de colores indica la magnitud de la velocidad.

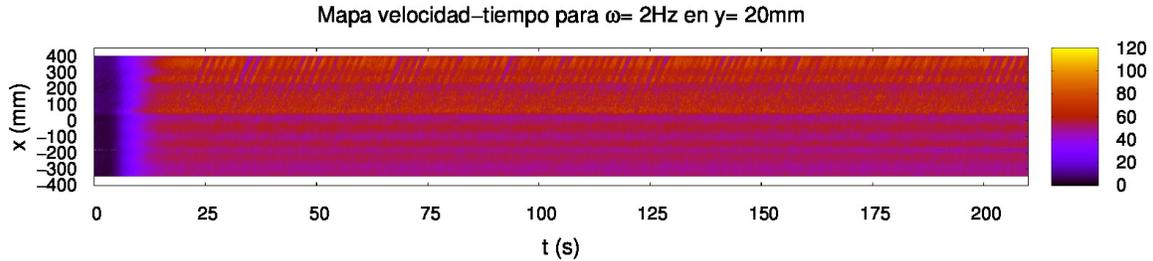


Fig. 5.10: Mapa de velocidad-tiempo obtenido en el flujo en un obstáculo magnético. La posición vertical corresponde a $y=20$ mm.

Los experimentos fueron realizados a partir del estado de reposo del fluido ($t = 0\text{s}$), pasando por una etapa de transición ($0 < t < 15\text{s}$) hasta llegar a un estado permanente con una velocidad que se puede suponer constante ($t > 15\text{s}$). Hay que recordar que en el sistema de referencia el centro del imán se encuentra en ($x = 0$ mm), por tal motivo en la Fig. 5.10 se observa que para valores de $x < 0$ el flujo cuenta con una velocidad prácticamente homogénea. Luego al llegar a la zona donde se encuentra el imán el flujo incrementa su velocidad, esto debido a que la medición para este mapa se realizó para $y = 20$ mm, que corresponde a una de las esquinas del obstáculo magnético (cuyo centro está en $x=0$, $y = 40$ mm). En dicha esquina el flujo rodea al obstáculo y se presenta una aceleración del flujo. Por otra parte, aguas abajo las oscilaciones inician en un punto posterior al obstáculo y se propagan a través del tiempo, es por eso que distinguimos franjas de color más intenso debido a la oscilación de la cauda. En la Fig. 5.11 se muestra un acercamiento cuando el flujo alcanza un estado permanente y oscilatorio en la zona aguas abajo con respecto al imán. Otro de los comportamientos que se observaron debido al efecto del obstáculo magnético, es la caída de velocidad justo en el centro de la región del campo magnético ($y = 40$ mm). En la Fig. 5.12 se puede observar el comportamiento que tiene el flujo en las diferentes alturas del canal, donde en las regiones inferior y superior ($y = 20$ mm y $y = 60$ mm respectivamente) se distinguen los efectos de la aceleración del flujo, notando el incremento de la velocidad del fluido justo después de pasar la zona del campo magnético, mientras que la velocidad cae notoriamente para la medición realizada justo en el centro del imán ($y = 40$ mm).

La caída de velocidad en la región del centro del imán y el incremento en las zonas inferior y superior se observa para cada una de las frecuencias con las que se realizaron los experimentos, los que se pueden observar en las Figs. 5.13, 5.14 y 5.15. También es importante notar la frecuencia con la que se aparecen las franjas (rastros de la oscilación periódica de la cauda) en los mapas, esto debido a que cuanto más se incrementa la

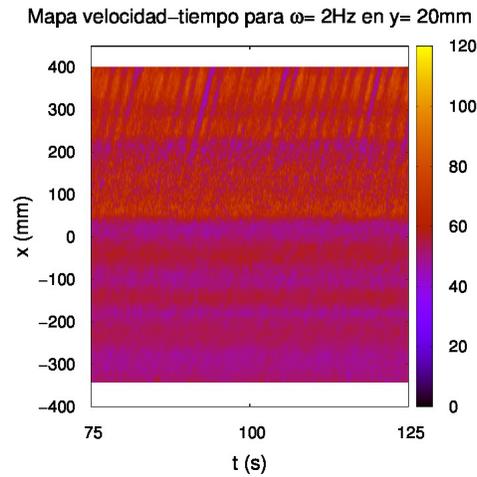


Fig. 5.11: Mapa ampliado de velocidad-tiempo en el flujo en un obstáculo magnético. La posición vertical corresponde a $y=20\text{ mm}$.

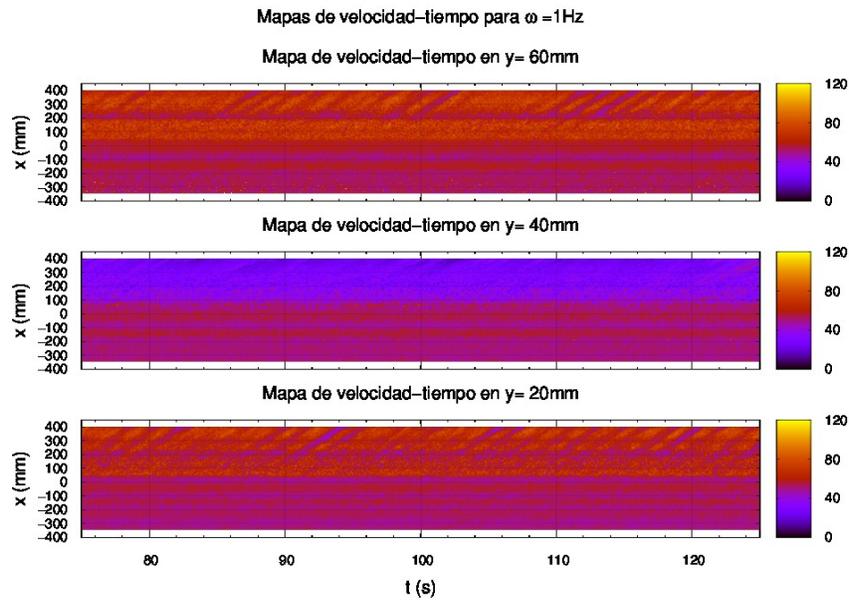


Fig. 5.12: Comparación de mapas de velocidad-tiempo para $\omega=1\text{ Hz}$ para distintas posiciones verticales, donde se puede notar la disminución de la velocidad en la zona del imán ($y = 40\text{ mm}$) y el incremento de la velocidad producido por la aceleración del flujo en $y = 20\text{ mm}$ y $y = 60\text{ mm}$.

frecuencia de trabajo de la bomba, las oscilaciones de la cauda aparecen con mayor frecuencia. Este fenómeno requiere de un análisis detallado que no se trata en este trabajo de tesis y se plantea para trabajos a futuro.

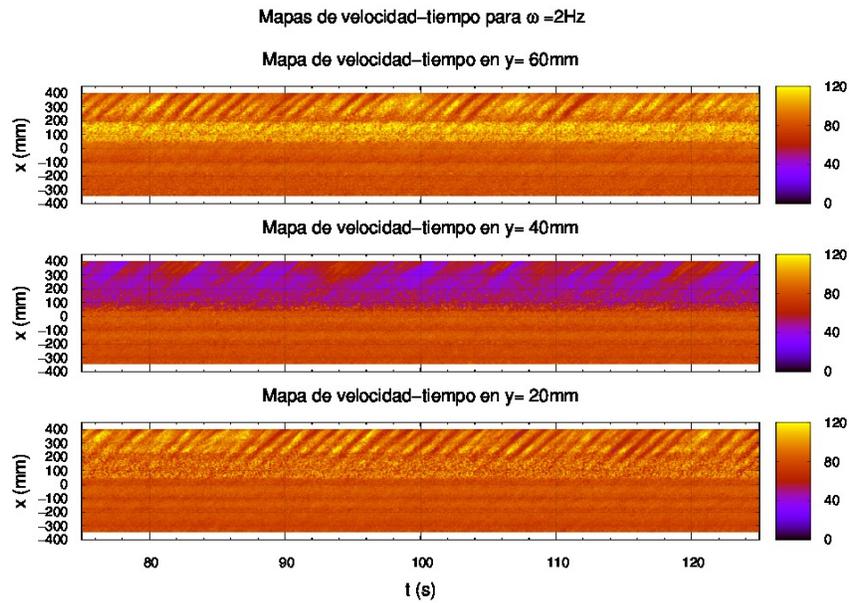


Fig. 5.13: Comparación de mapas de velocidad-tiempo para $\omega = 2$ Hz para distintas posiciones verticales, donde se puede notar la disminución de la velocidad en la zona del imán ($y = 40$ mm) y el incremento de la velocidad producido por la aceleración del flujo en $y = 20$ mm y $y = 60$ mm.

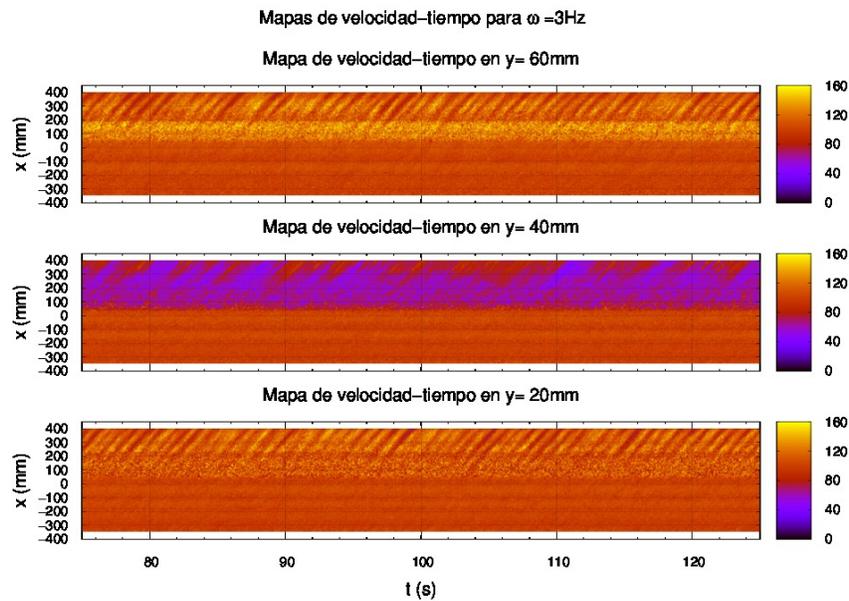


Fig. 5.14: Comparación de mapas de velocidad-tiempo para $\omega = 3$ Hz para distintas posiciones verticales, donde se puede notar la disminución de la velocidad en la zona del imán ($y = 40$ mm) y el incremento de la velocidad producido por la aceleración del flujo en $y = 20$ mm y $y = 60$ mm.

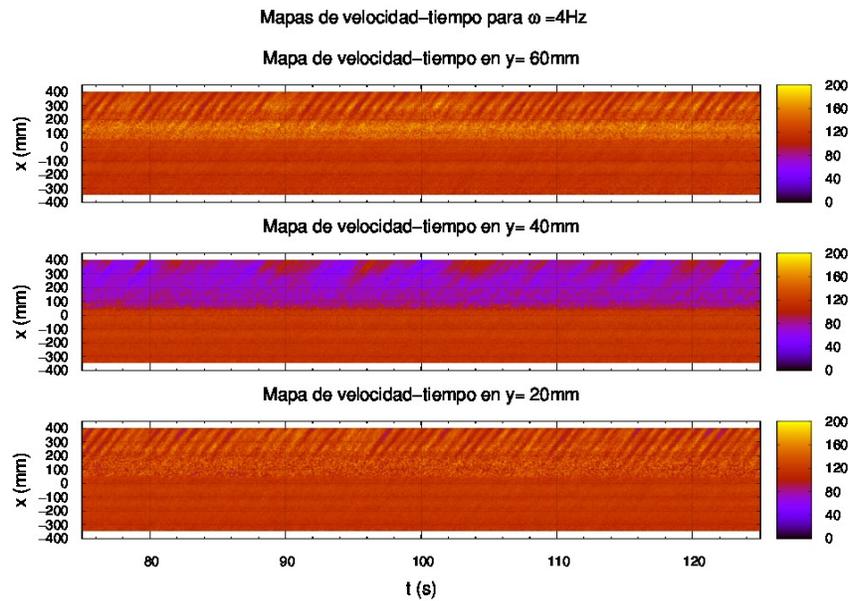


Fig. 5.15: Comparación de mapas de velocidad-tiempo para $\omega = 4$ Hz para distintas posiciones verticales, donde se puede notar la disminución de la velocidad en la zona del imán ($y = 40$ mm) y el incremento de la velocidad producido por la aceleración del flujo en $y = 20$ mm y $y = 60$ mm.

Después de analizar las características mencionadas en los flujos en presencia del campo magnético localizado, se realizó el análisis de los perfiles de velocidad. De la misma forma en que se presentaron los perfiles para la sección puramente hidrodinámica se presenta ahora en la Fig. 5.16, correspondiente al flujo en un obstáculo magnético. Es evidente el efecto que tiene el obstáculo magnético sobre el fluido, ya que produce una disminución de la velocidad en dicha región y por conservación de masa un incremento en las regiones inferior y superior.

5.2.2. Cálculo del gasto y del número de Reynolds

Con el mismo método que se calculó el gasto y el número de Reynolds para el caso puramente hidrodinámico, se realizó la caracterización de los flujos MHD. Hay que hacer notar que en este caso se supone también la existencia de una dependencia parabólica en el eje Z aunque el flujo ya no es completamente parabólico como lo sería en el caso hidrodinámico. Sin embargo, esta es una suposición razonable que puede utilizarse para realizar un cálculo aproximado. De esta forma, podemos observar en la Fig. 5.17 el comportamiento del gasto en función de la frecuencia de trabajo de la bomba. También se realizó el análisis del comportamiento del gasto con respecto a la distancia X , lo cual se muestra en la Fig. 5.18, donde las variaciones que se observan para cada una de las frecuencias de rotación se relacionan a la falta de conocimiento que se tiene sobre los valores de la velocidad en las regiones donde no se tomaron mediciones. En este caso las variaciones son un poco marcadas en la zona

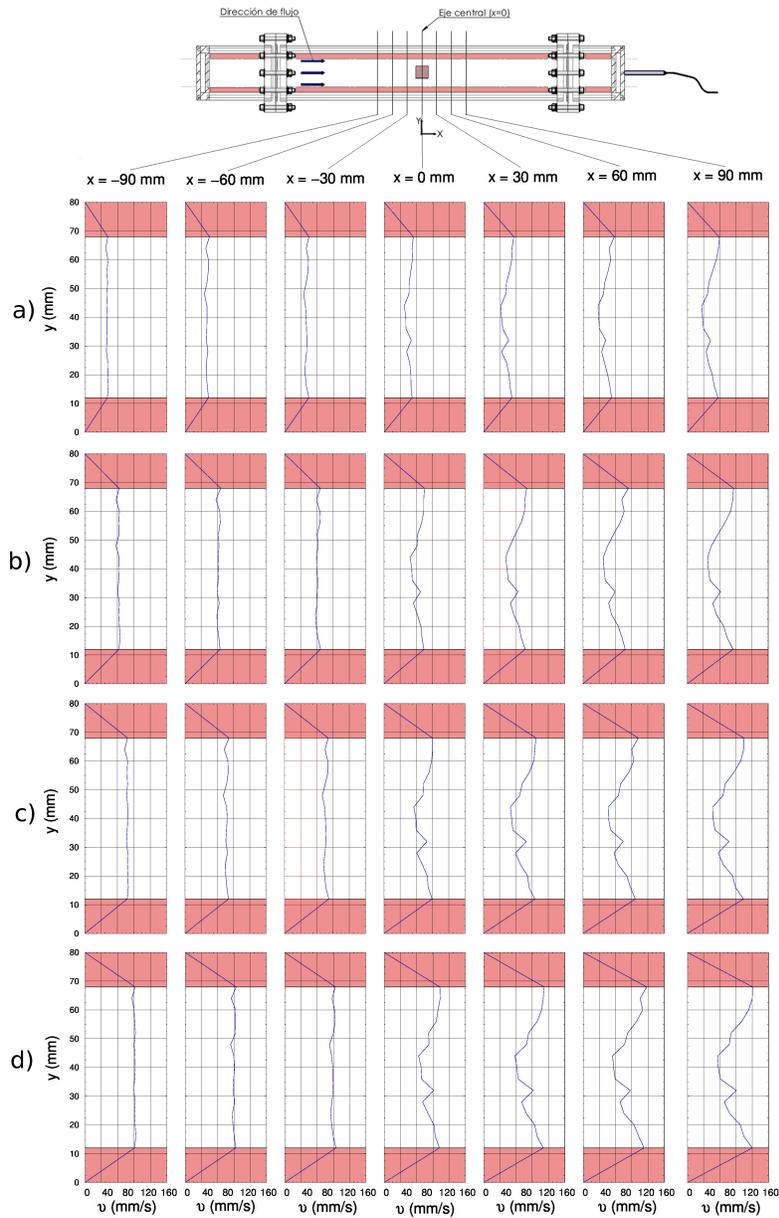


Fig. 5.16: Evolución del perfil de la componente axial de la velocidad a lo largo del eje x . a) Comportamiento a $\omega = 1\text{ Hz}$, b) Comportamiento a $\omega = 2\text{ Hz}$, c) Comportamiento a $\omega = 3\text{ Hz}$ y d) Comportamiento a $\omega = 4\text{ Hz}$.

donde se localiza el imán ($x = 0$). El número de Reynolds también se obtuvo para cada una de las frecuencias con las que trabajó la bomba, éste se muestra en la Fig. 5.19. Como era de esperarse, tanto el gasto como el número Reynolds tienen el mismo comportamiento, esto debido a que los valores del diámetro hidráulico (D_h) y la viscosidad cinemática (ν) son constantes para todas las condiciones en las que se trabajó.

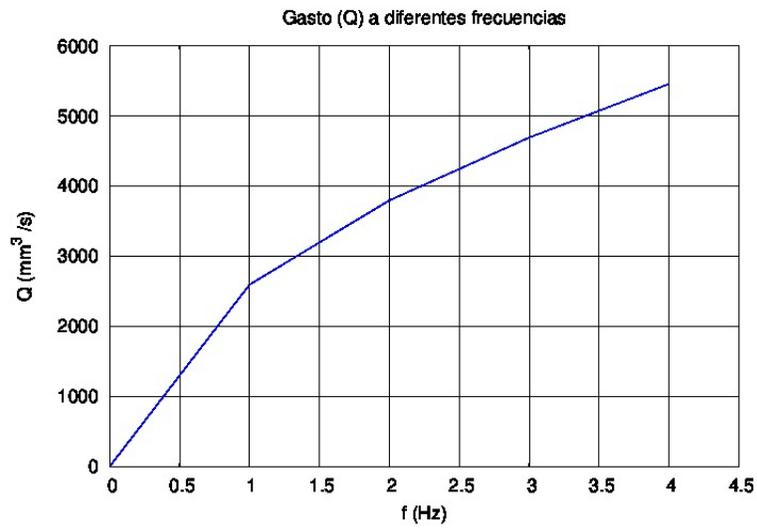


Fig. 5.17: Flujo volumétrico como función de la frecuencia de rotación de la bomba.

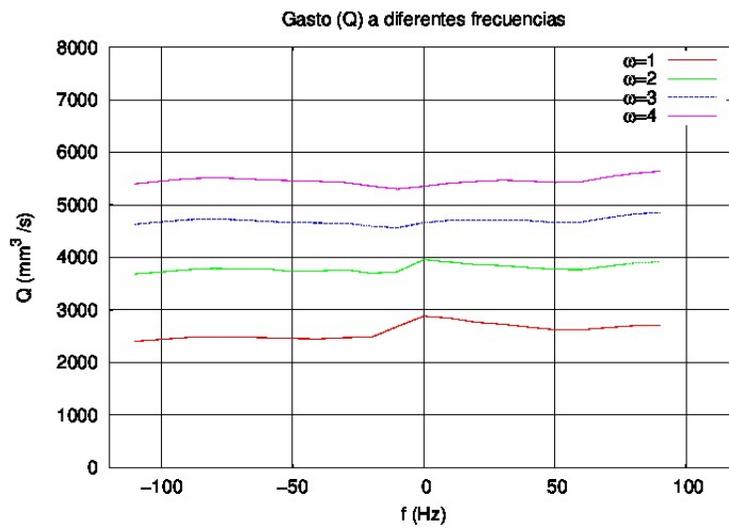


Fig. 5.18: Flujo volumétrico como función de la frecuencia de rotación de la bomba.

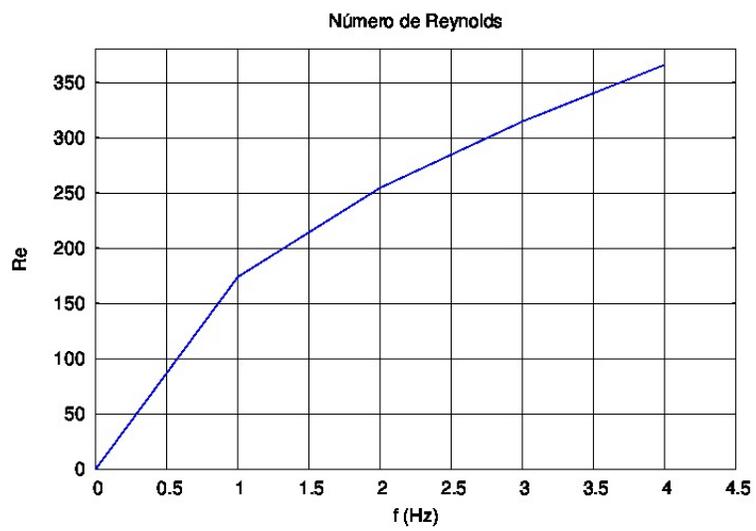


Fig. 5.19: Número de Reynolds como función de la frecuencia de rotación de la bomba.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo a futuro

En el presente trabajo se realizó el diseño, construcción y pruebas preliminares de un equipo experimental para estudiar flujos de metal líquido tanto hidrodinámicos como MHD. El equipo consta de un bomba MHD de inducción de imanes permanentes con diseño de discos y es la que permite propulsar al metal líquido a través del circuito. Uno de los objetivos principales del trabajo fue la caracterización tanto de la bomba electromagnética como de los flujos puramente hidrodinámicos y los flujos MHD. La motivación principal fue contribuir con un equipo experimental que ayude a la investigación de flujos de metales líquidos bajo campos magnéticos, los cuales son muy importantes en áreas como la metalurgia, la petroquímica y los reactores de fusión. En la tesis se presentó una revisión de los sistemas de bombeo, enfatizando el funcionamiento de las bombas de inducción MHD. Se presentaron asimismo las ecuaciones fundamentales que gobiernan el flujo de un metal líquido bajo un campo magnético, las cuales son la base para la modelación numérica tanto de la bomba MHD como de los flujos que pueden estudiarse experimentalmente en el circuito. De igual forma se llevaron a cabo mediciones experimentales de los flujos de metal líquido tanto en ausencia como en presencia de campos magnéticos. Dichas mediciones se efectuaron mediante la técnica de Velocimetría Ultrasónica por efecto Doppler. Los resultados obtenidos de este trabajo de tesis ayudaron a comprender desde un punto de vista experimental el comportamiento que presentan los flujos de metales líquidos y se espera que en un futuro se puedan explorar con detalle una gran cantidad de flujos MHD.

La variación espacio-temporal del campo magnético de un arreglo de imanes permanentes colocados en los discos de la bomba MHD, inducen corrientes eléctricas en el metal líquido que se encuentra confinado en un ducto con sección rectangular constante. Dichas corrientes interactúan con el mismo campo aplicado dando lugar a una fuerza de Lorentz que impulsa al fluido. La intensidad de la fuerza aumenta o disminuye directamente con la frecuencia de rotación del campo magnético aplicado. De esta forma, si incrementamos la frecuencia de rotación de los discos de la bomba, es posible aumentar el gasto debido al incremento de la fuerza electromagnética, lo que se pudo observar en los resultados experimentales de esta investigación.

Es importante mencionar que los resultados experimentales son preliminares, debido a que solo se realizaron pruebas con algunas de las variantes con las que puede trabajar el equipo. Hay que recordar que la bomba está diseñada para trabajar hasta con 24 imanes en cada disco, lo que representa una gran diversidad de condiciones de operación. De esta gran variedad de arreglos magnéticos solo se trabajó con el arreglo de 4 pares de imanes con la misma orientación del campo magnético en todos los imanes de cada disco. Otra de las variables que puede ser sumamente explotada para la caracterización del equipo, es la frecuencia de trabajo de la bomba, que puede ir desde 0 Hz hasta casi 30 Hz con incrementos de 0.1 Hz. En este trabajo, para la frecuencia de trabajo solo se consideraron cuatro valores (1, 2, 3 y 4 Hz), por lo que queda un gran margen de pruebas por realizar.

Las muy diversas condiciones en las que la bomba puede operar, repercuten directamente en los flujos que se establecen, por lo que también se cuenta con la posibilidad de realizar una caracterización experimental detallada de muy diversos flujos, ya sean hidrodinámicos o MHD. De manera particular, el circuito experimental construido a lo largo de este trabajo de tesis ofrece la oportunidad de analizar el flujo en un obstáculo magnético que es uno de los flujos MHD menos explorados a la fecha.

El trabajo reportado en esta tesis constituye un aporte de gran importancia para el estudio experimental de flujos magnetohidrodinámicos en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM.

Apéndice A

Velocimetría Ultrasónica por efecto Doppler

En este apéndice se presenta de manera breve las ideas principales detrás del método UDV para medir velocidades en flujos de metal líquido [19, 20, 25, 26].

El método de Velocimetría Ultrasónica por efecto Doppler (UDV, por sus siglas en inglés), fue desarrollado originalmente para el campo de la medicina hace más de 30 años. El éxito de esta técnica para las mediciones de flujos sanguíneos, ha propiciado que se extienda su aplicación a otros campos, incluyendo la dinámica de fluidos opacos como los metales líquidos y el petróleo. Para fluidos transparentes se conocen una gran cantidad de técnicas que ayudan a la caracterización de sus flujos, tales como Anemometría láser por efecto Doppler, Velocimetría por Imágenes de Partículas, Schlieren ópticos, entre otros. Por otro lado, cuando se utilizan fluidos opacos son pocas las técnicas que logran caracterizar los flujos. Es en estos casos para los que se desarrolló el método UDV, el cual en comparación con otros métodos presenta las siguientes ventajas:

- Es posible obtener información espacio-tiempo del campo de velocidades del fluido.
- Puede ser utilizado en líquidos opacos.
- Permite realizar mediciones a lo largo de una línea y por lo tanto conocer la variación de la velocidad en el tiempo a lo largo de dicha línea.
- Puede extenderse a mediciones en dos y tres dimensiones.

Principio básico del método UDV

Al utilizar el término Velocimetría Ultrasónica por efecto Doppler es común pensar que esta técnica funcionará bajo el principio de obtener la frecuencia Doppler (f_d) a partir del efecto Doppler, como es el caso de la técnica por “Anemometría Láser por efecto Doppler”. Sin embargo, en la técnica UDV el efecto Doppler tiene poca relevancia. En este método

la medición de la velocidad se obtiene por el cambio de la posición que presentan las partículas del fluido en un intervalo de tiempo conocido entre la emisión y recepción de pulsos acústicos que interactúan con dichas partículas.

Para entender de una mejor manera esta técnica hay que comprender el método llamado Pulsos Ultrasónicos Doppler (UDP, por sus siglas en inglés) y no el efecto Doppler. Este método en vez de emitir una onda de sonido continua con una frecuencia específica, emite periódicamente pulsos cortos de ondas ultrasónicas, mientras que el receptor percibe continuamente ecos reflejados por las partículas del fluido, que en el caso de metales líquidos comúnmente se trata de partículas oxidadas. Con base a un muestreo realizado al eco que las partículas emiten, se realiza el cálculo del cambio de posición de éstas. Hay que tener en consideración que el método funciona a través de un transductor y éste solo capta la velocidad axial de las partículas a lo largo de la línea de propagación de la onda ultrasónica.

Cuando la emisión de pulsos acústicos y la captación del eco son realizadas por el mismo transductor, como sucede en mediciones unidimensionales, las emisiones de ondas se realizan relativamente al mismo tiempo, de tal manera que si se conoce el tiempo de retraso (T_r) entre los pulsos emitidos y el eco reflejado por las partículas, la distancia a la que se encuentra la partícula puede ser calculada por la siguiente ecuación

$$d = \frac{c \cdot T_r}{2}, \quad (\text{A.1})$$

donde d es la distancia a la que se encuentra la partícula y c es la velocidad del sonido en el medio (fluido de trabajo).

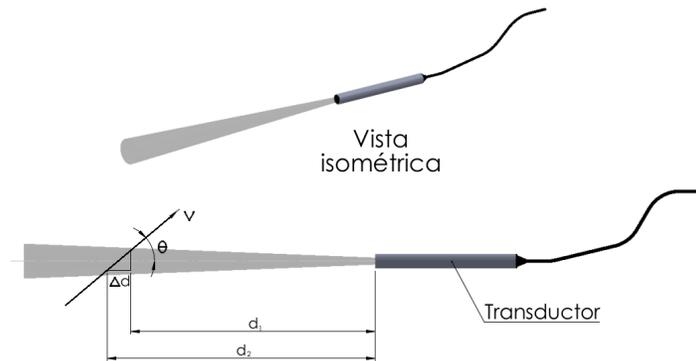


Fig. A.1: Ilustración del caso en que la partícula se desplaza con un ángulo θ con respecto al eje definido por la propagación de la onda acústica..

Si la partícula se está moviendo con un ángulo θ con relación al eje definido por la propagación de la onda ultrasónica (ver Fi. A.1), la velocidad de la partícula puede ser medida al calcular la variación de la distancia entre dos pulsos separados por un tiempo (T_{prf}), este cálculo se realiza con la siguiente ecuación:

$$(d_1 - d_2) = v \cdot T_{prf} \cdot \cos \theta = \frac{c}{2} \cdot (T_2 - T_1), \quad (\text{A.2})$$

donde d_1 y d_2 son las distancias de la partícula en los tiempos 1 y 2, respectivamente, v es la velocidad de la partícula, T_{prf} es el tiempo entre pulsos que emite el transductor y $(T_2 - T_1)$ es la diferencia de tiempo entre los pulsos. Esta diferencia en el tiempo $(T_2 - T_1)$ por lo general es muy corto. En la mayoría de los experimentos con flujos de metal líquido la diferencia temporal es del orden de microsegundos. Por esta razón es ventajoso remplazar esta diferencia entre tiempos por el cambio de la fase del eco recibido, dada por

$$\delta = 2\pi \cdot f_e \cdot (T_1 - T_2), \quad (\text{A.3})$$

donde δ es el cambio de la fase del eco y f_e es la frecuencia emitida por el transductor. Con esta información la velocidad de la partícula está dada por:

$$v = \frac{c \cdot \delta}{4\pi \cdot f_e \cdot \cos \theta \cdot T_{prf}}, \quad (\text{A.4})$$

La Ec.A.4 da el mismo resultado que la ecuación del efecto Doppler, sin embargo debemos de estar conscientes de que el método UDP y el efecto Doppler se basan en fenómenos completamente diferentes.

Ventajas y limitaciones

Como ya se comentó anteriormente, el método de Velocimetría Ultrasónica por efecto Doppler se basa en realizar un análisis de muestreo de la repetición de la frecuencia, la cual viene dada en pulsos (f_{prf}). La frecuencia máxima detectable, que está directamente relacionada con la velocidad máxima v_{max} , está limitada por el teorema de muestreo de Nyquist [26], de manera que

$$f_{d,max} = \frac{f_{prf}}{2} \longrightarrow v_{max} = \frac{c \cdot f_{prf}}{4f_e}. \quad (\text{A.5})$$

La máxima distancia que recorre el pulso está determinada con base al tiempo que tarda éste en ir y regresar del transductor

$$d_{max} = \frac{c}{2f_{prf}}. \quad (\text{A.6})$$

Una restricción de medición para el método UDP se da a partir de las limitaciones de las dos anteriores ecuaciones, de modo que

$$v_{max} \cdot d_{max} = \frac{c^2}{8f_e}. \quad (\text{A.7})$$

Al utilizar una frecuencia fija, la velocidad máxima detectada se determina a partir de la distancia máxima de la trayectoria de la zona de propagación de la onda ultrasónica. Por

lo tanto, si la medición de la velocidad máxima del flujo es grande, es necesario ajustar una pequeña distancia para realizar las lecturas. Para lecturas que lleguen a distancias muy largas, sólo las velocidades más pequeñas pueden ser detectadas. Cabe señalar que si la velocidad máxima es superada se produce el efecto *aliasing* en el análisis de la velocidad, este efecto puede ser compensado, en algunos casos, por un procesamiento posterior de los resultados.

Los métodos ultrasónicos se manejan con mayor facilidad en comparación que los métodos ópticos de láser. Sin embargo, en la práctica, se debe prestar atención en las mediciones cuantitativas del campo de velocidades. Vale la pena recordar que cuando se obtiene un valor de velocidad mediante el método de UDV, ésta es solo una componente del vector de velocidad. Sin embargo, es posible extender el método para medir las tres componentes de velocidad. Generalmente, el campo de velocidades de un flujo es difícil aproximarlos desde una perspectiva unidimensional, excepto para el caso de un flujo en una tubería o en una región muy pequeña donde el campo de velocidad tenga una orientación preferencial.

Bibliografía

- [1] P.A. Davidson. *An Introduction to Magnetohydrodynamics*. Cambridge University Press, 2001.
- [2] J. Hartman and F. Lazarus. *Hg-dynamics I - Theory of the laminar flow of an electrically conductive liquid in a homogeneous magnetic field*. *Mathematisk- Fysiske Meddelelser*. 15(6), 1937.
- [3] E. Braun. *Electromagnetismo*. Ciencia desde México. Fondo de Cultura Economica, 1992.
- [4] E.F. Northrup. Some newly observed manifestations of forces in the interior of an electric conductor. *Phys. Rev. (Series I)*, 24:474–497, Jun 1907.
- [5] C. Petersen. Method for transforming the kinetic energy in gases into electrical energy and manner for utilizing the latter for carrying out gas reaction. *U.S. Patent 1443091*, January 1923.
- [6] G. Dannen. *The Einstain-Szilard refrigerators*. *Scientific American*. 90–95, Jan 1997.
- [7] E. J. Williams. The induction of electromotive forces in a moving liquid by a magnetic field, and its application to an investigation of the flow of liquids. *Proceedings of the Physical Society*, 42(5):466–478, 1930.
- [8] J. Hartman y F. Lazarus. *Hg-dynamics II - Theory of the laminar flow of an electrically conductive liquid in a homogeneous magnetic field*. *Mathematisk-Fysiske Meddelelser*. 15(7), 1937.
- [9] S.S. Molokov, R. Moreau, and H.K. Moffatt (Eds.). *Magnetohydrodynamics: Historical Evolution and Trends*. Fluid Mechanics and Its Applications. Springer, 2010.
- [10] J.P. Freidberg. *Ideal magnetohydrodynamics*. Modern Perspectives in Energy Series. Plenum Publishing Company Limited, 1987.
- [11] I.G. Currie. *Fundamental Mechanics of Fluids*. Marcel Dekker, inc., third edition.
- [12] L.D. Landau y E.M Lifshitz. *Fluid Mechanics*. Pergamon Press, 1959.
- [13] J.D. Jackson. *Classical Electrodynamics*. John Wiley Sons, 1975.

- [14] W.F. Hughes y F.J. Young. *Electromagnetodynamics of Fluids*. Krieger Publishing Company, 1989.
- [15] I.Bucenieks y K.Kravalis. Efficiency of em induction permanent magnets pumps. *8th International pamir Conference on Fundamental and Applied MHD*, 2:501–505, 2011.
- [16] J. Balcells, F. Daura, and R. Esparza. *Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Electrónicos*. ACCESO RÁPIDO. Marcombo, S.A., 1992.
- [17] J. Sommeria y R. Moreau. Why, how, and when, mhd turbulence becomes two-dimensional. *Journal of Fluid Mechanics*, 118:607–518, 1982.
- [18] I. Bucenieks, K. Kravalis, R. Krishbergs, and A. Shishko. Feasibility of powerful em permanent magnets pumps for sodium. *8th International pamir Conference on Fundamental and Applied MHD*, 2:511–515, 2011.
- [19] O. Andreev, Yu. Kolesnikov, and A. Thess. Application of the ultrasonic velocity profile method to the mapping of liquid metal flows under the influence of a non-uniform magnetic field. *Experiments in Fluids*, 46(1):77–83, 2009.
- [20] S.A. Signal Processing. <http://www.signal-processing.com/>.
- [21] S. Cuevas, S. Smolentsev, and M. A. Abdou. On the flow past a magnetic obstacle. *Journal of Fluid Mechanics*, 553:227–252, 2006.
- [22] M. Rivero, O. Andreev, A. Thess, and S. Cuevas. Experimental study of flows past a magnetic obstacle. *8th International pamir Conference on Fundamental and Applied MHD*, 2:227–252, 2011.
- [23] A. Beltrán, E. Ramos, S. Cuevas, and M. Brøns. Bifurcation analysis in a vortex flow generated by an oscillatory magnetic obstacle. *Physical Review E*, 81:036309, 2010.
- [24] D. E. Peterson, Yu. M. Gelâfgat, and E. V. Shcherbinin. Velocity structure of flows in nonuniform constant magnetic fields i. numerical calculations. *Magnetohydrodynamics*, 14(1):55–61, 1978.
- [25] Y. Takeda. Ultrasonic doppler velocity profiler for fluid flow. *Fluid Mechanics and Its Applications*, 101, 2012.
- [26] D. S.G. Pollock. *Handbook of Time-Series Analysis, Signal Processing and Dynamics. Signal Processing and its Applications*. Academic Press, 1999.