

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería
(MYDCI)**

Campo de conocimiento: Eléctrica



Tesis Doctoral

**Sistema de Visión para Conocer el Campo de Velocidades en
un Fluido Mediante el Trazado de Partículas.**

Caso Especial de Magnetohidrodinámica

que para cubrir parcialmente los requisitos para obtener el grado de Doctor en
Ciencias presenta:

Mónica Valenzuela Delgado

Director de Tesis:
Dra. Wendy Flores Fuentes

Co-Director de Tesis:
Dr. Miguel Enrique Bravo Zanoguera

Mexicali, B. C., México, a 6 de Noviembre de 2020

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Mónica Valenzuela Delgado, declaro que esta tesis titulada, “Sistema de Visión para Conocer el Campo de Velocidades en un Fluido mediante el Trazado de Partículas. Caso Especial de Magnetohidrodinámica” y el trabajo presentado en ella es de mi autoría. Y confirmo que este trabajo enviado para mi evaluación es original y se expresa en mis propias palabras y fue realizado principalmente para obtener el grado de Doctorado en Ciencias en esta Universidad. Afirmo que he citado el trabajo de otros y he proporcionado debidamente las fuentes de estas citas. Cualquier uso que hice de la información de las obras de otros autores en cualquier forma y momento (tales como ideas, ecuaciones, figuras, texto, tablas, programas) se reconoce adecuadamente. Constato que en esta tesis he reconocido el trabajo hecho por mí en colaboración con otros aclarando explícitamente mi contribución y la aportación de otros. Por último, ratifico que esta tesis fue revisada en su totalidad por un comité evaluador.

Firma:

Fecha:

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado primeramente a Dios que me ha permitido llegar a esta meta. A mis padres y a todas las personas que me han apoyado durante mi vida y a las que han contribuido de alguna manera a que este trabajo se realice, mi agradecimiento de todo corazón. A mi fiel amigo que siempre me recibe con toda su alegría y entusiasmo al final de un largo y agotador día de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por ser la institución que me ha formado académica y profesionalmente a lo largo de muchos años, otorgandome un crecimiento personal e intelectual que me ha permitido contribuir al desarrollo de la ingeniería y la ciencia.

Al programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MyDCI), que gracias a su excelente organización nos permite la formación como investigadores de alto nivel académico, para el desarrollo de la ciencia y la innovación tecnológica en el país.

A la Facultad de Ingeniería de la UABC, campus Mexicali, por el apoyo y facilidades para llevar a cabo satisfactoriamente esta meta.

Al Dr. Daniel Hernández Balbuena, al Dr. Julio Cesar Rodríguez Quiñonez y al Dr. Maximiliano Vera Pérez por brindarme un espacio de trabajo y proporcionar el equipo necesario para el desarrollo del proyecto.

A la 19a convocatoria interna por el proyecto “Análisis, modelado numérico, computacional y experimental de un flujo para el procesamiento electromagnético de fuidos: Micropulsión MHD”, con Clave de Registro 105/6/C/30/19 de la Universidad Autónoma de Baja California y a su responsable técnico, él Dr. Alejandro S. Ortiz Pérez.

A mi Co-Director de tesis, Dr. Miguel E. Bravo Zanoguera, por su colaboración en este

proyecto de investigación.

Muy en especial a mi Directora de tesis, Dra. Wendy Flores Fuentes, primeramente por confiar en mi para la realización de este proyecto, por su paciencia, por su certera y constante orientación, por todo el apoyo que me brindó durante el desarrollo de este trabajo de investigación y por su incesante atención y preocupación para que los objetivos propuestos se cumplieran satisfactoriamente en tiempo y forma, y de inicio a fin.

"Para empezar un gran proyecto hace falta valentía. Para terminar un gran proyecto hace falta perseverancia"

Autor: Anónimo

RESUMEN

RESUMEN de la tesis de Mónica Valenzuela Delgado, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS, EN EL ÁREA DE ELÉCTRICA, Mexicali, Baja California, México, a 6 de Noviembre de 2020.

SISTEMA DE VISIÓN PARA CONOCER EL CAMPO DE VELOCIDADES EN UN FLUIDO MEDIANTE EL TRAZADO DE PARTÍCULAS. CASO ESPECIAL DE MAGNETOHIDRODINÁMICA.

Resumen aprobado por:

Dra. Wendy Flores Fuentes

La presente tesis doctoral muestra los resultados obtenidos durante el trabajo de investigación realizada en el área de eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California durante el período 2016-2020. Se describe el diseño y desarrollo de un sistema de visión para conocer el campo de velocidades en un fluido mediante el trazado de partículas para el caso especial de magnetohidrodinámica. En este proyecto se investigó teórica y experimentalmente el flujo laminar 3D de un fluido conductor en un canal anular abierto impulsado por una fuerza de Lorentz. El conducto anular se constituyó por dos cilindros concéntricos conductores de electricidad y se limitó por una pared inferior aislante. Para impulsar el fluido conductor en la dirección azimutal se indujo una fuerza de Lorentz causada por la interacción entre un campo

magnético uniforme a lo largo de la dirección axial y una corriente eléctrica radial, produciendo un flujo magnetohidrodinámico (MHD). Se analizó el efecto de las tres paredes considerando la distancia entre los cilindros y la profundidad del canal. A través del modelado del fenómeno físico, se calculó el flujo constante utilizando el método de Galërkin con series ortogonales de Bessel-Fourier. Se encontró una aproximación cuasi-analítica para la velocidad máxima del flujo. Los perfiles de velocidad se exploraron variando la profundidad del canal y la distancia entre los cilindros para mostrar el efecto de las paredes en la configuración del flujo. Los resultados del modelado se compararon con datos experimentales obtenidos a través de la técnica PIV (por sus siglas en inglés, Particle Image Velocimetry), así como con los encontrados en la literatura científica. La investigación experimental consistió en la confección de un prototipo MHD con electrodos de cobre y paredes de ácido poliláctico (PLA) probado con distintos fluidos conductores, así como el desarrollo de un sistema de visión personalizado. Se estableció una metodología de detección de los perfiles de velocidad para la validación experimental del flujo laminar 3D producido en el prototipo MHD. Por último, se desarrolló una herramienta de análisis y suavizado de perfiles de velocidad 2D de flujo magnetohidrodinámico.

ABSTRACT

ABSTRACT of the thesis of Mónica Valenzuela Delgado, presented as partial requirement for obtaining the degree of DOCTOR IN SCIENCE IN THE AREA OF ELECTRICITY. Mexicali Baja California, México, on November 6, 2020.

Abstract approved by:

Dra. Wendy Flores Fuentes

The present Doctoral thesis shows the results obtained during the research work done in the Electrical area of the Faculty of Engineering at the Universidad Autónoma de Baja California during the period 2016-2020. This research describes the design and development of a vision system to measure the velocity field in conductive fluid for the special case of magnetohydrodynamic by the particle tracing method. In this project, the 3D laminar flow of a conductive fluid in an open annular channel driven by a Lorentz force was investigated theoretically and experimentally. The annular conduit was constituted by two concentric cylinders electrically conductive and was limited by a bottom insulating wall. To drive the conductive fluid in the azimuthal direction, a Lorentz force was induced, caused by the interaction between a uniform magnetic field along the axial direction and a radial electric current, producing a magnetohydrodynamic flow (MHD). The effect of the three walls was analyzed considering the distance between the cylinders and the depth of the channel. Through the modeling of the physical phenomenon, the

constant flow was calculated using the Galërkin method with orthogonal Bessel-Fourier series. A quasi-analytical approach was found for the maximum flow velocity. Velocity profiles were explored by varying the channel depth and the distance between the cylinders to show the effect of the walls on the flow pattern. Modeling results were compared with experimental data obtained through the Particle Image Velocimetry (PIV) technique, as well as with those found in scientific literature. The experimental research consisted in making a MHD prototype with copper electrodes and walls of polylactic acid (PLA) tested with different conductive fluids, as well as the development of a customized vision system. A methodology for the detection of velocity profiles was established for the experimental validation of the 3D laminar flow produced in the MHD prototype. Finally, a tool for analyzing and smoothing 2D velocity profiles of magnetohydrodynamic flow was developed.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE GENERAL	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XVI
1. INTRODUCCIÓN	1
Introducción	1
2. PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN	6
2.1. Planteamiento del problema	6
2.2. Justificación y uso de resultados	6
2.3. Hipótesis	7
2.4. Objetivos de la investigación	8
2.4.1. Objetivo general	8

2.4.2. Objetivos específicos	8
3. MARCO TEÓRICO	10
3.1. Antecedentes de estudio	10
3.2. Micro-sistemas electromecánicos (MEMS)	12
3.2.1. Fluidos	13
3.2.2. Canales magnetohidrodinámicos	14
3.3. Trabajo relacionado con sistemas mecánicos y microfluídica	15
3.3.1. Sistemas de laboratorio en chip (LOS, Lab-On-Chip Systems)	16
3.3.2. Sensores	16
3.3.3. Actuadores	17
3.3.4. Sistemas de velocimetría de imagen de partículas	17
3.3.5. Sistema de iluminación y grabación	23
3.4. Conclusiones del marco teórico	27
4. METODOLOGÍA	28
4.1. Desarrollo del modelo matemático	28
4.1.1. Formulación matemática del problema	29
4.1.2. Análisis del modelo matemático	31
4.2. Validación experimental del modelo matemático	32
4.2.1. Prototipo MHD	33
4.2.2. Fluido conductor	34
4.2.3. Estructura del sistema de visión	37
4.2.4. Diseño del sistema de iluminación	38
4.3. Medición experimental de velocidad	42
4.3.1. Medición física de la velocidad	42
4.3.2. Cálculo de la velocidad por seguimiento de partículas	43
4.3.3. Cálculo de la velocidad mediante velocimetría de imágenes de partículas	44

4.4.	Herramienta de análisis y suavizado de perfiles de velocidad 2D de flujo magnetohidrodinámica	46
4.4.1.	Introducción del manual de usuario de la herramienta de análisis	47
4.4.2.	Descripción general del programa de cómputo	49
4.4.3.	Observaciones generales para el uso de la herramienta	49
4.4.4.	Procedimiento de uso de la herramienta	50
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	64
5.1.	Diseño del sistema fluídico MHD	64
5.1.1.	Prototipo MHD con electrodos de aluminio	65
5.1.2.	Prototipo MHD con electrodos de cobre	66
5.1.3.	Efectos producidos por los fluidos conductores	67
5.1.4.	Resultados y efectos producidos por las fuentes de iluminación evaluadas	67
5.2.	Resultados del modelo numérico	70
5.3.	Resultados computacionales del modelo numérico	71
5.4.	Validación teórica del modelo matemático	73
5.4.1.	Solución Analítica de Digilov	75
5.4.2.	Método de Elementos Finitos (FEM) por West	76
5.5.	Comparación del modelo matemático propuesto con mediciones experimentales	77
5.5.1.	Configuración de las soluciones conductoras	77
5.5.2.	Reultados de la herramienta Tracker para análisis PTV	79
5.5.3.	Reultados de la herramienta PIVLAB para análisis PIV	80
5.5.4.	Resultados de la validación experimental mediante el sistema de visión propuesto.	82
5.5.5.	Estimación de incertidumbre del sistema de visión	83
6.	CONCLUSIONES	89
7.	PRODUCTOS ACADÉMICOS	91

ÍNDICE GENERAL

7.1. Artículos publicados en revistas arbitradas e indexadas	91
7.2. Capítulos de libros	96
7.3. Artículos publicados en congresos	99
7.4. Registro de derechos de autor	103
REFERENCIAS	111

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1. Canales MHD	15
3.2. Tendencia de publicación científica PIV (Información de la fuente Scopus). . .	18
3.3. Sistemas típicos PIV basados en iluminación por Laser.	24
3.4. Sistema PIV basado en la iluminación de luz de fondo.	25
3.5. Cubo filtro de microscopio, para sistemas micro-PIV con iluminación LED . .	25
3.6. Configuración óptica del sistema de iluminación incoherente Micro-PIV con luz emitida por fibras ópticas plásticas	26
4.1. Estructura geométrica y componentes del prototipo microfluídico MHD (agita- dor MHD).	35
4.2. Proceso de sembrado de partículas.	36
4.3. Estructura del sistema de visión.	38
4.4. Diseño de circuitos impresos de anillos LED con diferente orientación lumínica.	40
4.5. Diseño del iluminador por campo oscuro	41
4.6. Medición física de la corriente en el mezclador MHD.	43
4.7. Velocidad máxima calculada con Tracker	44
4.8. Pantalla gráfica de los vectores de velocidad en PIVLAB	45
4.9. Ubicación de la posición de velocidad máxima calculada a través de PIV y una muestra del perfil de velocidad	46

4.10. (a) Vista general de la interfaz "2-D Flow Velocity MHD" como una herramienta agregada a PIVlab. (b) Opciones de configuración originales de PIVlab. (c) Análisis de perfil de velocidad 2D y herramienta de suavizado añadida a PIVlab.	48
4.11. Conexión de la herramienta de análisis y suavizado de perfiles de velocidad 2D de flujo MHD al sistema PIVLab.	49
4.12. Pantalla de la aplicación "Herramienta de Análisis y Suavizado de Perfiles de Velocidad 2D de Flujo Magnetohidrodinámico".	50
4.13. Carga de secuencia de imágenes.	51
4.14. Calibración de la imagen con distancia y tiempo real.	52
4.15. Selección de la región de interés mediante una máscara (ROI).	53
4.16. Configuración del método de análisis de correlación FFT.	54
4.17. Análisis de las imágenes	54
4.18. Validación de vectores	55
4.19. Extracción de parámetros radiales.	56
4.20. Trazado y almacenamiento de datos radiales.	57
4.21. Herramienta de Análisis y Suavizado de Perfiles de Velocidad 2D de Flujo Magnetohidrodinámico".	58
4.22. Cargar archivos radiales.	59
4.23. Cargar radios con los datos originales de los archivos cargados.	60
4.24. Filtrado de radios.	61
4.25. Análisis simultáneo de radios.	62
4.26. Instalación de la herramienta de Análisis y Suavizado de Perfiles de Velocidad 2D de Flujo Magnetohidrodinámico.	63
5.1. Evaluación y prueba de distintos tipos de fuentes de iluminación.	69
5.2. Resultados obtenidos con la técnica de iluminación por campo oscuro y el diseño de la lámpara con LEDs colocados en la base del difusor.	70

5.3. (a) Caudal 2D adimensional q versus η para la relación de aspecto $\epsilon = 0.1, 0.5, 1.0, 10.0$. (b) Representación física de la relación η y ϵ	72
5.4. Sección transversal del canal anular y sus parámetros principales: h (profundidad del canal), r (ancho del canal), R_1 (radio interno del cilindro), R_2 (radio externo del cilindro), v_θ (velocidad azimutal).	72
5.5. Perfiles de velocidad 3D adimensionales para varias configuraciones de parámetros, con el fin de mostrar la simetría y la antisimetría de las diferentes configuraciones paramétricas.	73
5.6. Resultados analíticos y experimentales de Digilov (Digilov, 2007) y West (West et al., 2003) vs resultados del modelo matemático propuesto.	77
5.7. Caracterización eléctrica V-I de la solución conductora de la configuración 5 mostrada en la tabla 5.1.	79
5.8. Comparación del método de Galërkin con datos experimentales obtenidos con Tracker y mediciones PIVLAB.	81
5.9. Validación experimental del mezclador MHD.	83
5.10. Análisis visual de vórtices.	84
5.11. Sistema de visión para medición de velocidad de un fluido en el mezclador MHD.	85
5.12. Gráfico de calibración, $-U$ (Límite Inferior), $+U$ (Límite Superior).	88

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Publicación científica PIV en los últimos 25 años.	19
3.1. Publicación científica PIV en los últimos 25 años.	20
3.1. Publicación científica PIV en los últimos 25 años.	21
3.1. Publicación científica PIV en los últimos 25 años.	22
4.1. Concentración de elementos en el fluido electrolito.	35
5.1. Configuración de las soluciones conductoras.	78
5.2. Comparación de las velocidades máximas obtenidas con la herramienta Tracker y con el método de Galérkin. Las características geométricas y parámetros son: $R_1/R_2 = \eta = 0,60, h/R_2 = \epsilon = 0,22, B = 0,1634T$	80
5.3. Comparación de las velocidades máximas obtenidas con la herramienta PI- VLAB y con el método de Galérkin. Las características geométricas y pará- metros son: $R_1/R_2 = \eta = 0,60, h/R_2 = \epsilon = 0,22, B = 0,1634T$	81
5.4. Validación del modelado del mezclador MHD propuesto versus mediciones ex- perimentales con el sistema de visión propuesto.	82
5.5. Estimación de incertidumbre para diferencias de potencial de 0.5V a 3.5V.. . .	87
5.6. Estimación de incertidumbre para diferencias de potencial de 4.0V a 6.0V. . . .	88

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La aplicación de la magnetohidrodinámica (MHD) en microfluidos representa una nueva tendencia durante los últimos veinte años. Las aplicaciones en microfluídica se desarrollan debido a la necesidad de impulsar y controlar flujos para realizar tareas tales como síntesis química de compuestos, o bien la caracterización, identificación y separación de reacciones complejas además de el diseño de redes a microescala. Los avances logrados en este campo multidisciplinario y su incursión en una gran variedad de procesos se siguen a través de la literatura científica. Sin embargo, aún permanece como un área de investigación que requiere de un mayor desarrollo ([Al-Hababbeh et al., 2016](#)). El principio del funcionamiento magnetohidrodinámico (MHD) en microfluidos se basa en la fuerza de Lorentz que actúa sobre una solución electroconductora, en presencia de campos magnéticos y eléctricos, lo que resulta en el movimiento de un fluido. Las soluciones más utilizadas en los inicios de la investigación de MHD son los metales líquidos y los gases ionizados, aunque en la literatura científica más reciente, las soluciones electrolíticas han hecho una incursión ([Yuan and Isaac, 2017a](#)). Esto se debe a que el flujo en un agitador MHD depende de la conductividad eléctrica de la solución. Los electrolitos son una opción conveniente, a pesar de que se produce un fenómeno de cinética de electrodo no lineal debido al uso de electrolitos. El flujo de electrolito generalmente está contaminado con reacciones electroquímicas que ocurren en las superficies de los electrodos ([Mitra and Chakraborty, 2011](#)). Por otro lado, las propiedades hidráulicas y la conductividad del flujo MHD

dependen de la geometría del canal (Yuan and M. Isaac, 2015) (forma, tamaño, proporciones, etc.) y la disposición de electrodos. Si bien las conducciones rectangulares son las más comunes, es decir, dos electrodos paralelos colocados en dos paredes opuestas (Jang and Lee, 2000), también existen otras configuraciones con canales anulares, donde el canal se forma entre un electrodo interno y uno externo (Rashidi et al., 2017). Otro aspecto a considerar es que los canales completamente cerrados y llenos de solución excluyen la presencia de superficies libres y, como consecuencia, muestran los efectos de tensión de la superficie, mientras que otros son canales abiertos, con una superficie libre. En cuanto a los campos magnéticos y eléctricos, estos se inducen mediante imanes permanentes, electroimanes, fuentes de alimentación de CC o CA (Lemoff and Lee, 2000; Bau et al., 2003; Zhao et al., 2015). En los últimos años, se observan diferentes configuraciones de sistemas MHD en la literatura científica, lo que abre una amplia gama de aplicaciones. Un ejemplo de un sistema MHD con una configuración novedosa se presenta en (Yuan and Isaac, 2017a), que logra una mejora de la mezcla mediante la creación de una advección caótica de tipo turbulento. La advección caótica se logra gracias a la aplicación de un voltaje de CA a través de electrodos de disco específicos y un contraelectrodo de anillo que enciende y apaga un par de electrodos de disco un cierto período de tiempo, produciendo un "vórtice intermitente".

La inclusión de los microfluidos en el diseño de Sistemas Microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés, Microelectromechanical systems) donde un fluido conductor es transportado para varias operaciones en Micro Sistemas de Análisis Total (μ TAS, por sus siglas en inglés, Micro Total Analysis Systems) de modo dinámico, proporciona una solución alternativa a la fricción mecánica, gracias a la ventaja de su naturaleza no intrusiva. La ausencia de elementos mecánicos reduce las posibilidades de averías, vibraciones y ruidos no deseados. Se realiza una transformación directa de energía electromagnética a mecánica para todas aquellas aplicaciones que requieren precisión en sistemas a microescala (Flores-Fuentes et al., 2017). Las aplicaciones más comunes de μ TAS MHD son el micro-bombeo, las redes, los procesos de control y separación de reacciones químicas en los llamados laboratorios en un chip (LOC, por sus siglas en inglés, Labs-On-Chip) y la cromatografía líquida (LC, por sus siglas en inglés,

Liquid Chromatography) (Bau et al., 2003; Qian and Bau, 2009; Das et al., 2013) . También se aplica en reactores químicos donde se produce la reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés, Polymerase Chain Reaction) para la amplificación de ácido desoxirribonucleico (ADN) (Yuan and Isaac, 2017a; West et al., 2002; Kumar et al., 2011) en procesos de micro-enfriamiento (en microelectrónica) y termociclado (Mitra and Chakraborty, 2011). Los resúmenes de los más recientes dispositivos de microfluidos basados en MHD se dan en (Qian and Bau, 2009; Ortiz-Pérez et al., 2017).

En base al estado del arte se observa que la microfluídica y recientemente la microfluídica MHD, tiene una gran cantidad de opciones por explorar. Desde los materiales y métodos de fabricación, diseño de dispositivos, estudios teóricos, experimentales y numéricos así como una diversidad de aplicaciones. La microfluídica MHD representa un reto para los científicos de hoy. De manera similar a la de la microelectrónica, las tecnologías microfluídicas permiten la fabricación de dispositivos altamente integrados para realizar varias funciones diferentes en un mismo chip (LOC). Uno de los objetivos a largo plazo en el campo de la microfluídica es crear dispositivos de diagnósticos clínicos integrados y portátiles, eliminando de esta manera los procedimientos de análisis de laboratorio que requieren mucho tiempo. Debido a que el campo de la microfluídica es un campo relativamente novedoso, las simulaciones numéricas de los sistemas de microfluídica son extremadamente valiosas tanto para proporcionar una herramienta de investigación, como para desarrollar una herramienta eficiente de diseño y optimización. Al incorporar en un modelo numérico la geometría del canal utilizado, el caudal del fluido, los coeficientes de difusión y las posibles interacciones químicas, el comportamiento de un sistema específico se puede predecir con precisión en comparación con una predicción intuitiva. El modelado numérico también permite la visualización de fenómenos de flujo complejos que son difíciles de obtener de manera experimental. El modelo se puede utilizar para explorar los efectos producidos al cambiar parámetros del sistema sin realmente fabricar dispositivos diferentes. La desventaja del modelado numérico es que no garantiza que reproduzca exactamente los eventos en la naturaleza. Por otro lado, debido a las aproximaciones numéricas del método, también es posible obtener resultados de simulación ligeramente inexactos. No obstante, exa-

minar los resultados de la simulación y la comparación de datos numéricos y experimentales puede validar el uso del modelo como herramienta predictiva.

Por lo tanto, uno de los objetivos esenciales de esta investigación es contribuir en el desarrollo de una herramienta de medición, predicción y análisis de flujos MHD en diseños experimentales con la cual es posible conocer el campo de velocidades del flujo y su caracterización en distintas configuraciones con la finalidad de comparar y validar los resultados del modelado numérico, por lo que la actual investigación, presenta el diseño de un flujo conductor laminar 3D producido en un canal anular abierto impulsado por una fuerza de Lorentz. Se lleva a cabo un estudio teórico y experimental donde la investigación teórica consiste en el estudio del estado del arte de los canales anulares impulsados por una fuerza de Lorentz, el análisis y aplicación de un modelo matemático para obtener la velocidad de flujo constante con una aproximación cuasi-analítica a través del método de Galërkin con series ortogonales de Bessel-Fourier, y la validación de la aproximación del modelo con respecto a otros modelos resueltos mediante métodos de solución analítica (AS, de sus siglas en inglés, Analytical Solution) ([Digilov, 2007](#)) y el método de Elementos Finitos (FEM, de sus siglas en inglés, Finite Element Method) ([West et al., 2003](#)). El método de Galërkin se ha utilizado antes con un enfoque numérico en otras investigaciones, lo que resulta en un método preciso y excelente para combinar con otros métodos matemáticos. Una revisión de los métodos matemáticos aplicados a las diferentes configuraciones MHD se puede encontrar en ([Rashidi et al., 2017](#)). La investigación experimental consistió en la fabricación de un prototipo MHD constituido por un canal anular formado por dos cilindros conductores eléctricos concéntricos limitados por una pared inferior aislante, el desarrollo de un sistema de visión personalizado para la detección de los perfiles de velocidad en un fluido conductor dirigido en dirección azimutal por una fuerza de Lorentz inducida por la interacción entre un campo magnético uniforme a lo largo de la dirección axial y una corriente eléctrica radial, y la validación del modelo matemático para caracterizar el efecto de las tres paredes implicadas en el prototipo MDH teniendo en cuenta la dimensión de la distancia entre los cilindros, así como la profundidad del canal.

Para presentar de manera estructurada el trabajo de investigación realizado, la presente te-

sis se divide en siete capítulos que permiten dar un seguimiento detallado del desarrollo de la investigación. En el capítulo uno se presenta una introducción de los principales antecedentes y el propósito general de la investigación así como la estructuración del presente documento. En el capítulo dos se define el propósito del proyecto mediante el planteamiento del problema y su justificación, se establece la hipótesis así como el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación. En el capítulo tres, se presenta una revisión de las aplicaciones de microfluidos relacionadas con los fundamentos de la MHD y el estado del arte. En el capítulo cuatro, se presenta la metodología implementada consistente en la validación teórica y experimental del modelo matemático, medición experimental de la velocidad de flujos y el desarrollo de una herramienta de análisis y suavizado de perfiles de velocidad 2D de flujo MHD. En el capítulo cinco se presenta el análisis de resultados, mientras que el capítulo 6 se describen las conclusiones de este proyecto, el capítulo 7 enlista los productos académicos obtenidos como consecuencia de la investigación, y finalmente se muestran las referencias a las citas de este documento.

CAPÍTULO 2

PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se plantea la problemática a resolver en esta investigación, se establece el marco de justificación del proyecto y su hipótesis. Los objetivos generales y específicos son determinados en esta sección y se describe explícitamente la metodología desarrollada para llevar a cabo los objetivos propuestos.

2.1. Planteamiento del problema

Desarrollar un sistema de visión para conocer el campo de velocidades en un fluido mediante el trazado de partículas para el caso especial de magnetohidrodinámica, con el propósito de validar teórica y experimentalmente el modelo matemático para el cálculo de un flujo laminar 3D de un fluido conductor de electricidad en un canal anular abierto impulsado por una fuerza de Lorentz.

2.2. Justificación y uso de resultados

Existen diferentes sistemas de medición de velocidades medias de fluidos, tales como los basados en las diferencias de presión provocadas por un estrechamiento constante en la conducción (diafragmas, boquillas y venturímetros), los basados en secciones de flujo variables

provocadas por las diferencias de presión constantes, producidas por un flotador (rotámetros) o los indirectos, basados en la medida de caudales en determinadas secciones de flujo (contadores mecánicos, medidores térmicos, medidores ultrasónicos) (Salcedo and Font, 2011). Estos sistemas de medición mencionados son invasivos e inconvenientes debido a las dimensiones y forma estructural del mezclador (agitador), así como las características y velocidad que presenta el flujo MHD en evaluación durante esta experimentación. Por lo anterior, en este trabajo se optó por utilizar un sistema de visión para conocer el campo de velocidades en un fluido mediante el trazado de partículas para el caso especial de magnetohidrodinámica basado en la técnica PIV, debido a que resulta un método no invasivo que no afecta ni interviene físicamente en la velocidad del fluido. Además, esta técnica identifica más parámetros geométricos para la recreación de campos de velocidad tales como los vórtices generados en un fluido. Debido a la estructura física del mezclador MHD, la velocimetría de imágenes de partículas se realiza sobre la superficie libre del fluido donde es posible calcular un perfil de velocidad 2D. La medición precisa del perfil de velocidad 2D es fundamental debido a la necesidad de una futura mejora del sistema de visión artificial caracterizado al prototipo mezclador MHD y al modelo matemático, para construir el perfil de velocidad 3D del prototipo de agitador MHD. La técnica presentada se puede utilizar para medir y validar el diseño de dispositivos que requieren manipulación de fluidos para tareas como bombeo, conexión en red, propulsión, agitación, mezcla e incluso enfriamiento sin necesidad de componentes mecánicos debido a la no intrusión de la MHD. Su naturaleza proporciona una solución a los problemas de elementos mecánicos móviles.

2.3. Hipótesis

Uno de los principales problemas que se presenta en la medición de la velocidad de un fluido en un microsistema MHD, es encontrar un método de medición de la velocidad media no invasivo o que no afecte la velocidad del fluido conductor debido a las dimensiones de estos microsistemas, y a las características y velocidad del fluido, el cual proporcione mediciones precisas y exactas del modelo físico del microsistema perfilado por el modelo matemático que

describe su comportamiento. Por este motivo, se plantea la siguiente hipótesis: “Utilizando un sistema de visión personalizado, se puede conocer el campo de velocidades en un fluido, mediante el trazado de partículas para el caso especial de magnetohidrodinámica, además es posible validar con precisión el perfil de velocidad 2D de la superficie libre sobre dicho flujo”.

2.4. Objetivos de la investigación

2.4.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de visión adecuado al mezclador MHD, para conocer el campo de velocidades en un fluido, mediante el trazado de partículas para el caso especial de magnetohidrodinámica, evaluando los resultados del sistema por medio de la validación teórica y experimental del modelo matemático del perfil de velocidad 2D de la superficie libre de flujo laminar 3D, de un fluido conductor en un canal anular abierto, el cual es impulsado por una fuerza de Lorentz. Realizar la validación experimental del modelo, utilizando las mediciones obtenidas a través de las técnicas de velocimetría de imágenes de partículas (PIV), validar teóricamente el modelo por medio de la comparación de resultados con los datos obtenidos de trabajos científicos anteriores, así como aplicar métodos de minería y suavizado de datos para la eliminación de valores atípicos, debido a problemas ópticos que se generan durante la captura de las imágenes de partículas del fluido conductor.

2.4.2. Objetivos específicos

1. Calcular el flujo constante a través del modelado del fenómeno físico.
2. Validar teóricamente el modelo matemático.
3. Confeccionar un prototipo MHD con configuración anular y de superficie libre.
4. Diseñar el sistema de visión personalizado.

5. Establecer una metodología de detección de los perfiles de velocidad para la validación experimental del flujo laminar 3D producido en el prototipo MHD.
6. Validar experimentalmente el modelo matemático.
7. Desarrollar una herramienta de análisis y suavizado de perfiles de velocidad 2D de flujo magnetohidrodinámico mediante la técnica PIV.
8. Aplicar técnicas de minería y suavizado de datos para eliminación de valores atípicos debido a problemas ópticos en las imágenes de las partículas.
9. Comparar los resultados del modelado con los datos experimentales obtenidos a través de la técnica PIV.
10. Registrar el derecho de autor del programa de computo "Herramienta de Análisis y Suavizado de Perfiles de Velocidad 2D de Flujo Magnetohidrodinámico".
11. Divulgar el conocimiento generado, en congresos nacionales e internacionales.
12. Publicar los resultados en revistas arbitradas e indexadas.
13. Escribir un capítulo de libro.
14. Escribir la tesis de este proyecto de investigación.

CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta una revisión de las aplicaciones de microfluidos relacionadas con los fundamentos de la MHD y las aplicaciones de sistemas de visión a la observación del comportamiento del flujo de los fluidos a través de la medición de sus velocidades en los sistemas MHD, para el análisis, diseño de forma, estructura y rendimiento de agitadores electromagnéticos.

3.1. Antecedentes de estudio

La utilización de micro-fluidos en el diseño de sistemas mecánicos es cada vez más frecuente. Con el desarrollo de novedosas técnicas computacionales el modelado del comportamiento de los micro-fluidos puede ser muy preciso, lo que permite delinear el uso de micro-fluidos en el diseño de sofisticados sistemas micro-electromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés, Microelectromechanical Systems) para aplicaciones en micro escala que requieren de gran precisión.

Los sistemas electromecánicos requieren energía eléctrica para su funcionamiento, ya que su tarea esencial es poner piezas en movimiento, la aplicación de micro-fluidos puede producir el mismo efecto en el movimiento de piezas mecánicas, dotando a los MEMS de la capacidad

para llevar a cabo funciones específicas (Das et al., 2013), entre las más comunes el bombeo, propulsión, agitación y mezclado de fluidos, conexiones en red e incluso enfriamiento sin la necesidad de componentes mecánicos (Kumar et al., 2011).

En la actualidad, casi todos los mecanismos convencionales pueden perder ciertas cantidades de energía debido a condiciones como la fricción de sus componentes, lo que resulta un inconveniente para algunas aplicaciones.

El diseño de MEMS está en constante evolución y varias disciplinas se unen al desarrollo de sistemas para mejorarlos. Una de ellas es la magneto-hidrodinámica (MHD), la cual proporciona una solución alternativa al problema de la fricción gracias a la ventaja de su naturaleza no intrusiva, ya que no se requiere de elementos mecánicos en movimiento para lograr el funcionamiento de los MEMS, reduciendo la posibilidad de averías, vibraciones no deseadas y del ruido, obteniendo una transformación directa de energía electromagnética a energía mecánica.

La aplicación de la MHD está ganando constantemente el interés de los diversos campos de la ingeniería y de la investigación científica para mejorar la tecnología empleada en naves espaciales, aviones y vehículos marinos, etcétera (Zhang and Chen, 2020).

Recientes experimentaciones han emergido con el propósito de manipular micro-fluidos, utilizando la inducción de una fuerza de Lorentz para impulsar el movimiento del micro-fluido, el avance logrado en este campo multidisciplinario y su incursión en una gran variedad de aplicaciones se puede seguir a través de la literatura científica. Algunas de las aplicaciones más comunes son el micro-bombeo (Al-Habahbeh et al., 2016), el micro-mezclado (Yuan and Kakkattukuzhy, 2015), el control de micro sistemas a través de redes de fluidos (Bau et al., 2003), y el micro-enfriamiento (Mahabaleshwar et al., 2020). Sin embargo, aún permanece como área de investigación, ya que requiere de análisis y da lugar al desarrollo y aplicación de sistemas de visión máquina para evaluar el comportamiento de microfluidos mediante la medición de las

velocidades y direcciones del fluido presente en los MEMS.

Los sistemas de visión son una fuente esencial de información para la integración de los sistemas mecánicos y micro-fluídicos al proveer la información necesaria para el análisis, el diseño de la forma, estructura y el rendimiento de mezcladores para MEMS ([Yuan and Kakkat-tukuzhy, 2015](#)).

3.2. Micro-sistemas electromecánicos (MEMS)

El diseño de MEMS permanece en constante evolución y varias disciplinas se involucran para aportar sus beneficios y resolver los retos que se presentan.

Los MEMS son útiles para casi todos los campos de aplicación en micro-escala debido a su bajo consumo de energía, tamaño, costo y capacidad de adaptación ([Valenzuela Delgado et al., 2017](#)). La fabricación de MEMS se realiza por lotes, consiste en una serie de sustratos delgados y planos estructurados como capas, lo que resulta en dispositivos baratos para sensores y actuadores con una presencia mínima invasiva en las aplicaciones. Los transductores MEMS convierten la energía de entrada en otro tipo de energía de salida, estos tipos de energía pueden ser mecánica, óptica, eléctrica, fluídica, magnética, térmica, etcétera. La función del transductor-sensor MEMS, se encarga principalmente de medir una cantidad física sin producir efectos de carga, mientras que la función del transductor-actuador MEMS es mover o controlar un sistema. Existen MEMS basados en diversos fenómenos como: piezoeléctrico, resonante, magnético, termo-eléctrico, capacitivo, termo-mecánico, termo-neumático, inductivo, resistivo, óptico, y los basados en micro-fluidos. Respecto a los basados en micro-fluidos han surgido un gran número de tecnologías, entre ellas, las basadas en MHD.

La micro-fluídica permite la interconexión de redes de micro-canales ([Bau et al., 2003](#)), pro-

porcionando a los MEMS funciones de control y de multiplexación para ser parte de sistemas en diferentes aplicaciones, tales como las cabezas de impresoras de inyección de tinta, dosificadores micro-bomba no mecánica, detectores de gas y una larga lista de bio-sensores y sistemas de análisis químicos para alimentos, así como para propósitos farmacéuticos.

3.2.1. Fluidos

Se consideran fluidos todas aquellas sustancias que se deforman bajo la acción de un esfuerzo cortante, así, para este modelado se considera como continuo a pesar de que está formado por millones de moléculas. Por otro lado, cuando el volumen del fluido es muy pequeño, se estima utilizando el recorrido libre de las moléculas.

Número de Reynolds

Para canales anulares se pueden predecir los patrones de su fluido por medio del número de Reynolds, por ejemplo, para números de Reynolds menores a 2300 al patrón se le llama “flujo laminar” y para números entre 2300 y 4000 el patrón se denomina “flujo de transición”. De la misma forma, para números mayores a 4000, el patrón se nombra “flujo turbulento”. El número de Reynolds se relaciona con la velocidad media del fluido, el diámetro del canal y la viscosidad del fluido (interpretado como la relación de fuerzas de inercia a fuerzas viscosas).

Microfluido

La microfluídica hace referencia a flujos a escalas muy pequeñas (μL , nL , pL , fL) utilizadas en MEMS y debido éstas pequeñas dimensiones, la mayoría de los flujos tienden a ser laminar, es decir, la microfluidica estudia el comportamiento de los fluidos en la microescala y la mesoescala. También comprende el diseño de sistemas en los que se emplean estas cantidades de fluido. En microcanales de 10 a 500 nanómetros de diámetro el número de Reynolds es

extremadamente bajo; típicamente es de décimas. Por lo tanto, el flujo es siempre laminar y no ocurren turbulencias; sólo la difusión interviene en la mezcla de fluidos. Sin embargo para prototipos experimentales, es posible representar estas características de número de Reynolds bajo y flujo laminar en escala de milímetros y centímetros mediante una configuración geométrica circular y un flujo a baja velocidad (Avila et al., 2011).

3.2.2. Canales magnetohidrodinámicos

El principio de funcionamiento de los canales magnetohidrodinámicos se basa en la fuerza de Lorentz (Serway and Jewett, 2009), la cual actúa en una solución eléctricamente conductora en presencia de los campos magnético y eléctrico lo que resulta en el movimiento de flujo, como se expresa en 3.1 donde q es la carga móvil sobre la que actúa la fuerza de Lorentz, que tiene una velocidad v en presencia tanto de un campo eléctrico E y un campo magnético B , experimentando a la vez una fuerza eléctrica qE y una fuerza magnética $qv \times B$.

$$F = qE + qv \times B \quad (3.1)$$

En un principio, las soluciones más empleadas en los canales MHD, fueron los metales líquidos y los gases ionizados, mientras que en investigaciones recientes se utilizan soluciones electrolíticas de baja conductividad (Yuan and Isaac, 2017a), aunque las soluciones electrolíticas generalmente se contaminan debido a las reacciones electroquímicas que ocurren en las superficies de los electrodos (Mitra and Chakraborty, 2011), además de propiciar la generación de burbujas (Lemoff and Lee, 2000).

Los canales rectangulares son los más comunes, estos consisten de dos paredes en paralelo actuando como electrodos (Jaesung Jang and Seung S. Lee, 2000), aunque también existen otras configuraciones (Rashidi et al., 2017) como la del mezclador MHD propuesto, el cual consiste en un canal anular formado por un anillo interno y otro anillo externo actuando de igual manera

como electrodos, esto se observa en la figura 3.1. Algunos canales son cerrados y otros abiertos, lo que causa la presencia de una superficie libre donde se pueden observar los efectos de la tensión superficial, así como el comportamiento del flujo. El campo magnético se puede inducir por electroimanes o imanes permanentes, mientras que el campo eléctrico por una fuente de voltaje o corriente, ya sea continua o alterna (Zhao et al., 2015).

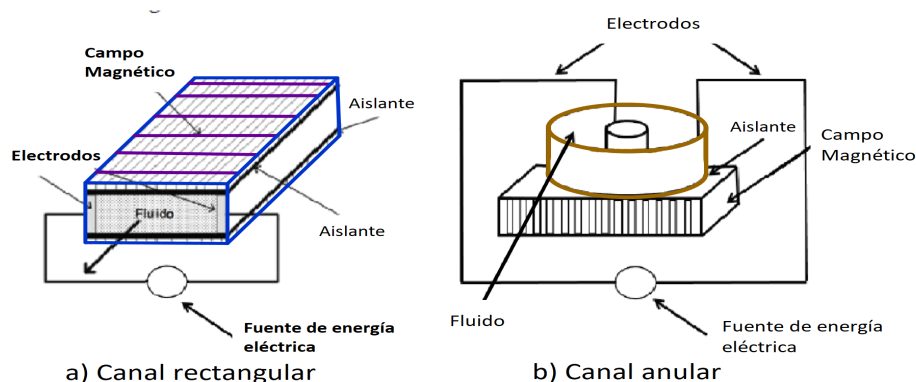


Figura 3.1: Canales MHD

3.3. Trabajo relacionado con sistemas mecánicos y microfluídica

La fusión de sistemas microelectromecánicos y microfluídicos ha dado origen a una nueva tecnología que implica el procesamiento de fluidos a microescala en microcanal grabado para ser utilizados en la construcción de sistemas de laboratorio en chip (LOS), sensores y actuadores. Los sistemas generados con esta nueva tecnología pueden transformarse en un dispositivo de aplicación completo o utilizarse como componentes individuales para dispositivos (Rosen and Gurman, 2010).

3.3.1. Sistemas de laboratorio en chip (LOS, Lab-On-Chip Systems)

El procesamiento de fluidos a microescala en microcanales grabados se utiliza para construir LOS para llevar a cabo ensayos químicos y biológicos, útiles en diagnósticos clínicos, monitoreo ambiental e investigación biomédica. LOS es un sistema de análisis total de dispositivos. Son pequeños, portátiles y autónomos, y proporcionan una plataforma única en la que se realizan todos los aspectos del análisis, desde la preparación de la muestra hasta la detección. La detección de las especies de interés es uno de los aspectos más desafiantes del análisis químico utilizando dispositivos microfluídicos. Si bien la capacidad de manejar muestras pequeñas, los tamaños son una clara ventaja de tales dispositivos, esto hace que la cantidad total de especies a detectar sea muy pequeña. Por lo tanto, se requieren métodos de detección sensibles. Además, el esquema de detección ideal debería ser universal en su capacidad para responder a las especies y ser fácilmente adaptable a los diversos materiales utilizados en dispositivos microfluídicos (vidrio, polímeros, silicio, etc.). Están surgiendo nuevos diagnósticos médicos debido a la fabricación de biosensores para biomarcadores. Tales como los dispositivos para el análisis electroquímico de la hibridación de ADN, que con una manipulación de válvula microfluídica de capa, proporcionan capacidades controladas y automatizadas para el análisis de alto rendimiento con una respuesta de dosis precisa (Ben-Yoav et al., 2015). Estos dispositivos pueden tomar una pequeña muestra de fluido, moverla a través de un microcanal y luego separar los componentes importantes. En consecuencia, estos componentes se detectan y cuantifican por flujo de electroósmosis y / o separación electroforética, donde un campo eléctrico aplicado induce el movimiento del flujo y separa los constituyentes del fluido.

3.3.2. Sensores

Los sistemas de microfluidos proporcionan el uso de cantidades muy pequeñas de muestras para llevar a cabo separaciones y detecciones con alta resolución y sensibilidad. Comúnmente, los sensores se leen sin contacto a través del fondo de cristal de un chip con instrumentos optoelectrónicos miniaturizados utilizando técnicas de modulación de fase. El microsistema y

la nanotecnología permiten la implementación de elementos de transducción y detección en los dispositivos microfluídicos como detectores de pesticidas (Tahirbegi et al., 2017), contador de células cancerosas (Kokkinis et al., 2017), el sensor colorimétrico de soluciones estáticas (Hsiao et al., 2015) y detectores de metales pesados Lin et al. (2016), entre otros. Si bien, y un ejemplo relacionado con las aplicaciones de MHD es la producción de termoplásticos para mejorar las propiedades físicas del plástico a medida que se solidifica (Farzaneh-Gord et al., 2010), el monitoreo de los cambios en la presión hidrostática y los potenciales eléctricos a través de los vasos en la vasculatura humana en presencia de un gran campo estático magnético para determinar la viabilidad de la pectroscopia RMN en vivo (Nijm et al., 2008).

3.3.3. Actuadores

El uso de actuadores basados en microfluidos ha demostrado ser útil para una variedad de tareas microfluídicas, incluida la mezcla de fluidos, la separación de partículas, el calentamiento localizado o la atomización de fluidos (Winkler et al., 2016). Por lo tanto, se han desarrollado actuadores de microfluídica de microbombeo, microválvulas y mezcla para manejo de fluidos y control de flujo (Saez et al., 2016). Mientras que algunos de ellos se basan en MHD (Yuan and Isaac, 2017b), mediante la cual se aplica un voltaje a través de electrodos de disco específicos y un contraelectrodo de anillo, se establece una corriente en la solución conductora. La corriente interactúa con un campo magnético aplicado externamente generando una fuerza de Lorentz que causa movimiento fluido.

3.3.4. Sistemas de velocimetría de imagen de partículas

Las técnicas de velocimetría de imagen de partículas surgen en el campo de las mediciones con la necesidad de medir y analizar la velocidad de fluidos mediante técnicas no invasivas, es decir, que no cambien o interfieran en la velocidad del mismo. Las primeras publicaciones científicas comienzan a partir de 1983 cuando se utiliza una aplicación de técnicas fotográficas con manchas para realizar mediciones de flujo de gas inestable. En 1984 se discute la velocime-

tría láser pulsada (PLV) en el contexto de las mediciones fluidicas. Las limitaciones prácticas y teóricas continuaron en la investigación hasta 1991, cuando se publica la primera patente relacionada con PIV ([Patrick V. Farrell, 1989](#)). Además, las nuevas alternativas a cada uno de los elementos de los sistemas PIV continúan bajo el desarrollo de la investigación y la innovación de acuerdo con los nuevos avances de las tecnologías computacionales y mecánicas para nuevas aplicaciones sofisticadas, la figura 3.2 muestra la creciente tendencia de publicación científica según la fuente de información Scopus, mientras que la tabla 3.1 describe brevemente la historia sobresaliente de los últimos 25 años de acuerdo con Scopus, con base en la cobertura de todos los temas, ubicación geográfica, investigadores y publicaciones científicas más citadas.

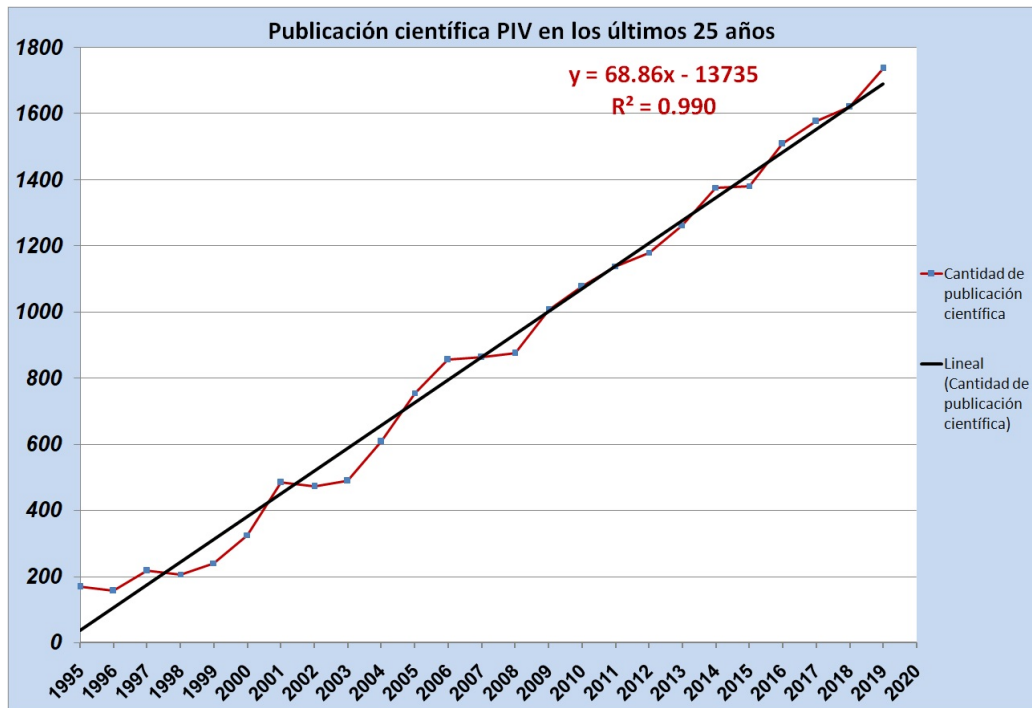


Figura 3.2: Tendencia de publicación científica PIV (Información de la fuente Scopus).

Tabla 3.1: Publicación científica PIV en los últimos 25 años.

Año	País	Publicación Científica
1995	EUA	Sridhar, G., and Katz, J. (1995). Drag and lift forces on microscopic bubbles entrained by a vortex. <i>Physics of Fluids</i> (1994-present), 7(2), 389-399, [37].
1996	EUA	Williamson, C. H. (1996). Vortex dynamics in the cylinder wake. <i>Annual review of fluid mechanics</i> , 28(1), 477-539, [38].
1997	Holanda	Westerweel, J. (1997). Fundamentals of digital particle image velocimetry. <i>Measurement science and technology</i> , 8(12), 1379, [39].
1998	EUA	Santiago, J. G., Wereley, S. T., Meinhart, C. D., Beebe, D. J., and Adrian, R. J. (1998). A particle image velocimetry system for microfluidics. <i>Experiments in fluids</i> , 25(4), 316-319, [40].
1999	EUA	Meinhart, C. D., Wereley, S. T., and Santiago, J. G. (1999). PIV measurements of a microchannel flow. <i>Experiments in fluids</i> , 27(5), 414-419, [41].
2000	EUA	Adrian, R. J., Meinhart, C. D., and Tomkins, C. D. (2000). Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer. <i>Journal of Fluid Mechanics</i> , 422, 1-54, [42].
2001	Francia	Graftieaux, L., Michard, M., and Grosjean, N. (2001). Combining PIV, POD and vortex identification algorithms for the study of unsteady turbulent swirling flows. <i>Measurement Science and Technology</i> , 12(9), 1422, [43].

(Continúa en la página siguiente)

(Continuación de la página anterior)

Tabla 3.1: Publicación científica PIV en los últimos 25 años.

Año	País	Publicación Científica
2002	EUA	Tretheway, D. C., and Meinhart, C. D. (2002). Apparent fluid slip at hydrophobic microchannel walls. <i>Physics of Fluids</i> (1994-present), 14(3), L9-L12, [44].
2003	Reino Unido	White, D. J., Take, W. A., and Bolton, M. D. (2003). Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. <i>Geotechnique</i> , 53(7), 619-632, [45].
2004	EUA	Günther, A., Khan, S. A., Thalmann, M., Trachsel, F., and Jensen, K. F. (2004). Transport and reaction in microscale segmented gas-liquid flow. <i>Lab on a Chip</i> , 4(4), 278-286, [46].
2005	EUA	Adrian, R. J. (2005). Twenty years of particle image velocimetry. <i>Experiments in fluids</i> , 39(2), 159-169, [47].
2006	Holanda	Elsinga, G. E., Scarano, F., Wieneke, B., and van Oudheusden, B. W. (2006). Tomographic particle image velocimetry. <i>Experiments in fluids</i> , 41(6), 933-947, [48].
2007	EUA	Adrian, R. J. (2007). Hairpin vortex organization in wall turbulence. <i>Physics of Fluids</i> (1994-present), 19(4), 041301, [49].
2008	Reino Unido	Heathcote, S., Wang, Z., and Gursul, I. (2008). Effect of spanwise flexibility on flapping wing propulsion. <i>Journal of Fluids and Structures</i> , 24(2), 183-199, [50].

(Continúa en la página siguiente)

(Continuación de la página anterior)

Tabla 3.1: Publicación científica PIV en los últimos 25 años.

Año	País	Publicación Científica
2009	Holanda	Lindken, R., Rossi, M., Große, S., and Westerweel, J. (2009). Micro-particle image velocimetry (Micro-PIV): recent developments, applications, and guidelines. <i>Lab on a Chip</i> , 9(17), 2551-2567, [51].
2010	EUA	Wereley, S. T., and Meinhart, C. D. (2010). Recent advances in micro-particle image velocimetry. <i>Annual Review of Fluid Mechanics</i> , 42, 557-576, [52].
2011	Alemania	Oberleithner, K., Sieber, M., Nayeri, C. N., Paschereit, C. O., Petz, C., Hege, H. C., ... and Wagnarski, I. (2011). Three-dimensional coherent structures in a swirling jet undergoing vortex breakdown: stability analysis and empirical mode construction. <i>Journal of Fluid Mechanics</i> , 679, 383-414, [53].
2012	Holanda	Scarano, F. (2012). Tomographic PIV: principles and practice. <i>Measurement Science and Technology</i> , 24(1), 012001, [54].
2013	Holanda	Westerweel, J., Elsinga, G. E., and Adrian, R. J. (2013). Particle image velocimetry for complex and turbulent flows. <i>Annual Review of Fluid Mechanics</i> , 45, 409-436, [55].
2014	Alemania	Schmid, L., Weitz, D. A., and Franke, T. (2014). Sorting drops and cells with acoustics: acoustic microfluidic fluorescence-activated cell sorter. <i>Lab on a Chip</i> , 14(19), 3710-3718, [56].

(Continúa en la página siguiente)

(Continuación de la página anterior)

Tabla 3.1: Publicación científica PIV en los últimos 25 años.

Año	País	Publicación Científica
2015	Corea del Sur	Sciacchitano, A., Neal, D. R., Smith, B. L., Warner, S. O., Vlachos, P. P., Wieneke, B., and Scarano, F. (2015). Collaborative framework for PIV uncertainty quantification: comparative assessment of methods. <i>Measurement Science and Technology</i> , 26(7), 074004, [57].
2016	EUA	Zhou, K. C., Huang, B. K., Gamm, U. A., Bhandari, V., Khokha, M. K., and Choma, M. A. (2016). Particle streak velocimetry-optical coherence tomography: a novel method for multidimensional imaging of microscale fluid flows. <i>Biomedical Optics Express</i> , 7(4), 1590-1603, [58].
2017	Francia	Azzopardi, C.L., Lacour, V., Manceau, J.-F., Barthès, M., Bonnet, D., Chollet, F., Leblois, T. (2017). A fluidic interface with high flow uniformity for reusable large area resonant biosensors.
2018	EUA	Zade, S., Costa, P., Fornari, W., Lundell, F., Brandt, L. (2018). Experimental investigation of turbulent suspensions of spherical particles in a square duct, 748-783.
2019	China	Tan, L., Ali, J., Cheang, U.K., Shi, X., Kim, D, Kim, M. (2019). μ -PIV measurements of flows generated by photolithography-fabricated achiral microswimmers.

(Fin de tabla 3.1)

3.3.5. Sistema de iluminación y grabación

La mayoría de los sistemas PIV utilizan el láser como fuente de luz para iluminar las partículas sembradas en el fluido que se analiza, principalmente porque el láser emite una señal monocromática de alta energía (luz coherente) que puede agruparse en una hoja de luz para iluminar un plano específico en el fluido. El movimiento de un fluido se visualiza iluminando una delgada capa de fluido que contiene partículas trazadoras reflectantes y neutrales. Los diseños básicos de los sistemas PIV basados en la iluminación por láser utilizan el láser de onda continua (CWL), mientras que otros sistemas PIV emplean un diseño de iluminación óptimo mediante el láser pulsado (PL), ya que el PL almacena y entrega toda la potencia del láser en el instante específico cuando el sistema de visión óptica graba el plano de flujo obteniendo imágenes capturadas a alta velocidad con efectos de desenfoque mínimos. Se han diseñado diferentes configuraciones de iluminación en sistemas PIV a lo largo de los años de acuerdo con los requisitos de la aplicación. Por ejemplo, algunos sistemas PIV tienen más de un láser, algunos usan láseres de iones de argón, mientras que otros usan láser de neodimio: granate de itrio y aluminio, etc. Así mismo ocurre con la posición del láser en los sistemas PIV con referencia a la dirección del fluido y a la configuración del sistema de visión óptica (cámara), como se muestra en la Figura 3.3, donde se presentan tres sistemas típicos de PIV, tal como en (Shi et al., 2016; Shokri et al., 2017; Wilson, 2010).

En sistemas microfluídicos, la tecnología de iluminación con hojas de luz láser no es útil debido a la forma de acceso óptico para iluminar el fluido ya que todo el flujo debe estar iluminado por volumen en lugar de iluminar solo un plano del fluido. Por lo tanto, el sistema de visión óptica, requiere enfocar con precisión las partículas que se encuentran dentro de la profundidad del campo de interés, mientras que el resto de las partículas deben estar desenfocadas, lo que contribuye al ruido de fondo, el cual puede eliminarse mediante algoritmos de pre-procesamiento. La iluminación completa del flujo también se obtiene mediante un emisor de luz incoherente en la parte posterior de un sistema PIV (Tellez Alvarez et al., 2016); comúnmente utilizando una iluminación LED con un difusor de luz colocado entre la fuente de iluminación y el contenedor

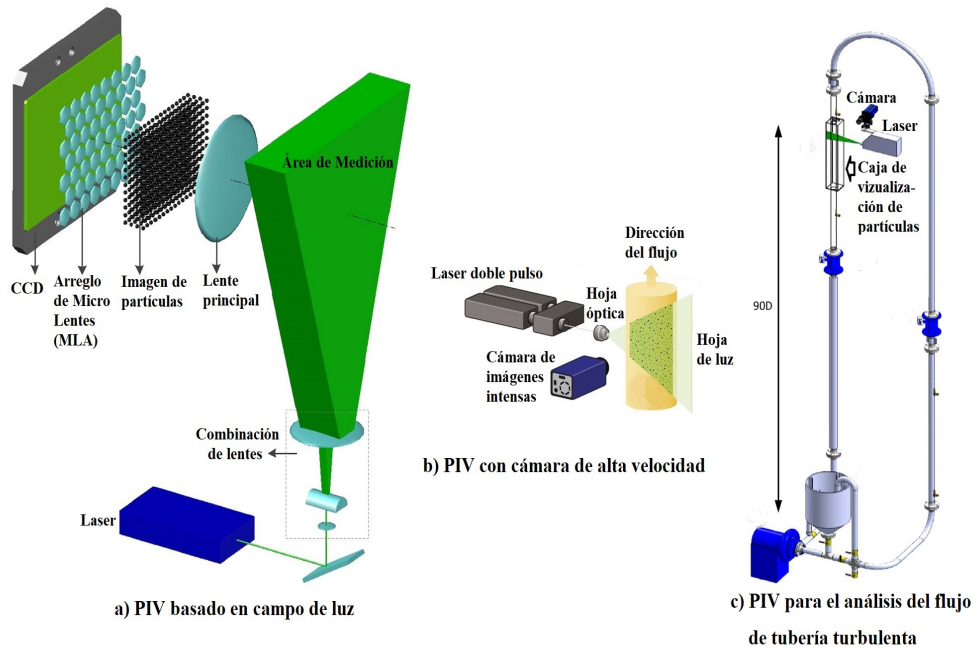


Figura 3.3: Sistemas típicos PIV basados en iluminación por Laser.

de fluido para obtener una iluminación homogénea. La Figura 3.4 muestra un ejemplo de un sistema PIV basado en la iluminación de luz de fondo (backlight illumination), donde se utiliza adicionalmente una caja negra para minimizar la reflexión de la luz y los efectos de espejo (Mühlich et al., 2016).

Por otro lado, existen investigaciones que utilizan la iluminación LED para sistemas Micro-PIV, donde la iluminación por LED corresponde a luz incoherente. En (Hagsäter et al., 2008) presentan una investigación general sobre micro-PIV con iluminación LED en la cual proponen mejoras a sistemas PIV previos basados en luz LED. Utilizan un cubo que contiene filtros y un espejo dicróico / divisor de haz 50-50. El espejo dicróico es un filtro diseñado para reflejar una porción determinada del espectro visible, mientras que deja pasar el resto. El diodo LED es colocado en la parte lateral del cubo dirigiendo el campo luminoso hacia el espejo el cual refleja la luz en dirección a la muestra de partículas fluorescentes y el reflejo de las mismas es recibido por la cámara colocada en la parte superior del cubo. Un esquema de este sistema de iluminación por luz LED incoherente, se muestra en la figura 3.5.

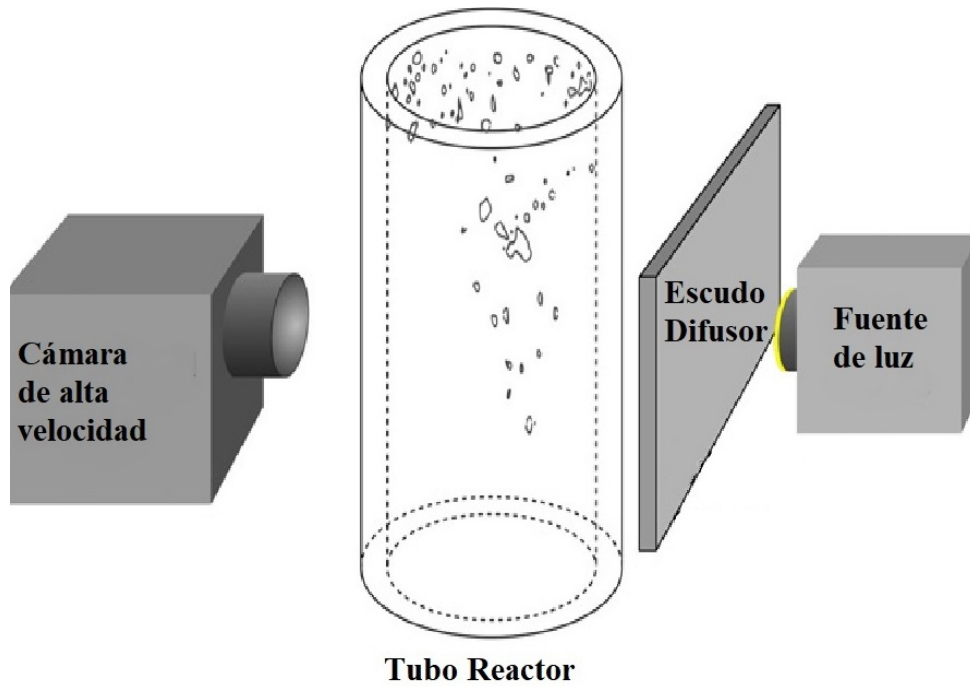


Figura 3.4: Sistema PIV basado en la iluminación de luz de fondo.

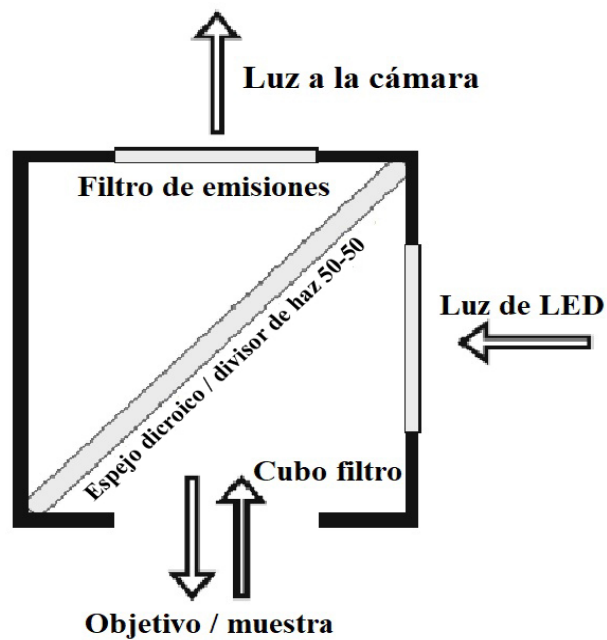


Figura 3.5: Cubo filtro de microscopio, para sistemas micro-PIV con iluminación LED

En (Chaves et al., 2010) se presenta una nueva técnica para mediciones de micro-PIV en flujos de alta velocidad de pequeñas dimensiones. La técnica requiere solo una fuente de luz incoherente pulsada con duración de impulso corta. Esta duración limita la velocidad máxima resuelta, ya que el par de imágenes no se adquiere con una cámara en modo abierto que limitaría la separación temporal mínima de la imagen, sino con dos cámaras. Para flujos muy rápidos, se necesitan separaciones temporales del orden de 20 nanosegundos. La separación del pulso se obtiene por la diferencia en el retraso de la luz en fibras ópticas de plástico de longitud apropiada. El retraso se mide con un fotodiodo de avalancha. La separación de la imagen se obtiene ópticamente usando luz polarizada y no electrónicamente como en el PIV estándar. La luz del extremo de cada fibra pasa por un divisor de haz de polarización para que cada haz de luz se polarice perpendicularmente al otro y atraviese el objeto. Entre el objetivo del microscopio y las cámaras, un segundo divisor de haz polarizador separa las imágenes. Siempre que la duración del pulso de la fuente de luz sea lo suficientemente corta, no hay límite para el rango de velocidad medible. El diseño de este sistema de iluminación Micro-PIV se observa en la figura 3.6 .

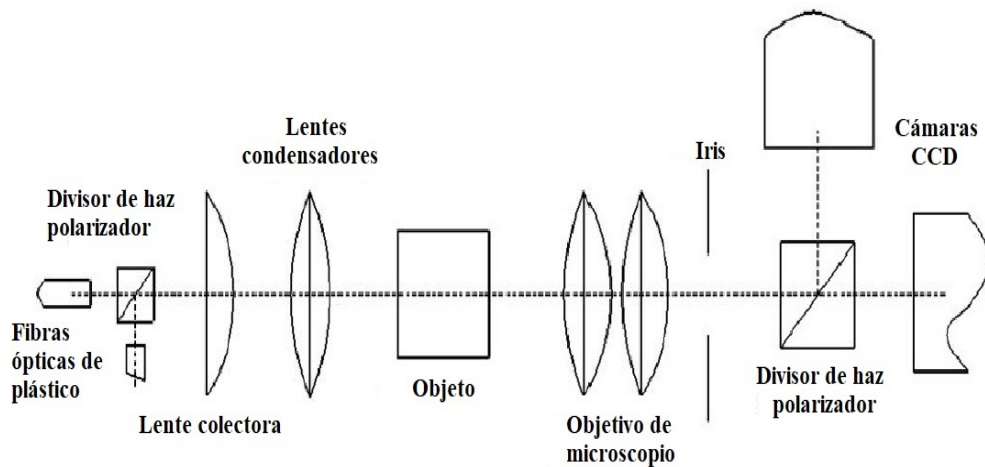


Figura 3.6: Configuración óptica del sistema de iluminación incoherente Micro-PIV con luz emitida por fibras ópticas plásticas

3.4. Conclusiones del marco teórico

En base a los objetivos propuestos en el capítulo 2 y a la teoría que constituye los sistemas MEMS, el presente trabajo introduce el método optoelectrónico y el modelo matemático para analizar la variedad de campo de velocidades en micro-fluidos, asimismo presenta la configuración de un mezclador MHD como un prototipo de análisis con las características principales que se presentan en un micromezclador y en un microfluido como lo es el flujo laminar, demuestra la validez teórica y experimental del modelo matemático del mezclador MHD, resume la metodología de experimentación seguida para la validación del modelo matemático del mezclador MHD y para la estimación de la incertidumbre del sistema de visión. Finalmente expresa los resultados y conclusiones, así como la necesidad de futuras acciones identificadas para la mejora del sistema de visión. Todo esto con el propósito de contribuir al desarrollo de un novedoso sistema de visión que permita caracterizar los comportamientos de los distintos micro-fluidos en las variadas configuraciones de sistemas MHD, enfocados a la optimización de su diseño en distintas aplicaciones.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología implementada en el desarrollo del sistema de visión caracterizado a un prototipo mezclador MHD, para conocer el campo de velocidades en un fluido conductor, mediante el trazado de partículas para el caso especial de magnetohidrodinámica. La metodología contempla cuatro etapas de desarrollo: la primera etapa consiste, además de la recopilación y análisis de antecedentes y estado del arte, en la validación teórica del modelo matemático que describe el perfil de velocidad 2D de la superficie libre de flujo laminar 3D de un fluido conductor en un canal anular abierto el cual es impulsado por una fuerza de Lorentz; la segunda etapa radica en la validación experimental del modelo matemático que comprende el diseño de un prototipo MHD, la configuración de un fluido conductor y la estructura del sistema de visión; en la tercera etapa se describe la metodología aplicada para la medición experimental de velocidad y en la cuarta y última etapa se desarrolla un programa de computo que se utiliza como herramienta de análisis y suavizado de perfiles de velocidad 2D de flujo magnetohidrodinámico.

4.1. Desarrollo del modelo matemático

El desarrollo del modelo matemático de un fluido conductor MHD que fluye en un canal anular abierto se presenta en esta sección, se establece mediante la formulación matemática del

problema y se obtiene una solución aproximada mediante el análisis del modelo matemático. En canales abiertos con una profundidad finita, la presencia de la pared inferior influye en la configuración del flujo, actuando como una fuerza de arrastre adicional en el fluido, también las paredes de los cilindros producen efectos particulares que determinan el comportamiento del flujo e influyen en su estabilidad. Los canales cerrados se analizan previamente, teniendo en cuenta los efectos de las cuatro paredes en (Ortiz-Pérez et al., 2017), sin embargo, este análisis se centra en los canales abiertos ya que es una de las configuraciones disponibles en micromezcladores (Gleeson, 2005) la cual permite el seguimiento de partículas y el análisis PIV, debido a que esta configuración facilita la observación de la superficie libre en el canal anular. La formulación matemática del problema y las ecuaciones que lo gobiernan se presentan en esta sección. Los datos computacionales obtenidos del modelo matemático y su comparación con los obtenidos en trabajos científicos previos de configuraciones similares se presentan en el de análisis de resultados (capítulo 5), es decir, la validación teórica del modelo es presentada en la sección 5.4

4.1.1. Formulación matemática del problema

En la formulación matemática se analiza un flujo laminar constante en 3D de un fluido de baja conductividad en un canal anular abierto impulsado por una fuerza azimutal de Lorentz. El análisis 3D de flujo laminar constante se realiza en una sección transversal del canal abierto. El efecto de las paredes se considera durante el análisis. Las paredes proporcionan un tipo de fricción, que produce una resistencia a los fluidos, comúnmente llamada fuerza de arrastre. Las fuerzas de arrastre actúan opuestas al movimiento fluido; pueden aparecer en superficies fluidas con una magnitud proporcional a la velocidad del flujo laminar. El efecto de las tres paredes se analiza en detalle considerando el espacio entre los cilindros y la profundidad del canal.

Se contempla una profundidad h del canal anular abierto limitado por dos electrodos cilíndricos concéntricos de R_1 y R_2 donde $R_1 < R_2$ además de una pared inferior aislante. El

fluido de conductividad eléctrica uniforme σ con densidad de masa ρ y viscosidad cinemática ν , está contenido en el canal, mientras que un campo magnético uniforme de fuerza B_0 se aplica verticalmente a lo largo del eje axial. Una diferencia de potencial $\nabla\phi$ entre los electrodos cilíndricos es aplicada para generar una corriente eléctrica que circule radialmente dentro del fluido e interactúe con el campo magnético generando una fuerza de Lorentz que impulsa el fluido en la dirección azimutal. El sentido en el que fluye la corriente depende de la polaridad de los electrodos de tal modo que cuando la corriente fluye hacia adentro, el fluido se mueve en sentido antihorario.

En base a estas consideraciones las ecuaciones que gobiernan el flujo MHD en el canal anular se expresan de la siguiente forma adimensional, tal como en (Pérez-Barrera et al., 2016):

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u = \frac{1}{Re} \{-\nabla p + \nabla^2 u + j \times B\} \quad (4.2)$$

$$j = -\nabla\phi + Ha^2 (u \times B) \quad (4.3)$$

$$\nabla^2\phi = Ha^2 \nabla \cdot (u \times B) \quad (4.4)$$

Las ecuaciones (4.1) y (4.2) corresponden a las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes, respectivamente, mientras que las ecuaciones (4.3) y (4.4) conciernen a la ley de Ohm y la ecuación del potencial eléctrico que expresan la conservación de la carga, donde los campos de velocidad del fluido, la presión, la densidad de corriente y el campo magnético se denotan por los símbolos u , p , j y B respectivamente.

Dado que en las aplicaciones de microfluidos, el campo magnético inducido por las corrientes eléctricas que circulan en el fluido es mucho más pequeño que el campo magnético aplicado, el número de Reynolds magnético es muy bajo ($R_m \ll 1$) así como en (Davidson, 2001), por lo que el termino inercial de la ecuacion (4.2) es despreciado. En consecuencia, las ecuaciones de

continuidad (4.1) y de Navier-Stokes (4.2) que normalmente se utilizan para gobernar el flujo MHD en conductos anulares, en relación con la ley de Ohm (4.3) y la ecuación para el potencial eléctrico (4.4) que manifiestan la conservación de la carga, se desprecian para este caso. Considerando que un microfluídico es una solución de baja conductividad, el número de Hartmann es muy pequeño ($Ha \approx 0,01$). Esto ocasiona que los términos multiplicados por Ha^2 en las ecuaciones (4.3) y (4.4) se omitan, por lo que resulta en el desacoplamiento de los parámetros de velocidad y potencial eléctrico.

Por lo anterior, la solución para la velocidad azimutal (u_θ) implícita en (4.5) se determina resolviendo la ecuación de Laplace $\nabla^2\phi = 0$ aplicando las condiciones de frontera: (a) las paredes conductoras laterales ubicadas en $r = \eta$ y $r = 1$, están dadas por (4.6), donde $\eta = R_1/R_2$. (b) la pared de Hartmann aislante inferior y la superficie libre en la parte superior se encuentran en $z = 0$, y $z = 1$ dado por (4.7) y (4.8) respectivamente, mientras que $\epsilon = h/R_2$ es la relación de aspecto que considera los efectos de la altura del canal:

$$\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{1}{\epsilon^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} - \frac{1}{r |\ln \eta|} = 0 \quad (4.5)$$

$$u_\theta(r, z) \Big|_{r=1, \eta} = 0 \quad (4.6)$$

$$u_\theta(r, z) \Big|_{z=0} = 0 \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial u_\theta(r, z)}{\partial z} \Big|_{z=1} = 0 \quad (4.8)$$

4.1.2. Análisis del modelo matemático

La solución aproximada de la ecuación diferencial no homogénea (4.5) sujeta a las condiciones (4.6 - 4.8), se obtiene sustituyendo las funciones de Bessel de primer y segundo orden y satisfaciendo las condiciones de frontera utilizando valores propios. Por otro lado, el caudal (q) expresado por (4.9) proporciona los resultados analíticos que se obtienen utilizando el méto-

do de aproximación de Galërkin, donde v_θ es la solución aproximada para la velocidad azimutal:

$$q = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \int_{\eta}^1 v_\theta dr dz \quad (4.9)$$

Con el fin de reducir la cantidad de tiempo que requiere el programa de computo para resolver las ecuaciones, las ecuaciones de velocidad y caudal se toman como adimensionales. La velocidad característica (U_c) y la velocidad de flujo característica (Q_c) se expresan utilizando el parámetro de corriente (I) como parámetro de control, lo que resulta en (4.10) y (4.11) respectivamente, donde (μ) representa la permeabilidad magnética. Finalmente, se establece la velocidad media característica (\bar{U}_{AVG}) por (4.12), producto de la división de la velocidad de flujo entre el área de la sección transversal del canal:

$$U_c = \frac{R_2 \sigma \Delta \phi B_0}{\mu} = \frac{R_2 I B_0 |\ln \eta|}{2\pi h \mu} \quad (4.10)$$

$$Q_c = \frac{R_2^2 \sigma h \Delta \phi B_0}{\mu} = \frac{R_2^2 I B_0 |\ln \eta|}{2\pi \mu} \quad (4.11)$$

$$\bar{U}_{AVG} = \frac{R_2 \sigma \Delta \phi B_0}{(1 - \eta) \mu} = \frac{R_2 I B_0 |\ln \eta|}{2(1 - \eta) \pi h \mu} \quad (4.12)$$

4.2. Validación experimental del modelo matemático

El sistema microfluídico MHD descrito en el marco teórico permite la aplicación de la Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) o bien, la Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV, por sus siglas en inglés, Particle Tracking Velocimetry). Estas técnicas son utilizadas para realizar la validación experimental del modelo matemático propuesto, ya que permiten medir los vectores de velocidad del flujo (Przybyło et al., 2016) a través del cálculo del desplazamiento de un conjunto de partículas sembradas en el fluido (Khoo et al., 2016; Mickiewicz, 2014). Considerando que la configuración del agitador facilita la observación de la superficie libre del

canal anular abierto, se ha diseñado y configurado un sistema de visión personalizado para validar el modelo matemático del microsistema MHD. El sistema de visión se conforma por tres componentes principales: un prototipo MHD el cual contiene al fluido conductor en el canal anular abierto delimitado por 3 paredes cuya superficie es libre y transparente; una estructura de brazo móvil que integra una cámara CCD para la captura de imágenes y un subsistema de iluminación por campo oscuro. Estos componentes son detallados a continuación.

4.2.1. Prototipo MHD

El prototipo propuesto para representar un sistema microfluídico MHD, consiste en un canal anular formado por el espacio entre dos cilindros concéntricos conductores de electricidad cuyos radios son de 18.76 milímetros y 31.44 milímetros ($R_1 = 18,76 \text{ mm}$ y $R_2 = 31,44 \text{ mm}$) los cuales actúan como electrodos. El material utilizado en la construcción de los cilindros es una hoja de cobre de 1 milímetro de espesor debido a que posee una mayor conductividad que el aluminio, metal que inicialmente se utiliza en la experimentación. La profundidad del canal es de 7 milímetros ($h = 7 \text{ mm}$) y está delimitada por una pared de fondo aislante (*pared de Hartmann*) y por una superficie libre que forman parte del contenedor de 10x10 centímetros hecho de un polímero de ácido láctico (*PLA*) mediante una impresora 3D a través del proceso de modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés, Fused Deposition Modeling), por lo tanto, este prototipo es un contenedor sin pared superior. El canal anular está centrado en un imán permanente de neodimio (*SMBN0643 Stanford – Magnet, LakeForest, CA, EE. UU.*). El imán permanente induce un campo magnético uniforme de 0.1624 Teslas ($B_0 = 0,1624 \text{ T}$) paralelo a los ejes de los cilindros en dirección vertical. Las características descritas y el prototipo del agitador MHD se observan en la figura 4.1. El funcionamiento del mezclador MHD consiste en aplicar una diferencia de potencial eléctrico ($\nabla\phi$, *voltaje de CC*) entre los electrodos cilíndricos donde ésta diferencia de potencial produce una corriente eléctrica radial (I) en el fluido conductor. La interacción de la corriente radial con el campo magnético axial genera una fuerza azimutal

de Lorentz. La fuerza azimutal de Lorentz impulsa el flujo ocasionando una fuerza corporal distribuida sobre el fluido. En consecuencia, se produce una circulación continua de fluido en un circuito cerrado, obteniendo un canal con una longitud virtual infinita. Si la corriente fluye hacia adentro (hacia afuera), el fluido se mueve en sentido anti horario (en sentido horario). El cambio de sentido se consigue conmutando la polaridad de los electrodos.

Con respecto a este prototipo, cabe destacar que es un mezclador con las características principales que se presentan en un micro-mezclador y en un micro-fluido como lo es el flujo laminar. Es un prototipo para el análisis que genera las condiciones que se presentan en un micro-mezclador, donde se consigue el flujo laminar por la baja velocidad de flujo y donde se presentan vórtices que modifican su estado de laminar a turbulento debido al cambio brusco de voltaje, es decir, cambio abrupto de velocidad, que se obtiene cuando las partículas o fluido se encuentran con una velocidad que tiende a cero, lo que aplica repentinamente un voltaje alto. Este se estabiliza cuando el fluido alcanza la velocidad de acuerdo con el voltaje aplicado.

4.2.2. Fluido conductor

Inicialmente el microfluídico seleccionado es una disolución electrolítica que se compone por una concentración de bicarbonato de sodio disuelto en agua destilada en la que se mezcla cierta cantidad de partículas reflectivas. El tipo de partículas utilizadas en el experimento son partículas de vidrio huecas de borosilicato con forma esférica y de superficie lisa, cubiertas por un delgado revestimiento de plata (*S-HGS*, de sus siglas en inglés, *Silver Coated Hollow Glass Spheres*) que aumenta la reflectividad por lo que son preferibles para aplicaciones de flujo de líquido y convenientes para el análisis PIV. Estas partículas tienen un diámetro medio de 10 micrómetros. En la tabla 4.1, se muestra la concentración de elementos en el electrolito y la concentración de partículas mezcladas en la disolución del experimento realizado.

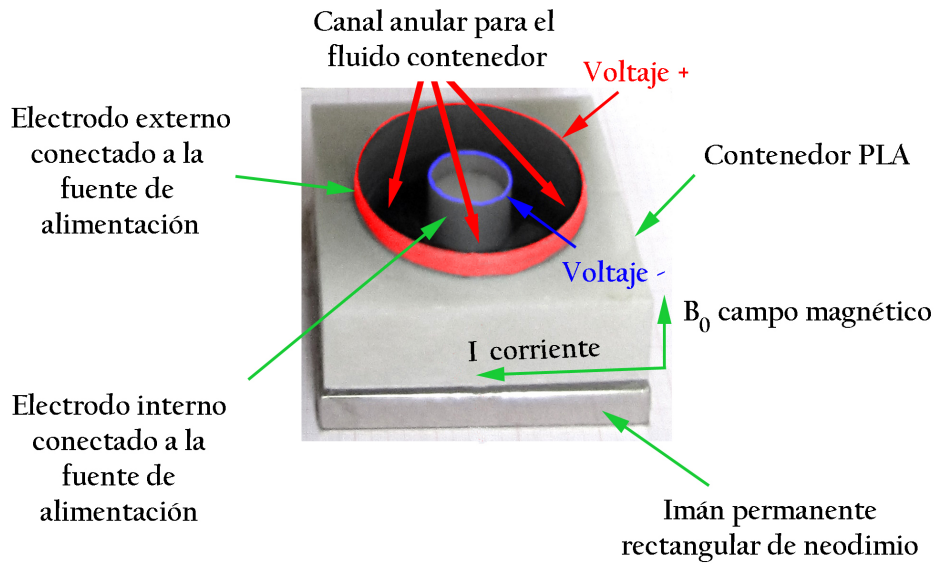


Figura 4.1: Estructura geométrica y componentes del prototipo microfluídico MHD (agitador MHD).

Tabla 4.1: Concentración de elementos en el fluido electrolito.

Concentración electrolítica			
Elementos	Bicarbonato de sodio	Agua destilada	Partículas de Palta (S-GHGS)
Electrolito saturado	9.6 g	0.1 l (100 g)	1 g
Electrolito al 10%	3.8 g	0.4 l (400 g)	1 g

La concentración de bicarbonato de sodio es considerada de acuerdo a su solubilidad en agua a temperatura ambiente (20 a 25 grados Celsius) la cual es de 9.6 gramos de $NaHCO_3$ por 100 gramos de agua para formar una disolución saturada que corresponde a la máxima cantidad de soluto ($NaHCO_3$) que se puede disolver en una cantidad determinada de disolvente (agua destilada). La disolución de bicarbonato de sodio utilizada en los experimentos iniciales es del 10 % debido a que representa una conductividad mínima estable del electrolito ya que el modelado matemático del sistema representa la estimación de las velocidades en fluidos de conductividad baja y uniforme que corresponden a microcanales y micromezcladores donde el

número de Reynolds es extremadamente bajo por lo que el flujo es siempre laminar. Aunque el prototipo mezclador no está en el orden de micras, se consigue la característica laminar de un micromezclador debido a que en un fluido que se mueve en un canal de geometría circular y a baja velocidad, el flujo persistente será laminar por debajo de un número de Reynolds crítico de aproximadamente 2040 (Avila et al., 2011). Además de la disolución de bicarbonato de sodio con partículas de plata, se aplica como fluido conductor, una suspensión de agua destilada sembrada con las mismas esferas de vidrio huecas recubiertas de plata de 10 micrometros anteriormente mencionadas. Esta suspensión eléctricamente conductora se prepara con 200 mililitros de agua destilada sembrada con 0.2 gramos de partículas de plata. El canal anular se llena con la solución preparada hasta alcanzar 7 milímetros de profundidad. El proceso de sembrado de partículas se observa en la figura 4.2.



Figura 4.2: Proceso de sembrado de partículas.

4.2.3. Estructura del sistema de visión

El sistema de visión artificial propuesto, representa un sistema personalizado donde se integra el prototipo MHD diseñado, una cámara con un dispositivo de carga acoplada (CCD, por sus siglas en inglés, Charge-Coupled Device) montada en un brazo móvil y un subsistema de iluminación sobre el agitador. La estructura del sistema compuesta por el brazo móvil que soporta la cámara, tiene un mecanismo de posicionamiento que permiten variar la altura del dispositivo de captura de imagen con respecto al mezclador MHD colocado en la base inferior de la estructura. La estructura y sus componentes integrados se observan en la figura 4.3. En el diseño del subsistema de iluminación, se utiliza luz blanca incoherente y se aplica la técnica de iluminación oblicua mediante campo oscuro entre distintos tipos de luz y técnicas de iluminación que son probadas durante la experimentación. Este subsistema de iluminación se compone de un arreglo de LEDs en configuración serie y paralelo que requiere de una fuente de alimentación de 12 voltios y se integra en un circuito impreso en forma de anillo. El anillo LED se incorpora dentro de un difusor de plástico para formar una lámpara de campo oscuro, la cual se coloca sobre la superficie libre del mezclador. El video se graba con una cámara de 16M píxeles usando 25 cuadros por segundo (FPS, Frames Per Second, por sus siglas en inglés).

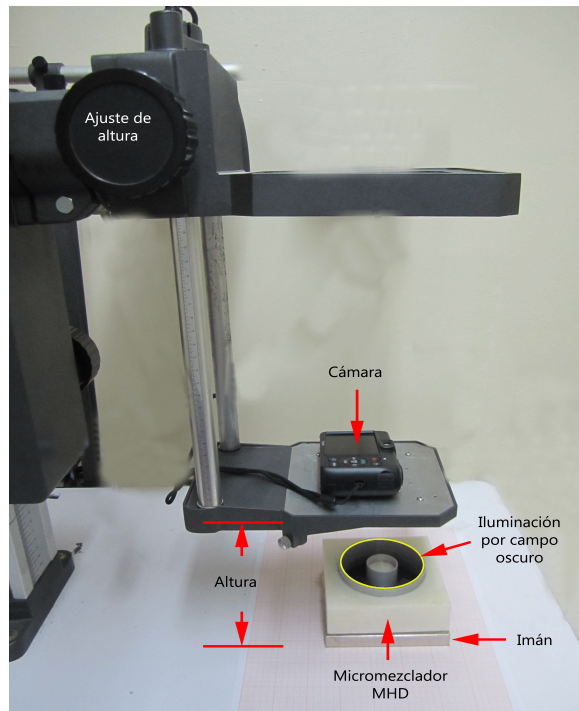


Figura 4.3: Estructura del sistema de visión.

4.2.4. Diseño del sistema de iluminación

Un PIV requiere de un sistema de iluminación que proporcione un plano de luz constante y uniforme, de determinado color e intensidad dependiendo de las características geométricas y ópticas de las partículas. Los rayos láser son muy utilizados, ya que mediante lentes se forman diferentes planos de luz y además con el láser se pueden generar pulsos (luz estroboscópica). En general, la iluminación podría ser continua o pausada mediante un láser (luz coherente) para un sistema PIV con un contenedor fluídico transparente, tal como se menciona en la sección 3.3.5. Existen otras investigaciones donde sistemas Micro-PIV son iluminados utilizando luz incoherente proveniente de LEDs (Hagsäter et al., 2008; Tellez Alvarez et al., 2016) e inclusive fibra óptica como en (Chaves et al., 2010). Por lo anterior, en la experimentación se realizaron pruebas tanto con luz coherente como con luz incoherente con la finalidad de obtener una iluminación constante y uniformemente distribuida sobre el área de interés de tal modo que las partículas sembradas en el fluido sean observables con nitidez y no existan reflejos no deseados

sobre la superficie del fluido. Durante el diseño del sistema PIV para el prototipo mezclador MHD, se evalúan distintos tipos de fuentes de iluminación tales como una matriz de LEDs que radia luz blanca brillante, un arreglo de LEDs en anillo con emisión de luz roja reflectante, un haz de luz laser rojo de 650 nm y un haz de luz laser verde de 532nm, una lámpara de luz azul y una lámpara de luz blanca incoherente. Estas evaluaciones se realizan debido a que la posibilidad de utilizar fuentes de iluminación con hojas de luz láser o iluminación trasfondo (métodos mencionados en la sección 3.3.5) son nulas, ya que por un lado, la estructura del mezclador MHD no permite iluminar un plano de flujo con una lámina de luz láser que pueda ser capturada por el sistema de visión óptico lateralmente como es común debido a que en este prototipo, las paredes del contenedor no son transparentes a causa de los electrodos cilíndricos colocados en el interior del canal fluídico y además, el campo de interés está en la superficie del fluido, por otro lado, la iluminación LED trasfondo tampoco es posible, puesto que en la parte inferior del contenedor, hay un imán permanente rectangular de ferrita que induce la fuerza azimutal de Lorentz durante la aplicación de la diferencia de potencial eléctrico entre los cilindros coaxiales, tal como se observa en las figuras 4.1 y 4.3. Las fuentes de iluminación que se evalúan, proporcionan intensidades de luz variable aplicando diferentes voltajes de corriente continua que oscilan desde los 9 voltios hasta 15 voltios con una corriente de 0.01 amperios hasta 0.65 amperios respectivamente, lo cual obliga a tener una fuente de corriente continua independiente para el sistema de iluminación y otra fuente distinta para proporcionar la diferencia de potencial entre los electrodos. Estas fuentes de iluminación son aplicadas con diferentes intensidades y ángulos de incidencia de luz, obteniendo como resultado reflexiones no deseadas, baja o nula visibilidad de las partículas sembradas y ruido, exceptuando la iluminación con luz blanca incoherente. Estos resultados son detallados en la sección 5.1.4 y se observan en la figura 5.1. Por lo anterior y dado que el sistema PIV personalizado para el mezclador MHD, requiere que la superficie transparente y libre del fluido se ilumine de manera constante y homogénea para capturar por medio del sistema óptico las partículas sembradas, se define que el mejor esquema de iluminación es el uso de la luz blanca emitida por la lámpara observada en el inciso (e) de la figura 5.1. La lámpara de luz blanca incoherente proporcionada por un LED, ilumina claramente

las partículas en la superficie del fluido conductor solo en una cuarta parte del mezclador MHD, por consiguiente, se construye un anillo de LEDs que emiten luz blanca para rodear y cubrir toda la superficie del fluido. Se diseñan y construyen tres anillos LED de luz blanca con distinta orientación luminica como se muestra en la figura 4.4. La orientación luminica del primer anillo es hacia el exterior y las dimensiones del mismo corresponden a las del cilindro interno del mezclador, con el objetivo de que la dirección de la luz sea paralela a la superficie y los LEDs no se vean reflejados sobre el fluido. En el segundo anillo, los LEDs son colocados en el interior del aro lo que conlleva nuevamente a la orientación paralela de luz con respecto a la superficie del fluido pero en dirección al electrodo interno del mezclador. Esta configuración, es la más utilizada comercialmente. En el último diseño, los LEDs son colocados en la parte inferior de un anillo plano de una placa para circuito impreso cuyas dimensiones corresponden a las del cilindro exterior del canal fluídico. El anillo es colocado rodeando al canal de manera que la luz es perpendicular a la superficie del fluido evitando de este modo las reflexiones provocadas por los LEDs. Los diseños de los anillos LED son observados en la figura 4.4



Figura 4.4: Diseño de circuitos impresos de anillos LED con diferente orientación lumínica.

La separación del anillo de LEDs de la superficie del fluido, genera reflexiones no deseadas a causa de que cada LED actúa como lámpara independiente, la cual ilumina un área determinada originando una fuente de luz heterogénea alrededor de la superficie cilíndrica del fluido

conductor. Para conseguir la homogeneidad de la fuente de luz, los anillos LED se integran a un difusor hecho con material plástico translúcido PLA mediante una impresora 3D como se observa en la figura 4.5.

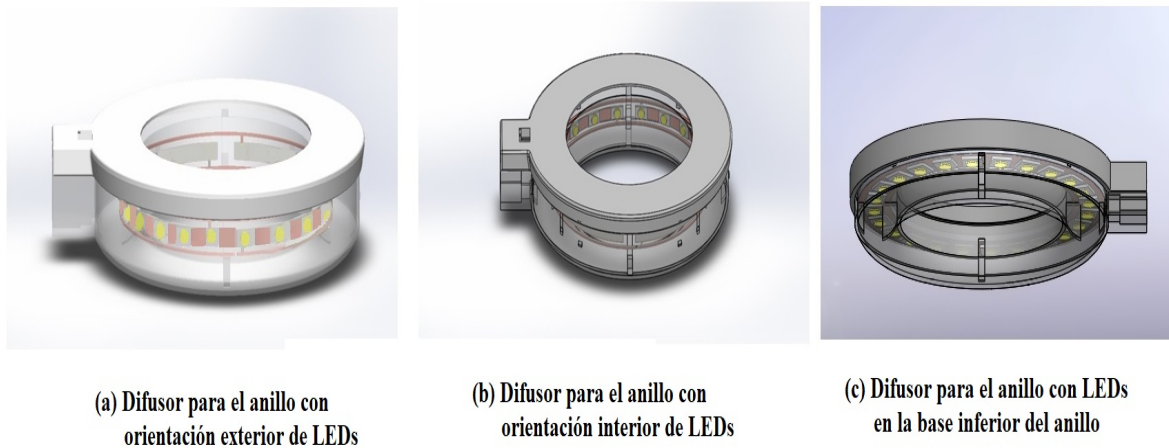


Figura 4.5: Diseño del iluminador por campo oscuro

La siguiente problemática a resolver en cuanto al sistema de iluminación es el brillo y reflejo causado por la claridad del fondo del contenedor, claridad que también dificulta la detección de las partículas. Para eliminar esta reflectancia y brillo no deseado, el fondo del mezclador se cubre con un esmalte negro opaco y el anillo de LEDs cubierto por el difusor se coloca alrededor del contorno externo del canal fluídico para contrarrestar reflexiones y brillos no deseados ocasionados por la distancia de la fuente de iluminación, de tal modo que las partículas en el fluido se iluminan de modo indirecto. Las partículas iluminadas (partículas esféricas recubiertas de plata) dispersan la luz y se hacen visibles contra el fondo oscuro que tienen detrás, tal como ocurre con las partículas de polvo iluminadas por un rayo de sol que se cuela en una habitación oscura. Esta forma de iluminación se conoce como iluminación por campo oscuro y se utiliza en microscopía para analizar elementos biológicos transparentes o sin pigmentar, invisibles con iluminación normal.

4.3. Medición experimental de velocidad

Para la medición experimental de la velocidad se considera la configuración descrita en la sección 4.2.3 del sistema de visión personalizado con la caracterización final del subsistema de iluminación por campo oscuro cuya configuración se observa anteriormente en el inciso (c) de la figura 4.5, la cámara CCD montada en el brazo móvil, la cual se posiciona sobre el prototipo MHD a una altura donde el canal del mezclador MHD es enfocado por completo, proporcionando una imagen de alto contraste como se muestra en el inciso (b) de la figura 4.6.

El canal anular es cubierto hasta alcanzar una profundidad de 7mm con la suspensión eléctricamente conductora que contiene 200 ml de agua destilada sembrada con 0.2 gramos de esferas huecas de vidrio de $10\mu\text{m}$ recubiertas de plata (densidad $1,4\text{ g/cm}^3$), dando una fracción de volumen de $7 \times 10^{-4}\text{ cm}^3$ debido a las esferas. Los electrodos de cobre del prototipo se conectan a una fuente de alimentación de CC para aplicar una diferencia de potencial entre ambos conductores que se incrementa en 0,5 voltios cada 40 segundos, hasta alcanzar 7,0 voltios.

4.3.1. Medición física de la velocidad

Mientras que los campos magnético y eléctrico inducen la fuerza de Lorentz, se produce el movimiento del fluido. Después de cada aumento de 0,5 voltios, se mide la corriente que fluye a través del fluido y se registran los datos de dichas mediciones para posteriormente simular las velocidades del fluido para cada nivel de voltaje, sustituyendo en el modelo matemático los valores obtenidos de las lecturas de corriente y utilizando como herramienta de cómputo el programa conocido como MAPLE. Este programa permite observar los resultados del modelo matemático tanto numéricamente como esquemáticamente. Las conexiones físicas para la medición de la corriente continua en el sistema mezclador MHD se observan en la figura 4.6.

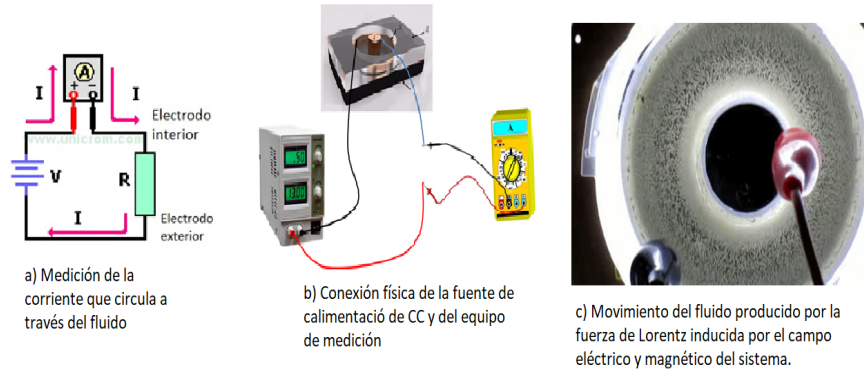


Figura 4.6: Medición física de la corriente en el mezclador MHD.

4.3.2. Cálculo de la velocidad por seguimiento de partículas

Por otro lado, la medición experimental de la velocidad también se realiza mediante el análisis del video del movimiento del fluido, ya que el objetivo principal de este proyecto es la propuesta de un sistema de visión para conocer el campo de velocidades en un fluido mediante el trazado de partículas para el caso especial de magnetohidrodinámica. La metodología que se sigue para esta medición experimental se describe a continuación. Se graba un video del movimiento del fluido con la cámara CCD de 16M pixeles a 25 frames por segundo (FPS). El video se analiza mediante dos tipos de programas de cómputo de código abierto: Tracker (D., 2017), una herramienta gratuita de análisis y modelado de video basada en Open Source Physics(OSP) Java framework y PIVLAB (Thielicke and Stamhuis, 2014), una herramienta gratuita de velocimetría de imágenes de partículas (PIV) que se ejecuta en MATLAB.

Posteriormente, se extraen 14 subsecciones del video. Cada subsección corresponde a cada uno de los 14 valores de la diferencia de potencial aplicada al prototipo. $[\Delta\phi_0 : \Delta\phi_i : \Delta\phi_f] = [0,5 : 0,5 : 7,0]$ donde el $\Delta\phi_0$, $\Delta\phi_i$ y $\Delta\phi_f$ son el valor inicial, el incremento y el voltaje final, respectivamente. La longitud de cada subsección es de 20 segundos (500 cuadros con un intervalo de tiempo $dt = 0,040$ segundos).

Con el uso del programa de cómputo Tracker, una partícula seleccionada en $r = 26,76mm$

fue rastreada desde el centro en la trayectoria del conducto anular: este último resultado proporcionado por el modelo Garlëkin. Se realiza un seguimiento de la posición de la partícula en función del tiempo, se calcula la velocidad dividiendo la distancia recorrida por el tiempo transcurrido entre dos posiciones; es decir, el tiempo entre fotogramas. Las mediciones se realizan en varias secciones del canal para confirmar el flujo estacionario. La velocidad se confirma por la distancia de un giro de $1/4$ y el tiempo transcurrido para completar el giro, esta medición es proporcionada por el programa de cómputo Tracker como se observa en la figura 4.7. este procedimiento se repite para las 14 subsecciones del video. Los datos obtenidos se discuten en la sección 5.5.2.

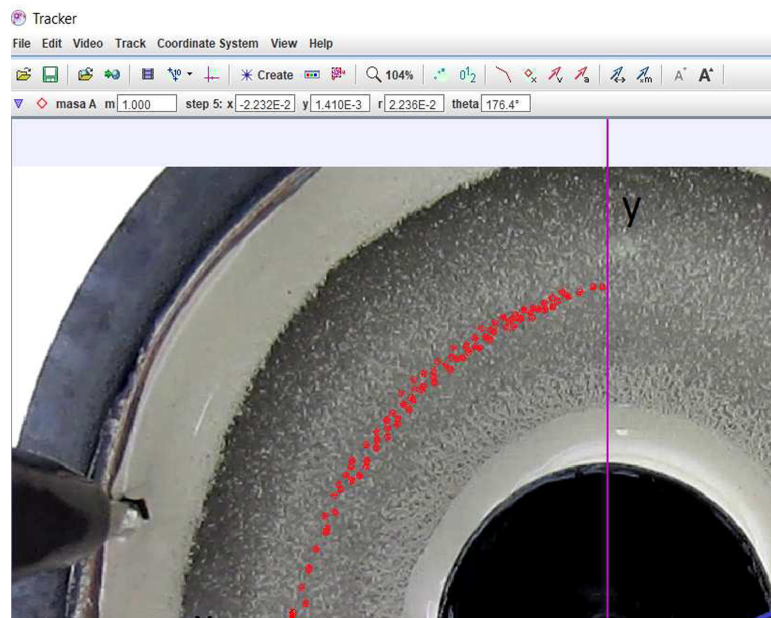


Figura 4.7: Velocidad máxima calculada con Tracker

4.3.3. Cálculo de la velocidad mediante velocimetría de imágenes de partículas

Las mismas 14 subsecciones de video son analizadas con la caja de herramientas PIVLAB (Thielicke and Stamhuis, 2014; Raffel et al., 2018). Para cada serie de mediciones, son cargadas 500 imágenes con la secuencia de cuadros 1-2, 2-3, 3-4, ..., 498-499, 499-500. El cilindro

interno y el cable del electrodo se enmascaran con el fin de no requerir seleccionar una región de interés (ROI) y eliminar la generación de vectores falsos causados por los contornos de la imagen. Para el pre-procesamiento de cada imagen mediante la opción de ecualización del histograma para el contraste adaptativo limitado (CLAHE, Contrast-limited adaptive histogram equalization, por sus siglas en inglés), se aplica un tamaño de ventana de 20 píxeles. La velocimetría de la imagen de partículas se realiza mediante la deformación de la ventana de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transformation, por sus siglas en inglés) con el estimador de sub-píxel de Gauss de 2x3 puntos. El pos-procesamiento de validación del vector no es requerido debido a que no se presentan datos de valores atípicos en la medición, como se muestra en la figura 4.8, a causa de que las imágenes fueron enmascaradas y pre-procesadas adecuadamente, lo que da como resultado, mediciones precisas detalladas que se discutirán en el capítulo 5 de análisis de resultados. La figura 4.9 representa el análisis del perfil de velocidades a través del canal, donde las velocidades más bajas están cerca de los electrodos internos y externos, y la velocidad máxima está presente en $r \approx 26,76mm$. La velocidad se obtiene midiendo la velocidad en 40 puntos a lo largo de la trayectoria del semicírculo donde $r \approx 26,76mm$. y la media de estos datos da como resultado la máxima velocidad experimental.

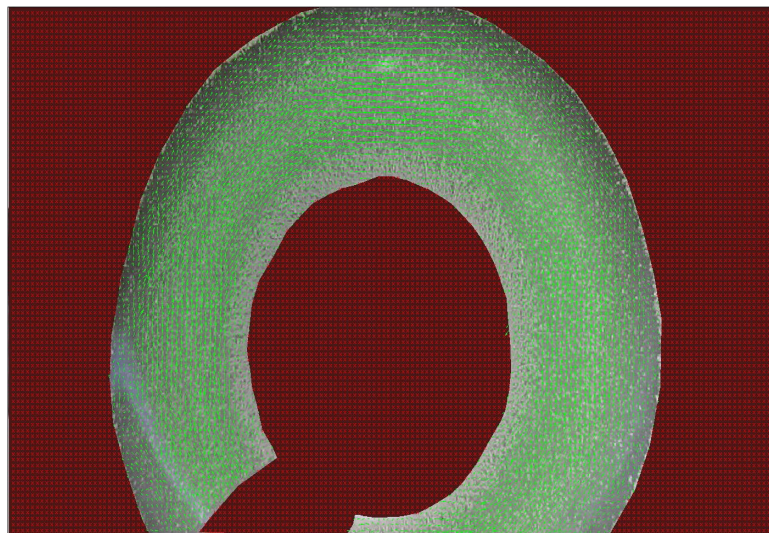


Figura 4.8: Pantalla gráfica de los vectores de velocidad en PIVLAB

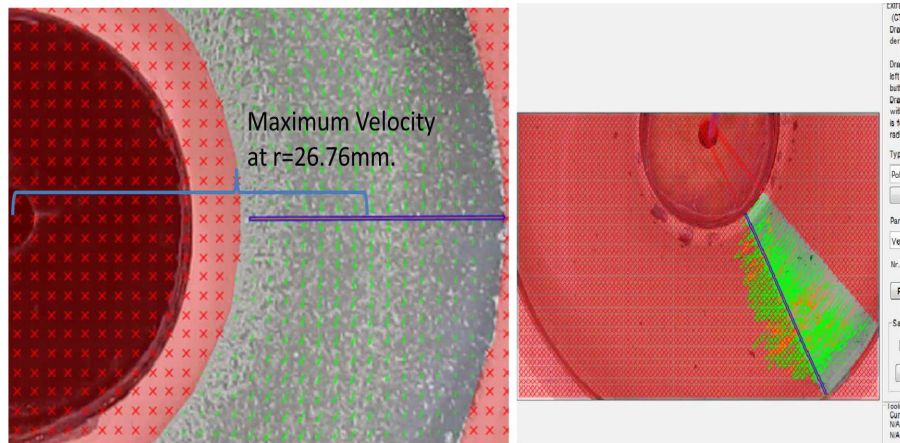


Figura 4.9: Ubicación de la posición de velocidad máxima calculada a través de PIV y una muestra del perfil de velocidad

4.4. Herramienta de análisis y suavizado de perfiles de velocidad 2D de flujo magnetohidrodinámica

El programa de cómputo "Herramienta de Análisis y Suavizado de Perfiles de Velocidad 2D de Flujo Magnetohidrodinámico", tiene por objeto analizar los perfiles de velocidad de un flujo que actúa bajo un campo magnético y eléctrico mediante el suavizado y detección de valores atípicos utilizando filtros y métodos de regresión para las correcciones. El programa es una herramienta agregada al programa de cómputo conocido como PIVlab creado bajo la plataforma Matlab el cual es un programa de cómputo de velocimetría de imágenes de partículas (PIV) de código abierto que calcula la distribución de velocidad en una secuencia de imágenes y que además se utiliza para calcular múltiples parámetros del patrón de flujo y cuyo creador es William Thielicke ([Thielicke and Stamhuis, 2014](#)).

4.4.1. Introducción del manual de usuario de la herramienta de análisis

La aplicación de magnetohidrodinámica (MHD) en microfluidos representa una nueva tendencia durante los últimos veinte años. Las microaplicaciones comenzaron a desarrollarse y aumentaron con la necesidad de propulsar, agitar y controlar los flujos para realizar tareas tales como la mezcla y la creación de redes a microescala. Han sido particularmente útiles para aplicaciones microfluídicas donde un fluido conductivo necesita ser manipulado para realizar operaciones específicas.

El progreso logrado en este campo multidisciplinario y su incursión en una gran variedad de aplicaciones se puede seguir a través de la literatura científica. Sin embargo, sigue siendo un área de investigación que requiere un mayor desarrollo. Su principio de funcionamiento se basa en la fuerza de Lorentz que actúa en una solución conductora, en presencia de campos magnéticos y eléctricos, lo que da como resultado un fluido en movimiento.

Considerando la relevancia de las aplicaciones MHD en microfluídica, se buscan métodos experimentales no intrusivos y técnicas de análisis para el cálculo cuantitativo del flujo MHD, para lo cual y desde 2014, es común utilizar la herramienta de código abierto MATLAB "PIVlab" creada bajo la plataforma MATLAB. Esta herramienta es una interfaz gráfica de usuario (GUI, de sus siglas en inglés, Graphical User Interface) que le permite al PIV realizar análisis de flujo, a través del procesamiento de imágenes digitales que calcula la distribución de velocidad en una secuencia de cuadros, y también se utiliza para calcular múltiples parámetros del patrón de flujo de manera general tales como vorticidad y velocidad tangencial y lineal entre otros parámetros. Sin embargo, esta GUI no tiene ninguna herramienta específica para el análisis de flujo MHD, por esta razón, se agregó una aplicación a PIVlab para generar resultados específicos en dos dimensiones para el análisis de flujo MHD. En la figura 4.10 se observa la vista general de la interfaz "2-D Flow Velocity MHD" como una herramienta agregada a PIVlab así como las opciones de configuración originales de PIVlab y el análisis de perfil de velocidad

2D generado por la herramienta de suavizado añadida a PIVlab.

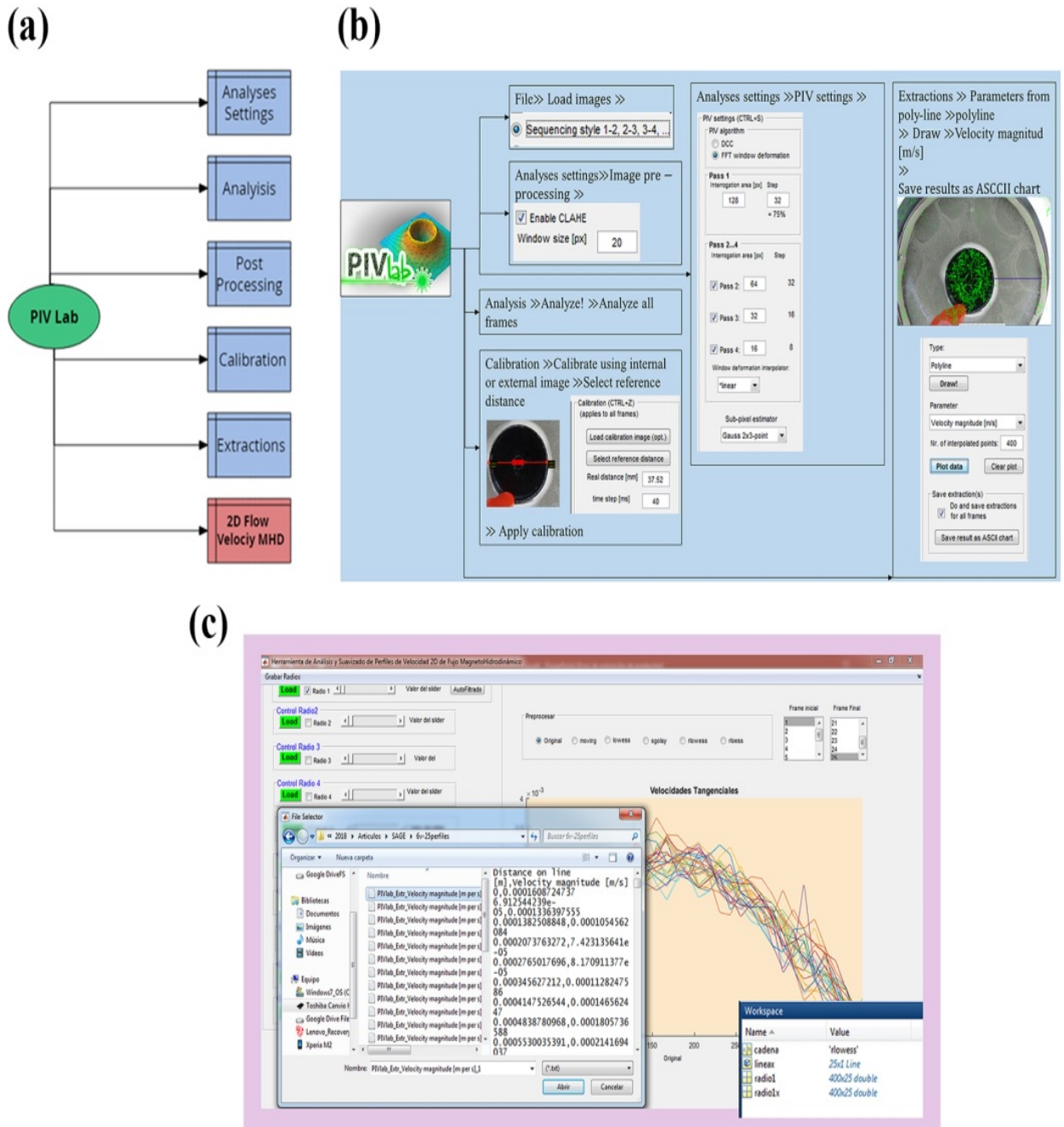


Figura 4.10: (a) Vista general de la interfaz "2-D Flow Velocity MHD" como una herramienta agregada a PIVlab. (b) Opciones de configuración originales de PIVlab. (c) Análisis de perfil de velocidad 2D y herramienta de suavizado añadida a PIVlab.

4.4.2. Descripción general del programa de cómputo

La herramienta programada forma parte del menú de opciones del programa de cómputo de código abierto PIVLab como un apartado adicional. La conexión de la herramienta de análisis y suavizado de perfiles de velocidad 2D de flujo MHD al sistema PIVLab se muestra en la figura 4.11

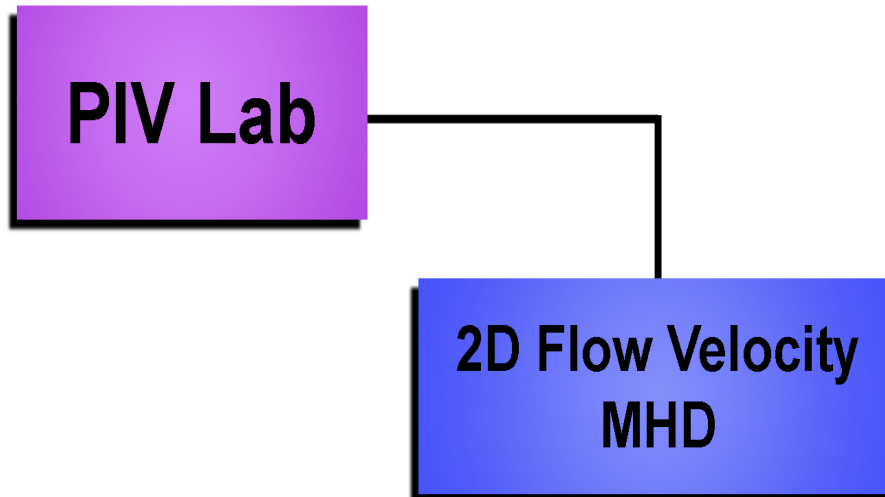


Figura 4.11: Conexión de la herramienta de análisis y suavizado de perfiles de velocidad 2D de flujo MHD al sistema PIVLab.

4.4.3. Observaciones generales para el uso de la herramienta

La herramienta que se integra a PIVlab, toma como entrada un archivo de datos del cual es posible seleccionar el rango de cuadros a analizar, así como elegir los filtros de suavizado y métodos de regresión para la detección de valores atípicos donde es posible la variación de intensidad de suavizado y de detección mediante una barra de desplazamiento. Los valores son mostrados de manera gráfica. Es posible seleccionar hasta 10 archivos de manera simultánea con un rango de hasta de 25 cuadros por archivo y una muestra infinita de puntos, para realizar el

análisis de manera paralela entre las diferentes gráficas generadas. El sistema tiene la capacidad para almacenar los resultados en variables de trabajo fácilmente recuperables por el usuario. Los controles de esta herramienta se observan en la figura 4.12.

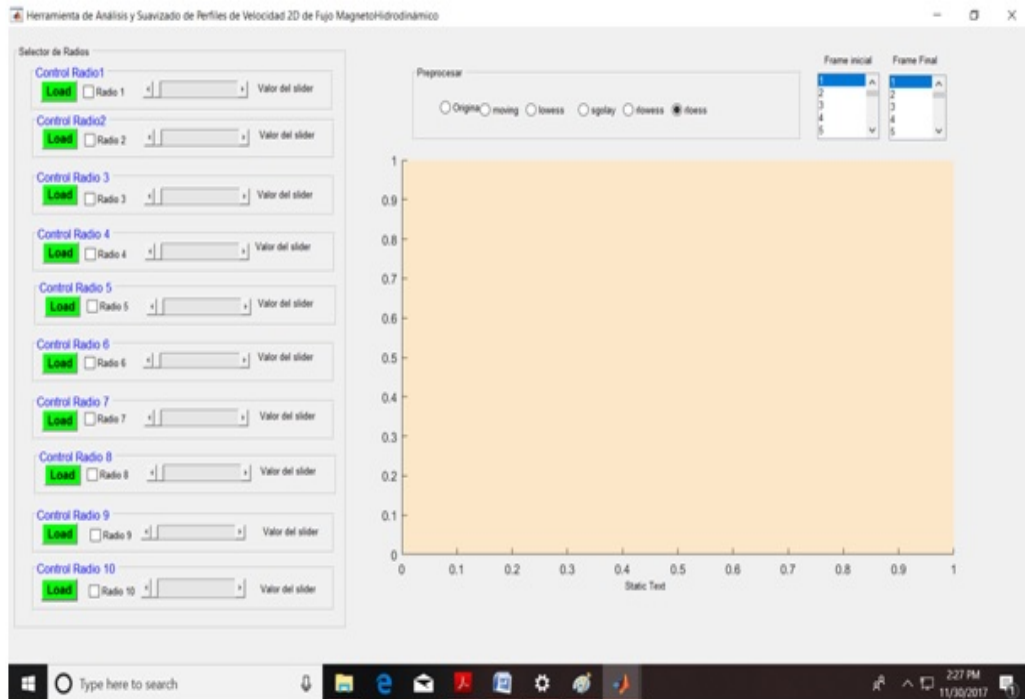


Figura 4.12: Pantalla de la aplicación “Herramienta de Análisis y Suavizado de Perfiles de Velocidad 2D de Flujo Magnetohidrodinámico”.

4.4.4. Procedimiento de uso de la herramienta

1. Carga: Seleccionar imágenes de una secuencia de cuadros, presionar el botón importar, seleccionar estilo de frecuencia tal y como se muestra en la figura 4.13.

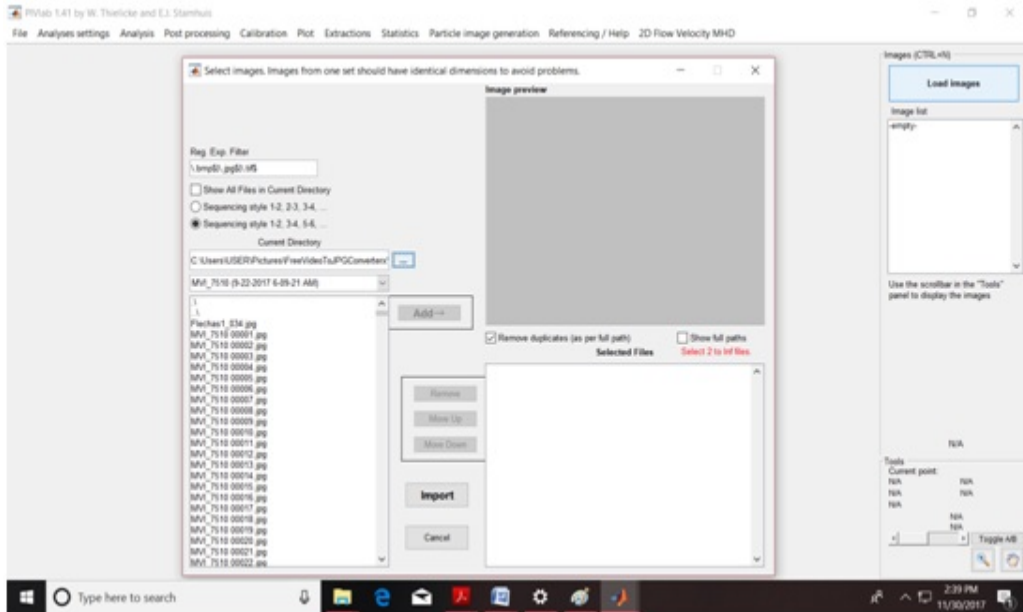


Figura 4.13: Carga de secuencia de imágenes.

2. Calibración: Seleccionar una imagen para la calibración física de la secuencia de análisis. Indicar distancia real en milímetros, del área señalada mediante el mouse y tiempo transcurrido entre cada cuadro de imagen, el cual se obtiene de la velocidad de captura de video la cámara digital o bien de la velocidad del video en cuadros por segundo, por lo tanto, el tiempo transcurrido entre cada imagen es constante. En la figura 4.14 se observa como ejemplo 25 frames por segundo (fps) que equivale a 40 milisegundos transcurridos entre cada cuadro.

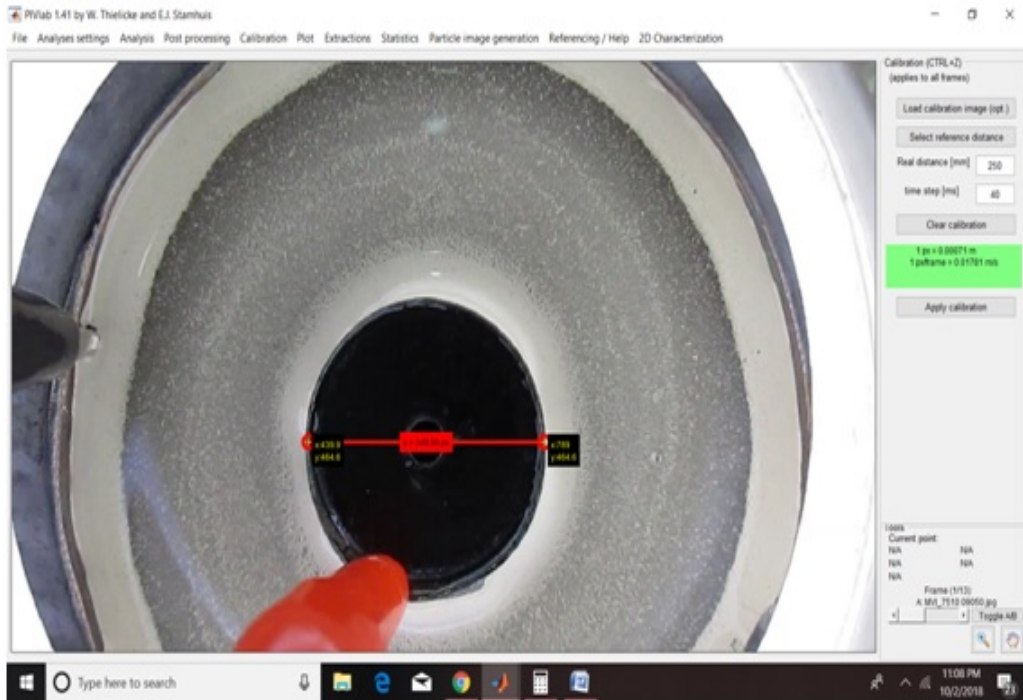


Figura 4.14: Calibración de la imagen con distancia y tiempo real.

3. Máscara: Seleccionar el menú de configuración de análisis (Analyses settings) y elegir “Exclusions (ROI, MASK)” para seleccionar la región de interés. Delinear con el mouse las áreas no deseadas dando un click a la opción “Draw mask(s) for current frame” y después aplicar a todos los frames seleccionando la opción “Apply current mask” como en la figura 4.15.

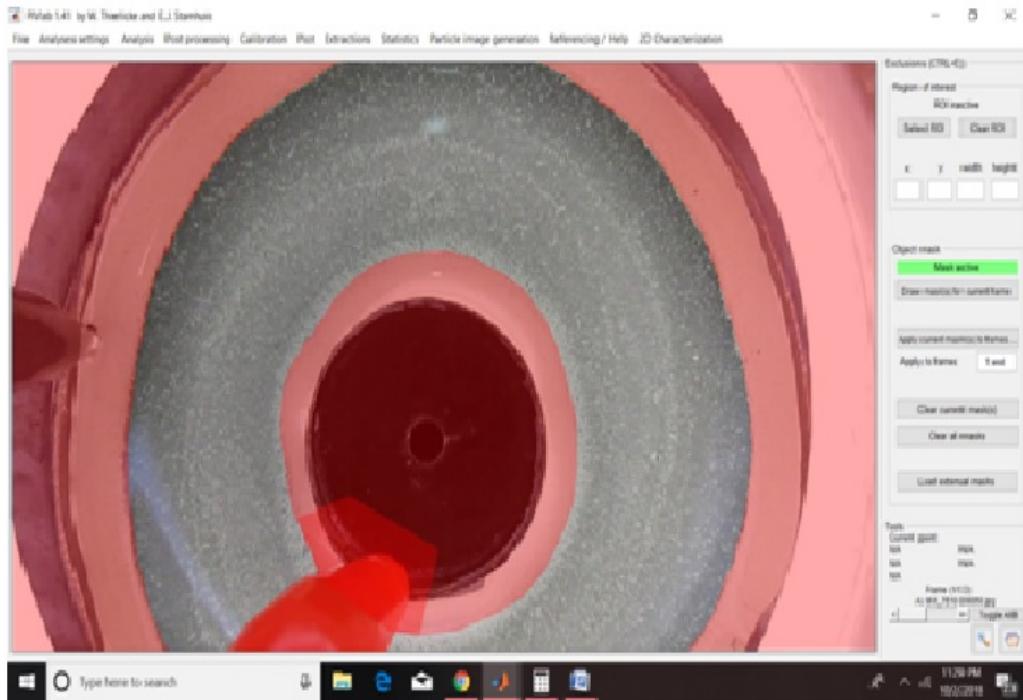


Figura 4.15: Selección de la región de interés mediante una máscara (ROI).

4. Ajustes: Seleccionar el submenú “PIV settings” dentro del menú “Analyses settings”. Seleccionar el método transformada rápida de Fourier (FFT). Seleccionar los rangos de ventana de la siguiente manera: 128-64, 64-32, 32-16, -16-8 y 8-4. Además seleccionar deformador de la ventana “Linear” y el estimador de subpixel “2D Gaus”. Estos parámetros se observan en la figura 4.16

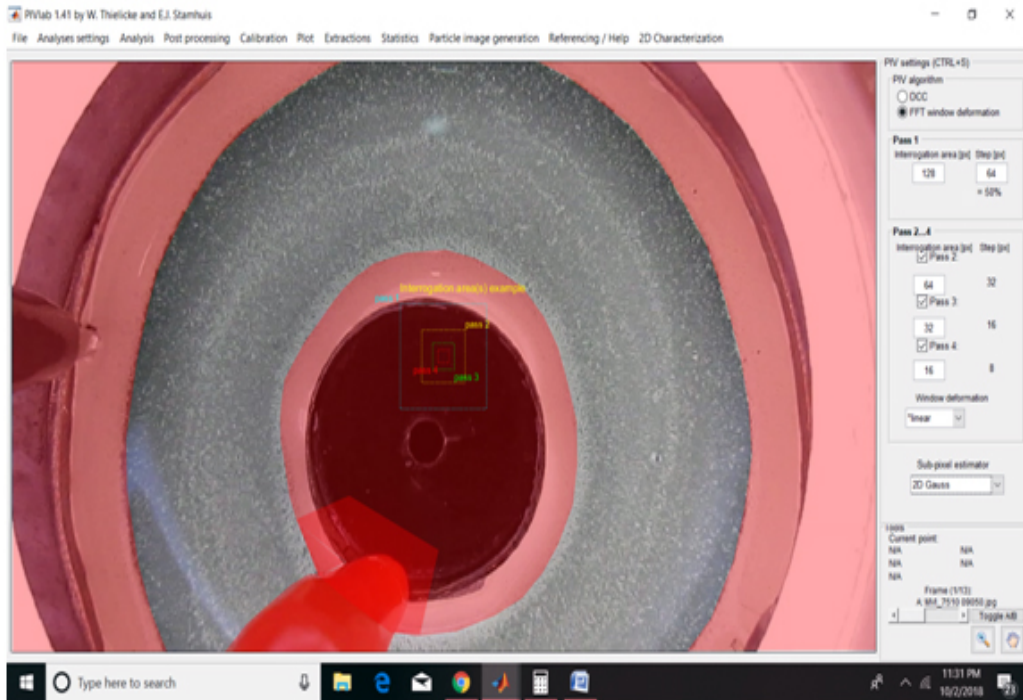


Figura 4.16: Configuración del método de análisis de correlación FFT.

5. Análisis: Ejecutar análisis de las imágenes en el menú Analysis. Analizar todos los cuadros como en la figura 4.17

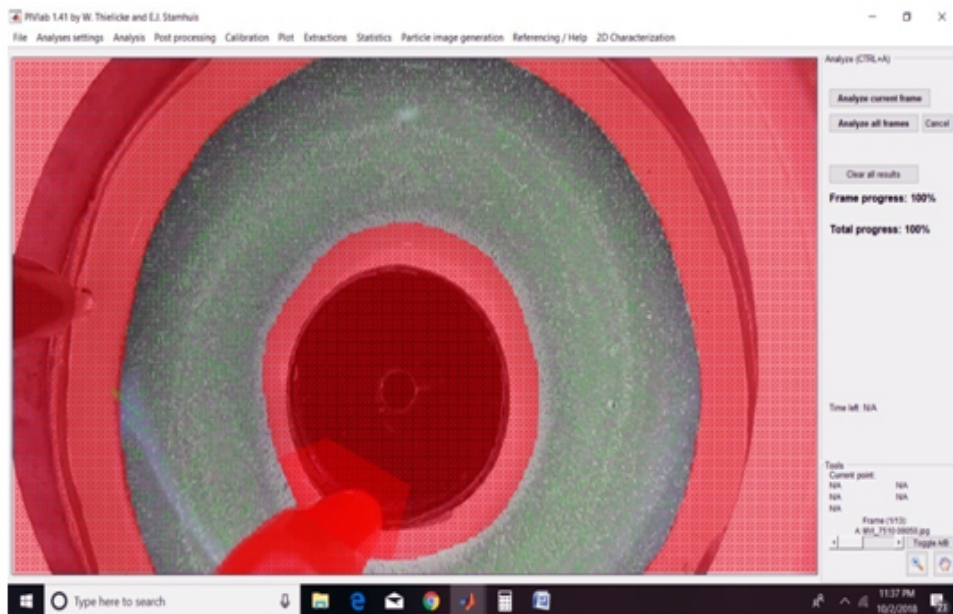


Figura 4.17: Análisis de las imágenes

6. Validación de los vectores de velocidad: Seleccionar el menú “Post- Processing”. Seleccionar límites de velocidad mediante el submenú correspondiente y encerrar con el mouse los puntos válidos correspondientes a los vectores de velocidad, dejando fuera los puntos más alejados del condensado que representa el campo vectorial de la velocidad del flujo. Los puntos más alejados corresponden a áreas no enmascaradas de los bordes donde la velocidad es nula o muy baja. El ejemplo correspondiente se observa en la figura 4.18.

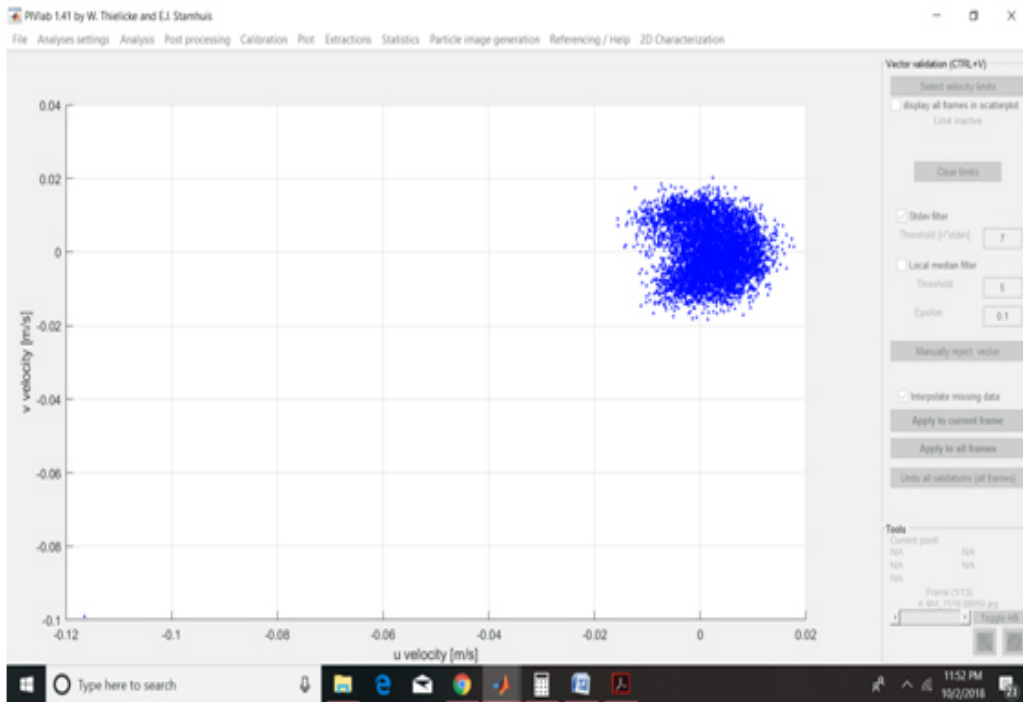


Figura 4.18: Validación de vectores

7. Extracción de parámetros radiales: Extraer los radios alrededor de los cilindros que contienen el fluido en movimiento mediante el menú “Extractions” y el submenú “Parameters from poly-line”, seleccionando como tipo de extracción “Polyline” y velocidad tangencial como parámetro. Seleccionar “Draw” y dibujar como se muestra en la figura 4.19.

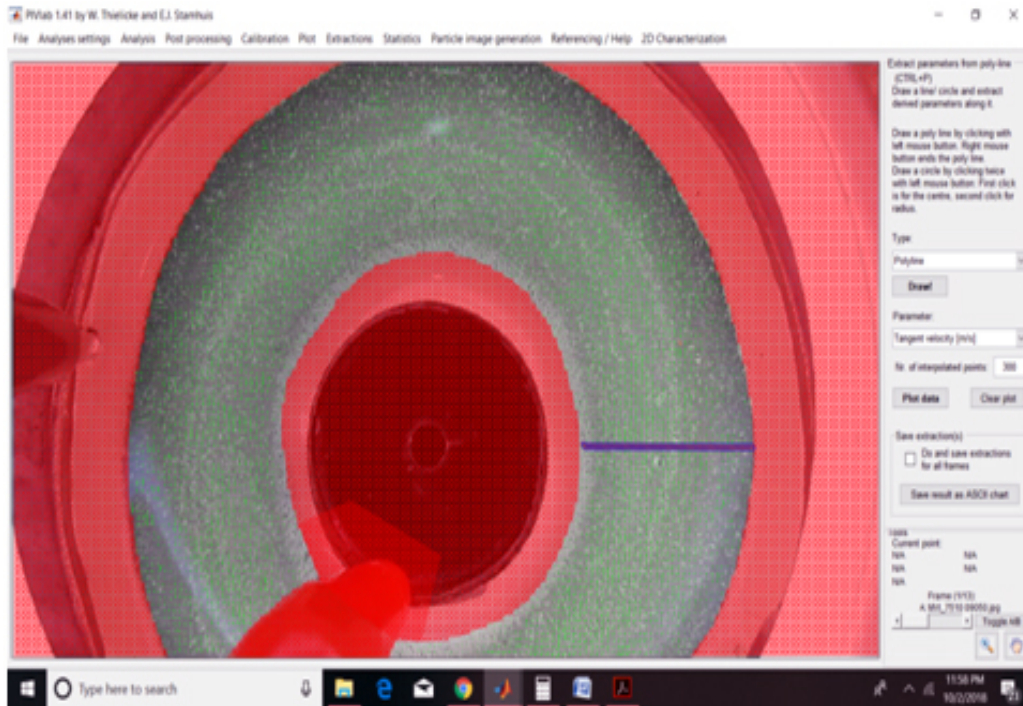


Figura 4.19: Extracción de parámetros radiales.

8. Trazado de Datos: Trazar los datos mediante el botón “Plot data” y salvar los resultados ASCII de todos los cuadros para ser analizados posteriormente por el menú agregado (2D Flow Velocity MHD, “ Herramienta de Análisis y Suavizado de Perfiles de Velocidad 2D de Flujo Magnetohidrodinámico”). Los trazos generados se observan en la figura 4.20

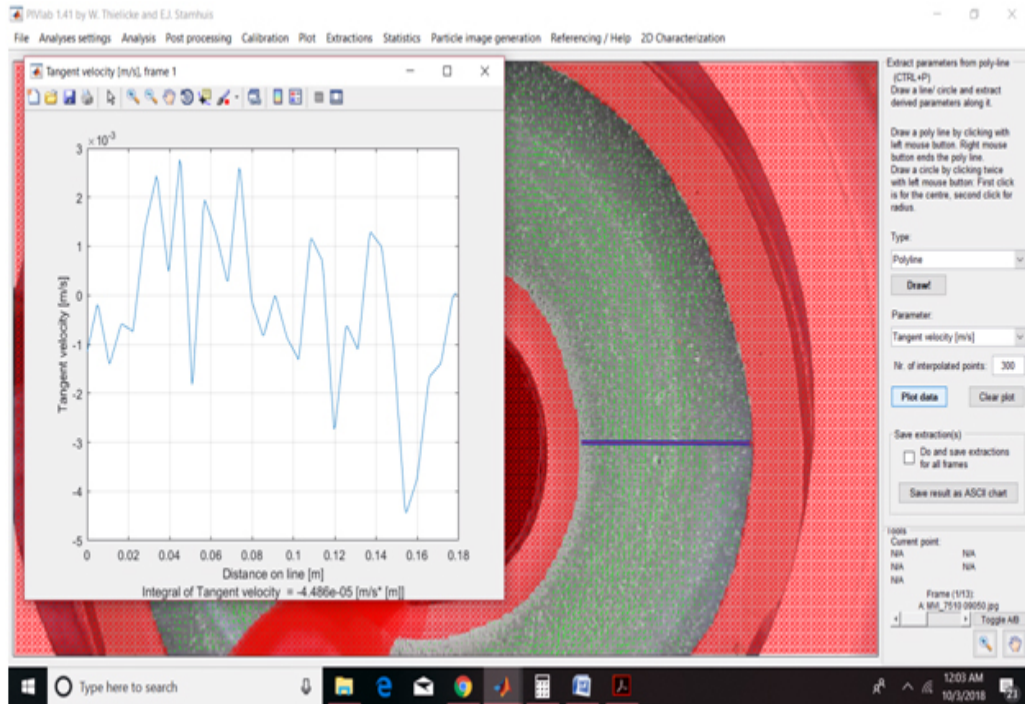


Figura 4.20: Trazado y almacenamiento de datos radiales.

9. Aplicación de la herramienta de análisis: Seleccionar el menú “2D Flow Velocity MHD” mediante el cual aparecerá la nueva herramienta de análisis MHD. La pantalla principal aparece en la figura 4.21

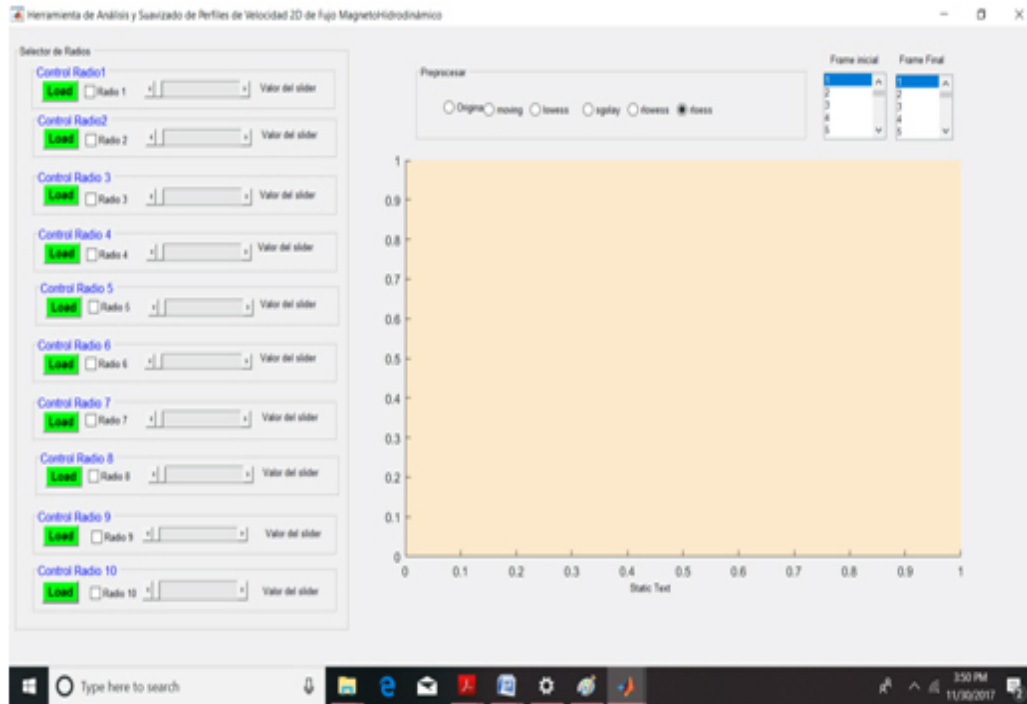


Figura 4.21: Herramienta de "Análisis y Suavizado de Perfiles de Velocidad 2D de Flujo Magnetohidrodinámico".

10. Carga de archivos generados por PIVLab: Presionar el botón “Load” y seleccionar los archivos “*.txt” generados por la aplicación PIVLab que contienen los datos de cada radio. No es necesario cargarlos de manera consecutiva, cada conjunto de archivos de un radio se puede cargar de forma independiente en el control deseado. Tampoco es necesario que los diez radios sean cargados. Nota: Marque solo un archivo txt tal como lo indica la figura 4.22, se cargaran 25 archivos consecutivos correspondientes a 25 pares de cuadros analizados.

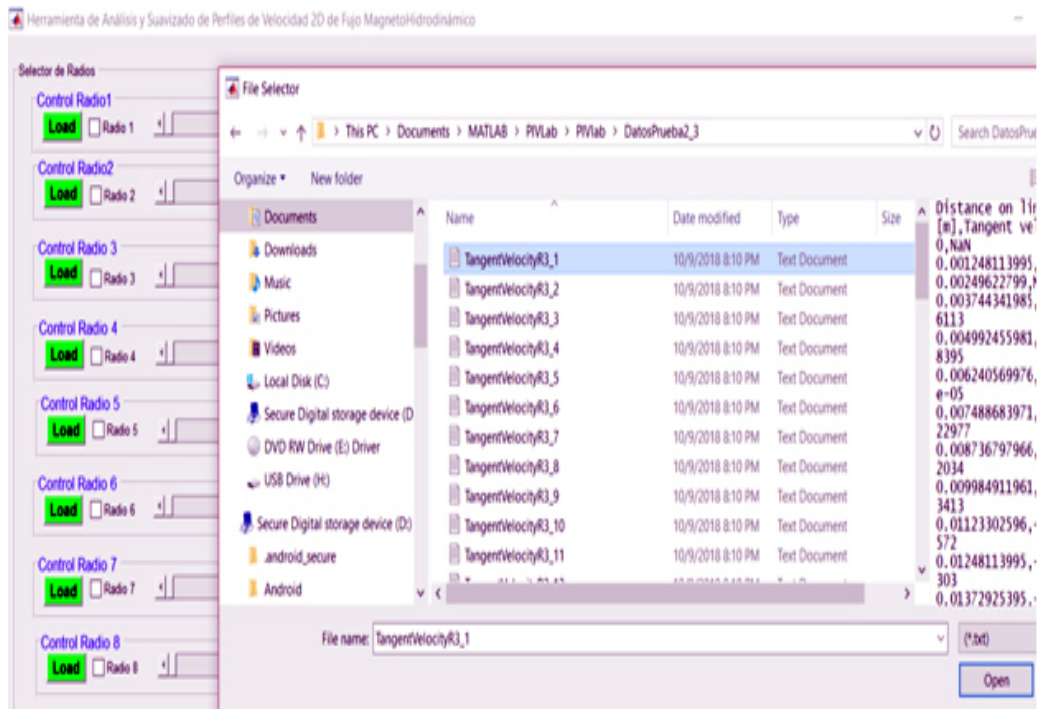


Figura 4.22: Cargar archivos radiales.

11. Selección de filtros: Seleccionar filtro original y frames, donde frame inicial debe ser menor o igual a frame final. Activar la casilla donde se cargaron los archivos. El resultado se observa en la figura 4.23.

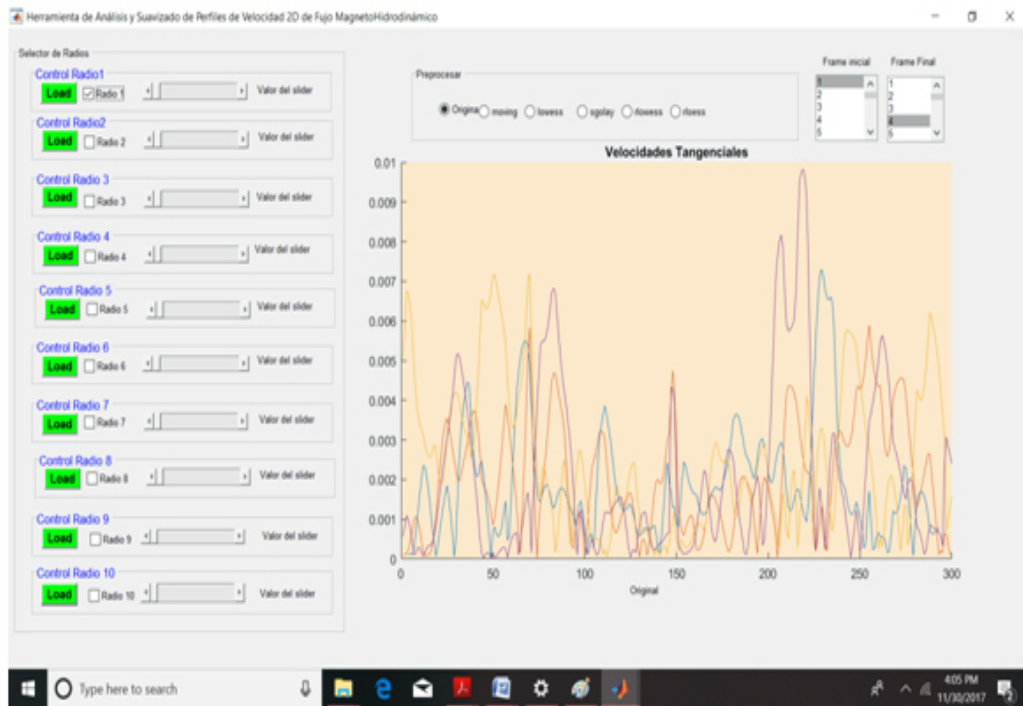


Figura 4.23: Cargar radios con los datos originales de los archivos cargados.

12. Selección de filtros: Seleccionar algún filtro o método de regresión de las opciones mostradas en la figura 4.24. Mover la barra de desplazamiento para obtener diferentes resultados según la intensidad indicada en la barra. Los valores de la barra deben ser mayores a 0 y menores a 1.

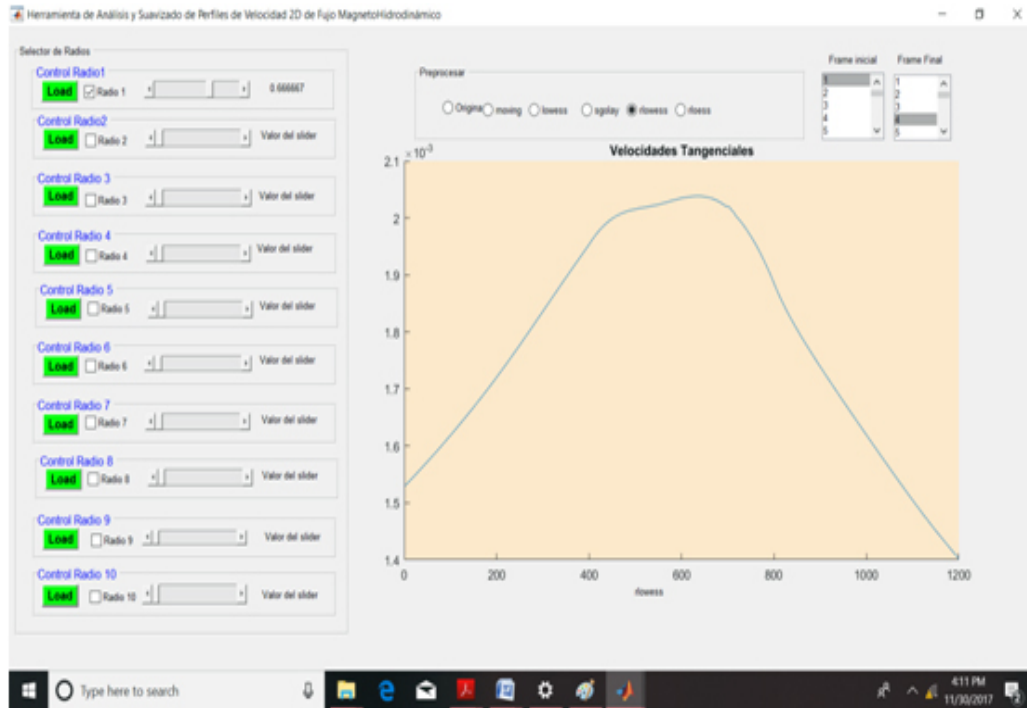


Figura 4.24: Filtrado de radios.

13. Análisis de más de un radio: Como se mencionó anteriormente, se pueden cargar y activar hasta un máximo de 10 radios con un rango de 1 a 25 frames, como se observa en la figura 4.25 para su análisis simultáneo.

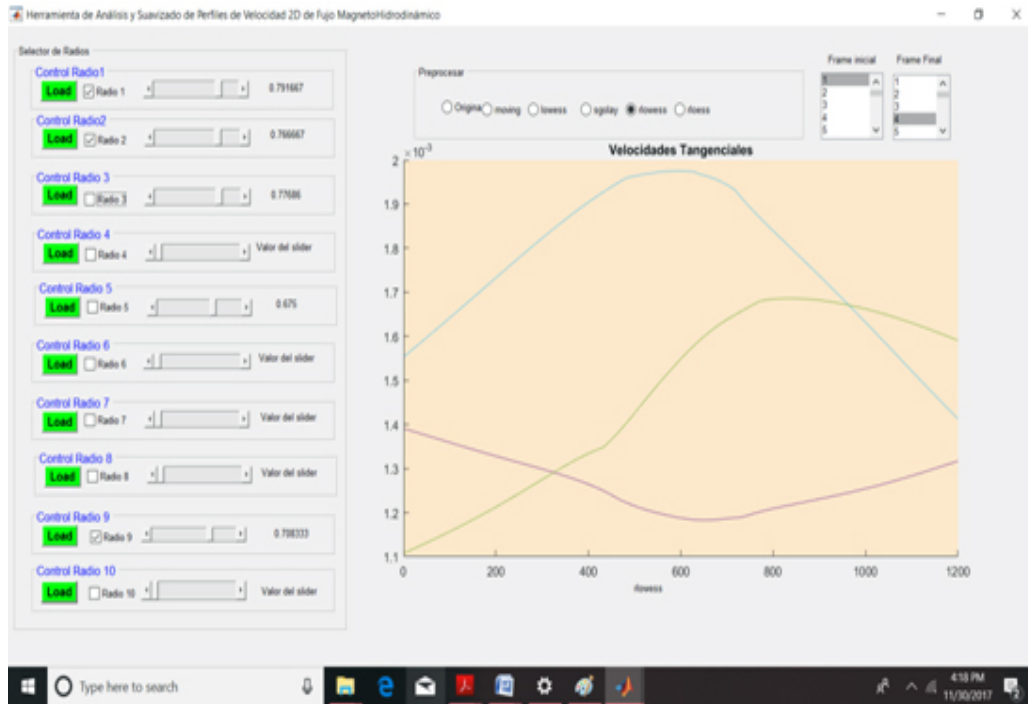


Figura 4.25: Análisis simultaneo de radios.

14. Instalación: Para instalar se copia la carpeta PIVLab en el directorio Mis documentos \MATLAB. Abrir la carpeta y correr el archivo *PIVlab_GUI.m* mediante MATLAB. Cuando el programa está cargado en MATLAB se ejecuta el script mediante el editor de MATLAB (Opción indicada por una flecha color verde). En la misma carpeta se encuentran imágenes y archivos ejemplo para correr el programa. Las indicaciones se observan en la figura 4.26

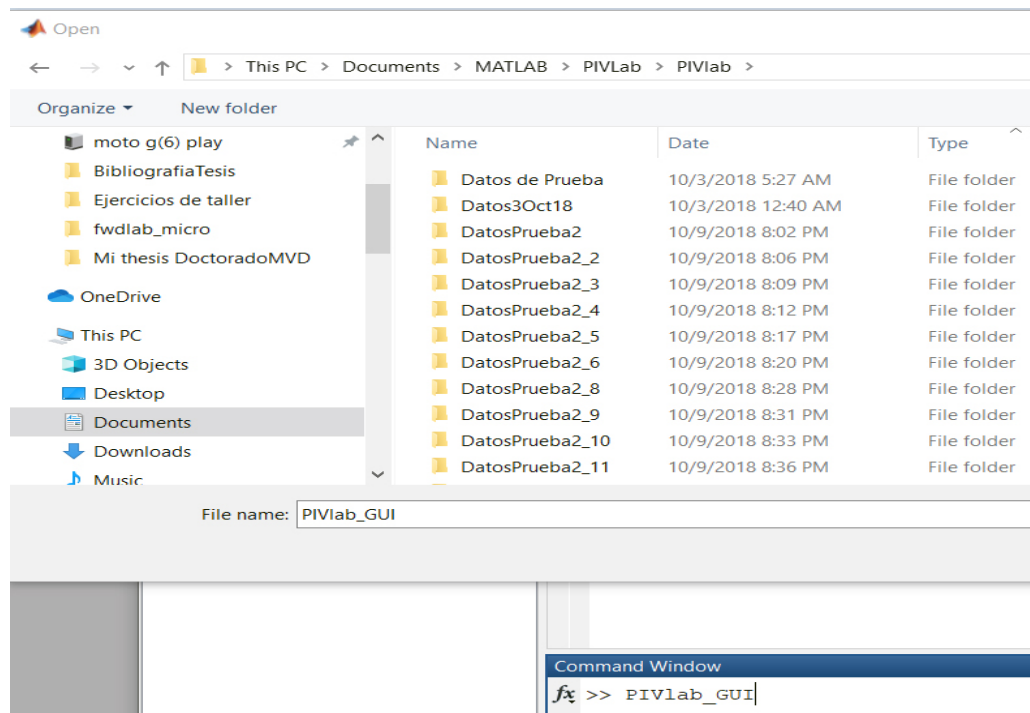


Figura 4.26: Instalación de la herramienta de Análisis y Suavizado de Perfiles de Velocidad 2D de Flujo Magnetohidrodinámico.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos en base a la metodología propuesta y a la validación teórica y experimental realizada en este proyecto. La presentación de los resultados se estructura de la siguiente manera: en primer término, se presentan los resultados obtenidos para la generación del movimiento del fluido conductor en un canal anular abierto con diferentes diseños de sistemas fluídicos MHD, en segundo término se presentan los resultados del método numérico aplicado a la solución del modelo matemático propuesto, en tercer término se compara y evalúa el modelo matemático con respecto a otros modelos similares encontrados en la literatura y en último término se presenta la comparación de resultados del modelo matemático con los resultados de los procesos experimentales realizados y los resultados obtenidos con el sistema de visión para conocer el campo de velocidades en un fluido mediante el trazado de partículas y la herramienta de análisis y suavizado de perfiles de velocidad 2D de flujo magnetohidrodinámico que se proponen y desarrollan en esta investigación

5.1. Diseño del sistema fluídico MHD

Se requiere de un prototipo para un sistema fluídico MHD consistente en un canal anular formado por el espacio entre dos cilindros concéntricos conductores de electricidad cuyos radios pueden variar siempre que se conserve la relación $R_1 < R_2$. Este prototipo debe estructurarse

de modo que emule en características de comportamiento a un sistema microfluídico MHD, debido a que el modelo matemático que se presenta en esta investigación, es la representación del comportamiento de un sistema microfluídico en un canal anular abierto, donde una fuerza de Lorentz generada por la interacción entre un campo magnético axial y un campo eléctrico radial generan el movimiento del fluido. Las dimensiones de un sistema microfluídico son en el orden de micrómetros y nanómetros por lo que requieren equipo especializado de laboratorio para su estudio y análisis. Sin embargo, es posible representar sus características especiales como los son un número extremadamente bajo de Reynolds y su flujo laminar causado por este número. Estas características pueden presentarse y controlarse en sistemas en los que se emplean muy pequeñas cantidades de fluido, su geometría es cilíndrica y la velocidad de fluido es baja (Avila et al., 2011), dando lugar a un prototipo MHD de canal anular abierto en el orden de centímetros para la experimentación.

Considerando lo anterior y analizando las características de baja velocidad y flujo laminar, se fabrican dos prototipos MHD de dimensiones idénticas con material polímero de ácido poliláctico (PLA) y una impresora 3D. En cada prototipo MHD se utiliza diferente tipo de material en la construcción de los anillos conductores. Los resultados obtenidos con cada prototipo son presentados.

Por otro lado, el proceso de análisis PIV requiere de la captura de imágenes de alto contraste de las partículas mezcladas en el fluido, por lo que un sistema de iluminación fue diseñado experimentando con diferentes fuentes de luz, distancias y ángulos dirección lumínica para evitar efectos ópticos y ruido causado por reflexiones de luz no deseada sobre la imagen.

5.1.1. Prototipo MHD con electrodos de aluminio

Los resultados que se obtienen utilizando un prototipo MHD constituido por electrodos de aluminio con las mismas dimensiones y características especificadas en la sección 4.2.1, son los siguientes: se genera una velocidad considerablemente baja del fluido (menor a la precisada por el modelo matemático) lo que impide el flujo laminar, además del requerimiento de una

diferencia de potencial elevada entre los electrodos para generar el movimiento del fluido la cual varia entre 16.5 volts y 25 volts con una corriente inicial de 55 miliamperios. El flujo se detiene completamente a los 30 segundos aproximadamente después de aplicarse la diferencia de potencial, independientemente del incremento o disminución del voltaje. La conmutación de polaridad en los electrodos genera el cambio direccional del flujo tal como se indica en la misma sección 4.2.1 con una velocidad menor a la inicial a causa de la saturacion del fluido, por lo tanto, la interrupción del flujo ocurre en un tiempo aproximado de 15 segundos posteriores a la conmutación de la polaridad. Una vez saturado el fluido, no se presenta movimiento alguno, aún cuando se conmute nuevamente la polaridad de los electrodos. Estos efectos causados por la baja conductividad del aluminio y la saturacion por burbujas, obligan a utilizar una nueva solución electrolítica no saturada y repetir el proceso para generar el movimiento del fluido. Por otro lado, estos resultados dificultan la captura de video y el análisis de la secuencia de imagenes de partículas a causa del corto tiempo de exposición del flujo en la superficie del fluido.

5.1.2. Prototipo MHD con electrodos de cobre

Al utilizar el prototipo MHD constituido por electrodos de cobre se obtienen los siguientes resultados: la velocidad del fluido es considerablemente mayor que la obtenida con los electrodos de aluminio. La diferencia de potencial mínima requerida para generar el movimiento, es de 0.5 volts. La corriente que se genera con este voltaje es de 0,13 miliamperios. El movimiento del fluido no se detiene durante un extenso periodo de tiempo, solo se atenúa la velocidad al transcurso del tiempo ya que la resistencia del sistema aumenta a consecuencia de la saturación de las partículas y por consiguiente la corriente disminuye, dado que la fuente de alimentación proporciona un voltaje constante al sistema MHD. Al cambiar la polaridad de los electrodos, el fluido cambia de dirección con la velocidad adquirida antes de la conmutación de polaridad. Se presenta movimiento aunque la polaridad se cambie nuevamente. Estos resultados facilitan, la obtención de datos suficientes de corriente y de voltaje, los cuales se sustituyen en el modelo matemático para obtener el campo de velocidades del flujo MHD. La captura de video se

prolonga permitiendo una mayor cantidad de cuadros de imágenes de partículas para el análisis PIV.

5.1.3. Efectos producidos por los fluidos conductores

La disolución electrolítica compuesta por una concentración de 3.8 gramos de bicarbonato de sodio disuelto en 400 mililitros de agua destilada en la que se mezcla 1 gramo de partículas de plata, da como resultado un fluido conductor que produce un velocidad de flujo mayor al umbral máximo de conductividad que se establece en el modelo matemático ($\sigma = 0.00287$ S/m) por lo que se pierden las características de un microfluído (número de Reynolds bajo y flujo laminar) , esto ocurre a causa de la conductividad del electrolito formado por bicarbonato de sodio (sal) y agua destilada, sumada a la conductividad de las partículas de plata. El segundo fluido conductor utilizado, el cual consiste en la mezcla de 0.2 gramos de partículas de plata con 200 mililitros de agua destilada, origina una velocidad dentro del umbral establecido en el modelo matemático (el flujo es laminar y el número de Reynolds se conserva bajo), permitiendo que el agua destilada sea eléctricamente conductora y menos vulnerable a la generación de burbujas y a la oxidación de los electrodos, además, por la baja velocidad y transparencia, facilita la captura de video para el análisis por PTV o PIV.

5.1.4. Resultados y efectos producidos por las fuentes de iluminación evaluadas

Los resultados obtenidos con los distintos tipos de fuentes lumínicas evaluadas, las cuales corresponden a una matriz de LEDs que radia luz blanca brillante, un arreglo de LEDs en anillo con emisión de luz roja reflectante, un haz de luz laser rojo, una lámpara de luz azul y una lámpara de luz blanca incoherente se muestran en la figura 5.1. Tal como se observa en estas imágenes, lo obtenido con la matriz de luz blanca brillante es la visualización media de las partículas solo en el área de alcance de la matriz dependiendo de la distancia a la que es colocada la cual nunca cubre toda la superficie del fluido porque invade el espacio de captura del sistema

óptico, también presenta la problemática del reflejo de los LEDs sobre la superficie del fluido. La fuente de luz roja proveniente del anillo de LEDs permite una visualización baja de las partículas de 20 micrometros anuado a la problemática del reflejo de LEDs alrededor de la superficie del fluido impidiendo la visualización completa de las partículas en ese espacio. La iluminación mediante el láser solo es localizable en un punto como se observa en el inciso (c) de la figura 5.1 a menos que esta se refleje en la pared del electrodo exterior formando una línea de luz donde se puede visualizar las partículas pasando a través de ella con una visibilidad extremadamente baja que impide la captación de las mismas por el sistema óptico y su seguimiento mediante las técnicas PIV o PTV. Con la fuente de iluminación azul no se generan reflexiones o brillos no deseados pero las partículas no son observables por el sistema de captura ni a simple vista. Con la iluminación de la lámpara de luz blanca, las partículas son fácilmente observables solo en el área expuesta por lo que para aumentar dicha área se construyen tres anillos de LEDs que emiten luz blanca incoherente para rodear y cubrir toda la superficie del fluido, estos diseños se observan en la figura 4.4 de la subsección 4.2.4.

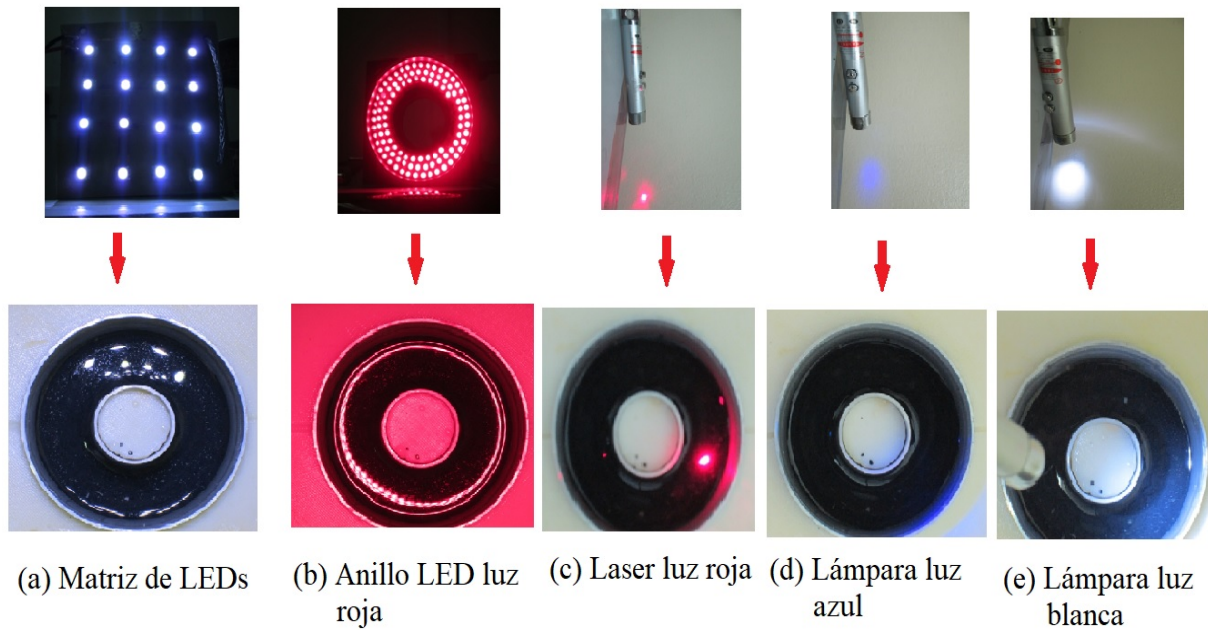


Figura 5.1: Evaluación y prueba de distintos tipos de fuentes de iluminación.

La separación entre los LEDs genera heterogeneidad en la iluminación que provoca sombras generadas por las paredes de los cilindros además de la reflexión de la luz y los efectos de espejo. Para minimizar estos efectos, se diseña un difusor hecho con material plástico traslúcido PLA para cada anillo. Estos diseños se muestran en la figura 4.5 de la subsección 4.2.4. Por último, para aumentar la nitidez de las partículas sembradas, el fondo del mezclador se cubre con un esmalte negro opaco que incrementa el contraste de las partículas, al mismo tiempo que minimiza el efecto espejo y las reflexiones no deseadas. Los anillos integrados a los difusores se colocan alrededor del contorno del canal fluídico para iluminar de modo indirecto a las partículas sembradas. Tal como se ha mencionado antes, la orientación luminica del primer anillo es hacia el exterior y sus dimensiones corresponden a las del cilindro interno del mezclador en donde es colocado, esta orientación genera como resultado baja visibilidad de las partículas y reflexiones en el anillo exterior. El segundo anillo, con LEDs en el interior del aro, es colocado al borde del electrodo exterior del mezclador, generando también baja visibilidad de las partículas y reflexiones en el aro opuesto (anillo interno del mezclador). El tercer y último anillo con

LEDs en la parte inferior de la placa circular se coloca en el cilindro exterior del canal fluídico, rodeando al canal de manera que la luz es perpendicular a la superficie del fluido. Este último diseño, da como resultado una visibilidad completa de las partículas sobre la superficie del fluido, las cuales son observables nítidamente a simple vista, no se generan brillos ni reflexiones no deseadas y el efecto espejo desaparece, además de que el diseño y colocación estratégica del mismo, permite el acceso del campo visual al sistema óptico conformado por la cámara CCD. Este diseño cumple con las características de iluminación por campo oscuro utilizada en microscopía.

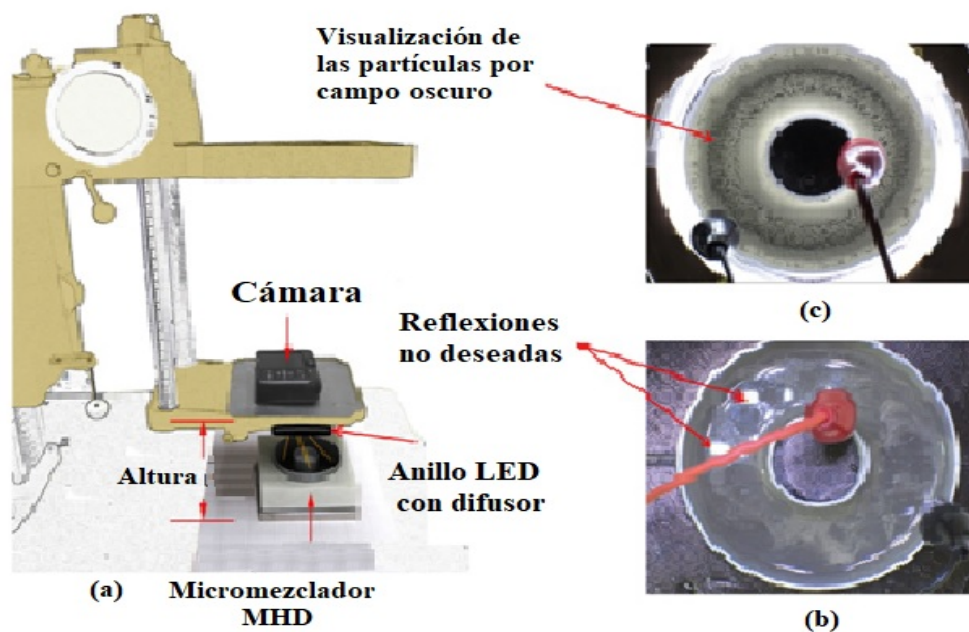


Figura 5.2: Resultados obtenidos con la técnica de iluminación por campo oscuro y el diseño de la lámpara con LEDs colocados en la base del difusor.

5.2. Resultados del modelo numérico

Una vez aplicada la condición común de frontera sin deslizamiento (condiciones expresadas en las ecuaciones (4.6), (4.7) y (4.8)) en las superficies de los cilindros, se determinan los valores propios de las funciones de Bessel para cada valor η , obteniendo soluciones de velocidad y cau-

dal (tasa de flujo volumétrico) expresadas por (5.1) y (5.2) respectivamente. Diferentes valores de la relación de aspecto ϵ se obtienen de acuerdo con el valor η utilizado:

$$v_{\theta} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{8(-1)^{n+1} \alpha_m}{(\alpha_m^2 + \frac{[(2n-1)\pi]^2}{4\epsilon^2})(v'_{1;m}(1) - \eta^2 v'_{1;m}(\eta)) |\ln \eta|} \frac{v_{0;m}(1) - v_{0;m}(\eta)}{[(2n-1)\pi]} v_{1,m}(r) g_n(z) \quad (5.1)$$

$$q = - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{16}{(\alpha_m^2 + \frac{[(2n-1)\pi]^2}{4\epsilon^2})(v'_{1;m}(1) - \eta^2 v'_{1;m}(\eta)) |\ln \eta|} \frac{(v_{0;m}(1) - v_{0;m}(\eta))^2}{[(2n-1)\pi]^2} \quad (5.2)$$

5.3. Resultados computacionales del modelo numérico

El modelo numérico es simulado utilizando Maple (Inc., 2018). Con el interés de analizar el comportamiento del fluido para diferentes valores paramétricos, se utilizan simulaciones numéricas 3D con varias configuraciones de parámetros. La velocidad de flujo adimensional expresada por (5.2) se evalúa para $\eta = [0,2 : 0,2 : 1,0]$ con $\epsilon = [0,1, 0,5, 1,0, 10,0]$. La simulación se ilustra en la Figura (5.3). El caudal adimensional q es directamente proporcional al aumento de ϵ para cualquier valor η dado. Sin embargo, debido a la fricción existente en las paredes, el caudal q se reduce a medida que toma valores más pequeños, así como cuando el espacio se vuelve cero ($\eta \rightarrow 1$). Para los diferentes valores de ϵ , el caudal máximo adimensional está en $\eta = 0,15$. Por otro lado, $\epsilon = 10$ se considera como límite ya que para valores más altos, el caudal q no cambia dramáticamente. La sección transversal del canal anular se observa en la Figura (5.4) y muestra los parámetros principales: radio del cilindro interno (R_1), radio del cilindro externo (R_2), profundidad del canal (h) en el eje Z , ancho de canal adimensional (r) y perfil de velocidad (v_{θ}) a través de la longitud r .

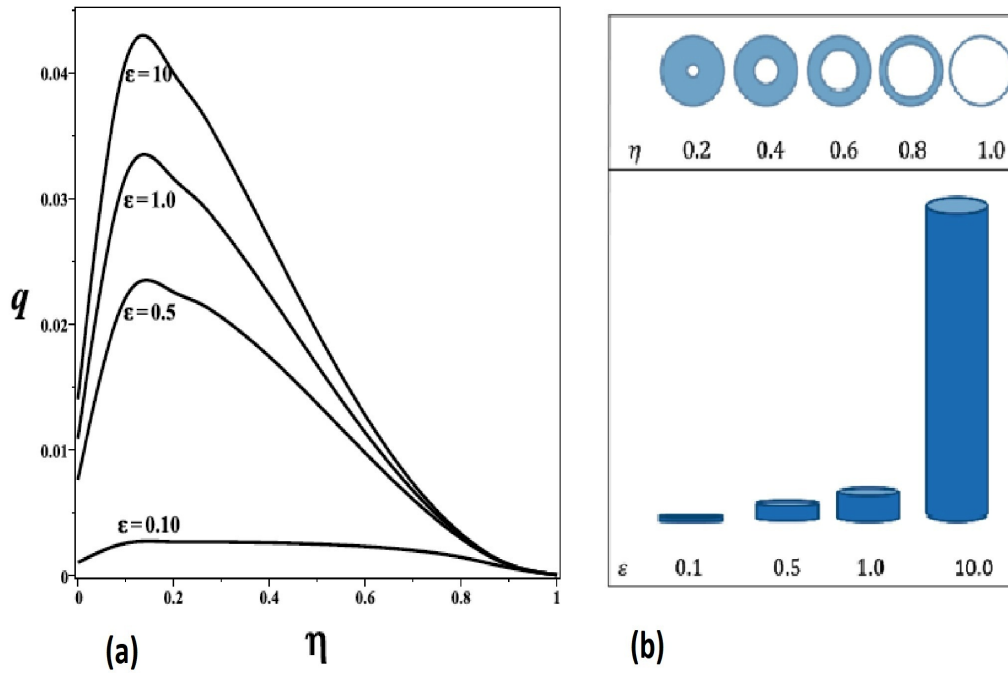


Figura 5.3: (a) Caudal 2D adimensional q versus η para la relación de aspecto $\epsilon = 0.1, 0.5, 1.0, 10.0$. (b) Representación física de la relación η y ϵ .

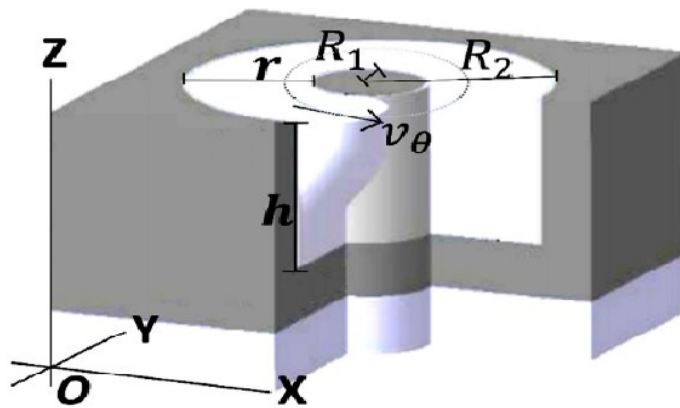


Figura 5.4: Sección transversal del canal anular y sus parámetros principales: h (profundidad del canal), r (ancho del canal), R_1 (radio interno del cilindro), R_2 (radio externo del cilindro), v_θ (velocidad azimutal).

Los perfiles de velocidad se exploran variando la profundidad del canal (h) y el espacio entre los cilindros para mostrar el efecto de las paredes en el comportamiento del flujo. En la Figura 5.5 se ilustran los perfiles de velocidad para $h = 0,1$ y $h = 0,15$ con relaciones de

aspecto $\epsilon = 0,1,0,5, 1,0, 10,0$ (varias profundidades del canal). Para una relación de aspecto pequeña, el perfil de velocidad en la superficie es antisimétrico debido al efecto de las paredes. Sin embargo, para una relación de aspecto alta, el perfil de velocidad en la superficie tiende a ser simétrico debido a que la superficie casi no se ve afectada por la pared inferior. Además, se puede alcanzar el perfil simétrico a medida que el radio interno se acerca al radio externo.

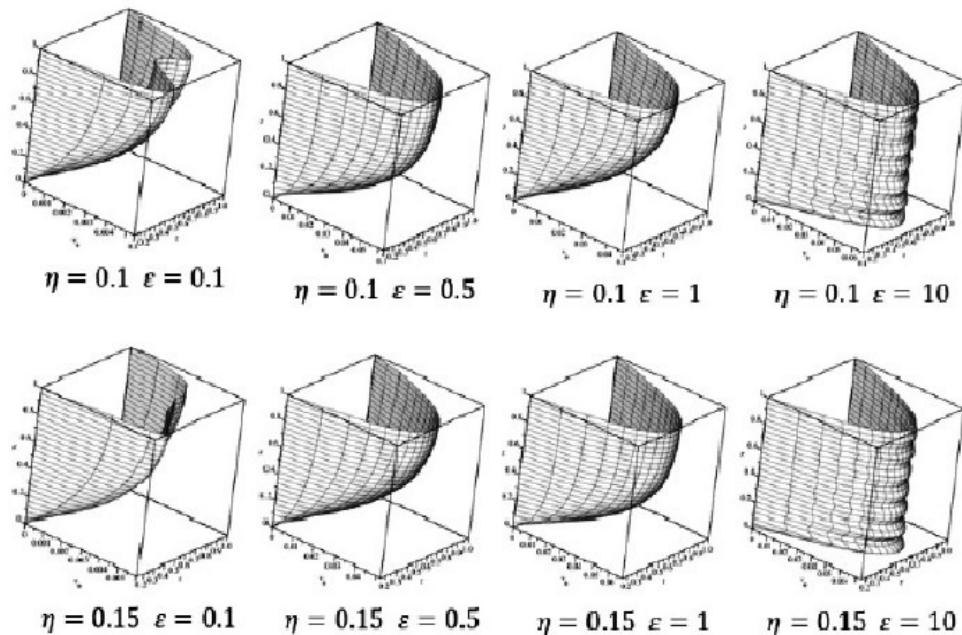


Figura 5.5: Perfiles de velocidad 3D adimensionales para varias configuraciones de parámetros, con el fin de mostrar la simetría y la antisimetría de las diferentes configuraciones paramétricas.

5.4. Validación teórica del modelo matemático

En esta sección, se compara el modelo matemático propuesto con otros modelos encontrados en literatura de configuraciones similares, es decir, modelos para mezcladores MHD en los que una fuerza de Lorentz induce un flujo azimutal de un fluido débilmente conductor con algunas consideraciones distintas en cuanto a parámetros electromagnéticos, tipo de solución fluida conductora y pruebas experimentales entre otras, las cuales se explican a continuación. Durante la investigación del estado del arte, se analizan experimentos previos en los que una

fuerza de Lorentz induce un flujo azimutal de un fluido débilmente conductor. Sin embargo, la mayoría de ellos asume que los cilindros son infinitamente largos ($\epsilon \rightarrow \infty$) y que la fricción viscosa no está presente debido a la inexistencia de los efectos de fondo (Qin and Bau, 2012)

Aunque en algunos estudios, los cilindros son finitos (Pérez-Barrera J., Ortiz A., 2016), se desarrolla un modelo teórico Q2D (modelo cuasi-bidimensional) para un canal circular con una superficie libre superior con una capa de fluido muy delgada ($\epsilon = 0,1$). Para la solución analítica modelo Q2D, se considera la fricción debida a la pared inferior aislante, con dos condiciones diferentes: (a) idealizada suponiendo que el fluido no se adhiere a las paredes del canal circular, condición de límite de deslizamiento ($l_s \rightarrow \infty$), y (b) condición de límite antideslizante (l_s varía entre 0 y 100). El modelo Q2D se basa en un procedimiento de promedio en la dirección normal debido a la fuerza de fricción viscosa pura presente en el fluido causada por la pared inferior. En el perfil de velocidad 2D, se ha encontrado que la magnitud de la velocidad es casi un 50 % más alta cuando se usan fluidos débilmente conductores, en comparación con fluidos altamente conductores, debido a que la fricción de Hartmann presentada en fluidos de alta conducción es más fuerte que la fricción viscosa presentada en un fluido débilmente conductor. Se ha encontrado que los valores de velocidad máxima están más cerca del cilindro interno, aunque a medida que R_m crece, la velocidad aumenta mientras que el perfil presenta una forma más parabólica. Además, a pesar de la fricción viscosa en el fondo, el caudal crece con R_m mientras que, como se esperaba, se observa una ganancia sustancial a medida que aumenta el parámetro l_s . Se observa también que para $l_s \rightarrow \infty$, el caudal crece linealmente con R_m , hasta alcanzar un valor de saturación.

En estas circunstancias, es necesario desarrollar un modelo 3D para simular los perfiles de velocidad. Por esta razón, se desarrolla un modelo en (Ortiz-Pérez et al., 2017), basado en una aproximación cuasi-analítica utilizando el método de Galérkin con la serie ortogonal de Bessel-Fourier, para analizar un canal circular cerrado, con longitud finita, teniendo en cuenta una condición de deslizamiento general en las cuatro paredes (cilindros superior, inferior, interior y exterior). Este nuevo estudio tiene en cuenta una nueva configuración de forma, que es un flujo

circular con un canal largo finito y con una superficie libre (canal abierto) influenciada por las condiciones de deslizamiento de las tres paredes (fondo y dos lados), con un fluido débilmente conductor inducido por una fuerza de Lorentz. La validación teórica del modelo propuesto, se realiza haciendo una comparación de los valores obtenidos del modelo matemático, con los datos adquiridos por trabajos científicos anteriores de modelos con configuraciones para mezcladores MHD, en los que una fuerza de Lorentz induce un flujo azimutal de un fluido débilmente conductor.

5.4.1. Solución Analítica de Digilov

En la investigación realizada por Digilov (Digilov, 2007), el experimento se ejecuta en un canal abierto con una profundidad de ($h = 18mm$), formado con el espacio entre dos cilindros conductores de radios ($R_1 = 1,5mm$) y ($R_2 = 24mm$), con el suministro ($\eta = 0,0625$ y $\epsilon = 0,75$), lleno con una solución acuosa de C_uSO_4 al 2%, proporcionando una conductividad de fluido ($\sigma = 0,75Sm^{-1}$). Inducido por un campo magnético uniforme ($B_0 = 20mT$), con número de Hartmann ($H_a = 0,01$) y un voltaje de CC ($0,5V \leq \phi \leq 3,0V$). La visualización de los patrones de flujo se lleva a cabo utilizando una técnica basada en una inyección de colorante líquido. El tinte líquido se deja caer horizontalmente en el canal, utilizando la escala de tiempo para el tinte, proporcional a la escala de tiempo de respuesta magnética. La medición experimental de la velocidad de flujo se realiza mediante el seguimiento del polvo de lycopodium pasivo rociado sobre la superficie líquida libre. La velocidad se mide contando el número de revoluciones completadas por una partícula dentro de una cantidad de tiempo dada. La velocidad del flujo es modelada por una solución analítica 2D, obteniendo la distribución radial del vector de velocidad azimutal por (5.3). Se concluye que para cualquier geometría de canal dada, la velocidad es proporcional al voltaje aplicado. Los resultados experimentales y analíticos de Digilov de esta experimentación se observan en la Figura 5.6, en comparación con el modelo matemático propuesto.

$$v_{\theta(r)} = \frac{\sigma \phi B_0}{2v \ln\left(\frac{1}{\eta}\right)} r \left\{ \ln\left(\frac{R_2}{r}\right) + \frac{\ln\left(\frac{1}{\eta}\right)}{\left(\frac{1}{\eta}\right)^2 - 1} \left[1 - \left(\frac{R_2}{r}\right)^2 \right] \right\} \quad (5.3)$$

5.4.2. Método de Elementos Finitos (FEM) por West

En la investigación de West (West et al., 2003), se observa un perfil de velocidad parabólica para un flujo laminar en un canal anular MHD impulsado por una fuerza de Lorentz. Se diseña un prototipo de agitador para tareas de micro-mezcla y se caracteriza utilizando partículas de látex, tinte de fluoresceína y un sistema de video para microscopía. Se monitoriza el tiempo en el que el azul de bromofenol y los iones de hidrógeno se disuelven para cada rango de velocidades. El experimento se ejecuta en un canal abierto con una profundidad de ($h = 500m$), formado con el espacio entre dos cilindros conductores de radios ($R_1 = 4mm$) y ($R_2 = 6mm$) donde ($R_1 < R_2$), con la ración ($\eta = 0,667$ y $\epsilon = 0,083$), se llena con una solución acuosa dopada con KCl ($1M$) como portador de carga y 20 partículas, proporcionando una viscosidad del fluido ($v = 0,9 \times 10^{-3} kgm^{-1}s^{-1}$). Inducido por un campo magnético uniforme ($B_0 = 6,6mT$), y un campo eléctrico de una señal alterna ($I_{RMS} = 85,5mA$, $V_{RMS} = 6,5V$, $f = 1kHz$). El modelo matemático para esta propulsión anular MHD consiste en una ecuación reducida de Navier-Stokes con fuerza de Lorentz, que proporciona líneas de corriente circulares y permite reducir el modelo a una ecuación de Poisson, que se resuelve usando un paquete de elementos finos bidimensionales. Esto da como resultado un perfil de velocidad parabólica, con un máximo hacia la pared interna, a media profundidad. Se observa que para un voltaje de electrodo dado, los valores de la corriente (I) cambian proporcionalmente con la altura del canal (h) para mantener la densidad de corriente. La predicción del modelo por FEM se compara con la velocidad experimental observada y con el modelo matemático propuesto. La figura 5.6 muestra la similitud entre modelos.

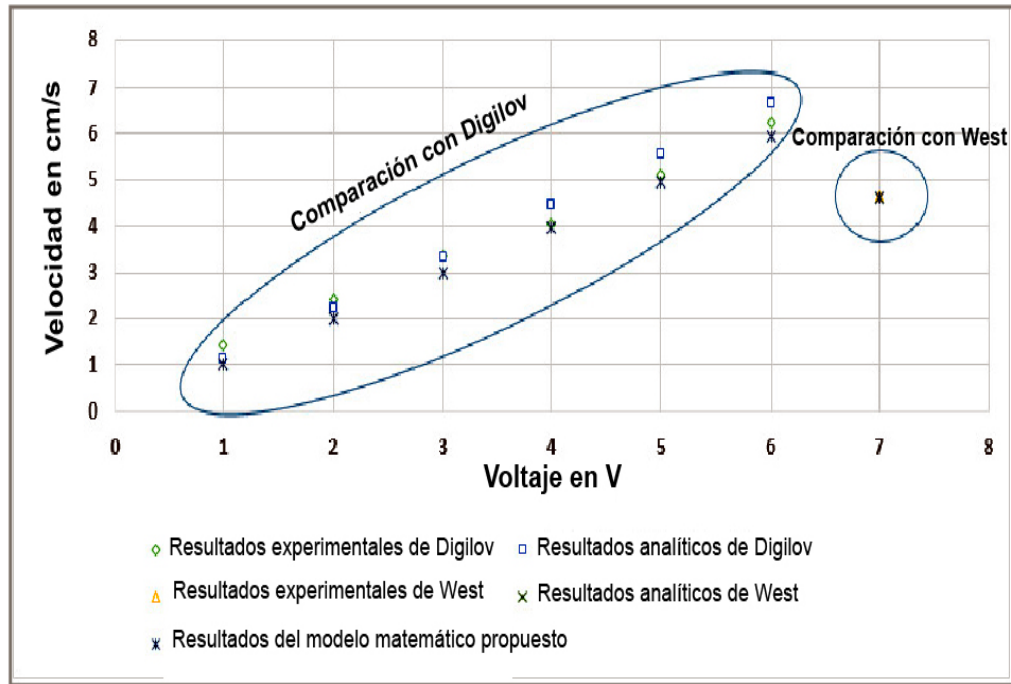


Figura 5.6: Resultados analíticos y experimentales de Digilov (Digilov, 2007) y West (West et al., 2003) vs resultados del modelo matemático propuesto.

5.5. Comparación del modelo matemático propuesto con mediciones experimentales

En esta sección se describen los resultados experimentales obtenidos mediante las técnicas PTV y PIV descritas en las secciones 4.3.2 y 4.3.3 como parte de la metodología, se describe a su vez los resultados que se obtuvieron con las configuraciones de las soluciones conductoras y por último la estimación de incertidumbre del sistema de visión.

5.5.1. Configuración de las soluciones conductoras

Para la validación experimental del modelado matemático del mezclador MHD propuesto se desarrolló un sistema de visión del cual se resumen a continuación sus componentes, con-

figuración y la estimación de su incertidumbre. Se partió de la preparación de las soluciones conductoras mostradas en la tabla 5.1. Se prosiguió con el llenado del canal anular hasta la profundidad definida $h = 7mm$, se indujo la fuerza de Lorentz debido a la presencia del campo magnético y la activación de la fuente de voltaje directo. Se realizó la caracterización eléctrica V-I de las distintas configuraciones de soluciones conductoras mostradas en la tabla 5.1, y se observó el comportamiento del fluido. Cabe mencionar que en la sección 5.1.3 se detallan los efectos producidos por los fluidos conductores y el umbral máximo de conductividad que se establece en el modelo matemático. Para la configuración 1, no se observó movimiento del fluido. En la configuración 2 se observó un flujo turbulento y la generación de burbujas. Para las configuraciones 3 y 4 la conductividad elevada generó un flujo de alta velocidad y turbulento. Tras estos experimentos fue notorio que al agregar las esferas S-HGS la conductividad aumentaba, por lo que se decidió probar la configuración 5, con la cual se observó un flujo estable, sin burbujas, ni problemas de oxidación, y además con una relación V-I lineal como se muestra en la figura 5.7. Se procedió a la validación experimental pre-eliminar, donde se compararon las predicciones del modelo matemático contra las lecturas obtenidas a través de herramientas de uso libre para PTV (Tracker) y para PIV (PIVLAB). Posteriormente se compara los resultados del modelo matemático con los resultados del sistema de visión diseñado para analizar el mezclador MHD, como se muestra en la figura 5.9 y se describe en la tabla 5.4. Dónde se obtuvo una variación máxima de 0.00060 m/s.

Tabla 5.1: Configuración de las soluciones conductoras.

Número de Configuración	Agua destilada	Bicarbonato de Sodio	Esferas de S-HGS	Campo Magnético	Diferencia de Potencial que induce el Campo Eléctrico
1	100 ml	0.84 g	N/A	0.1624 T	0.5V a 10.0V
2	100 ml	0.84 g	0.1 g	0.1624 T	2.0V a 24.0V
3	100 ml	8.4 g	N/A	0.1624 T	0.5V a 5.0V
4	100 ml	8.4 g	0.1 g	0.1624 T	0.5V a 8.0V
5	100 ml	N/A	0.1 g	0.1624 T	0.5V a 6.0V

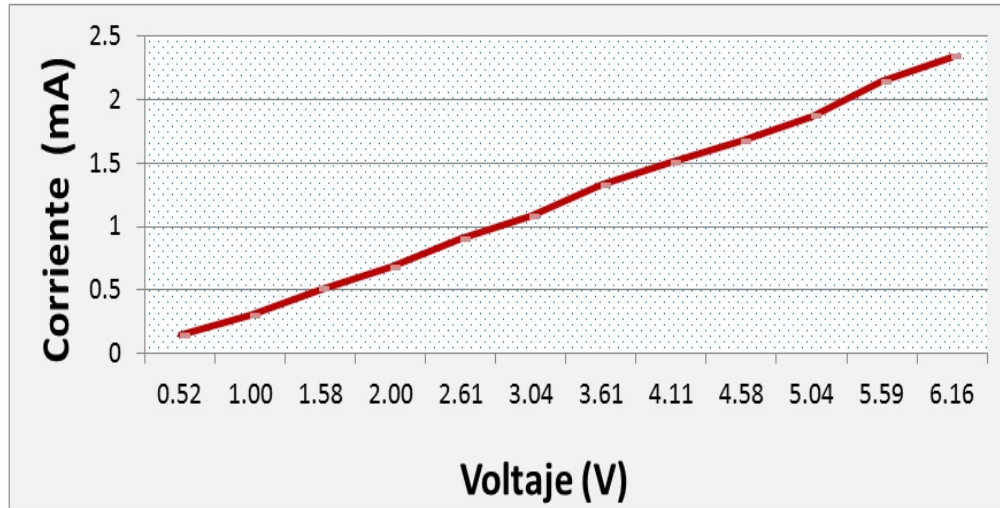


Figura 5.7: Caracterización eléctrica V-I de la solución conductora de la configuración 5 mostrada en la tabla 5.1.

5.5.2. Resultados de la herramienta Tracker para análisis PTV

El análisis realizado con el software Tracker en modo de seguimiento automático dio cierto nivel de certeza al comparar los resultados con los obtenidos por Galérkin, pero las mediciones de velocidad resultaron extremadamente inexactas debido a que el software no es la herramienta más eficiente para esta aplicación. Las partículas son pequeñas y la cantidad de partículas en el flujo hace imposible que el software las rastree automáticamente, ya que pierde la partícula seleccionada para rastrear. Esto se debe a que este método rastrea partículas individuales, en contraste con la velocímetros de imágenes de partículas (PIV) que calcula un vector de desplazamiento para una ventana de partículas (8 pixeles x ventana) entre 2 cuadros de imágenes consecutivas. Como consecuencia, el seguimiento para PTV en Tracker, se llevó a cabo en forma manual. Los resultados obtenidos con la herramienta tracker se observan en la tabla 5.2

Tabla 5.2: Comparación de las velocidades máximas obtenidas con la herramienta Tracker y con el método de Galërkin. Las características geométricas y parámetros son: $R_1/R_2 = \eta = 0,60$, $h/R_2 = \epsilon = 0,22$, $B = 0,1634T$

Voltaje (V)/ Corriente (mA)	Velocidad máxima en (cm/s) PTV Tracker	Velocidad máxima en (cm/s) Galërkin	Galërkin Error %
0.5 / 0.13	0.006	0.02	233.33
1.0 / 0.24	0.036	0.05	38.89
1.5 / 0.36	0.045	0.07	35.71
2.0 / 0.49	0.069	0.09	30.00
2.5 / 0.61	0.086	0.12	39.53
3.0 / 0.73	0.115	0.14	17.86
3.5 / 0.84	0.126	0.16	27.00
4.0 / 0.96	0.155	0.18	16.13
4.5 / 1.08	0.183	0.20	0.9.29
5.0 / 1.23	0.182	0.24	31.87
5.5 / 1.33	0.210	0.25	16.00
6.0 / 1.46	0.220	0.28	27.27
6.5 / 1.60	0.230	0.30	30.00
7.0 / 1.72	0.280	0.33	17.86

5.5.3. Reultados de la herramienta PIVLAB para análisis PIV

Los resultados de la herramientas PIVLAB entre 2 y 4,5 V, presentan una desviación menor de los resultados de Galërkin que los resultados del software Tracker. Esto se debe a que en esta técnica PIV, el fluido puede ser sembrado con partículas suficientemente pequeñas, que siguen fielmente la dinámica del flujo. Además la técnica PIV produce campos vectoriales bidimensionales, mientras que la técnica PTV mide la velocidad de una sola partícula que no define la dinámica completa del flujo. La comparación de resultados del método de Galërkin con datos experimentales obtenidos con Tracker y las mediciones PIVLAB se observan en la figura 5.8

Tabla 5.3: Comparación de las velocidades máximas obtenidas con la herramienta PIVLAB y con el método de Galërkin. Las características geométricas y parámetros son: $R_1/R_2 = \eta = 0,60$, $h/R_2 = \epsilon = 0,22$, $B = 0,1634T$

Voltaje (V)/ Corriente (mA)	Velocidad máxima en (cm/s) PIVLAB	Velocidad máxima en (cm/s) Galërkin	Galërkin Error %
0.5 / 0.13	0.029	0.02	45.00
1.0 / 0.24	0.059	0.05	18.00
1.5 / 0.36	0.077	0.07	10.00
2.0 / 0.49	0.094	0.09	04.44
2.5 / 0.61	0.128	0.12	06.67
3.0 / 0.73	0.153	0.14	05.00
3.5 / 0.84	0.160	0.16	00.00
4.0 / 0.96	0.180	0.18	00.00
4.5 / 1.08	0.199	0.20	00.50
5.0 / 1.23	0.210	0.24	14.28
5.5 / 1.33	0.220	0.25	13.63
6.0 / 1.46	0.230	0.28	21.74
6.5 / 1.60	0.250	0.30	20.00
7.0 / 1.72	0.260	0.33	26.90

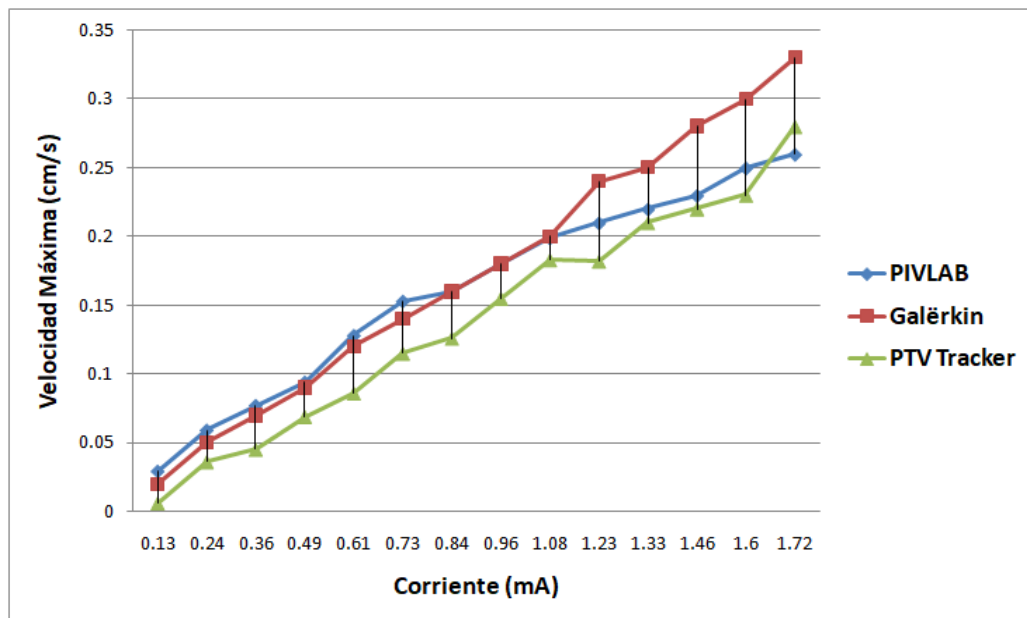


Figura 5.8: Comparación del método de Galërkin con datos experimentales obtenidos con Tracker y mediciones PIVLAB.

5.5.4. Resultados de la validación experimental mediante el sistema de visión propuesto.

Luego de realizar los experimentos descritos en la Tabla 5.1 para obtener la relación lineal de los parámetros eléctricos, se seleccionó la configuración de parámetros utilizada en la configuración 5. Fue seleccionada por su linealidad eléctrica y por su comportamiento de flujo laminar para validar el perfil de velocidad del modelo matemático, utilizando Velocimetría de Imagen de Partículas (PIV). La configuración del software se muestra en las Secciones 4.3.3 y 4.4, mientras que los resultados se observan en la tabla 5.4 y la figura 5.9

Tabla 5.4: Validación del modelado del mezclador MHD propuesto versus mediciones experimentales con el sistema de visión propuesto.

Voltaje (V)/ Corriente (mA)	Velocidad máxima en (m/s) Modelado	Velocidad máxima en (m/s) Sistema de visión	Valor absoluto de la diferencia de resultados en m/s
0.5 / 0.140	0.00023	0.00040	0.00017
1.0 / 0.300	0.00058	0.00049	0.00009
1.5 / 0.500	0.00095	0.00075	0.00020
2.0 / 0.680	0.00130	0.00131	0.00001
2.5 / 0.900	0.00170	0.00173	0.00003
3.0 / 1.087	0.00208	0.00220	0.00012
3.5 / 1.330	0.00250	0.00255	0.00005
4.0 / 1.510	0.00300	0.00290	0.00010
4.5 / 1.680	0.00320	0.00322	0.00002
5.0 / 1.870	0.00350	0.00350	0.00000
5.5 / 2.150	0.00400	0.00370	0.00030
6.0 / 2.340	0.00450	0.00390	0.00060

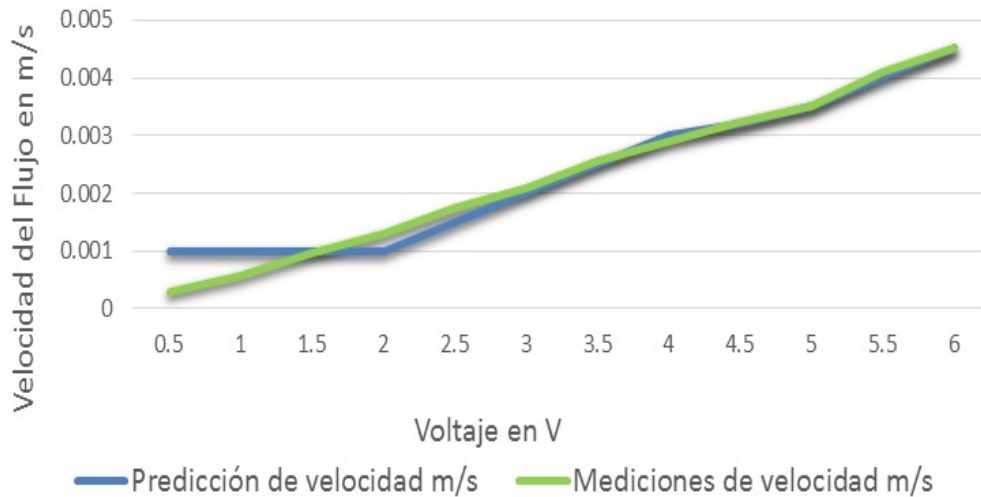


Figura 5.9: Validación experimental del mezclador MHD.

5.5.5. Estimación de incertidumbre del sistema de visión

La medición del comportamiento del fluido en un mezclador MHD es una fuente de información indispensable para analizar el diseño de la forma, las dimensiones del canal y la caracterización del funcionamiento de dicho mezclador MHD. Además, se requiere experimentar con los efectos de la variación de intensidad de campos magnético y eléctrico inducidos en el fluido, así como con la conductividad del fluido.

En previas experimentaciones, se recurrió al análisis visual del flujo usando tinte para revelar su comportamiento (Pérez-Barrera J., Ortiz A., 2016). Sin embargo, a través de esta examinación solo se lograba identificar los vórtices y su tiempo de permanencia cuando el flujo era turbulento, esto debido a un cambio brusco de voltaje, ver figura 5.10. Como es bien conocido los sistemas de visión permiten modelar el comportamiento de fluidos en sistemas mecánicos manipulados por MHD a través del trazado de partículas, por tal razón se procedió al diseño de un sistema de visión con los requerimientos necesarios para poder medir el flujo en el mezclador MHD propuesto. Con este propósito se diseñó el sistema de visión apoyado en el análisis de los campos de velocidad presentes en un fluido a partir del trazado de partículas, a través de procesamiento digital basado en un análisis de velocimetría de partículas en las imágenes (PIV), cuya

metodología de diseño se describe en el capítulo 4 y a continuación se resume brevemente sus componentes y configuración, para dar lugar al análisis de la estimación de su incertidumbre.

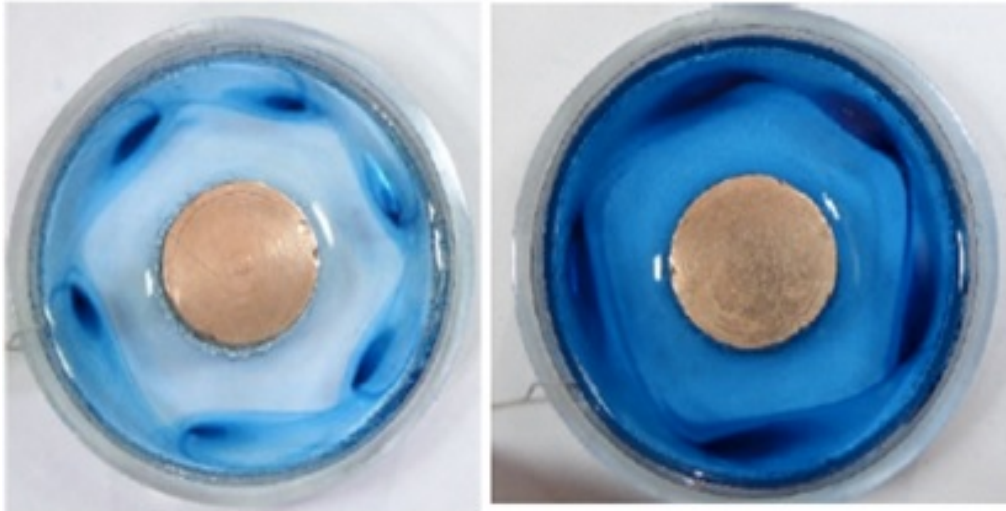


Figura 5.10: Análisis visual de vórtices.

En la figura 5.11, se observan los componentes del sistema de visión:

- El mezclador MHD con canal anular.
- Fluido dopado con esferas S-HGS.
- Fuente de corriente directa.
- Imán.
- Soporte para cámara de 25 cuadros por segundo (FPS, por sus siglas en inglés), e iluminación basada en campo oscuro.
- Sistema de cómputo con programa MATLAB y aplicación PIVLAB ([Thielicke and Stamhuis, 2014](#)).

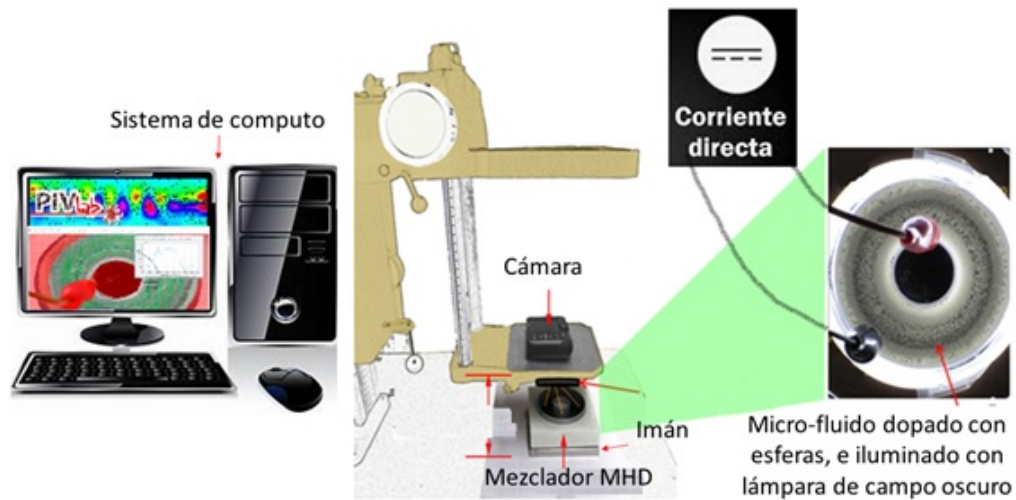


Figura 5.11: Sistema de visión para medición de velocidad de un fluido en el mezclador MHD.

A través de la aplicación PIVLAB, se realiza la carga de cuadros con la secuencia de estilo $x_1 - x_2, x_2 - x_3, \dots, x_{n-1} - x_n$. Se selecciona la región de interés (ROI, de sus siglas en inglés, Region of Interest), y se aplica la máscara a todos los cuadros. Se pre-procesan las imágenes con el algoritmo “contrast-limited adaptive histogram equalization (CLAHE)” con una ventana con tamaño de 20 píxeles. Para el procesamiento se utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés, Fast Fourier Transform) con 4 ciclos de interrogación de áreas de 128, 64, 32 y 16 píxeles. Se utiliza interpolación lineal con una ventana de Gauss 2x3-puntos para la estimación de sub-píxeles. El sistema se calibra con el diámetro interno del mezclador MHD (37.52 mm) y con el intervalo de tiempo provisto por la cámara entre cuadros ($dt = 40ms$).

La cuantificación de la incertidumbre en sistemas de PIV aún es un campo de experimentación en desarrollo, se han realizado algunas estimaciones a partir de datos sintéticos, pero al evaluar dicha incertidumbre con datos reales se ha observado que no han sido consideradas las fuentes de error presentes en el proceso real de medición. La definición de incertidumbre de cualquier medición se establece como el intervalo en el cual reside el error, y se detalla una metodología de medición de incertidumbre en donde se concluye que para mediciones basadas en PIV el error de mediciones depende de varios factores que varían en el dominio del espacio y del tiempo produciendo un error no uniforme a través de las mediciones de todo el fluido.

Entre estos factores se encuentran el algoritmo PIV utilizado, las características del fluido, el diámetro de las partículas (esferas), la densidad de las partículas, el patrón de desplazamiento de las partículas y su gradiente de velocidad, así como de todos los parámetros utilizados en la configuración de la experimentación. Considerando estos antecedentes, se decide cuantificar la incertidumbre del sistema de visión para las condiciones de la experimentación descrita en la tabla 5.4.

Para cada nivel de voltaje aplicado (de 0.5V a 6.0 V) al mezclador MHD se realizó la medición de 30 perfiles de velocidad distribuidos en 3 cuadrantes. Se estimó la incertidumbre de medida U de acuerdo a la ecuación (5.4) para cada uno de estos niveles de voltaje a un nivel de confianza del 99 %, donde $k=3$ es el factor de cobertura, debido a que los datos presentan una distribución normal y s es la desviación estándar de la distribución de datos. De manera que la estimación de medida M esta definida por la ecuación (5.5), donde V es la media aritmética de los datos. Se obtuvo la gráfica de calibración mostrada en la figura 5.12 de acuerdo a los datos de las tablas 5.5 y 5.6. Donde podemos observar que el canal de incertidumbre para las mediciones se vuelve regular a partir de mediciones de velocidad mayores a 0.003 m/s, para lo cual se estimó una incertidumbre de medición de 0.001152 m/s para perfiles de medición con comportamiento de velocidad estables, a partir del promedio de las incertidumbres (U) obtenidas de las mediciones de los perfiles de velocidad con diferencias de potencial de 4.0, 4.5, 5.0, 5.55, y 6.0 volts.

$$U = k\varphi \quad (5.4)$$

$$M = V \pm U \quad (5.5)$$

Tabla 5.5: Estimación de incertidumbre para diferencias de potencial de 0.5V a 3.5V..

Perfil	0.5 V	1.0 V	1.5 V	2.0 V	2.5 V	3.0 V	3.5 V
1	0.003023	0.001162	0.009114	0.000748	0.001580	0.001492	0.002402
2	0.000739	0.001150	0.005671	0.001531	0.000595	0.000713	0.001401
3	0.000634	0.001123	0.000750	0.000597	0.000764	0.000502	0.001365
4	0.001313	0.000907	0.000992	0.000901	0.000910	0.001390	0.001617
5	0.003096	0.000912	0.000937	0.000805	0.000827	0.003514	0.001381
6	0.001699	0.003824	0.001100	0.001439	0.000798	0.001052	0.002704
7	0.001610	0.001783	0.001292	0.000806	0.001359	0.001024	0.001519
8	0.002019	0.000900	0.001309	0.000936	0.001320	0.000671	0.001323
9	0.000944	0.001383	0.001474	0.001052	0.000990	0.001588	0.001322
10	0.002341	0.001346	0.000990	0.001974	0.000785	0.000804	0.001338
11	0.000960	0.004175	0.001292	0.001448	0.002541	0.001377	0.001448
12	0.000631	0.000492	0.000440	0.000368	0.000717	0.000712	0.001179
13	0.002917	0.001591	0.001537	0.000966	0.000694	0.001164	0.004536
14	0.000978	0.005884	0.001733	0.000911	0.001842	0.001130	0.001703
15	0.004228	0.010132	0.002497	0.000590	0.001088	0.001137	0.001744
16	0.004580	0.001570	0.010406	0.000880	0.001432	0.001127	0.001664
17	0.001016	0.001635	0.001567	0.001411	0.002668	0.001443	0.002176
18	0.001693	0.003469	0.001368	0.001257	0.001678	0.002156	0.003114
19	0.004580	0.002873	0.001634	0.008655	0.001888	0.001201	0.001734
20	0.001955	0.011061	0.002347	0.000817	0.002069	0.001663	0.002115
21	0.003010	0.001615	0.001548	0.001215	0.002149	0.002403	0.008598
22	0.002548	0.000987	0.002151	0.001269	0.001298	0.001080	0.004475
23	0.000563	0.000518	0.004816	0.000466	0.000646	0.000988	0.001052
24	0.003970	0.010435	0.002302	0.008710	0.002811	0.001373	0.002676
25	0.000876	0.000547	0.000762	0.000412	0.000552	0.001201	0.000987
26	0.004301	0.000689	0.001205	0.000441	0.000606	0.000682	0.001333
27	0.004217	0.001233	0.000815	0.000649	0.000617	0.000710	0.002527
28	0.001009	0.000971	0.002103	0.000436	0.000574	0.000850	0.002237
29	0.001926	0.004479	0.000684	0.000921	0.000512	0.000907	0.001016
30	0.000407	0.000726	0.014632	0.000731	0.000923	0.000690	0.001209
V	0.002126	0.002652	0.002649	0.001445	0.001241	0.001225	0.002130
s	0.0014000	0.0030000	0.0033000	0.0020000	0.0006830	0.0006510	0.0015000
U	0.004200	0.009000	0.009900	0.006000	0.002049	0.001953	0.004500
Límite Inferior	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Límite Superior	0.006326	0.011652	0.012549	0.007445	0.003290	0.003178	0.006630

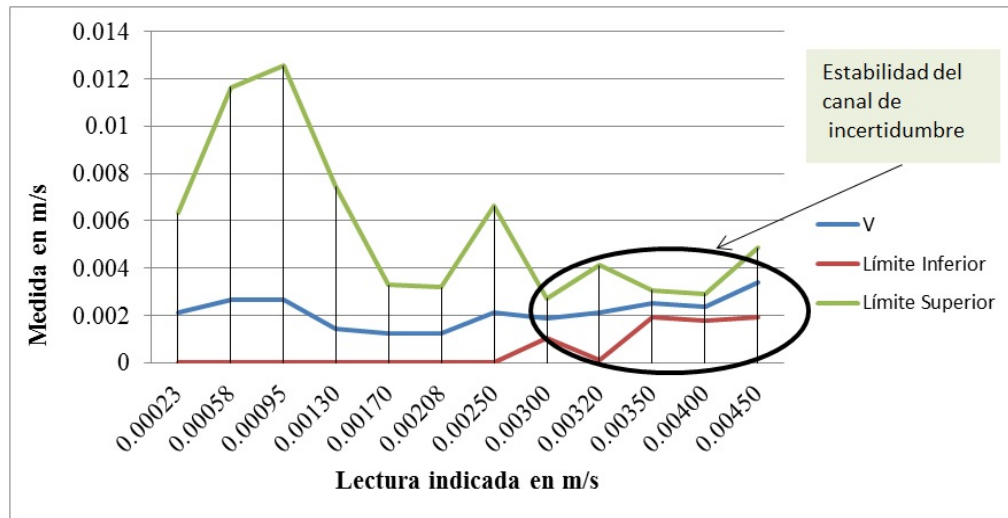


Figura 5.12: Gráfico de calibración, $-U$ (Límite Inferior), $+U$ (Límite Superior).

Tabla 5.6: Estimación de incertidumbre para diferencias de potencial de 4.0V a 6.0V.

Perfil	4.0 V	4.5 V	5.0 V	5.5 V	6.0 V
1	0.002238	0.002276	0.002660	0.002300	0.003919
2	0.001658	0.002271	0.002674	0.002006	0.003262
3	0.002333	0.003768	0.002934	0.002228	0.003444
4	0.001757	0.002081	0.002444	0.002522	0.003421
5	0.002023	0.002168	0.002761	0.002787	0.002954
6	0.001772	0.002168	0.002678	0.002282	0.002930
7	0.001522	0.001986	0.002341	0.002465	0.003303
8	0.001592	0.002129	0.002645	0.002268	0.003143
9	0.001552	0.002042	0.002291	0.002308	0.003891
10	0.001536	0.001725	0.002436	0.002585	0.003782
11	0.001962	0.001998	0.002319	0.002405	0.003664
12	0.001953	0.002047	0.002668	0.002322	0.001234
13	0.001543	0.001956	0.002448	0.002384	0.003269
14	0.001758	0.002011	0.002197	0.002522	0.003324
15	0.001756	0.002011	0.002197	0.002315	0.003538
16	0.001530	0.001767	0.002453	0.002475	0.003278
17	0.002068	0.001774	0.002287	0.002491	0.003819
18	0.001774	0.001912	0.002588	0.002359	0.003262
19	0.002004	0.004054	0.002387	0.002363	0.003585
20	0.001730	0.004054	0.002235	0.002243	0.003202
21	0.001854	0.001902	0.002696	0.002191	0.004018
22	0.001807	0.001447	0.002287	0.002398	0.003319
23	0.002500	0.001777	0.002533	0.002035	0.003551
24	0.002301	0.001836	0.002512	0.002843	0.003570
25	0.001931	0.001543	0.002240	0.002382	0.003208
26	0.001630	0.001847	0.002639	0.002220	0.003470
27	0.002000	0.001677	0.002563	0.002176	0.003725
28	0.002224	0.001712	0.002369	0.002152	0.003424
29	0.002231	0.001757	0.002510	0.002362	0.003608
30	0.002143	0.002100	0.002713	0.002174	0.003623
V	0.001889	0.002127	0.002490	0.002352	0.003391
s	0.0002750	0.000865	0.000195	0.000187	0.000489
U	0.000825	0.001995	0.000585	0.000561	0.001467
Límite Inferior	0.001064	0.000132	0.001905	0.001791	0.001924
Límite Superior	0.002714	0.004122	0.003075	0.002913	0.004858

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Existen estudios sobre flujos MHD en canales anulares con metales líquidos, pero pocos trabajos han sido publicados en el caso de los electrolitos, además no se encontró registro en la literatura científica de que se hayan utilizado las esferas S-HGS para proporcionarle conductividad al fluido y solucionar problemas de oxidación y burbujas propios del uso de electrolitos. En algunos de estos estudios se menciona el comportamiento estable e inestable del fluido y que se requiere medir este fenómeno, sin embargo en muchos de ellos no se ha realizado debido a la falta de un sistema de medición.

En esta tesis se resumen los fundamentos científicos para la aplicación de fluidos y MHD en sistemas mecánicos, se describe la configuración de un mezclador MHD propuesto, el cual opera con un fluido de baja conductividad debido al dopado de esferas S-HGS en agua destilada, sin problemas de oxidación, ni burbujas. Se evalúa el comportamiento del fluido en su etapa estable a través de la simulación de las distintas configuraciones de mezcladores MHD encontrados en la literatura científica. Se demuestra la validez experimental del modelo matemático a través de un sistema de visión desarrollado específicamente para la configuración del mezclador MHD propuesto. Se realiza un análisis de incertidumbre y se entrega la tabla de calibración del sistema de visión para la medición de la máxima velocidad del fluido en su perfil de velocidad. Donde podemos observar que el canal de incertidumbre para las mediciones se vuelve regular a

partir de mediciones de velocidad mayores a 0.003 m/s, para lo cual se estimó una incertidumbre de medición de 0.001152 m/s para perfiles de medición con comportamiento de velocidad estables, a partir del promedio de las incertidumbres (U) obtenidas de las mediciones de los perfiles de velocidad con diferencias de potencial de 4.0, 4.5, 5.0, 5.55, y 6.0 volts. Este análisis de incertidumbre permitirá tomar decisiones y controlar el sistema de medición para avanzar a la medición del perfil de velocidad completo en 2D y posteriormente replicar estas mediciones en n cantidad de planos para obtener el perfil de velocidad en 3D, ya que como futuras actividades se prevé la necesidad de validar no solo la máxima velocidad del perfil, si no el perfil completo para posteriormente diseñar un mezclador MHD que permita la penetración de hojas de láser a fin de poder desarrollar un sistema de visión que pueda medir simultáneamente varios planos a través de la profundidad del canal a fin de recrear el comportamiento del fluido en 3 dimensiones.

CAPÍTULO 7

PRODUCTOS ACADÉMICOS

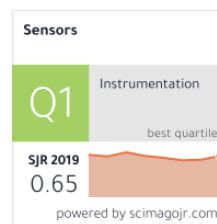
La publicación del trabajo desarrollado en esta investigación tiene como finalidad divulgar y contrastar los productos académicos y las aportaciones originadas, someterlos a debate, validación y retroalimentación para generar nuevo conocimiento que contribuya con el bienestar social y humano, y a nuevas investigaciones. Para el logro de este objetivo, los productos obtenidos fueron publicados en diferentes revistas científicas de diversas editoriales, en un capítulo de libro y congresos nacionales e internacionales.

7.1. Artículos publicados en revistas arbitradas e indexadas

- Valenzuela-Delgado, M., Flores-Fuentes, W., Rivas-López, M., Sergiyenko, O., Lindner, L., Hernández-Balbuena, D., y Rodríguez-Quñonez, J. C. (2018). Electrolyte Magneto-hydrodynamics Flow Sensing in an Open Annular Channel-A Vision System for Validation of the Mathematical Model. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18(6), 1683. *https://doi.org/10.3390/s18061683*
- Valenzuela-Delgado, M., Ortiz-Pérez, A.S., Flores-Fuentes, W., Bravo-Zanoguera, M.E., Acuña-Ramírez, A., Ocampo-Díaz, J.D., Hernández-Balbuena, D., Rivas-López, M. y Sergiyenko, O. Theoretical and experimental study of low conducting fluid MHD flow in an open annular channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 127, Part




C, 2018, Pages 322-331, ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.047>

- Flores-Fuentes, W., Valenzuela-Delgado, M., Cáceres-Hernández, D., Sergiyenko, O., Bravo-Zanoguera, M. E., Rodríguez-Quñonez, J. C. y Rivas-López, M. (2019). Magneto-hydrodynamic velocity profile measurement for microelectromechanical systems micro-robot design. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. <https://doi.org/10.1177/1729881419875611>



Article

Electrolyte Magneto-hydrodynamics Flow Sensing in an Open Annular Channel—A Vision System for Validation of the Mathematical Model

Mónica Valenzuela-Delgado, Wendy Flores-Fuentes * , Moisés Rivas-López ,
Oleg Sergiyenko , Lars Lindner, Daniel Hernández-Balbuena and Julio C. Rodríguez-Quinones

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali C.P. 21280, Baja California, Mexico; monicavd74@uabc.edu.mx (M.V.-D.); mrvivas@uabc.edu.mx (M.R.-L.); srgnk@uabc.edu.mx (O.S.); lindner.lars@uabc.edu.mx (L.L.); dhernan@uabc.edu.mx (D.H.-B.); julio.rodriguez81@uabc.edu.mx (J.C.R.-Q.)

* Correspondence: flores.wendy@uabc.edu.mx; Tel.: +55-686-566-4270

Received: 7 March 2018; Accepted: 25 April 2018; Published: 24 May 2018



Abstract: Magneto-hydrodynamics (MHD) is becoming more popular every day among developers of applications based on microfluidics, such as “lab on a chip” (LOC) and/or “micro-total analysis systems” (micro-TAS). Its physical properties enable fluid manipulation for tasks such as pumping, networking, propelling, stirring, mixing, and even cooling without the need for mechanical components, and its non-intrusive nature provides a solution to mechanical systems issues. However, these are not easy tasks. They all require precise flow control, which depends on several parameters, like microfluidics conductivity, the microfluidics conduit (channel) shape and size configuration, and the interaction between magnetic and electric fields. This results in a mathematical model that needs to be validated theoretically and experimentally. The present paper introduces the design of a 3D laminar flow involving an electrolyte in an annular open channel driven by a Lorentz force. For an organized description, first of all is provided an introduction to MHD applied in microfluidics, then an overall description of the proposed MHD microfluidic system is given, after that is focused in the theoretical validation of the mathematical model, next is described the experimental validation of the mathematical model using a customized vision system, and finally conclusions and future work are stated.

Keywords: magneto-hydrodynamics; sensing; microfluidics; vision system

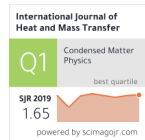
1. Introduction

The application of magneto-hydrodynamics (MHD) in microfluidics represents a new trend during the last twenty years. Micro-applications started to develop and surged with the need to propel, stir, and control flows to perform tasks such as mixing and networking at the micro-scale. They have been particularly useful for microfluidic applications where a conductive fluid needs to be manipulated to perform specific operations. The progress achieved in this multidisciplinary field and its incursion into a big variety of applications can be followed through the scientific literature. Nevertheless, it still remains as an area for research that requires further development [1]. Its principle of operation is based on the Lorentz force acting in an electrical conductive solution, in the presence of magnetic and electric fields, resulting in a motion flow. The most used solutions in the beginnings of MHD research were liquid metals and ionized gases, though in the more recent scientific literature electrolyte solutions have made an incursion [2]. This is because the flow in a MHD stirrer depends on the solution electrical conductivity. Electrolytes are a convenient option, even though a nonlinear electrode kinetics phenomenon occurs due to the use of electrolytes. The electrolyte flow is usually contaminated



Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Heat and Mass Transfer

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijhmt

Theoretical and experimental study of low conducting fluid MHD flow in an open annular channel

M. Valenzuela-Delgado^a, A.S. Ortiz-Pérez^{a,*}, W. Flores-Fuentes^a, M.E. Bravo-Zanoguera^a, A. Acuña-Ramírez^a, J.D. Ocampo-Díaz^a, D. Hernández-Balbuena^a, M. Rivas-López^b, O. Sergiyenko^b^a Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez S/N, Unidad Universitaria, Mexicali 21280, Baja California, Mexico^b Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez S/N, Unidad Universitaria, Mexicali 21280, Baja California, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 April 2018

Received in revised form 8 August 2018

Accepted 13 August 2018

Keywords:

Annular MHD flow

Microfluidics

Particle Image Velocimetry

Fourier-Bessel series

ABSTRACT

In this paper, we research theoretically and experimentally the 3D laminar flow of an electrolyte in an annular open channel driven by a Lorentz force. The annular duct is formed by two concentric electrically conducting cylinders and limited by an insulating bottom wall. The interaction between a uniform magnetic field along the axial direction and a radial electric current produces a Lorentz force that drives the fluid in the azimuthal direction, producing a Magnetohydrodynamic (MHD) flow. The effect of the three walls is analyzed in detail by considering the gap between the cylinders as well as the depth of the channel. The steady flow is solved using a Galerkin method with orthogonal Bessel-Fourier series. A quasi-analytic approximation for velocity is found. Velocity profiles are explored by varying the depth of the channel and the gap between the cylinders in order to show the effect of the walls on the flow configuration. Results are compared with experimental data provided by PIV technique as well as in those found in scientific literature.

© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Recent advances in Micro-Electromechanical Systems (MEMS) include improvements done in the propulsion of fluids, either through mechanical or dynamics pumps. Because of the advantage of dynamics pumps over mechanical ones, a lot of micropumps have been designed in order to drive fluids involving no moving parts. These have been particularly useful in microfluidic applications where a conducting fluid needs to be transported for several operations in micro Total Analysis Systems (μ TAS). Operations in μ TAS include control, mixing, separation and chemistries processes, such as operations in a small laboratory, for this reason, are sometimes called Lab-On-Chip (LOC) systems. The flow induced by the MHD effects, as a result of the Lorentz force produced by the interaction between an electric current within the fluid and an external magnetic field, is a feasible way to pump fluid in microfluidic and laboratory devices. This phenomenon is particularly important in processes in microreactors where Polymerase Chain Reaction (PCR) is used for the amplification of Deoxyribonucleic Acid (DNA) [1] and mass micromixing processes [2,3]. Some devices perform PCR for nucleic acid detection and amplification utilizes MHD for fluid propulsion and sensing [4]. Electrolytes are


fluids of small conductivity present in microfluidics, this property allows them to be propelled without the flow induces a considerable change in the applied electric field, in consequence, the velocity is uncoupled from the potential difference; this does not occur for liquid metal where the electric potential and velocity are coupled and the induced current cannot be ignored causing an additional drag force that becomes an important factor into the flow's configurations. However, additional drag force can appear due to friction with the boundaries delimiting the fluid. In open channels, the presence of the bottom wall influences the flow configuration acting like an additional drag force in the fluid. Studies of these walls have been done in straight channels and annular ones. The problem of the flow in the annular channel driven by a Lorentz force has been studied with 2D quasi-analytical approximation including the effect of the bottom wall [5]. However, a 3D flow must be considered taking into account the effects of the walls. Analytical solutions for 2D flow (ignoring the effects of the bottom and lateral walls) and many studies with infinite cylinders have been done including stability. However, when the depth of the channel is finite, the effect of the wall is particularly important in determining the basic flow and the influence of its stability. The case of the closed channel has been dealt by Ortiz et al. [6] including a general slip in the four walls, but the particular case of free surface on the top deserves special attention because the walls' effects can be translated to the flow on the surface of the

* Corresponding author.

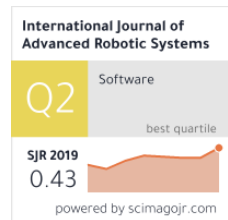
E-mail address: sebastian.ortiz@uabc.edu.mx (A.S. Ortiz-Pérez).



Magnetohydrodynamic velocity profile measurement for microelectromechanical systems micro-robot design

Wendy Flores-Fuentes¹ , Mónica Valenzuela-Delgado¹, Danilo Cáceres-Hernández², Oleg Sergiyenko³, Miguel E Bravo-Zanoguera¹, Julio C Rodríguez-Quiñonez¹, Daniel Hernández-Balbuena¹ and Moisés Rivas-López²

International Journal of Advanced
Robotic Systems
September-October 2019: 1–16
© The Author(s) 2019
DOI: 10.1177/11729881419875611
journals.sagepub.com/home/arx



Abstract

The development of microelectromechanical systems based on magnetohydrodynamic for micro-robot applications requires precise control of the micro-flow behavior. The micro-flow channel design and its performance under the influence of the Lorentz force is a critical challenge, the mathematical model of each magnetohydrodynamic device design must be experimentally validated before to be employed in the fabrication of microelectromechanical systems. For this purpose, the present article proposes the enhancement of a particle image velocimetry measurement process in a customized machine vision system. The particle image velocimetry measurements are performed for the micro-flow velocity profile mathematical model validation of a magnetohydrodynamic stirrer prototype. Data mining and filtering have been applied to a raw measurement database from the customized machine vision system designed to evaluate the magnetohydrodynamic stirrer prototype. Outlier's elimination and smoothing have been applied to raw data to approximate the particle image velocimetry measurements output to the velocity profile mathematical model to increase the accuracy of a customized machine vision system for two-dimensional velocity profile measurements. The accurate measurement of the two-dimensional velocity profile is fundamental owing to the requirement of future enhancement of the customized machine vision system to construct the three-dimensional velocity profile of the magnetohydrodynamic stirrer prototype. The presented methodology can be used for measurement and validation in the design of microelectromechanical systems micro-robot design and any other devices that require micro-flow manipulation for tasks such as stirring, pumping, mixing, networking, propelling, and even cooling.

Keywords

Micro-robot, MEMS, MHD, PIV, data mining, filtering, measurements, machine vision

Date received: 5 June 2019; accepted: 17 August 2019

Topic: Vision Systems

Topic Editor: Antonio Fernandez-Caballero

Associate Editor: Lars Lindner

Introduction

The most common industrial and civil applications that use robots for automation are the automotive industry, food industry, and manufacturing industries of diverse products, to mention some. The sizes of those kinds of robots are on an adequate scale for human handling. Most of those robots

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México

² Laboratorio de Sistemas Inteligentes, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, República de Panamá

³ Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México

Corresponding author:

Wendy Flores-Fuentes, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Bv. Benito Juárez S/N, Parcela 44, 21280 Mexicali, Baja California 21100, Mexico.

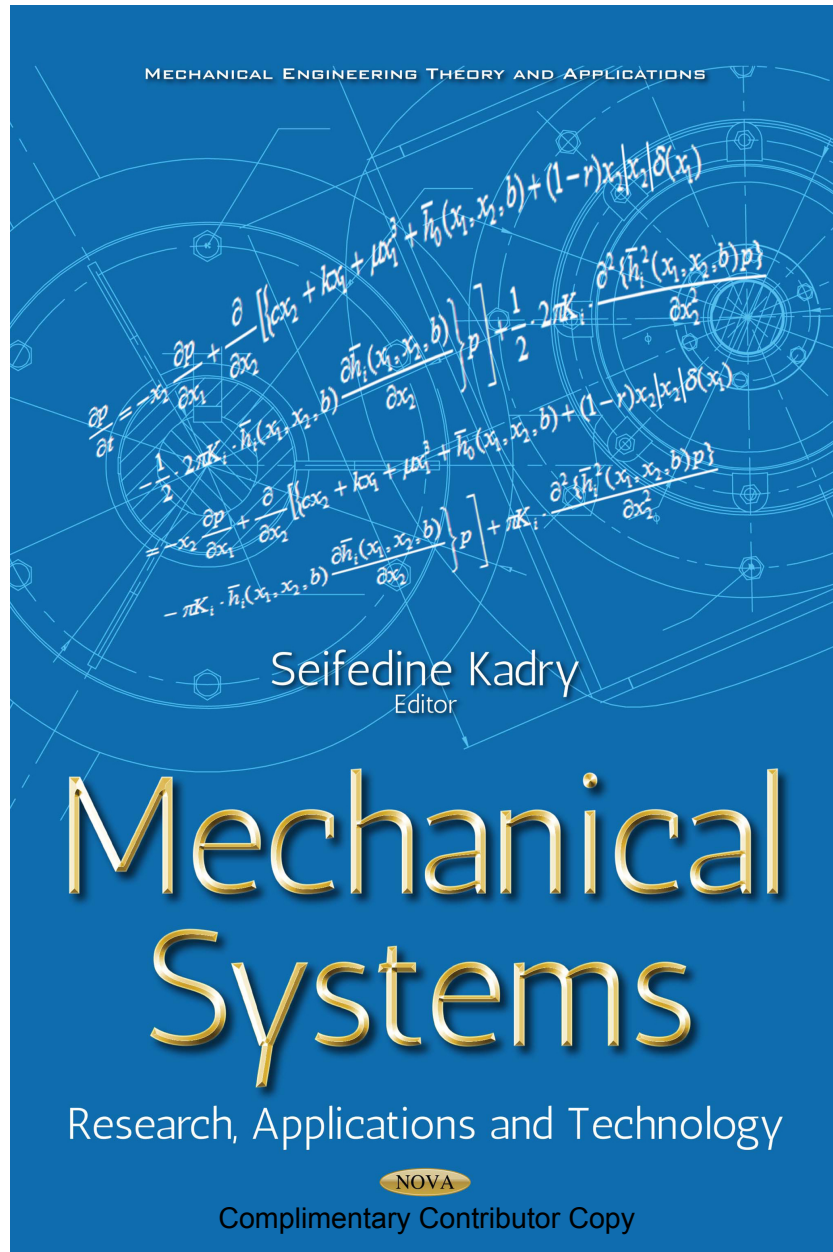
Email: flores.wendy@uabc.edu.mx



Creative Commons CC BY: This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License (<http://www.creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) which permits any use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is attributed as specified on the SAGE and Open Access pages (<https://us.sagepub.com/en-us/nam/open-access-at-sage>).

7.2. Capítulos de libros

Flores-Fuentes, W., Valenzuela Delgado, M., Bravo-Zanoguera, M., Lopez, M., Sergiyenko, O., Lindner, L., Ortiz-Perez, A. S., Hernandez-Balbuena, D., y Rodríguez-Quñonez, J. (2017). Mechanical systems and microfluidics: The application of a vision system in the testing offluids behavior. In *Mechanical Systems: Research, Applications and Technology*, pages 73–100.



Copyright © 2017 by Nova Science Publishers, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means: electronic, electrostatic, magnetic, tape, mechanical photocopying, recording or otherwise without the written permission of the Publisher.

We have partnered with Copyright Clearance Center to make it easy for you to obtain permissions to reuse content from this publication. Simply navigate to this publication's page on Nova's website and locate the "Get Permission" button below the title description. This button is linked directly to the title's permission page on copyright.com. Alternatively, you can visit copyright.com and search by title, ISBN, or ISSN.

For further questions about using the service on copyright.com, please contact:

Copyright Clearance Center

Phone: +1-(978) 750-8400 Fax: +1-(978) 750-4470 E-mail: info@copyright.com.

NOTICE TO THE READER

The Publisher has taken reasonable care in the preparation of this book, but makes no expressed or implied warranty of any kind and assumes no responsibility for any errors or omissions. No liability is assumed for incidental or consequential damages in connection with or arising out of information contained in this book. The Publisher shall not be liable for any special, consequential, or exemplary damages resulting, in whole or in part, from the readers' use of, or reliance upon, this material. Any parts of this book based on government reports are so indicated and copyright is claimed for those parts to the extent applicable to compilations of such works.

Independent verification should be sought for any data, advice or recommendations contained in this book. In addition, no responsibility is assumed by the publisher for any injury and/or damage to persons or property arising from any methods, products, instructions, ideas or otherwise contained in this publication.

This publication is designed to provide accurate and authoritative information with regard to the subject matter covered herein. It is sold with the clear understanding that the Publisher is not engaged in rendering legal or any other professional services. If legal or any other expert assistance is required, the services of a competent person should be sought. FROM A DECLARATION OF PARTICIPANTS JOINTLY ADOPTED BY A COMMITTEE OF THE AMERICAN BAR ASSOCIATION AND A COMMITTEE OF PUBLISHERS.

Additional color graphics may be available in the e-book version of this book.

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

ISBN: ; 9: /3/75834/5: 5/: "gDqqm#

Published by Nova Science Publishers, Inc. † New York

Complimentary Contributor Copy

In: Mechanical Systems
Editor: Seifedine Kadry

ISBN: 978-1-53612-370-8
© 2017 Nova Science Publishers, Inc.

Chapter 4

**MECHANICAL SYSTEMS AND MICROFLUIDICS:
THE APPLICATION OF A VISION SYSTEM
IN THE TESTING OF FLUIDS BEHAVIOR**

*Wendy Flores-Fuentes**, *Mónica Delgado-Valenzuela,*
Miguel E. Bravo-Zanoguera, Moisés Rivas-Lopez,
Oleg Sergiyenko, Lars Lindner, Alejandro S. Ortiz-Perez,
Daniel Hernandez-Balbuena and Julio C. Rodríguez-Quñonez

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California,
Mexicali, Baja California, Mexico

ABSTRACT

With the advancing development of computational techniques, the modeling of fluids behavior is becoming every day more precise, enabling the use of microfluidics in the design of sophisticated micro-electromechanical systems (MEMS) for all those functional and commercial applications that require a precise control at the micro scale.

Mechanical systems require energy to operate since their essential task is to set parts in motion, the application of microfluidics may produce the same effect as the desired parts movement, providing to the MEMS with the capacity to accomplish their functions as well as pumping fluids.

Currently, almost all the conventional mechanisms may lose certain amounts of energy due to some conditions such as friction from their parts, resulting in inconvenient for some applications. The design of MEMS is in constantly evolving and several disciplines are joining to the development of enhanced systems. One is the case of the magnetohydrodynamics (MHD), which provides an alternative solution to friction, thanks to the advantage of its non-intrusive nature, lack of mechanical moving elements reduce

* Corresponding Author Email: flores.wendy@uabc.edu.mx.

Complimentary Contributor Copy

7.3. Artículos publicados en congresos

- Valenzuela-Delgado, M., Flores-Fuentes, W., Bravo-Zanoguera, M.E., Ortiz-Perez, A.S., Rivas-Lopez, M., Gonzalez-Navarro, F.F., y Sergiyenko, O.(2016). Sistema de Visión para Conocer el Campo de Velocidades en un Fluido mediante el Trazado de Partículas. ENCuentro Nacional de Ciencias de la Computación, Tecnologías emergentes y avances de la computación en México – ENC 2016. Chihuahua, Chih., México. ISBN: 978-607-9424-94-7
- Valenzuela Delgado, M., Flores-Fuentes, W., Bravo-Zanoguera, M., Ortiz-Perez, A. S., Hernandez-Balbuena, D., Lopez, M., Sergiyenko, O., y González-Navarro, F. F. (2017). Machine vision system to measuring the velocity field in a fluid by Particle Image Velocimetry: Special Case of Magnetohydrodynamics. IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, 2017, pp. 1621-1625, doi: 10.1109/ISIE.2017.8001489.
- Flores-Fuentes, W., Valenzuela-Delgado, M., Gonzalez-Navarro, F.F., Cáceres-Hernández, D., Sergiyenko, O., Rodríguez-Quiñonez, J. C., Rivas-López, M., Bravo-Zanoguera, M. E. y Hernandez-Balbuena, D (2019). An MHD Stirrer 2D Velocity Profile Measurement Validation Through a Machine Vision System. IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 5584-5589, doi: 10.1109/IECON. 2019.8927393.

Sistema de visión para conocer el campo de velocidades en un fluido mediante el trazado de partículas

Mónica Valenzuela-Delgado
Miguel E. Bravo-Zanoguera
Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ingeniería, Mexicali, B.C., México
Blvd Benito Juárez s/n C.P. 21280
52 686 566 4270
monicavd74@uabc.edu.mx

Wendy Flores-Fuentes
Alejandro S. Ortiz-Pérez
Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ingeniería, Mexicali, B.C., México
52 686 566 4270
flores.wendy@uabc.edu.mx

Moisés López-Rivas
Félix F. González-Navarro
Oleg Sergiyenko
Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Ingeniería, Mexicali, B.C., México
52 686 565 4431
mrivas@uabc.edu.mx

RESUMEN

La medición del movimiento de un fluido en un sistema magneto hidrodinámico es una fuente de información para el diseño de agitadores electromagnéticos. Por lo tanto, se requiere experimentar con los efectos de intensidad de campos eléctricos y magnéticos inducidos en un fluido, por medio de la medición de la velocidad, dirección, y aceleración del flujo. En experimentaciones realizadas, se ha recurrido al análisis visual del flujo usando tinte para revelar los vórtices y su tiempo de permanencia [1], pero se requiere de una medición y un análisis más detallado de los resultados de la experimentación, con este propósito se inicia una línea de investigación para el diseño de un sistema de visión para el análisis de los campos de velocidad presentes en un fluido a partir del trazado de partículas, por medio de procesamiento digital basado en un análisis de velocimetría por imágenes de partículas (PIV), cuya metodología de diseño se describe en este documento.

Conceptos CCS

Computing methodologies → Massively parallel and high-performance simulations.

Palabras Clave

Sistema de Visión; velocimetría por imágenes de partículas; magneto hidrodinámica.

1. INTRODUCCIÓN

La magneto-hidrodinámica (MHD) estudia la dinámica de fluidos conductores de electricidad en campos magnéticos y eléctricos. Tiene aplicaciones en micro-reactores y micro-mezcladores [2]. La medición del movimiento del fluido en un sistema MHD es una fuente de información para el diseño de micro-mezcladores. Existen estudios sobre flujos MHD en canales anulares con metales líquidos, pero pocos trabajos publicados para el caso de electrolitos. En estos estudios se menciona una inestabilidad del campo del flujo [3] y que se requiere medir la influencia de este fenómeno. Experimentos realizados por la UNAM, en colaboración con UABC, describen una inestabilidad en la superficie libre de un flujo generado por una fuerza de Lorentz azimutal aplicada a un electrolito contenido en un agitador electromagnético abierto con geometría cilíndrica. Se ha realizado el análisis visual del flujo usando tinte para revelar los vórtices y su tiempo de permanencia. Estos vórtices son visibles claramente sobre la superficie del electrolito. Las imágenes observadas se procesaron mediante la herramienta para aplicaciones generales

de Matlab, pero un análisis más detallado es requerido, a través de código personalizado a la aplicación. Una práctica común para el análisis de la dinámica de fluidos, es la velocimetría por imágenes de partículas (PIV), debido a los avances recientes en tecnologías laser y procesamiento de imágenes digitales [4]. Aunque también existen otros métodos basados en la medición de partículas tales como en [5], la de mayor interés es PIV, no solo por el avance tecnológico, sino que esta técnica identifica mayor cantidad de parámetros geométricos para la recreación de campos de velocidad en los vórtices generados en un fluido. Existen sistemas típicos PIV consistentes en una luz estroboscópica, una cámara CCD y un tanque cilíndrico en forma de torre que contiene las partículas donde estas fluyen hacia la superficie [6]. Este sistema típico no es funcional para todos los casos de análisis de la dinámica de fluidos [7] de tal modo que un sistema personalizado debe ser diseñado según la aplicación requerida. Por lo anterior, se pretende el diseño de un sistema PIV personalizado, ya que el fluido a analizar, es un electrolito en un agitador electromagnético cuyas características difieren de un sistema típico PIV. Para ello, se describen diversos sistemas PIV, se analizan los distintos algoritmos basados en correlación cruzada para medir la variación de velocidad, campos de vorticidad, espectro y otros parámetros pertinentes de turbulencia, se expone la metodología para resolver la problemática planteada y los resultados esperados.

2. METODOLOGÍA.

2.1. Montaje experimental y comportamiento del agitador electromagnético.

Al aplicar radialmente una corriente en un agitador electromagnético cilíndrico abierto, bajo un campo magnético axial aproximadamente uniforme se presenta una inestabilidad en un flujo de electrolito impulsado por una fuerza de Lorentz azimutal (ver figura 1).



Figura 1. Montaje experimental del agitador MHD. 1 {ferrita rectangular imán permanente; 2 {contenedor de plexiglás; 3 {electrodo exterior; 4 {electrodo interno; 5 {suministro de energía. Imagen tomada de Ref. [1].

Machine Vision System to Measuring the Velocity Field in a Fluid by Particle Image Velocimetry

Special Case of Magnetohydrodynamics.

Mónica Valenzuela-Delgado Wendy Flores-Fuentes,
Miguel E. Bravo-Zanoguera, Alejandro S. Ortiz-Pérez,
Daniel Hernandez-Balbuena.
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, B.C., México
monicavd74@uabc.edu.mx

Moises Rivas-López, Oleg Sergiyenko, Felix F.
Gonzalez-Navarro.
Instituto de Ingeniería
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, B.C., México
mrivas@uabc.edu.mx

Abstract— Measurement of the fluid movement in a Magnetohydrodynamic system is an important source of information for design micro-mixers and micro-reactors. The importance of Magnetohydrodynamic systems is that they do not involve mechanical elements which require constant maintenance or parts replacement due to wear. This motivates to experiment with the effects of electric intensity and magnetic fields induced in a fluid, by means of the flow speed measurement. In order to obtain such a measurement, we are designing a Machine Vision System to acquire the velocity fields present in a fluid based on Particle Image Velocimetry (PIV). The conventional PIV systems consisting of a strobe light, a CCD camera, and a cylindrical tower-shaped tank containing seed particles where they flow to the surface. This conventional PIV is not functional for our system, in such a way a customized PIV is needed since the fluid to be analyzed is an electrolyte on an electromagnetic stirrer, whose characteristics differ from a conventional PIV system.

Keywords— *Magnetohydrodynamic; Machine Vision System; Particle Image Velocimetry; electromagnetic stirrer.*

I. INTRODUCTION

Magnetohydrodynamics (MHD) is involved in several disciplines. In engineering it is related to metallurgical process such as plasma confinement, liquid-metal cooling of nuclear reactors and electromagnetic casting, among others [1]. The MHD generates a wide variety of applications such as MHD propels using only electric and magnetic fields without moving parts to wear out or require replacement and maintenance allowing its operation at higher temperatures [2]. In aerospace engineering, MHD is applied in the design of sensors to measure the angular velocity in inertial navigation systems because the sensor is able to survive in harsh environments [3]. In microfluidics, the MHD studies the behavior of the fluid in micro-mixers (micro-stirrer) and micro-reactors to produce a continuous flow, useful in the design of micro-pumps [4]. Dynamic micro-pumps can operate under principles of MHD effects, where the fluid is driven by a Lorentz force, produced by the interaction between a magnetic field and an electric current [5]. MHD micro-pumps are used for many applications in several configurations, including straight and cylindrical geometry channels. These applications include transport processes,

control, mixing and separation of substances among others [6]. Cylindrical geometry channels are preferable because they avoid the input effects that are characteristic of straight channels but instability is generated [7]. For this reason the analysis of the fluid behavior in an MHD micro-mixer of cylindrical geometry is the point of interest in this research. For the achievement of this aim, the analysis of the fluid velocity field in a MHD flow system is essential for flow control and minimizes instabilities. This motivates experiment with electric and magnetic fields intensity affects induced in a fluid, by means of the speed flow measurement. In order to obtain this measurement, we propose a novel design of Machine Vision System (MVS) to obtain the velocity fields present in a fluid based on Particle Image Velocimetry (PIV). The use of PIV is a common practice for the fluid dynamics analysis due to advances in laser technologies and digital image processing [8]. Although there are other methods based on particle measurement such as in [9], the most interesting is PIV, not only because of technological advance, but this technique identifies more geometric parameters for the recreation of velocity fields in vortices generated in a fluid. There are typical PIV systems consisting of a strobe light, a CCD camera and a cylindrical tower-shaped tank containing the particles where they flow to the surface [10]. The basic operation of a PIV consists of illuminating laterally the flow of seed particles from the transparent tower. Then, two pulses of the laser are realized in two different times synchronized with the camera capture. From these two captured images, the displacements of the particles are obtained to calculate the velocity of the fluid. This typical PIV is not functional for our system so that a custom PIV is necessary, as the fluid to be analyzed is an electrolyte in an electromagnetic stirrer whose characteristics differ from a typical PIV system. The fluid is delimited in the micro-stirrer laterally by two concentric aluminum cylinders that act as electrodes and vertically by electrically insulating wall. The non-transparent insulating structure does not allow lateral stroboscopic light. The only visible area of the fluid and the particles is on the surface of the annular channel. This requires a constant light without reflections and minimal variations because it is a transparent surface. We describe proposed vision system and mathematic method for its subsequent efficiency evaluation. In addition,

An MHD Stirrer 2D Velocity Profile Measurement Validation Through a Machine Vision System

Wendy Flores-Fuentes
Facultad de Ingeniería, Campus Mexicali
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, B. C., México
flores.wendy@uabc.edu.mx

Daniilo Cáceres-Hernández
Laboratorio de Sistemas Inteligentes
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Republica de Panamá
daniilo.caceres@utp.ac.pa

Moises Rivas-Lopez
Instituto de Ingeniería, Campus Mexicali
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, B. C., México
mrivas@uabc.edu.mx

Monica Valenzuela-Delgado
Facultad de Ingeniería, Campus Mexicali
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, B. C., México
monicavd74@uabc.edu.mx

Oleg Sergiyenko
Instituto de Ingeniería, Campus Mexicali
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, B. C., México
srgnk@uabc.edu.mx

Miguel E. Bravo-Zanoguera
Facultad de Ingeniería, Campus Mexicali
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, B. C., México
mbravo@uabc.edu.mx

Felix F. Gonzalez-Navarro
Instituto de Ingeniería, Campus Mexicali
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, B. C., México
fernando.gonzalez@uabc.edu.mx

Julio C. Rodríguez-Quíñonez
Facultad de Ingeniería, Campus Mexicali
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, B. C., México
julio.rodriguez81@uabc.edu.mx

Daniel Hernandez-Balbuena
Facultad de Ingeniería, Campus Mexicali
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, B. C., México
dheman@uabc.edu.mx

Abstract— The paper presents a technique developed for the enhancement of a Particle Image Velocimetry (PIV) measurement process in a customized machine vision system. The PIV measurements are performed for an accurate “Velocity Profile” mathematical model validation of a Magnetohydrodynamic (MHD) stirrer prototype. Data mining and filtering have been applied to a raw measurement database from the customized machine vision system designed to evaluate the MHD stirrer prototype. Outlier’s elimination and smoothing have been applied to raw data to approximate the PIV measurements output to the velocity profile mathematical model in order to increase the accuracy of a customized machine vision system for 2D velocity profile measurements. The accurate measurement of the 2D velocity profile is fundamental owing to the requirement of future enhancement of the customized machine vision system to construct the 3D velocity profile of the MHD stirrer prototype. The presented technique can be used for measurement and validation in the design of devices that require fluid manipulation for tasks such as pumping, networking, propelling, stirring, mixing, and even cooling without a need for mechanical components due to MHD’s non-intrusive nature provides a solution to mechanical moving elements issues.

Keywords— data mining, filtering, magnetohydrodynamics, particle image velocimetry, measurements, machine vision.

I. INTRODUCTION

The need for measuring the velocity of flowing stream in fluidic channels has given the origin to the particle image velocimetry technique (PIV). In the beginning, the first velocity flow measurements were done tracking the trajectory of debris over the flow surfaces of natural channels, such as rivers. With the development of the mechanics of fluids and the innovation in the use of fluids and microfluidics for a lot of applications, it was necessary to seed particles in the fluid and developed a technique to track their trajectory, measure their velocity and define its moving patterns, obtaining an accurate, quantitative measurement of fluid velocity vectors at a very large number of points simultaneously [1]. Besides due to the

development of computers, sophisticated machine vision systems for PIV have been designed for different applications. Where the PIV technique challenge and complexity depend on the characteristics of the application, as well as in the required resolution and accuracy. Examples of systems that use the PIV techniques to characterize its performance are the turbulent jets used in a wide variety of applications, as in marine propulsion, pollutant discharge or studies on the cardiocirculatory system [2]. The turbines for hydropower purposes to analyze from complex turbulent to two-phase flows [3]. Centrifugal pumps to measure the complex flow structures around the volute tongue region, where intense rotor-stator interaction appears [4]. Solid-liquid laminar stirrer tank with floating particles for industrial processes, such as the production processes of coatings, cosmetics and lubricating oil [5]. And microfluidics in annular channels for MHD stirrers [6]. Since micro-applications started to develop and surged the need of propelling, stir, and control flows to perform tasks such as mixing and networking at micro-scale, prototypes based on the principle of Magnetohydrodynamics (MHD) started to be considered [7]. MHD prototypes enable fluid manipulation for tasks such as pumping, networking, propelling, stirring, mixing, and even cooling without the need for mechanical components, its non-intrusive nature provides a solution to mechanical systems issues. The lack of mechanical elements reduces the possibilities of breakdowns, undesired vibrations, and noise. MHD is particularly useful for microfluidic applications where a conductive fluid needs to be manipulated to perform specific operations. The most common applications of MHD are micro-pumping (in lab on chip (LOC’s) and liquid chromatography (LC))[8], [9], [10], networking (in LOC’s) [8], stirring and mixing (in LOC’s, polymerase chain reaction (PCR), and chemical reactors) [11], [12], [13], micro-cooling (in microelectronics), and thermal cyclers [14], [15], [16]. However, the design of MHD prototypes is not an easy task. The design requires a precise flow control, which depends on several parameters, like microfluidics conductivity, microfluidics channel shape and size configuration, and the

7.4. Registro de derechos de autor

Gonzalez-Navarro, F.F., Valenzuela-Delgado, M., Bravo-Zanoguera, M.E., Flores-Fuentes, W., Hernandez-Balbuena, D., Lindner L., Ortiz-Perez, A.S., Rivas-López, M. Rodríguez-Quñonez, J. C., y Sergiyenko, O., (2019). Herramienta de Analisis y Suavizado de Perfiles de Velocidad 2D de Flujo Magnetohidrodinámico. Programa de computación. Registro Público del Derecho de Autor. Número de Registro: 03-2018-121112535200-01.

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: GONZALEZ NAVARRO FELIX FERNANDO
VALENZUELA DELGADO MONICA
BRAVO ZANOQUERA MIGUEL ENRIQUE
FLORES FUENTES WENDY
HERNANDEZ BALBUENA DANIEL
LINDNER LARS
ORTIZ PEREZ ALEJANDRO SEBASTIAN
RIVAS LOPEZ MOISES
RODRIGUEZ QUIÑONES JULIO CESAR
SERGIYENKO OLEG

TITULO: HERRAMIENTA DE ANALISIS Y SUAVIZADO DE PERFILES DE VELOCIDAD 2D DE FLUJO MAGNETOHIDRODINAMICO

RAMA: PROGRAMAS DE COMPUTACION

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ART. 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en lo establecido por el artículo 3° de la Ley Federal del Derecho de Autor, el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original solo de programa de cómputo.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 14 fracción I de la Ley Federal del Derecho de Autor, no es objeto de protección como derecho de autor: las ideas en sí mismas, las fórmulas, soluciones, conceptos, métodos, sistemas, principios, descubrimientos, procesos e invenciones de cualquier tipo.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2018-121112535200-01

03-2018-121112535200-01

Página 1 de 2

CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



INDAUTOR
Instituto Nacional del Derecho de Autor

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

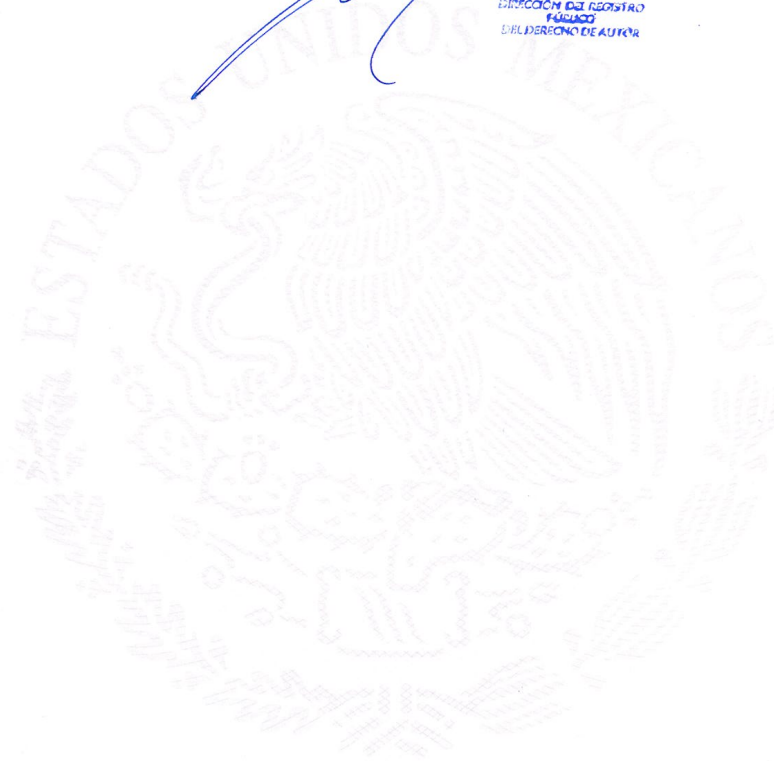
La presente firma ampara el registro número: 03-2018-121112535200-01

México D.F., a 7 de enero de 2019

SUBDIRECTOR DE REGISTRO DE OBRAS Y CONTRATOS

DANIEL RAMOS LOPEZ

SECRETARÍA DE CULTURA
INSTITUTO NACIONAL DEL
DERECHO DE AUTOR
DIRECCIÓN DEL REGISTRO
PÚBLICO
DEL DERECHO DE AUTOR



Página 2 de 2

REFERENCIAS

- Al-Habahbeh, O. M., Al-Saqqa, M., Safi, M., and Abo Khater, T. (2016). Review of magnetohydrodynamic pump applications.
- Avila, K., Moxey, D., de Lozar, A., Avila, M., Barkley, D., and Hof, B. (2011). The Onset of Turbulence in Pipe Flow. *Science*, 333(6039):192–196.
- Bau, H. H., Zhu, J., Qian, S., and Xiang, Y. (2003). A magneto-hydrodynamically controlled fluidic network. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 88(2):205–216.
- Ben-Yoav, H., Dykstra, P. H., Bentley, W. E., and Ghodssi, R. (2015). A controlled microfluidic electrochemical lab-on-a-chip for label-free diffusion-restricted DNA hybridization analysis. *Biosensors and Bioelectronics*, 64:579–585.
- Chaves, H., Eberle, A., and Hofemeier, P. (2010). Micro-PIV for high velocity flows. *15th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*.
- D., B. (2017). No Title.
- Das, C., Wang, G., and Payne, F. (2013). Some practical applications of magnetohydrodynamic pumping. *Sensors and Actuators A: Physical*, 201:43–48.
- Davidson, P. A. (2001). *An Introduction to Magnetohydrodynamics*. Cambridge University Press.
- Digilov, R. (2007). Making a fluid rotate: Circular flow of a weakly conducting fluid induced by a Lorentz body force. *American Journal of Physics - AMER J PHYS*, 75:361–367.

- Farzaneh-Gord, M., Joneidi, A. A., and Haghghi, B. (2010). Investigating the effects of the important parameters on magnetohydrodynamics flow and heat transfer over a stretching sheet. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 224(1):1–9.
- Flores-Fuentes, W., Valenzuela Delgado, M., Bravo-Zanoguera, M., Lopez, M., Sergiyenko, O., Lindner, L., Ortiz-Perez, A. S., Hernandez-Balbuena, D., and Rodríguez-Quiñonez, J. (2017). Mechanical systems and microfluidics: The application of a vision system in the testing of fluids behavior. In *Mechanical Systems: Research, Applications and Technology*, pages 73–100.
- Gleeson, J. P. (2005). Transient micromixing: Examples of laminar and chaotic stirring. *Physics of Fluids*, 17(10):100614.
- Hagsäter, S. M., Westergaard, C. H., Bruus, H., and Kutter, J. P. (2008). Investigations on LED illumination for micro-PIV including a novel front-lit configuration. *Experiments in Fluids*, 44(2):211–219.
- Hsiao, A., Gartia, M. R., Chang, T. W., Wang, X., Khumwan, P., and Liu, G. L. (2015). Colorimetric plasmon resonance microfluidics on nanohole array sensors. *Sensing and Bio-Sensing Research*.
- Inc., A. D. o. W. M. (2018). No Title.
- Jaesung Jang and Seung S. Lee (2000). Theoretical and experimental study of MHD (magnetohydrodynamic) micropump. *Sensors and Actuators A Physical*, 80:84–89.
- Jang, J. and Lee, S. S. (2000). Theoretical and experimental study of MHD (magnetohydrodynamic) micropump. *Sensors and Actuators A: Physical*, 80(1):84–89.
- Khoo, S. W., Karuppanan, S., and Tan, C. (2016). A Review of Surface Deformation and Strain Measurement Using Two-Dimensional Digital Image Correlation. *Metrology and Measurement Systems*, 23.

- Kokkinis, G., Cardoso, S., Keplinger, F., and Giouroudi, I. (2017). Microfluidic platform with integrated GMR sensors for quantification of cancer cells. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 241:438–445.
- Kumar, V., Paraschivoiu, M., and Nigam, K. D. P. (2011). Single-phase fluid flow and mixing in microchannels. *Chemical Engineering Science*, 66(7):1329–1373.
- Lemoff, A. V. and Lee, A. P. (2000). An AC magnetohydrodynamic micropump. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 63(3):178–185.
- Lin, Y., Gritsenko, D., Feng, S., Teh, Y. C., Lu, X., and Xu, J. (2016). Detection of heavy metal by paper-based microfluidics. *Biosensors and Bioelectronics*, 83:256–266.
- Mahabaleshwar, U. S., Nagaraju, K. R., Vinay kumar, P. N., Nadagoud, M. N., Bennacer, R., and Baleanu, D. (2020). An MHD viscous liquid stagnation point flow and heat transfer with thermal radiation and transpiration. *Thermal Science and Engineering Progress*, 16:100379.
- Mickiewicz, W. (2014). Systematic Error of Acoustic Particle Image Velocimetry and Its Correction. *Metrology and Measurement Systems*, (No 3):447–460.
- Mitra, S. K. . and Chakraborty, S. (2011). *Microfluidics and Nanofluidics Handbook. Chemistry, Physics and Life Science principles*. CRC Press, Boca Raton, USA., 1st. edition.
- Mühlich, P., Case, W., Hörmansperger, J., Beyrer, M., and Windhab, E. J. (2016). Particle Image Velocimetry (PIV) in food powders during Vacuum-Steam-Vacuum (VSV) treatment. *Powder Technology*, 299:1–8.
- Nijm, G. M., Swiryn, S., Larson, A. C., and Sahakian, A. V. (2008). Extraction of the magnetohydrodynamic blood flow potential from the surface electrocardiogram in magnetic resonance imaging. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 46(7):729–733.
- Ortiz-Pérez, A. S., García-Ángel, V., Acuña-Ramírez, A., Vargas-Osuna, L. E., Pérez-Barrera, J., and Cuevas, S. (2017). Magnetohydrodynamic flow with slippage in an annular duct for microfluidic applications. *Microfluidics and Nanofluidics*, 21(8):138.

- Patrick V. Farrell (1989). Optical correlator method and apparatus for particle image velocimetry processing.
- Pérez-Barrera, J., Ortiz, A., and Cuevas, S. (2016). Analysis of an Annular MHD Stirrer for Microfluidic Applications. In Klapp, J., Sigalotti, L. D. G., Medina, A., López, A., and Ruiz-Chavarría, G., editors, *Recent Advances in Fluid Dynamics with Environmental Applications*, pages 275–288, Cham. Springer International Publishing.
- Pérez-Barrera J., Ortiz A., C. S. (2016). *Recent Advances in Fluid Dynamics with Environmental Applications*. Cham, Germany.
- Przybyło, J., Kańtoch, E., Jabłoński, M., and Augustyniak, P. (2016). Distant Measurement of Plethysmographic Signal in Various Lighting Conditions Using Configurable Frame-Rate Camera. *Metrology and Measurement Systems*, 23.
- Qian, S. and Bau, H. H. (2009). Magneto-hydrodynamics based microfluidics. *Mechanics Research Communications*, 36(1):10–21.
- Qin, M. and Bau, H. (2012). MagnetoHydrodynamic Flow of a Binary Electrolyte in a Concentric Annulus. *Physics of Fluids*, 24.
- Raffel, M., Willert, C. E., Scarano, F., Kähler, C. J., Wereley, S. T., and Kompenhans, J. (2018). *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Experimental Fluid Mechanics. Springer International Publishing.
- Rashidi, S., Esfahani, J. A., and Maskaniyan, M. (2017). Applications of magnetohydrodynamics in biological systems-a review on the numerical studies. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 439:358–372.
- Rosen, Y. and Gurman, P. (2010). MEMS and microfluidics for diagnostics devices. *Current pharmaceutical biotechnology*, 11(4):366–375.

- Saez, J., Etxebarria, J., Antoñana-Diez, M., and Benito-Lopez, F. (2016). On-demand generation and removal of alginate biocompatible microvalves for flow control in microfluidics. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 234:1–7.
- Salcedo, M. R. and Font, R. (2011). Tema3. Medida de caudales. In de Alicante, U., editor, *Mecánica de fluidos*, chapter Tema3. Med, page 21. Mountain View, California.
- Serway, R. and Jewett, J. W. (2009). *Física para ciencias e ingenierías con Física Moderna*. Cengage Learning Editores,S.A. de C.V., Mexico, D.F., 7 edition.
- Shi, S., Wang, J., Ding, J., Zhao, Z., and New, T. (2016). Parametric study on light field volumetric particle image velocimetry. *Flow Measurement and Instrumentation*, 49:70–88.
- Shokri, R., Ghaemi, S., Nobes, D., and Sanders, R. (2017). Investigation of particle-laden turbulent pipe flow at high-Reynolds-number using particle image/tracking velocimetry (PIV/PTV). *International Journal of Multiphase Flow*, 89:136–149.
- Tahirbegi, I. B., Ehgartner, J., Sulzer, P., Zieger, S., Kasjanow, A., Paradiso, M., Strobl, M., Bouwes, D., and Mayr, T. (2017). Fast pesticide detection inside microfluidic device with integrated optical pH, oxygen sensors and algal fluorescence. *Biosensors and Bioelectronics*, 88:188–195.
- Tellez Alvarez, J. D., Gómez Valentín, M., Russo, B., and Redondo Apraiz, J. M. (2016). Surface Flow Image Velocimetry (SFIV) for hydraulics applications. *18th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics*.
- Thielicke, W. and Stamhuis, E. (2014). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2(1):e30. DOI: <http://doi.org/10.5334/jors.bl>.
- Valenzuela Delgado, M., Flores-Fuentes, W., Bravo-Zanoguera, M., Ortiz-Perez, A. S., Hernandez-Balbuena, D., Lopez, M., Sergiyenko, O., and González-Navarro, F. F. (2017).

Machine vision system to measuring the velocity field in a fluid by Particle Image Velocimetry: Special Case of Magnetohydrodynamics.

- West, J., Gleeson, J. P., Alderman, J., Collins, J. K., and Berney, H. (2003). Structuring laminar flows using annular magnetohydrodynamic actuation. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 96(1-2):190–199.
- West, J., Karamata, B., Lillis, B., Gleeson, J., Alderman, J., Collins, J., Lane, B., Mathewson, A., and Berney, H. (2002). Application of magnetohydrodynamic actuation to continuous flow chemistry. *Lab on a chip*, 2:224–230.
- Wilson, A. (2010). No Title. *Vision System Desing*, 15(10).
- Winkler, A., Brünig, R., Faust, C., Weser, R., and Schmidt, H. (2016). Towards efficient surface acoustic wave (SAW)-based microfluidic actuators.
- Yuan, F. and Isaac, K. (2017a). A study of MHD-based chaotic advection to enhance mixing in microfluidics using transient three dimensional CFD simulations. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 238:226–238.
- Yuan, F. and Isaac, K. (2017b). A study of MHD-based chaotic advection to enhance mixing in microfluidics using transient three dimensional CFD simulations. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 238:226–238.
- Yuan, F. and Kakkattukuzhy, M. I. (2015). A Study of MHD-Induced Mixing in Microfluidics Using CFD Simulations. *Micro and Nanosystems*, 6(3):178–192.
- Yuan, F. and M. Isaac, K. (2015). A Study of MHD-Induced Mixing in Microfluidics Using CFD Simulations. *Micro and Nanosystems*, 6(3):178–192.
- Zhang, G.-D. and Chen, C. (2020). Uniformly robust preconditioners for incompressible MHD system. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 379:112914.

Zhao, G., Jian, Y., Chang, L., and Buren, M. (2015). Magnetohydrodynamic flow of generalized Maxwell fluids in a rectangular micropump under an AC electric field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 387:111–117.